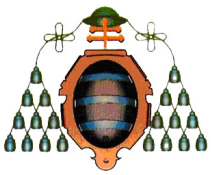


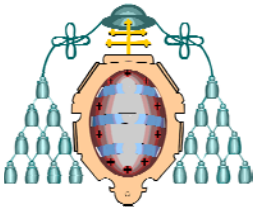
UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Departamento de Informática

Tesis doctoral

TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR PARA LA RECONSTRUCCIÓN EN TIEMPO REAL DE LA FORMA 3D DE PRODUCTOS LAMINADOS

Julio Molleda Meré

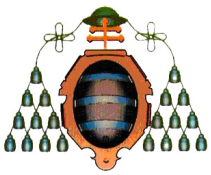
Gijón, julio de 2008



Reservados todos los derechos
© El autor

Edita: Universidad de Oviedo,
Biblioteca Universitaria, 2009
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 60

ISBN 978-84-692-8942-6
D.L.: AS.02294-2009



UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Departamento de Informática

Tesis doctoral

TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR PARA LA RECONSTRUCCIÓN EN TIEMPO REAL DE LA FORMA 3D DE PRODUCTOS LAMINADOS

presentada por

Julio Molleda Meré

para la obtención del grado de

Doctor por la Universidad de Oviedo

dirigida por **Daniel Fernando García Martínez**
y **Rubén Usamentiaga Fernández**

Gijón, julio de 2008

a Raquel,
su apoyo, esfuerzo y sacrificio
hacen posible mi superación profesional.

Agradecimientos

Agradezco a los directores de mi tesis su afán para que el trabajo realizado llegara a buen término. De forma individual, quiero expresar mi gratitud a Daniel García por la supervisión de mi trabajo en los últimos años; y a Rubén Usamentiaga por sus lecciones magistrales sobre procesamiento de imágenes, entre otras.

Agradezco, además, la ayuda y el apoyo prestados por el resto de compañeros del Área de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Oviedo.

Aunque, sin lugar a dudas, el agradecimiento más sentido es para mi familia, ya que su esfuerzo ha sido y es la base para mi trabajo.

Finalmente, debo reconocer la labor efectuada por Miguel Ángel Martínez en la revisión ortográfica de este documento.

Resumen

La visión por computador es una rama de la inteligencia artificial que desarrolla tanto la teoría como la tecnología necesarias para emular la percepción visual humana. Su principal objetivo es construir sistemas artificiales capaces de interpretar escenas naturales o datos multidimensionales. La reconstrucción de la forma tridimensional de objetos reales es un campo muy importante dentro de la visión por computador y es de aplicación, entre otras, en disciplinas tan dispares como la ingeniería inversa, la navegación automática o la inspección y el control automáticos de calidad.

En esta tesis se presenta la aplicación de técnicas de visión por computador en el análisis, diseño e implementación de un sistema para la reconstrucción tridimensional de la superficie de objetos con restricciones de tiempo real. El trabajo se centra en la inspección automática de la calidad de productos laminados en la industria del acero. La evaluación de la calidad de estos productos, denominados bandas de acero, requiere, además de otros análisis, la medición de su planitud. Esta medición se puede obtener a partir de una reconstrucción tridimensional de la forma de la banda.

La planitud es una característica que indica el grado de aproximación de la superficie de un objeto a una superficie totalmente plana. Un proceso de laminación incorrecto genera tensiones internas en el acero que se traducen en defectos de planitud en la banda laminada.

Hace algunos años la medición de la planitud se realizaba de forma manual por un operador de la instalación industrial. Para medir la planitud de una banda de forma manual se detiene su avance por la instalación y se mide la longitud de un intervalo concreto de su superficie así como la diferencia entre su punto más bajo y su punto más alto. En realidad, se miden la longitud y la amplitud de onda que forma la superficie de la banda. Esta tarea es extremadamente tediosa y consume un tiempo excesivo, por lo que sólo se puede obtener un conjunto reducido de medidas de cada producto. A partir de estas medidas se pueden inferir el tipo y la magnitud del defecto de planitud. La creciente demanda en la calidad de acabado de productos laminados y los exigentes requisitos de productividad actuales en la industria del acero hacen inviable la inspección de un producto de forma manual.

La medición de la planitud de una banda de forma automatizada se basa en la comparación de la longitud de varias fibras de su superficie. Si la banda es totalmente plana, todas las medidas de longitud serán iguales. En caso contrario,

las diferencias entre estas longitudes se observarán como defectos de planitud.

La automatización del proceso de medición de la planitud en entornos industriales es un campo de trabajo relativamente reciente. Según el principio de funcionamiento utilizado para obtener las medidas de longitud de la superficie de la banda, los sistemas de medición de planitud se pueden clasificar en mecánicos u ópticos.

En el trabajo realizado se presenta un estudio exhaustivo sobre el concepto de la planitud y su medición en productos laminados, así como una revisión de los sistemas industriales más relevantes de medición de planitud. Además, se describen las técnicas de visión por computador aplicables a la reconstrucción tridimensional de la superficie de productos laminados. También se presenta el diseño de un sistema de medición de planitud de bandas de acero basado en la técnica de triangulación óptica por láser.

Dada la enorme dificultad para generar datos sintéticos adecuados y la imposibilidad de repetición del proceso de producción industrial se han evaluado diversos algoritmos de compresión de vídeo en tiempo real con objeto de almacenar la información de entrada al sistema. A partir de esta evaluación se ha desarrollado una herramienta de grabación y reproducción de vídeo comprimido en tiempo real que permite realizar pruebas *off-line* con datos reales así como validar el diseño del sistema. Además, también permite generar una base de datos que representa el amplio rango de condiciones superficiales que puede presentar una banda de acero, así como de condiciones de iluminación en las que debe ser procesada.

Con el objetivo de extraer la proyección del patrón láser de la escena de forma robusta y precisa se analizan las técnicas existentes y se estudia su aplicabilidad en un entorno hostil. Las técnicas descritas en la literatura se centran principalmente en la precisión de la detección del láser, siendo poco robusta su utilización en un entorno industrial, por lo que se diseña un método que garantice la extracción del patrón láser en condiciones adversas. El método propuesto se divide en dos fases. En primer lugar se realiza un proceso de búsqueda del láser en reposo aplicando criterios de búsqueda local. En segundo lugar, basándose en la información obtenida en la fase anterior, se realiza un proceso de búsqueda global sobre la superficie de la banda. Esta segunda fase consiste en un proceso de ajuste de segmentos curvos basado en una técnica de división y unión de regiones.

La validación del sistema de medición de planitud se realiza indirectamente mediante la precisión lograda en el proceso de reconstrucción de la forma tridimensional de la banda. Los resultados relativos a la medición de planitud han sido obtenidos con datos reales procedentes de la industria del acero.

Abstract

Computer vision is a branch of artificial intelligence which develops both theory and technology required to emulate human visual perception. It aims to build artificial systems capable of perceiving and interpreting natural scenes or multi-dimensional data. Reconstruction of three-dimensional real objects is an important issue in many computer vision applications, such as reverse engineering, robot navigation or automatic quality inspection and control.

This thesis presents the application of computer vision techniques in the analysis, design and implementation of a 3D surface reconstruction system with real time constraints. It is focused on automatic quality inspection of rolled products in the steel industry. Quality evaluation of rolled products, so-called steel strips, requires apart from other analysis their flatness measurement. This measurement can be obtained by means of a three-dimensional reconstruction of the strip shape.

Flatness can be defined as the degree to which the surface of a flat product approaches a plane. Wrong rolling process generates internal strains in the steel which results in flatness defects in the rolled strip.

A few years ago, flatness measurement was carried out manually by human operators of the industrial installation. In order to manually measure the strip flatness, its advance on the installation is stopped, then the length of a specific surface interval and the difference between its shortest and highest level are measured. This measurement obtains the length and the extent of wave of the strip surface. This task is extremely tedious and time-consuming, therefore, only a small number of measurements for each strip can be obtained. From these measurements the type and magnitude of the flatness defects can be inferred. Growing demand in finished quality of rolled products and current demanding productivity requirements in the steel industry make manual inspection of any product not feasible.

Automatic flatness measurement of a steel strip is based on acquiring several length measurements of its surface and comparing them. If the strip is flat, all length measurements will be equals. Otherwise, differences between these length values will be observed as flatness defects.

Automation of flatness measurement process in industrial environments is a recent topic. There are two flatness measurement system types according to their basis principle: mechanical and optical systems.

The reported work presents an overview about flatness and its measurement

over rolled products, as well as a review of the more significant flatness measurement industrial systems. Moreover, computer vision techniques applicable to 3D surface reconstruction are described. Also, the design of a flatness measurement system of steel strips based on laser triangulation technique is presented.

Due to the great difficulty of generating appropriate synthetic data and the impossibility of repeating the industrial production process, several real time image compression algorithms have been evaluated and a real time grabbing service has been developed. The service allows building a data base which represents the wide range of surface conditions of a steel strip as well as the illumination conditions in its processing stage.

Existing techniques are mainly focused on the accuracy of laser detection and they are not robust, so their application on industrial environments is not possible. In this thesis an accurate and robust method to extract the laser profile on adverse conditions is proposed. The proposed method is divided in two phases. Firstly, a local search process of the laser out of the strip surface is carried out. Then, based on the knowledge obtained from previous phase, a global search of the laser on the strip surface is carried out. This second phase consists of an adjustment of curve segments based on a split and merge technique.

Flatness measurement system validation is carried out indirectly by means of the accuracy obtained in the reconstruction process of the three-dimensional shape of the strips. Results presented on this thesis have been obtained form real data from the steel industry.

Índice general

Índice de figuras xv

Índice de tablas xix

1. Introducción 5
- 1.1. Motivación . . . 5
- 1.2. Objetivos . . . 7
- 1.3. Organización de la tesis . . . 8

2. La planitud y su medición 11
- 2.1. Concepto de planitud . . . 11
- 2.2. Productos planos de acero . . . 12
- 2.3. La planitud en bandas de acero . . . 13
  - 2.3.1. Defectos de planitud en bandas de acero . . . 17
  - 2.3.2. Causas de los defectos de planitud en bandas de acero . . . 19
- 2.4. Medición de la planitud . . . 20
  - 2.4.1. Aproximaciones por elongación y por altura de onda . . . 20
  - 2.4.2. Elongación de las fibras de una banda de acero . . . 22
  - 2.4.3. Métrica *I-Units* . . . 24
  - 2.4.4. Tipos de índices de defectos de planitud . . . 28
  - 2.4.5. Integración de índices de planitud . . . 29
  - 2.4.6. Muestreo de las fibras de una banda de acero . . . 33
  - 2.4.7. Extracción de conocimiento de mediciones de planitud . . . 34
  - 2.4.8. Visualización de mediciones de planitud . . . 35
- 2.5. Sistemas de medición de planitud . . . 36
  - 2.5.1. Introducción a los sistemas de medición de planitud . . . 36
  - 2.5.2. Sistemas industriales de medición de planitud . . . 39

3. Visión por computador en la reconstrucción 3D 47
- 3.1. Conceptos generales . . . 47
  - 3.1.1. Sistemas de visión por computador . . . 47
  - 3.1.2. Representación de imágenes digitales . . . 48
  - 3.1.3. Etapas en un proceso de visión artificial . . . 49
  - 3.1.4. Técnicas de visión por computador . . . 51

3.2. Técnicas ópticas 53
3.2.1. Técnicas pasivas 53
3.2.2. Técnicas activas 56
3.3. Limitaciones de las técnicas ópticas 59
3.4. Componentes de un sistema de visión por computador 61
3.4.1. Fuente de iluminación 62
3.4.2. Cámara 62
3.4.3. Óptica 63
3.4.4. Filtro 64
3.4.5. Tarjeta capturadora 65
3.5. Modelos matemáticos y distorsión de una óptica 66
3.5.1. Modelo *pinhole* 66
3.5.2. Modelo de lente delgada 67
3.5.3. Modelo de lente gruesa 68
3.5.4. Distorsión óptica 68
3.6. Formación de la imagen. Geometría 70
3.6.1. Coordenadas homogéneas 70
3.6.2. Transformaciones elementales 71
3.6.3. Proyección perspectiva 72
3.7. Modelos matemáticos de una cámara 75
3.7.1. Modelos lineales 75
3.7.2. Modelos no lineales 76
3.8. Calibración de un sistema de visión por computador 78
3.8.1. Clasificación de las técnicas de calibración 79
3.8.2. Métodos de calibración 80
3.8.3. Comparación de métodos de calibración 83

4. Análisis y diseño de un sistema de medición de planitud basado en triangulación óptica por láser 85
4.1. Entorno industrial de funcionamiento 85
4.1.1. Restricciones físicas 88
4.1.2. Restricciones mecánicas 88
4.1.3. Condiciones de iluminación 88
4.1.4. Condiciones ambientales 89
4.1.5. Características físicas y estado del material 89
4.1.6. Secuencia de procesamiento de una bobina 90
4.2. Análisis y diseño de la arquitectura física 91
4.2.1. Subsistema de visión por computador 92
4.2.2. Subsistema de comunicación con dispositivos de planta . . 100
4.2.3. Subsistema de comunicación con equipos de red 102
4.3. Diseño de la geometría del subsistema de visión 103
4.3.1. Ubicación del emisor de luz láser 105

4.3.2. Ubicación de la cámara 106
4.3.3. Incidencia del área de interés en el sensor de la cámara . . 110
4.3.4. Procedimiento de diseño 114
4.4. Análisis de la arquitectura lógica 115
4.4.1. Descripción del sistema 115
4.4.2. Entidades participantes 117
4.4.3. Catálogo de requisitos 117
4.4.4. Alternativas de implementación 119
4.4.5. Modelo lógico 121
4.4.6. Modelo estructural simplificado 122
4.4.7. Modelo del comportamiento simplificado 124
4.5. Diseño de la arquitectura lógica 125
4.5.1. División del sistema en tareas 126
4.5.2. Patrones de diseño 132
4.5.3. Modelo estructural y modelo del comportamiento 133

5. Integración de mecanismos de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real en sistemas de visión por computador 145
5.1. Registro de las condiciones de procesamiento 145
5.2. Imágenes adquiridas por el sistema 147
5.3. Contenedores multimedia 149
5.3.1. *Audio Video Interleave* 150
5.3.2. *Advanced Streaming/Systems Format* 152
5.3.3. *QuickTime* 152
5.3.4. *Moving Picture Experts Group* 153
5.3.5. OGG/OGM 153
5.3.6. Matroska 153
5.4. Algoritmos de compresión y descompresión: *codecs* 154
5.4.1. LEAD MCMP/MJPEG 155
5.4.2. ZLIB 155
5.4.3. MSZH 155
5.4.4. PICVideo 156
5.5. Selección del contenedor y del *codec* adecuados 156
5.5.1. Evaluación del rendimiento de *codecs* 157
5.5.2. Integración del *codec* en el sistema 165

6. Extracción de la línea láser 171
6.1. La línea láser 171
6.2. Trabajo previo 174
6.2.1. Métodos de detección del láser 174
6.2.2. Métodos de enlazado del láser 175
6.3. Método propuesto 177

6.3.1. Detección con columnas independientes 177
6.3.2. Detección del láser sobre el fondo 183
6.3.3. Región de búsqueda del láser sobre la banda 193
6.3.4. Extracción del láser sobre la banda 203
6.4. Pruebas 221

7. Validación de la medición 227
7.1. Sistema industrial de reconstrucción 3D 227
7.2. Validación de la medición de altura 229
7.2.1. Incertidumbre de las probetas de validación 229
7.2.2. Procedimiento de validación de la medición de alturas . . 230
7.3. Validación de la medición de velocidad 235
7.4. Información proporcionada al usuario final 237

8. Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro 241
8.1. Objetivos alcanzados y aportaciones 241
8.2. Difusión de las aportaciones 244
8.3. Trabajo futuro 245

A. Consistencia de índices de defectos de planitud 249
A.1. Índices de flexión en función de índices de alargamiento 249
A.2. Índices de nivelación en función de índices de alargamiento . . . 251
A.3. Índices de alargamiento en función de índices de flexión y de nivelación 252

B. Calibración de la cámara de un sistema de visión por computador para la reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser 253
B.1. Procedimiento de calibración 253
B.2. Calibración de los parámetros intrínsecos 254
B.2.1. Plantilla de calibración 254
B.2.2. Errores en la plantilla de calibración 254
B.2.3. Procedimiento de calibración 255
B.3. Calibración de los parámetros extrínsecos 260
B.3.1. Plantilla de calibración 260
B.3.2. Errores en la plantilla de calibración 261
B.3.3. Homografía entre dos planos 261
B.3.4. Procedimiento de calibración 261

C. Calibración del sensor de velocidad de un sistema para la reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser 267
C.1. Procedimiento de calibración 267

D. Clasificación de dispositivos láser 271

Bibliografía **273**

Índice de figuras

2.1. Esquema de un tren de laminación 13
2.2. Descomposición en fibras de una banda de acero. 15
2.3. Rodillos de laminación en un escenario ideal 16
2.4. Banda de acero con ondulaciones y sin defectos de planitud . . . 17
2.5. Defecto de planitud nivelado defectuoso (*bad leveling*) 18
2.6. Defecto de planitud bordes ondulados (*wavy edges*) 18
2.7. Defecto de planitud bucle central (*center buckle*) 18
2.8. Forma de una fibra de una banda de acero 21
2.9. Perfil real y muestreado de una fibra de una banda de acero . . . 23
2.10. Perfil de planitud de una banda sin defectos de planitud 26
2.11. Perfil de planitud de una banda con nivelado defectuoso 26
2.12. Perfil de planitud de una banda con bordes ondulados 27
2.13. Perfil de planitud de una banda con bucle central 27
2.14. Perfil de planitud único para representar la planitud 30
2.15. Múltiples perfiles de planitud para representar la planitud 30
2.16. Índice de planitud e intervalo de integración 32
2.17. Índice de planitud y frecuencia de muestreo 34

3.1. Etapas de un proceso de visión por computador 50
3.2. Clasificación de técnicas de adquisición de información 3D 51
3.3. Clasificación de técnicas ópticas 54
3.4. Relación de triángulos semejantes en la técnica de triangulación . 57
3.5. Modelo *pinhole* 66
3.6. Modelo de lente delgada 67
3.7. Modelo de lente gruesa 68
3.8. Formación de la imagen mediante proyección perspectiva 73
3.9. Geometría, proyección perspectiva y distorsión radial 76

4.1. Línea de producción en la que se instala el sistema 87
4.2. División en subsistemas del sistema de medición de planitud . . . 92
4.3. Captura del láser sobre la superficie de una banda de acero . . . 94
4.4. Campo de visión de la cámara y área de interés de la escena . . . 96
4.5. Subsistema de comunicación con dispositivos de planta 101
4.6. Arquitectura física y componentes *hardware* del sistema 103

4.7. Sistema de medición de planitud en la línea de producción 104
4.8. Ubicación del láser del subsistema de visión por computador . . . 105
4.9. Cálculo de la altura para la ubicación del láser 106
4.10. Ubicación de la cámara con respecto al área de interés 108
4.11. Ángulo de apertura horizontal mínimo de la óptica 108
4.12. Distancia focal máxima de la óptica 109
4.13. Geometría del subsistema de visión por computador 110
4.14. Ángulo de apertura vertical de la óptica de la cámara 111
4.15. Incidencia horizontal del área de interés en el sensor 112
4.16. Incidencia vertical del área de interés en el sensor 113
4.17. Área del sensor en la que incide el área de interés de la escena . . 113
4.18. Diagrama de casos de uso del sistema 121
4.19. Diagrama de clases simplificado del sistema 123
4.20. Diagrama de secuencia simplificado del sistema 125
4.21. Secuencia de activaciones tareas adquisición y evaluación 128
4.22. Cronograma de ejecución de tareas adquisición y evaluación . . . 129
4.23. Relaciones entre clases del *pipeline* de adquisición 134
4.24. Relaciones entre clases del *pipeline* de procesamiento 136
4.25. Secuencia de adquisición y procesamiento de imágenes 138
4.26. Comunicación con el ordenador de proceso de la instalación . . . 139
4.27. Diagrama de clases del servidor del sistema 140
4.28. Relaciones entre clases de generación, conversión y envío 140
4.29. Relaciones entre clases de grabación y reproducción de vídeo . . 141
4.30. Relaciones entre clases de la interfaz gráfica de usuario 142
4.31. Diagrama de clases fundamentales del sistema 144

5.1. Fotografía de la proyección de la línea láser en reposo 148
5.2. Imagen de la proyección de la línea láser en reposo 148
5.3. Escala de colores de luminancia 149
5.4. Proyección de la línea láser sobre una banda 150
5.5. Imagen de la proyección de la línea láser sobre una banda 151
5.6. Factores en los experimentos de evaluación de los *codecs* 158
5.7. Tiempo de procesamiento y uso de recursos sin compresión . . . 160
5.8. Tiempo de procesamiento y uso de recursos del *codec* LEAD . . . 161
5.9. Tiempo de procesamiento y uso de recursos del *codec* ZLIB HS . 163
5.10. Tiempo de procesamiento y uso de recursos del *codec* ZLIB HC . 164
5.11. Tiempo de procesamiento y uso de recursos del *codec* MSZH . . . 165
5.12. Tiempo de procesamiento y uso de recursos del *codec* PICVideo . 166
5.13. Medición de planitud desde la cámara 167
5.14. Medición de planitud y grabación de vídeo desde la cámara . . . 168
5.15. Medición de planitud desde un contenedor 169
5.16. Medición de planitud y grabación de vídeo desde un contenedor . 169

6.1. Problemáticas en la detección de la línea láser 173
6.2. Problema de umbralizado de una columna de la imagen 178
6.3. Umbralizado por el método de Ridler con iluminación alta 179
6.4. Umbralizado por el método de Ridler con iluminación baja . . . 179
6.5. Umbralizado por el método de Ridler con iluminación variable . 180
6.6. Detección del láser con métodos basados en el máximo 181
6.7. Propuesta para la detección del láser en cada columna 183
6.8. Detección del láser con el método propuesto 184
6.9. Detección del láser sobre el fondo 186
6.10. Resultados de la detección del láser sobre el fondo (i) 187
6.11. Caracterización de la línea láser sobre el fondo 188
6.12. Intervalo de la línea láser sobre el fondo 189
6.13. Resultados de la detección del láser sobre el fondo (ii) 190
6.14. Intensidad luminosa del fondo de una imagen 191
6.15. Media móvil de la intensidad luminosa del fondo 192
6.16. Resultados de la detección del láser sobre el fondo (iii) 193
6.17. Proyección de la línea láser sobre la banda 194
6.18. Cálculo de la posible región de ubicación del foco láser 196
6.19. Posible región de ubicación del foco láser 197
6.20. Detección de la posición del foco láser en el vídeo 1 200
6.21. Detección de la posición del foco láser en el vídeo 2 200
6.22. Detección de la posición del foco láser en el vídeo 3 201
6.23. Detección de la posición del foco láser en el vídeo 4 201
6.24. Región de búsqueda de la línea láser sobre la banda 202
6.25. Detección de la línea láser en la región de búsqueda 204
6.26. Ajuste de la función seno mediante segmentos lineales 206
6.27. Ajuste de la función seno mediante segmentos cuadráticos 207
6.28. Ajuste de la función seno mediante *splines akima* 208
6.29. Ajuste de la función seno con dos espurios utilizando segmentos . 209
6.30. Ajuste del láser con ruido mediante segmentos lineales (i) 210
6.31. Ajuste del láser con ruido mediante segmentos lineales (ii) 211
6.32. Ajuste del láser con ruido mediante segmentos cuadráticos 212
6.33. Ajuste del láser con ruido mediante *splines akima* 213
6.34. Ajuste de la línea láser utilizando segmentos lineales 214
6.35. Ajuste de la línea láser utilizando segmentos cuadráticos 215
6.36. Ajuste de la línea láser utilizando *splines akima* 216
6.37. Comparación entre los métodos de ajuste de la línea láser 218
6.38. Ajuste mediante *splines akima* tras el proceso de unión 220
6.39. Ajuste de una línea láser con ruido artificial extremo 221
6.40. Comparación de dos estrategias para el proceso de unión 222
6.41. Mapa de alturas calculado para un vídeo de ejemplo (i) 224
6.42. Tiempo de extracción de la línea láser (i) 225

6.43. Tiempo de extracción de la línea láser (ii) 225
6.44. Mapa de alturas calculado para un vídeo de ejemplo (ii) 226
6.45. Tiempo de extracción de la línea láser (iii) 226

7.1. Sistema de medición en la instalación industrial 228
7.2. Referencia para la validación de alturas absolutas 230
7.3. Medición de la altura de una probeta de validación 231
7.4. Mapa de alturas de una probeta de calibración 232
7.5. Alturas de una probeta de calibración 232
7.6. Ejemplo de experimento de validación de alturas 233
7.7. Resultados de la medición de alturas 236
7.8. Mapa de planitud generado por el sistema (i) 238
7.9. Mapa de planitud generado por el sistema (ii) 238

B.1. Plantilla para la calibración de los parámetros intrínsecos 254
B.2. Imágenes para la calibración de los parámetros intrínsecos 256
B.3. Extracción de los puntos de control en la calibración intrínseca . 257
B.4. Componentes radial y tangencial del modelo de distorsión 258
B.5. Modelo de distorsión completo de la óptica 259
B.6. Error de reproyección de la calibración intrínseca 259
B.7. Plantilla para la calibración de parámetros extrínsecos 260
B.8. Imágenes para la calibración de los parámetros intrínsecos 264
B.9. Extracción de los puntos de control en la calibración extrínseca . 265
B.10. Reproyección de la plantilla de calibración extrínseca 266

C.1. Ajuste lineal del comportamiento del sensor de velocidad 269

Índice de tablas

2.1. Comparativa de sistemas de medición de planitud 45

4.1. Especificaciones ópticas del dispositivo láser seleccionado 95
4.2. Especificaciones ópticas y técnicas de la cámara selecionada . . . 98
4.3. Especificaciones de la óptica seleccionada 98
4.4. Especificaciones de la tarjeta capturadora seleccionada 100
4.5. Especificaciones de la tarjeta de adquisición seleccionada 102

5.1. Características de la plataforma de experimentación 159
5.2. Evaluación del rendimiento de *codecs* 167
5.3. Pruebas de integración del *codec* en el sistema 170

6.1. Resultados de la detección de la posición del foco láser 198
6.2. Parámetros utilizados en las pruebas 223

7.1. Dimensiones de las probetas de validación de alturas 229
7.2. Resultados de la medición de alturas absolutas 234

B.1. Resultados de la calibración de los parámetros intrínsecos 255
B.2. Error de reproyección de la calibración extrínseca 263

C.1. Resultados de la calibración del sensor de velocidad 269

Acrónimos

2D	Dos dimensiones, bidimensional.
3D	Tres dimensiones, tridimensional.
API	*Application Programming Interface* (interfaz de programación de aplicaciones).
AVI	*Audio Video Interleave* (intercalado de audio y vídeo).
ASF	*Advanced Streaming/Systems Format* (formato de flujo o de sistemas avanzado).
CCD	*Charge-Coplued Device* (dispositivo de cargas [eléctricas] interconectadas).
CCIR	*Comité Consultatif International des Radiocommunications* (comité consultivo internacional de radiocomunicaciones).
CMOS	*Complementary Metal Oxide Semiconductor* (semiconductor complementario de óxido metálico).
DAQ	*Data AcQuisition* (adquisición de datos).
DMA	*Direct Memory Access* (acceso directo a memoria).
FFT	*Fast Fourier Transformation* (transformada rápida de Fourier).
FPS	*frames per second* (fotogramas o imágenes por segundo).
FTP	*File Transfer Protocol* (protocolo de transferencia de ficheros).
IEC	*International Electrotechnical Commission* (Comisión Electrotécnica Internacional).
IPC	*Inter-Process Communication* (comunicación entre procesos).
ISO	*International Organization for Standardization* (Organización Internacional para la Estandarización).
JPEG	*Joint Photographic Experts Group* (grupo de expertos de fotografía).
LAN	*Local Area Network* (red de área local).

LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (amplificación de luz mediante emisión inducida de radiación).

LED *Light-Emitting Diode* (diodo emisor de luz).

LMS *Laser Measurement Sensor* (sensor de medición láser).

LUT *LookUp Table* (tabla de búsqueda o tabla de asociación).

LVDS *Low-Voltage Differential Signaling* (señal diferencial de bajo voltaje).

MIDI *Musical Instrument Digital Interface* (interfaz digital de instumentos digitales).

MIL *Matrox Imaging Library* (librería de imagen de Matrox).

MJPEG *Motion Joint Photographic Experts Group* (grupo de expertos de fotografía en movimiento).

MPEG *Moving Picture Experts Group* (grupo de expertos de imágenes en movimiento).

NIC *Network Interface Controller* (controlador de la interfaz de red, tarjeta de red o adaptador de red).

NTSC *National Television System Committee* (comisión nacional de sistemas de televisión).

PAL *Phase Alternating Line* (línea alternada en fase).

PCI *Peripheral Component Interconnect* (interconexión de componentes periféricos).

RGB *Red, Green and Blue* (modelo de color rojo, verde y azul).

RIFF *Resource Interchange File Format* (formato de fichero para intercambio de recursos).

RTOS *Real Time Operating System* (sistema operativo de tiempo real).

SDRAM *Synchronous Dynamic Random Access Memory* (memoria síncrona y dinámica de acceso aleatorio).

SFM *Shape From Motion* (forma a partir del movimiento).

SFS *Shape From Shading* (forma a partir de la sombra).

SFT *Shape From Texture* (forma a partir de la textura).

TCP/IP *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (protocolo de control de transmisión y protocolo de internet).

UML *Unified Modeling Language* (lenguaje unificado de modelado).

VCS *Video Capture System* (sistema de captura de vídeo).

VBR *Variable Bit Rate* (tasa de bits variable).

VFR *Variable Frame Rate* (tasa de imágenes variable).

Capítulo 1

Introducción

La creciente demanda en la calidad de acabado de productos laminados hace que su planitud sea una característica de vital importancia. La medición y el control de la planitud en entornos industriales han evolucionado enormemente durante la década pasada y se han convertido en un estándar en los procesos de laminación. Además, en los últimos años se han desarrollado sistemas de inspección automáticos para la gran mayoría de procesos en industrias con planes de producción muy exigentes.

1.1. Motivación

El grupo de investigación sobre procesamiento de imágenes del área de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Oviedo cuenta con una dilatada experiencia en investigación en sistemas de adquisición y procesamiento de imágenes en tiempo real, especialmente en aquellos sistemas que son de aplicación en procesos de fabricación y acabado de productos laminados. La determinación de la forma y dimensiones de objetos, el análisis termográfico de productos largos y la inspección de planitud de materiales son algunos ejemplos de sistemas desarrollados por el citado grupo.

En el caso de la medición de la forma y las dimensiones de productos laminados este grupo de investigación ha participado, durante los años 1998 y 1999, en el proyecto MEDITAS,[1] *Metrología Dimensional de Chapas en Tiempo Real*, en colaboración con Aceralia Corporación Siderúrgica S.A. y financiado por ésta. El desarrollo de un sistema de medición así como los resultados de su instalación en una planta de laminación de acero están recogidos en [García *et al.*, 2001*a*].

Recientemente se han desarrollado trabajos en los que el procesamiento de imágenes se realiza sobre un tipo particular de imágenes. En [Usamentiaga, 2005] se presenta el análisis y el diseño del conjunto de capas que constituyen la arquitectura completa de un sistema de procesamiento de imágenes termográficas en tiempo real. Resultados parciales de este trabajo se presentan en las siguientes

[1] Referencia: CN-98-230-B1.

publicaciones en revistas de carácter internacional: [Usamentiaga *et al.*, 2005] y [Usamentiaga *et al.*, 2006*c*].

Los inicios del trabajo de investigación sobre medición de planitud se remontan quince años atrás con el desarrollo, entre los años 1992 y 1994, del proyecto SOCAL,[2] *Sistema de Control de Calidad On-line para Productos Planos Laminados*, en colaboración con Aceralia Corporación Siderúrgica S.A. y financiado por la Fundación para el Fomento en Asturias de la Investigación Científica Aplicada y la Tecnología (FICYT). En este proyecto se desarrolló un prototipo de laboratorio capaz de medir la planitud de bandas de acero a partir de la observación de tres fibras de sus superficies, utilizando tres puntos láser[3] proyectados sobre la banda y apoyándose en el principio de triangulación.

El trabajo realizado sentó las bases para el desarrollo, entre los años 1993 y 1997, del proyecto PLANITEC,[4] *Inspección de Planitud en las Bandas Fabricadas en un Tren de Laminación en Caliente Mediante Visión Artificial*, en colaboración con Aceralia Corporación Siderúrgica S.A. y financiado por el Ministerio de Industria, Comercio y Transporte (MICyT), el Instituto Nacional de Industria (INI) y el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). En este proyecto se desarrolló un sistema para una instalación industrial capaz de medir la planitud de bandas de acero a partir de la observación de cinco fibras de su superficie, teniendo en cuenta el movimiento lateral de las bandas en su desplazamiento por el tren.

Estos trabajos se recogen en las siguientes publicaciones en revistas de carácter internacional: [García *et al.*, 1999] y [García *et al.*, 2002]. Los resultados satisfactorios obtenidos en el desarrollo de este proyecto abrieron las puertas al desarrollo de nuevos proyectos de investigación subvencionados, con la medición de la planitud de productos laminados como eje central de los mismos.

En este sentido, entre los años 2002 y 2005, se desarrolla, en colaboración con el Grupo Siderúrgico Arcelor, el proyecto CEFLA,[5] *Development of New Control Strategies for Enhancement Use of Automatic Flatness in Cold Rolling*, financiado por la Unión Europea. En este proyecto se evalúa la integración de la información proporcionada por la temperatura en el bucle de control de planitud de un tren de laminación en frío. Los resultados de este trabajo se presentan en [Usamentiaga *et al.*, 2006*a*].

Actualmente, se está desarrollando el proyecto GlobalShapeControl,[6] *Flatness Setup in Hot Strip Mills Tailored to the Demands of Next Step Processes and Final Customers*, en el que se enmarca la realización de esta tesis, con un período de duración de julio de 2004 a diciembre de 2007. En este proyecto se

[2] Referencia: PA-TP91-04.
[3] Ver lista de acrónimos en pág. 1.
[4] Referencia: CN-93-080-225-D2.
[5] Referencia: CN-CECA-02-7210PR337.
[6] Referencia: RFS-CR-04016.

desarrolla un sistema de medición de planitud, basado también en el principio de triangulación, que proyecta una línea láser sobre la superficie de los materiales a medir. La descripción del prototipo de laboratorio de este sistema se recoge en [López, 2004].

Esta experiencia en investigación en sistemas de adquisición y procesamiento de imágenes en tiempo real, unida al hecho de que la medición de planitud en la industria es un problema de difícil solución, motivan el desarrollo de esta tesis.

1.2. Objetivos

El propósito general de esta tesis es doble. Por un lado, se pretende investigar sobre el concepto de planitud y su medición en productos laminados. Y, por otro lado, se persigue analizar el rendimiento de un prototipo de medición de planitud basado en la técnica de triangulación óptica con objeto de optimizar su funcionamiento en instalaciones industriales reales.

Este propósito general se complementa con los siguientes objetivos:

- Analizar y evaluar de forma precisa el estado del arte en cuanto a técnicas y sistemas de medición de planitud de productos laminados, haciendo especial hincapié en las técnicas ópticas y los sistemas que las aplican.

- Dada la elevada complejidad de un prototipo de medición de planitud, y las dificultades inherentes con las que se encuentra en una instalación industrial real, se debe determinar qué factores de la instalación limitan el funcionamiento del prototipo.

- Determinar qué factores, relativos al diseño del prototipo y a sus parámetros de configuración, limitan la precisión o afectan a la incertidumbre del mismo en una instalación industrial real.

- Analizar métodos alternativos de procesamiento de las imágenes obtenidas por el subsistema de visión por computador de un sistema de medición de planitud que posibiliten una inspección robusta, precisa y aplicable en tiempo real.

- Para conseguir los objetivos anteriores se debe especificar, diseñar e implementar un sistema de almacenamiento de las imágenes capturadas por el prototipo de medición de planitud que permita replicar experimentos en laboratorio a partir de los productos laminados observados en una instalación industrial real, reproduciendo las mismas condiciones ambientales y de iluminación.

1.3. Organización de la tesis

La documentación de esta tesis está organizada de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se presenta una visión general del concepto de la planitud de productos laminados y se describe el proceso que se ha de seguir para su medición. También se describen las principales métricas de planitud utilizadas en la industria del acero, haciendo especial hincapié en la métrica *I-Units*. Finalmente, se sintetiza el funcionamiento de un sistema de medición de planitud, se especifican los requisitos que ha de satisfacer y se presentan los sistemas industriales más relevantes que se utilizan en la actualidad.

En el capítulo 3 se introducen los sistemas y las técnicas de visión por computador que permiten obtener información tridimensional a partir de imágenes bidimensionales adquiridas de una escena, prestando especial atención a las técnicas ópticas activas. Tras enumerar los elementos que componen un sistema de visión por computador se estudia el proceso de formación de la imagen y se analizan los modelos matemáticos utilizados para describir el comportamiento físico y óptico de la cámara de un sistema de visión. Además, se presenta una clasificación de las diferentes técnicas de calibración de la cámara de un sistema de visión por computador y se describen los principales métodos de calibración propuestos por la literatura así como un resumen comparativo de los mismos.

En el capítulo 4 se analiza el entorno de funcionamiento de una línea de producción de bandas de acero, determinando los factores que pudieran limitar el funcionamiento de un prototipo industrial de reconstrucción tridimensional. Se presentan el análisis y el diseño de un sistema de reconstrucción 3D de la forma de productos laminados cuyo objetivo final es obtener la planitud de dichos productos. Este sistema se basa en la técnica de la triangulación y utiliza un dispositivo emisor láser como fuente de luz activa.

Los procesos que se presentan en este capítulo son totalmente generalizables para cualquier instalación o línea industrial que procese productos laminados, aunque en esta tesis están adaptados para la realización del análisis y el diseño de un sistema de medición de planitud en una línea de producción industrial específica.

En el capítulo 5 se analizan las principales dificultades existentes en los procesos de validación de un sistema de inspección industrial antes de su instalación en el entorno de funcionamiento definitivo. Para superar estas dificultades en el proceso de validación de un sistema de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados basado en técnicas de visión por computador se diseña un componente *software* capaz de registrar los datos de entrada al sistema para reproducir fielmente las condiciones de procesamiento en un laboratorio sobre un prototipo del sistema. El objetivo de este componente es almacenar la secuencia

de imágenes generadas por la cámara del sistema, así como información necesaria para su procesamiento, en un contenedor multimedia. Para ello se analizan los contenedores multimedia más relevantes existentes actualmente y se selecciona el más adecuado para esta tarea. Además, se realiza un diseño experimental para evaluar el rendimiento de algoritmos de compresión de secuencias de imágenes para seleccionar el más adecuado de acuerdo al tipo de imágenes generadas por el sistema.

En el capítulo 6 se presenta un método robusto y eficiente para la extracción de una línea láser de las imágenes generadas por un sistema de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados basado en técnicas de visión por computador. El método propuesto es robusto ya que no se ve afectado por las condiciones de iluminación hostiles inherentes a un entorno industrial. Además es eficiente dado que todas las operaciones que realiza han sido optimizadas para permitir cumplir las restricciones de tiempo real al sistema en el cual se integra. En este capítulo también se definen las condiciones particulares para la detección del láser en un entorno industrial y se revisan los métodos propuestos en la literatura, analizando la idoneidad de cada uno de ellos para la resolución de este problema.

En el capítulo 7 se presenta el diseño de un conjunto de experimentos orientados a validar el proceso de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados así como los resultados obtenidos en la realización de este conjunto de experimentos.

En el último capítulo se recogen las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado durante el desarrollo del presente trabajo, se resumen las principales aportaciones y se indican las líneas de trabajo futuras que se derivan de la realización de esta tesis.

Capítulo 2

La planitud y su medición

En este capítulo se proporciona, en primer lugar, una visión general del concepto de planitud para, posteriormente, estudiar qué se conoce por productos laminados de acero, así como describir, de forma breve, su proceso de fabricación. Tras esta parte introductoria se profundiza en el concepto de la planitud referido a bandas de acero, haciendo especial hincapié en los defectos de planitud que pueden presentar y especificando las causas que los generan. Una vez definidos los defectos de planitud que puede presentar una banda de acero se describe el proceso que se ha de seguir para su medición. Este proceso puede utilizar dos aproximaciones diferentes, aproximación por elongación y aproximación por altura de onda, obteniendo una métrica de planitud para cada una de ellas. Aunque se puede utilizar cualquiera de estas métricas, e incluso se pueden definir algunas nuevas basadas en las dos aproximaciones mencionadas, la más extendida en el entorno industrial es la métrica *I-Units*. Dada su utilización mayoritaria se describe exhaustivamente esta métrica, así como los métodos con que se puede extraer conocimiento de la misma y la forma en que puede ser visualizada por operadores humanos en instalaciones industriales. Finalmente, se introducen los principios de funcionamiento y se especifican los requisitos que han de satisfacer los sistemas de medición de planitud industriales, además de describir, someramente, los sistemas más relevantes que se utilizan en la actualidad.

2.1. Concepto de planitud

La planitud es una característica que indica el grado de aproximación de la superficie de un objeto a una superficie totalmente plana. Esta característica se expresa, para productos laminados, de acuerdo a estándares medidos cuando los productos están en reposo sobre una superficie plana, denominada superficie de referencia. Por tanto, para indicar el grado de planitud del producto a inspeccionar, se mide la desviación de su superficie con respecto a la citada superficie de referencia. Si el producto a inspeccionar es totalmente plano, todos los puntos de su superficie estarán en contacto con la superficie de referencia.

A partir de esta medición se puede obtener un error de planitud del producto, que se especifica en varios estándares de tolerancia geométrica, tales como [ANSI/ASME, 1994] e [ISO, 2004].

De una manera más formal se define el problema de la planitud como la mínima distancia entre dos planos paralelos entre los que se encuentran todos los puntos de su superficie, es decir, todos los puntos se sitúan por encima de un plano y por debajo del otro [Carr y Ferreira, 1995].

2.2. Productos planos de acero

Los productos de acero se pueden clasificar en dos tipos básicos dependiendo de su forma: productos planos y productos largos. Este trabajo se centra en la reconstrucción de la forma tridimensional de productos planos. El proceso de laminación, así se denomina al proceso metalúrgico a través del cual se obtiene un producto plano, puede realizarse en dos etapas consecutivas. La primera de ellas, conocida como laminación en caliente (*hot rolling*), se realiza con el acero a una temperatura por encima de 1200 ^{o}C. Los productos laminados en caliente se utilizan en la industria petroquímica, en la construcción naval y en la construcción civil, además de servir como materia prima para la siguiente etapa del proceso. La laminación en frío (*cold rolling*), etapa en la que no se modifica la forma del producto sino que se reduce su espesor o se mejora la calidad de su superficie, se realiza con el acero a una temperatura en torno a 200 ^{o}C. Los productos laminados en frío se utilizan en la industria del automóvil y en la fabricación de electrodomésticos y productos similares. Ambas etapas generan bandas de acero que pueden llegar a tener una longitud de varios miles de metros, por lo que son almacenadas enrolladas en bobinas. Tras el proceso de laminación en caliente, la banda generada puede tener un espesor de entre 1 y 10 milímetros. En el caso de la laminación en frío, el espesor puede oscilar entre 0,15 y 2 milímetros. En ambos casos, el ancho de las bandas laminadas varía entre 600 y 2000 milímetros.

Las bobinas resultantes del proceso de laminación se obtienen a partir de un bloque de acero (*slab*) que se hace pasar por unos conjuntos de rodillos que lo aplanan. Los rodillos ejercen presión sobre el acero hasta lograr el espesor deseado en la banda que se forma, incrementando, lógicamente, su longitud. Dado que los rodillos no tienen una superficie cilíndrica perfecta, no presionan de manera uniforme toda la sección transversal de la banda por lo que el incremento de longitud, elongación, no será el mismo en todos los puntos de la citada sección. Estas diferencias en la elongación generan defectos de planitud que se manifiestan como ondulaciones en la superficie de la banda debido a las tensiones internas que se producen en el material.

Como su propio nombre indica, uno de los principales requisitos de esta gama

de productos es que sean lo más planos posibles. Los controles de calidad a los que se someten los productos planos en las líneas de producción de acero tratan de identificar el grado de planitud de cada uno de ellos. En el pasado, las medidas de planitud sobre estos productos se tomaban de forma manual por un operador de la instalación. Para medir la planitud de un producto era necesario detener su avance por la línea industrial para tomar la muestra en un punto concreto o en un intervalo pequeño de su superficie. La tarea era extremadamente tediosa y consumía un tiempo excesivo (en términos de productividad) por lo que sólo se podía obtener un conjunto reducido de medidas. En la actualidad, debido a los exigentes criterios impuestos sobre la calidad de productos planos y a los requisitos sobre productividad, estas industrias tratan de desarrollar sistemas automatizados de medición de planitud.

Para poder cuantificar el grado de planitud de una banda de acero se han de medir las longitudes de varias secciones longitudinales de su superficie y compararlas entre sí. Para realizar esta comparación se definen una serie de métricas que indican la magnitud del defecto de planitud en intervalos de varios metros de longitud de la banda.

2.3. La planitud en bandas de acero

En la forma final de las bandas de acero intervienen multitud de factores, desde el momento en que el material se prepara hasta que finaliza el proceso de laminación. El acero se hace pasar por una serie de cilindros que, dispuestos de una forma determinada (ver figura 2.1) y por efecto de la presión que ejercen sobre el material, lo estiran y lo aplanan.

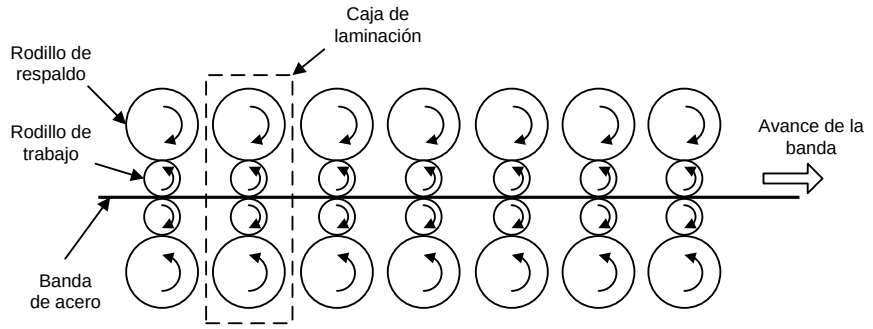


Figura 2.1: Esquema de un tren de laminación.

Una vez se consigue una banda con el espesor deseado (en el caso de la la-

minación en caliente se le hace pasar por una zona de refrigeración que hace descender su temperatura) ésta es enrollada en el formato final de almacenamiento y distribución.

La planitud de cada una de las bandas está sometida a un estricto control de calidad durante su proceso de fabricación. El problema que surge al tratar de medir esta planitud es que, según [Ginzburg, 1990], no existe una definición aceptada globalmente de lo que debe ser un producto plano. Se puede decir que cada empresa siderúrgica define su propio concepto basándose en diversas medidas existentes de planitud de productos. En todas ellas, el concepto de planitud hace referencia a la condición en la que todos los puntos de una superficie deben estar contenidos entre dos planos paralelos separados por una cierta distancia, denominada tolerancia de planitud (ver sección 2.1). Para medir la planitud de la superficie de una banda de acero, ésta se considera constituida por multitud de fibras paralelas entre sí, como se muestra en la figura 2.2(a). En el proceso de laminación, la presión a la que someten los rodillos a la banda hace que las fibras del material se alarguen.

En un escenario ideal, para obtener un perfil transversal de la banda laminada de forma rectangular la presión ejercida por los rodillos sobre el material debe ser constante a lo largo de toda su superficie (ver figura 2.3), por tanto, todas las fibras sufrirán el mismo alargamiento y alcanzarán la misma longitud final.

En un proceso de laminación en una planta industrial, un escenario real, la presión que ejercen los rodillos sobre el material no es uniforme en toda la sección transversal de la banda. Cuando la banda atraviesa una caja de laminación, que ejerce una determinada fuerza para realizar el proceso de laminado, los rodillos que forman dicha caja se curvan en torno a la banda debido a que el eje de los mismos está sujeto en sus extremos. Esta curvatura tiende a presionar más a la banda en los extremos que en el centro, por lo que todas las fibras no tendrán la misma longitud, sino que unas habrán sido estiradas más que otras. También puede suceder que los rodillos no sean cilíndricamente perfectos (por efecto del procesamiento de la banda) y que la sección transversal de la banda de acero esté más presionada en el centro que en los extremos, más presionada en un extremo que en el otro, etc.

Además de la presión ejercida por los rodillos, un factor determinante en la longitud de las fibras de la superficie de una banda de acero es el proceso de refrigeración al que se somete la banda tras su laminación en caliente [Usamentiaga *et al.*, 2006*a*]. Un proceso de refrigeración inadecuado provoca un enfriamiento no constante de la superficie de la banda, contrayéndose unas fibras más que otras.

En el caso de que las fibras de una banda fuesen independientes entre sí, las diferentes longitudes de estas fibras darían lugar a un producto laminado como el que se muestra en la figura 2.2(b). Sin embargo, en las bandas de acero, la longitud de cada una de las fibras que la componen está limitada por la

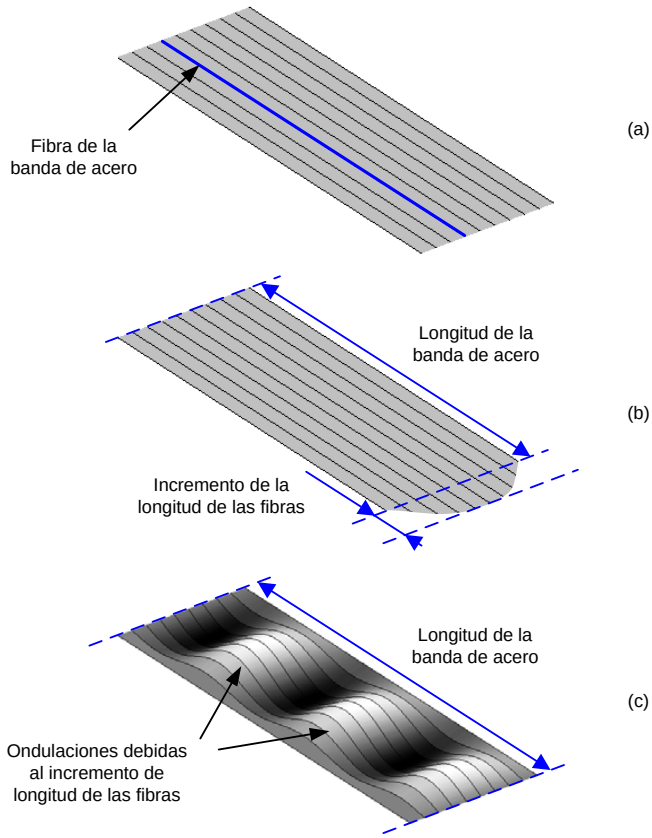


Figura 2.2: Descomposición en fibras de una banda de acero: (a) Banda constituida por multitud de fibras. (b) Banda en la que se suponen independientes entre sí cada una de las fibras que la componen. (c) Banda en la que las fibras que la constituyen son independientes entre sí y están limitadas por la forma física de la propia banda (forma real).

forma física de la propia banda, lo que favorece que haya tensiones internas que se manifiestan como ondulaciones en su superficie, tal como se muestra en la figura 2.2(c).

La diferencia de longitud entre las fibras de una misma banda de acero da lugar a ondulaciones y, por tanto, a defectos de planitud que, en el proceso de fabricación, pueden ser observables de dos formas diferentes.

En la primera de ellas, denominada forma latente, las tensiones debidas al

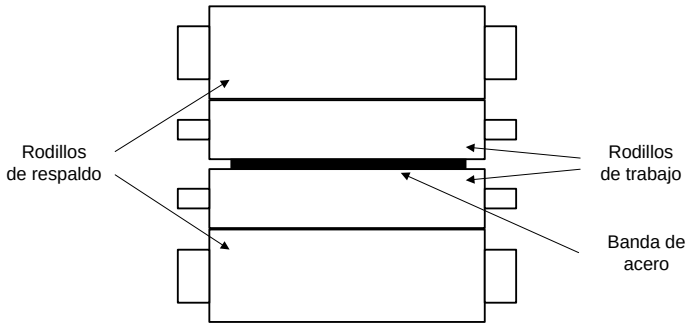


Figura 2.3: Rodillos de laminación en un escenario ideal.

incremento de las longitudes de las fibras se contrarrestan con la tensión que soporta la banda al ser arrastrada por el tren en el que se procesa. Las ondulaciones, en este caso, se observan una vez que la banda no se ve afectada por dichas tensiones, habitualmente cuando finaliza el proceso de fabricación. En la segunda de las formas, denominada forma manifiesta, las tensiones internas producidas por las diferencias de las longitudes de las fibras superan la tensión soportada por la banda en su desplazamiento por el tren y las ondulaciones se observan directamente en el propio tren de laminación.

Por un lado, las ondulaciones que se presentan de forma latente pueden medirse utilizando rodillos con sensores de presión, que captan la tensión a la que están sometidas las fibras y, por tanto, son capaces de medir los alargamientos de las mismas. Por otro lado, las ondulaciones que se presentan de forma manifiesta pueden ser medidas por un operario del tren de laminación de forma manual o utilizando técnicas de visión artificial para una supervisión automatizada, midiendo, como en el caso anterior, los alargamientos de las fibras que componen la banda.

Las bandas de acero constituidas por fibras con longitudes diferentes presentan defectos que, de una u otra forma, se manifiestan en ondulaciones. Un aspecto muy importante a tener en cuenta a la hora de tratar de detectar defectos de planitud en bandas de acero es que no todas las ondulaciones observadas provienen de defectos de planitud del material. Bandas de acero perfectamente planas (todas las fibras que las constituyen son de igual longitud) pueden presentar ondulaciones, como se muestra en la figura 2.4.

Los defectos de planitud que pueden presentar las bandas de acero se originan en el proceso de laminación por muchas y muy diversas causas. En la sección 2.3.1 se enumeran los defectos de planitud que puede presentar una banda de acero

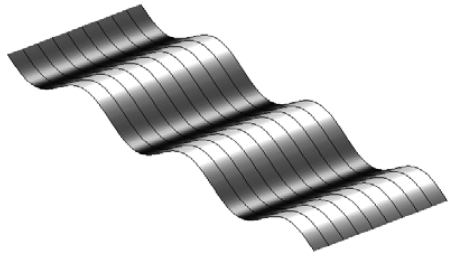


Figura 2.4: Banda de acero con ondulaciones y sin defectos de planitud.

y, en la sección 2.3.2, se describen las principales causas que los generan.

2.3.1. Defectos de planitud en bandas de acero

Los defectos de planitud de una banda de acero se producen cuando las fibras que la constituyen no tienen la misma longitud. Por este motivo, un análisis de la planitud requiere algún método de comparación de estas longitudes. Habitualmente, se fija un número de fibras repartidas de forma simétrica por la banda y equidistantes entre sí: una fibra central y uno o varios pares de fibras hacia los bordes de la banda.

A partir del estudio comparativo de las longitudes de las fibras se puede determinar la presencia de tres tipos de defectos de planitud en la banda:

- *Nivelado defectuoso (bad leveling)*. Está originado por un nivelado incorrecto de los rodillos del tren de laminación. La presión que ejercen estos rodillos es más elevada en un borde de la banda que en otro, por lo que las longitudes de las fibras aumentan de forma más o menos lineal desde el borde que menos presión soporta hasta el que más. La figura 2.5 muestra una representación de este tipo de defecto.

- *Bordes ondulados (wavy edges)*. Se produce cuando la zona central de la banda ha sido sometida a menor presión de la que han sido sometidos los bordes. Esta diferencia de presiones hace que las fibras centrales sean más cortas que las fibras exteriores. La figura 2.6 muestra una representación de este tipo de defecto.

- *Bucle central (center buckle)*. Se produce cuando la zona central de la banda ha sido sometida a mayor presión de la que han sido sometidos los bordes. Esta diferencia de presiones hace que las fibras centrales sean

más largas con respecto a las fibras exteriores. La figura 2.7 muestra una representación de este defecto.

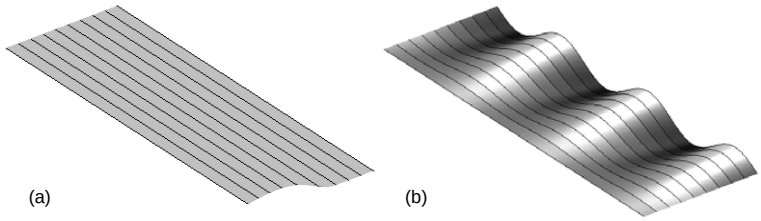


Figura 2.5: Defecto de planitud nivelado defectuoso (*bad leveling*): (a) Detalle longitud de las fibras. (b) Superficie de la banda.

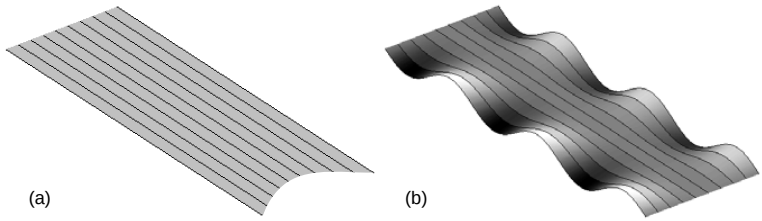


Figura 2.6: Defecto de planitud bordes ondulados (*wavy edges*): (a) Detalle longitud de las fibras. (b) Superficie de la banda.

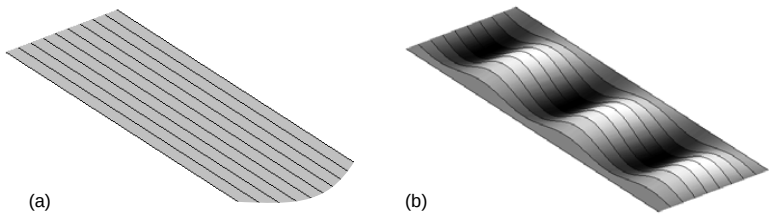


Figura 2.7: Defecto de planitud bucle central (*center buckle*): (a) Detalle longitud de las fibras. (b) Superficie de la banda.

Estos tres tipos de defectos pueden agruparse en dos categorías principales:

- *Defectos asimétricos*. Los defectos de nivelado defectuoso son generados por problemas de nivelación[1] de rodillos (*roll tilt*).
- *Defectos simétricos*. Los defectos de bordes ondulados y bucle central están directamente relacionados con el ajuste de la flexión[2] de los rodillos de laminación (*roll bending*).

2.3.2. Causas de los defectos de planitud en bandas de acero

Las numerosas causas por las que se pueden producir defectos de planitud en bandas de acero se pueden clasificar, según [Beal, 2001], en seis grandes grupos:

- *Maquinaria*. El estado de los componentes del tren de laminación afecta a la planitud final del producto fabricado. La calibración de cada uno de los sistemas que intervienen en el proceso de laminación es un factor decisivo. Entre otros, se pueden destacar el estado de la superficie de los rodillos de trabajo y de respaldo, su curvatura, etc.
- *Medición*. El sistema que controla el tren de laminación debe ser capaz de medir los defectos de planitud de las bandas de acero para poder actuar sobre el tren en forma de realimentación a partir de la evolución de los resultados obtenidos. Si la medición es errónea, el sistema generará órdenes de control incorrectas que se traducirán en defectos de planitud en la superficie del producto.
- *Entorno*. Antes de que las bandas de acero sean enfriadas se debe asegurar un entorno libre de suciedad que impida incrustación de partículas en el acero que puedan dañar su superficie o que puedan producir algún defecto en la superficie de los rodillos que más adelante se reflejará en defectos en la laminación de las bandas.
- *Métodos*. La forma en que funciona cada uno de los componentes del tren de laminación afecta a la planitud final de las bandas, destacando, entre otros aspectos, los siguientes:
  - La configuración de las cajas de laminación a través de las cuales ha de pasar la banda en el proceso.
  - El giro del conjunto formado por los rodillos del tren.

[1] Los ejes de los rodillos de cada caja de laminación no están paralelos en el mismo plano vertical.

[2] Encorvamiento transitorio que experimentan los rodillos cuando la banda atraviesa las cajas de laminación por efecto de estar sujetos sus ejes en los extremos de los mismos.

  - La temperatura de trabajo de los rodillos.
  - El sistema de refrigeración y engrase de los rodillos.
  - La tensión de arrastre que provoca el desplazamiento de la banda de acero por el tren.

- *Material.* Las características del acero a laminar deben ser tales que aseguren un perfil de temperatura en la banda adecuado para el proceso de laminación, además de ser capaz de alcanzar una temperatura no inferior a la requerida según los parámetros de aplastamiento y estiramiento a los que va a ser sometida.

- *Supervisión y control humano.* Los factores del sistema de control del proceso de laminación que no sean totalmente automatizables deben ser supervisados por un operador del tren de laminación. Los posibles errores en este proceso de supervisión pueden dar lugar a defectos de planitud.

2.4. Medición de la planitud

La técnica que permite detectar defectos de planitud en bandas de acero consiste en medir las longitudes de varias fibras de la banda y compararlas entre sí. El proceso de medición de estas longitudes puede hacerse tanto *on-line*, en el tren de rodillos durante el proceso de laminación, como *off-line*, en instalaciones por las que se hace pasar la banda de acero una vez enfriada para realizar, entre otras, pruebas de calidad sobre la misma.

Aplicando esta técnica, los defectos de planitud en la superficie de una banda se pueden expresar como desviaciones con respecto a una superficie plana horizontal, denominada superficie de referencia. En entornos industriales, la magnitud de estas desviaciones se obtiene a través de dos aproximaciones diferentes: aproximación por elongación y aproximación por altura de onda.

2.4.1. Aproximaciones por elongación y por altura de onda

Debido a que las fibras que constituyen una banda son dependientes entre sí, la diferencia de longitudes de las mismas, limitadas a su vez por la longitud física de la banda, provoca que las fibras con mayor longitud se plieguen adoptando una forma sinusoidal. Ambas aproximaciones se basan en comparar las características de las ondas que forman las fibras de la banda. La figura 2.8 representa la forma de una fibra en una banda de acero.

En la aproximación por elongación se selecciona una fibra, denominada fibra de referencia, y se compara con ella la longitud de otra u otras fibras de la banda. La elongación o alargamiento de cada una de las fibras, Δ_L, es igual a

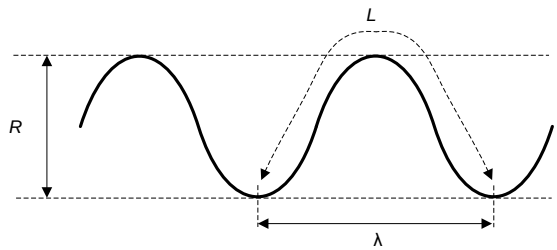


Figura 2.8: Forma de una fibra de una banda de acero.

la diferencia entre su longitud, L_{fibra}, y la longitud de la fibra de referencia, $L_{referencia}$. La comparación de estas longitudes da lugar a una métrica o índice de planitud, denominado índice de unidades I, *I-Units* , que se calcula según la ecuación (2.1). No se trata de una unidad dimensional, sino de una convención internacional para representar la escala 10^5. De este modo se obtiene un índice I para cada una de las fibras medidas. El valor del índice se calcula multiplicando por la constante citada anteriormente la comparación relativa de las longitudes entre la fibra medida y la fibra de referencia. Esta constante se utiliza para poder representar el índice con números enteros, debido a que el valor de la comparación es, generalmente, un valor muy pequeño.[3]

$$I_{I-Unit} = \frac{\Delta_L}{L_{referencia}} \times 10^5 = \frac{L_{fibra} - L_{referencia}}{L_{referencia}} \times 10^5 \tag{2.1}$$

En la segunda de las aproximaciones, la aproximación por altura de onda, se considera la fibra de una banda como una onda, cuyos parámetros son: la amplitud máxima, R, y la longitud de onda, λ. A partir de estos parámetros se define una métrica o índice de planitud, denominado índice *Steepness*, que se calcula a partir de la ecuación (2.2). Habitualmente, el valor de este índice se suele expresar como un porcentaje, según indica la ecuación (2.3).

$$I_{Steepness} = \frac{R}{\lambda} \tag{2.2}$$

$$\%I_{Steepness} = \frac{R}{\lambda} \times 10^2 \tag{2.3}$$

[3] Una cantidad aceptable para bandas de acero de espesores altos, entre 2 y 10 milímetros, se sitúa entre 10 y 20 *I-Units*. Para espesores finos, entre 0,15 y 2 milímetros, una cantidad aceptable debe estar en el rango de 3 a 10 *I-Units*. Por el contrario, bandas de acero que presenten defectos de planitud graves pueden tener entre 100 y 200 *I-Units*.

Basados también en alguna de las dos aproximaciones anteriores, se definen otras métricas de planitud, así como la forma de convertir unidades entre estas métricas [AISE, 1989]. La relación entre las métricas *I-Units* y *Steepness*, ecuaciones (2.4) y (2.5), sólo es aplicable cuando el defecto de planitud adopta una forma sinusoidal. Los defectos de planitud en bandas de acero se presentan en forma sinusoidal por lo que puede establecerse entre ellas esta relación. Se definen varias limitaciones que indican que la equivalencia entre ambas métricas no es una aproximación exacta, sino una aproximación válida sólo a partir de un índice *Steepness* bajo. Un índice *Steepness* bajo significa que la longitud de onda del defecto de planitud es mucho mayor que su amplitud. En defectos de planitud en los que el índice *Steepness* es elevado existe una notable diferencia entre el índice *I-Units* real y el calculado a partir del índice *Steepness*.

$$I_{I-Units} = \left(\frac{\pi \times I_{Steepness}}{2} \right)^2 \times 10 \tag{2.4}$$

$$I_{Steepness} = \frac{2}{\pi} \times \sqrt{I_{I-Units} \times 10^{-1}} \tag{2.5}$$

En la industria del acero está actualmente extendido el uso de las métricas *I-Units* y *Steepness*. La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) desarrolló un estándar [ASTM, 2005] en el que define las diferentes características de planitud de bandas de acero, entre otros productos planos, y describe los métodos más comúnmente utilizados para medir esta planitud.

2.4.2. Elongación de las fibras de una banda de acero

Para determinar la planitud de una banda por el método de la elongación es necesario medir la longitud de varias fibras que la forman y realizar, posteriormente, una comparación entre estas longitudes. De manera formal, se definen varios requisitos generales que deben cumplir los sensores de los sistemas de medición de planitud [Heaven, 1988]:

- No deben interferir en el proceso de laminación.
- No deben dañar la superficie de la banda.
- Deben ser capaces de funcionar en entornos hostiles, como es el caso de trenes de laminación, líneas de acabado, líneas de control de calidad, etc.
- Deben ser robustos mecánicamente.
- Deben requerir un mantenimiento mínimo.
- Deben proporcionar resultados fiables y exactos.

- Deben ser capaces de realizar muestreos a frecuencia elevada y poder trabajar en tiempo real.

La longitud de cada una de las fibras se calcula utilizando la técnica de integración [García *et al.*, 2002]. El primer paso de esta técnica consiste en obtener el perfil de la fibra. Para ello, es necesario medir tanto el desplazamiento horizontal como el desplazamiento vertical en cada período de muestreo. La figura 2.9 representa el perfil real y el perfil muestreado de una fibra en una banda de acero. Utilizando la ecuación (2.6) se puede calcular la longitud de la fibra, L, donde t_i es el instante de muestreo, v_i la velocidad de desplazamiento horizontal de la banda en el instante t_i, h_i la altura de la fibra muestreada en el instante t_i con respecto a un eje de referencia, y n el número total de muestras. Los puntos intermedios se aproximan mediante interpolación lineal entre cada par de muestras de altura consecutivas. A través de este método se obtiene una aproximación de la longitud de la fibra.

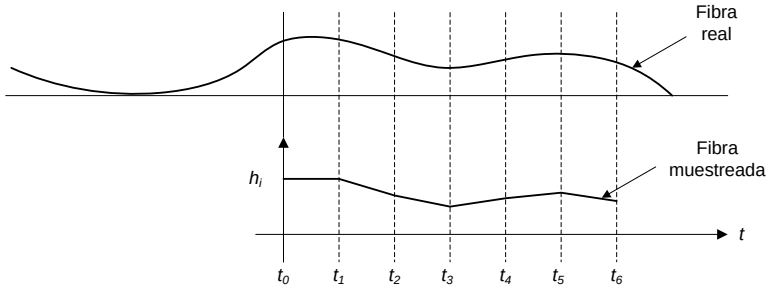


Figura 2.9: Perfil real y muestreado de una fibra de una banda de acero.

$$L = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(h_i - h_{i-1})^2 + v_i^2 (t_i - t_{i-1})^2} \tag{2.6}$$

A partir de la longitud de las fibras, se puede calcular la métrica de planitud *I-Units* de la banda utilizando la ecuación (2.1).

La precisión con la que se calcula la longitud de una fibra aplicando el método de integración depende de la velocidad de desplazamiento de la banda y del intervalo de muestreo. La velocidad de desplazamiento se ajusta en función de parámetros físicos de la propia banda y de factores de la instalación industrial, totalmente independientes del sistema de medición. El período entre dos muestras consecutivas depende del sistema de medición de alturas utilizado.

2.4.3. Métrica *I-Units*

Como se ha indicado anteriormente, en instalaciones industriales en que se realizan procesos de laminación de bandas de acero está extendido el uso de las métricas *I-Units* y de *Steepness*, aunque la más utilizada de las dos es la que se basa en el índice *I-Units* (ver sección 2.4.1). El índice de planitud calculado a partir de esta métrica varía, para una misma superficie, en función de la fibra de la banda que se elija como fibra de referencia. En algunas ocasiones, la fibra de referencia no se corresponde con ninguna fibra real de la banda sino que se obtiene aplicando algún indicador estadístico, como puede ser la longitud media de todas las fibras de la banda o cualquier otra referencia, como la proyección de una fibra sobre una superficie plana.

No existe un estándar que defina cuál de las fibras que componen una banda debe elegirse como fibra de referencia para calcular esta métrica. Esta elección arbitraria provoca que los resultados de planitud no sean directamente comparables, ya que cada sistema industrial de medición de planitud puede seleccionar una fibra diferente.

2.4.3.1. Fibra de referencia

Los criterios de selección más habituales de una fibra de referencia para el cálculo de la métrica *I-Units* son:

- *Fibra central*. Elegir como fibra de referencia la fibra central de la banda, independientemente de su longitud.
- *Fibra más corta*. Elegir como fibra de referencia la fibra más corta de todas las fibras muestreadas en la banda.
- *Fibra más larga*. Elegir como fibra de referencia la fibra más larga de todas las fibras muestreadas en la banda.
- *Fibra media*. Realizar un promedio de las longitudes de todas las fibras muestreadas y utilizar ese valor como longitud de la fibra de referencia. Esta fibra no se corresponde con ninguna fibra real de la banda.
- *Avance de la banda*. Utilizar como fibra de referencia la proyección de una de las fibras de la banda sobre el plano de referencia horizontal. Al igual que en el criterio anterior, esta fibra no se corresponde con ninguna fibra real de la banda.

El primero de los criterios selecciona una fibra de posición fija dentro de la banda, independientemente de su longitud, mientras que los dos siguientes criterios seleccionan una fibra de posición variable, donde la posición seleccionada depende de la longitud de todas las fibras muestreadas.

2.4.3.2. Perfil de planitud

Para expresar la planitud de una banda no se utiliza un único índice con relación a una fibra de referencia, sino que se utilizan varias fibras de la banda, para cada una de las cuales se obtiene un índice de planitud. De esta forma, la planitud de una banda estará representada por un vector de componentes, cada uno de los cuales es un índice de planitud. Cada uno de estos índices estará asociado a una posición transversal de la banda.

A partir de esta expresión vectorial de índices de planitud para una banda se define el perfil de planitud como una representación gráfica del vector de planitud. Se trata de una representación sobre un eje de coordenadas bidimensional. En el eje de abscisas se representa la posición de la fibra en la banda y en el eje de ordenadas se representa el valor del índice de planitud de la fibra. Esta curva representa el perfil de elongaciones de la superficie de la banda. Si el índice de planitud utilizado se expresa en unidades I, el perfil se denomina curva *I-Units*.

La forma del perfil de planitud va a depender de dos factores: el criterio de selección de la fibra de referencia y el defecto de planitud que presente la banda.

De entre estos dos factores, el que más afecta a la forma final de la curva es el defecto de planitud. La figura 2.10 muestra la forma de la curva *I-Units* para una banda de acero en la que todas sus fibras tienen la misma longitud. Las figuras 2.11, 2.12 y 2.13 muestran la forma de la curva *I-Units* para una banda de acero con nivelado defectuoso, con bordes ondulados y con bucle central, respectivamente. En todas estas representaciones se ha elegido como fibra de referencia la fibra más corta de la banda, de ahí que todos los índices de planitud sean positivos.

Los defectos de planitud no son excluyentes entre sí, sino que pueden presentarse varios en la misma banda, dando lugar a un perfil de planitud particular en cada uno de los casos, estando definido, principalmente, por su rango y posición.

El rango del perfil de planitud es el intervalo de valores dentro del cual se encuentran los índices de todas las fibras de la superficie. Este rango depende de la fibra de referencia elegida. El rango más amplio de variación de la curva se obtiene al utilizar como fibra de referencia el avance de la banda. Por el contrario, el rango más pequeño de variación se obtiene al utilizar como fibra de referencia la fibra más larga de la banda. Para el resto de los casos, el rango obtenido se encontrará entre estos dos valores.

La posición del perfil de planitud es el desplazamiento vertical dentro del eje de coordenadas en que se representa. Este desplazamiento es totalmente independiente de la forma de la curva. El tipo de defecto de planitud de la banda no afecta a la posición de la curva dentro de la gráfica. Esta posición depende de la fibra que se elija como fibra de referencia. Tanto si se elige una fibra de referencia de posición fija como una fibra de posición variable, la curva siempre toma valor cero en un punto, lo que elimina los desplazamientos verticales. Si

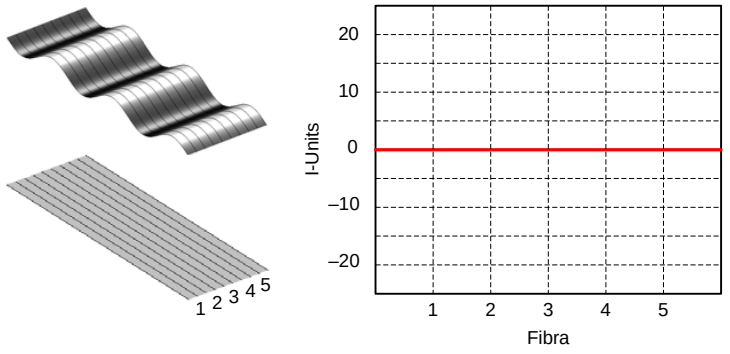


Figura 2.10: Perfil de planitud, expresado en *I-Units*, de una banda sin defectos de planitud.

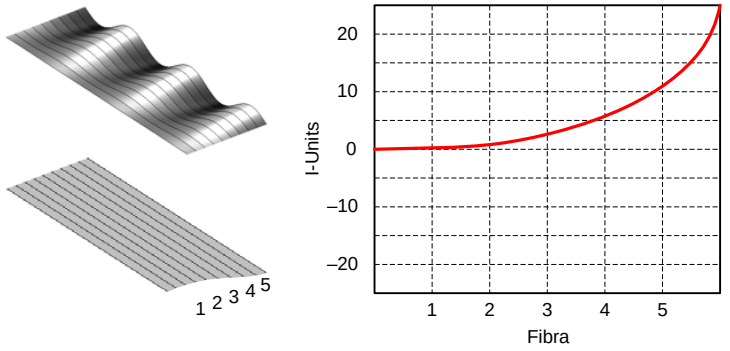


Figura 2.11: Perfil de planitud, expresado en *I-Units*, de una banda con nivelado defectuoso.

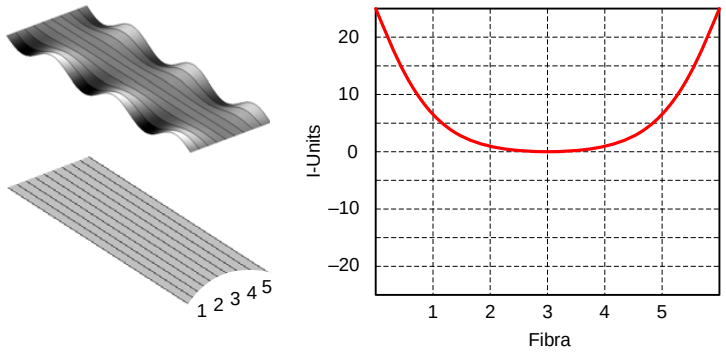


Figura 2.12: Perfil de planitud, expresado en *I-Units*, de una banda con bordes ondulados.

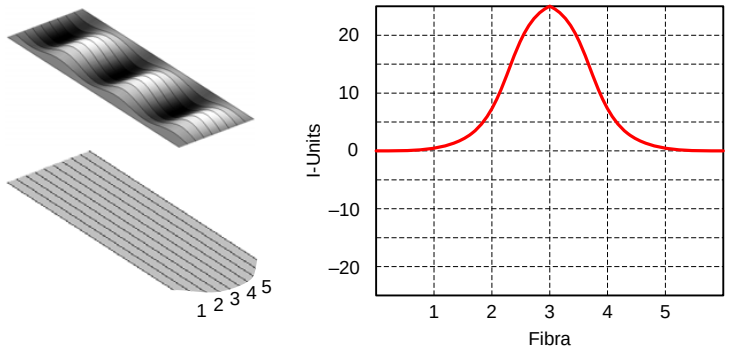


Figura 2.13: Perfil de planitud, expresado en *I-Units*, de una banda con bucle central.

por el contrario, se utiliza como fibra de referencia el avance de la banda, todos los índices van a ser mayores o iguales que cero y, según la elongación media que presente la banda, la curva se desplazará más o menos verticalmente.

2.4.4. Tipos de índices de defectos de planitud

Como se ha indicado en la sección 2.4.1, la información relativa a la planitud no está contenida en las longitudes de las fibras que componen la superficie del material a medir, sino en la comparación de las longitudes de las diferentes fibras. Para cuantificar esta comparación se definen varios tipos de índices de planitud: índices de alargamiento, índices de flexión e índices de nivelación.

Para realizar esta definición se supone la superficie de una banda formada por n fibras, $1, 2, \ldots, c, \ldots, n$, de longitud $L_1, L_2, \ldots, L_c, \ldots, L_n$, respectivamente, donde c es la fibra central, y 1 y n las fibras de los extremos de la banda.

Los índices de alargamiento representan las longitudes de las fibras de la banda tomando como referencia la fibra central. En el caso de las fibras de los extremos, estos índices se calculan de acuerdo a las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$I_{1-c} = \frac{L_1 - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{2.7}$$

$$I_{n-c} = \frac{L_n - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{2.8}$$

Los índices de defectos de flexión de rodillos o índices simétricos se calculan a partir de las longitudes medias entre fibras simétricas. La ecuación (2.9) permite calcular los defectos de flexión exteriores de los rodillos de laminación. Además, variando la fibra i en la ecuación (2.10) se pueden calcular los defectos de flexión entre el centro y los extremos de los rodillos de laminación.

$$I_{1+n-c} = \frac{\frac{L_1 + L_n}{2} - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{2.9}$$

$$I_{i+(n-i+1)-c} = \frac{\frac{L_i + L_{n-i+1}}{2} - L_c}{L_c} \times 10^5, \quad i \in [2, n-1] \tag{2.10}$$

Los índices de defectos de nivelación de rodillos o indices asimétricos permiten calcular el defecto relativo entre la diferencia de longitudes de las fibras exteriores y la longitud exterior media, ecuación (2.11). Además, variando la fibra i en la ecuación (2.12) se puede calcular el defecto relativo entre la diferencia de longitudes de fibras intermedias y la longitud intermedia media.

$$I_{1-n} = \frac{L_1 - L_n}{\frac{L_1 + L_n}{2}} \times 10^5 \tag{2.11}$$

$$I_{i-(n-i+1)} = \frac{L_i - L_{n-i+1}}{\frac{L_i + L_{n-i+1}}{2}} \times 10^5, \quad i \in [2, n-1] \tag{2.12}$$

En el apéndice A se demuestra la consistencia de los índices de defectos de planitud descritos en esta sección.

2.4.5. Integración de índices de planitud

Las bandas de acero producidas en un tren de laminación tienen una longitud de varios centenares a varios miles de metros, por lo que no es suficiente proporcionar un único perfil de planitud para indicar la planitud de toda la banda (ver figura 2.14). En bandas de acero de esta longitud pueden presentarse varios defectos en diferente secciones de la banda que un único perfil de planitud no podría reflejar.

Para indicar de una forma más exacta la planitud de una banda de acero se aumenta el número de perfiles de planitud que se calculan a lo largo de la misma. El proceso consiste en dividir la banda en varias secciones y generar un índice de planitud para cada una de ellas (ver figura 2.15). La longitud de cada una de estas secciones se conoce como intervalo de integración del índice de planitud y debe ser definido a partir de las características físicas de la banda.

En las bandas de acero, la longitud de onda de los defectos de planitud es del orden del ancho de la banda [IRM, 1996]. Por tanto, el intervalo de integración que se debe utilizar para separar de forma correcta unos defectos de planitud de otros es un valor múltiplo de este ancho. Para elegir un valor concreto debe tenerse en cuenta que el incremento entre dos muestras consecutivas de longitud de la fibra no es constante durante todo el intervalo de integración. A continuación se demuestra este hecho utilizando una simplificación teórica de una fibra de una banda de acero.

La forma de una fibra de una banda de acero se representa mediante la ecuación (2.13), que modela una onda sinusoidal. Esta ecuación calcula la altura, z, a la que se encuentra la fibra a partir de su posición longitudinal en la banda de acero, y, con una amplitud de onda R, una longitud de onda λ y un desfase de la fibra con respecto al punto de inicio del intervalo de integración θ.

$$z = R \times \sin\left(\frac{2\pi \times y}{\lambda} + \theta\right) \tag{2.13}$$

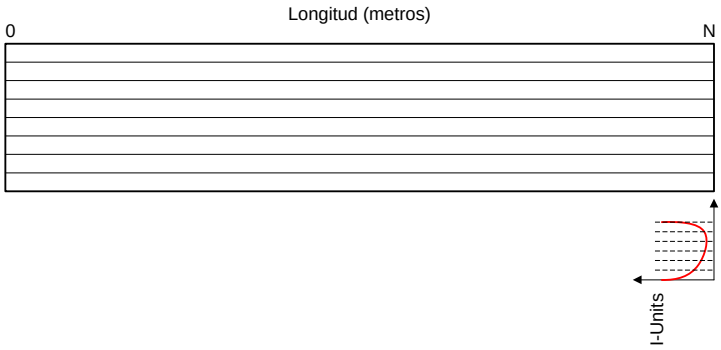


Figura 2.14: Perfil de planitud único para representar la planitud de una banda.

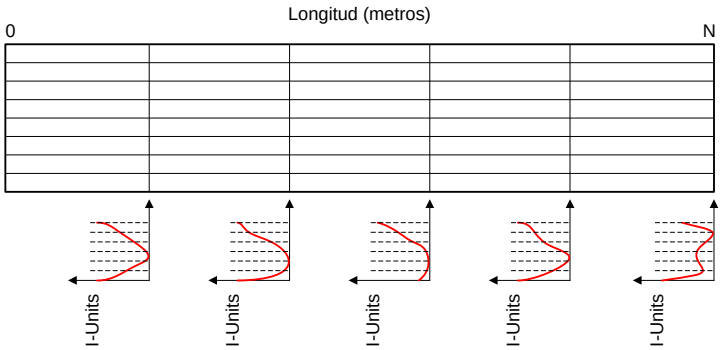


Figura 2.15: Múltiples perfiles de planitud para representar la planitud de una banda.

La técnica de integración aproxima la longitud de la fibra en cada intervalo uniendo mediante una recta dos puntos consecutivos de la misma. El incremento de la altura de una fibra, en función de su avance, se puede expresar aplicando la definición de la recta a través de la ecuación punto-pendiente, según la ecuación (2.14), donde la pendiente de la recta, m, en un punto, (y, z), se calcula a partir de la ecuación (2.15), que se obtiene como la primera derivada de la ecuación (2.13). Por tanto, el incremento de longitud entre dos muestras consecutivas se calcula a partir de la ecuación (2.16), provocando, como se ha indicado anteriormente, que dicho incremento no sea constante durante todo el

período de integración, sino que responde a la ecuación (2.17).

$$(z - z_0) = m(y - y_0) \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned} m = \quad & \frac{dz}{dy} = \frac{d\left(R \times \sin\left(\frac{2\pi \times y}{L} + \theta\right)\right)}{dy} \\ = \quad & \frac{2\pi \times R}{L} \times \cos\left(\frac{2\pi \times y}{L} + \theta\right) \end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\Delta L = \sqrt{\Delta z^2 + \Delta y^2} = \sqrt{m^2 \Delta y^2 + \Delta y^2} = \Delta y \sqrt{1 + m^2} \tag{2.16}$$

$$\Delta L = \Delta y \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \times R}{L} \times \cos\left(\frac{2\pi \times y}{L} + \theta\right)\right)^2} \tag{2.17}$$

La integración consiste en sumar los incrementos de longitud de la fibra dentro del intervalo de integración. En caso de que el incremento de longitud fuese constante, sería indiferente la forma de situar el intervalo de integración sobre la banda. En el caso de una fibra real, la elongación que se calcula depende de la posición del intervalo de integración. Los intervalos en que todos los incrementos de longitud de la fibra están por encima del incremento promedio se denominan intervalos positivos. Por el contrario, los intervalos en que todos los incrementos de longitud de la fibra estén por debajo del incremento promedio se denominan intervalos negativos. Si el intervalo de integración cubre el mismo número de intervalos positivos que de intervalos negativos, la elongación calculada se corresponde con la elongación promedio de la fibra. En cambio, si el intervalo de integración contiene más intervalos positivos que intervalos negativos se obtiene una elongación superior a la media, y si contiene más intervalos negativos que intervalos positivos se obtiene una elongación inferior a la media.

El problema para establecer la posición del intervalo de integración es que no es posible conocer, antes de realizar la medición, el desfase de la onda del defecto. Seleccionando diferentes posiciones para el intervalo de integración puede darse el caso de que se calculen elongaciones diferentes según el punto en que comience la medición para una misma fibra que presente una ondulación constante.

En [López, 2004] se realiza una simulación en la que se calcula la planitud de una banda variando la posición inicial del intervalo de integración y la amplitud del mismo. Esta simulación utiliza una fibra con una longitud de onda λ de 1 metro y con una amplitud R de 0,01 metros. Se calcula el índice *I-Units* de

planitud a partir de la ecuación (2.1) utilizando como fibra de referencia el avance de la banda. Para cada uno de los intervalos de integración se calcula la planitud de la banda simulando el punto de inicio de dicho intervalo, con respecto a la onda de defecto de la fibra, para desfases comprendidos entre 0 y 2π. El resultado que arroja esta simulación, mostrado gráficamente en la figura 2.16, es que, para amplitudes del intervalo de integración múltiplos de media longitud de onda de la fibra, el índice *I-Units* de planitud calculado coincide con el índice de planitud promedio. Además, también se demuestra que a medida que aumenta la amplitud del intervalo de integración, el error cometido en las medidas de planitud disminuye.

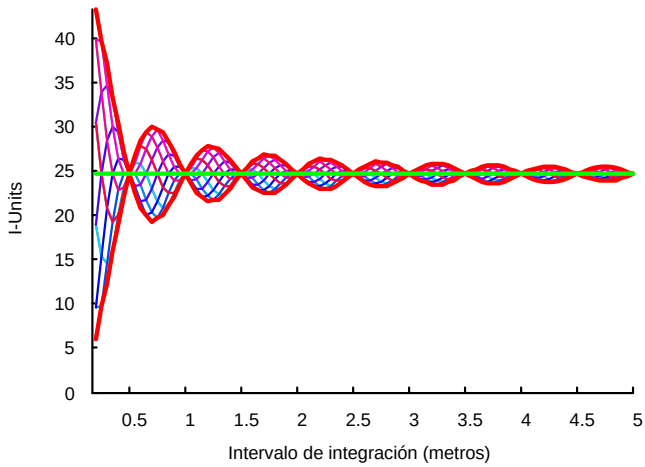


Figura 2.16: Variación del índice de planitud en función del intervalo de integración.

Por tanto, aunque no es posible conocer a priori el desfase de la onda de la fibra, el error introducido debido a que el incremento de longitud entre dos muestras consecutivas no es constante durante todo el intervalo de integración puede minimizarse aumentando la amplitud de dicho intervalo. Se debe llegar a un compromiso entre un intervalo lo suficientemente amplio, que permita minimizar el error en el cálculo del índice de planitud, y lo suficientemente reducido, que permita obtener una densidad de datos adecuada.

2.4.6. Muestreo de las fibras de una banda de acero

Además de definir el intervalo de integración para el índice de planitud, el proceso de muestreo de las fibras que componen la superficie de una banda de acero debe tener en cuenta el tiempo transcurrido entre muestras consecutivas. El tiempo de muestreo, o tiempo que transcurre entre la obtención de dos muestras consecutivas, depende, entre otros, de factores ambientales como la iluminación, y de los componentes *hardware* del sistema de medición.

A medida que aumenta la frecuencia de muestreo, el segmento de fibra entre dos muestras consecutivas decrece y, por tanto, la forma de la fibra muestreada se parece más a la forma de la fibra real. En un proceso de muestreo teórico, la forma de la fibra real se aproximaría tomando muestras con una frecuencia infinita. El problema surge cuando se utiliza un sistema de medición real, el cual introducirá un grado de incertidumbre en cada muestra de la fibra que dependerá de la precisión del sistema de medida y de la presencia de ruido en cada una de las mediciones.

La elongación de la fibra se calcula aplicando la técnica de integración a partir de la ecuación (2.6). El valor obtenido para una misma fibra varía dependiendo de la frecuencia con que ésta haya sido muestreada. Si la fibra ha sido muestreada a una frecuencia excesivamente baja, el error cometido se conoce como error debido al submuestreo. Si la fibra ha sido muestreada a una frecuencia excesivamente alta, el error cometido se conoce como error debido al sobremuestreo.

A partir de la longitud obtenida de la fibra, y de la longitud de una fibra de referencia, se calcula el índice de planitud del intervalo de integración de la banda a partir de la ecuación (2.1). Por tanto, el índice de planitud calculado se ve afectado por la frecuencia de muestreo de cada una de las fibras de la banda.

El efecto de la frecuencia de muestreo de las fibras de una banda sobre el índice de planitud calculado se comprueba en [López, 2004] a través de una simulación de la técnica de integración en la que se tienen en cuenta las incertidumbres en la obtención de las muestras. El proceso de simulación genera un número elevado de fibras con las mismas características (longitud y amplitud de onda) y calcula la longitud de cada una de ellas utilizando diferentes frecuencias de muestreo. El resultado que arroja esta simulación es que cuanto menor es la frecuencia de muestreo mayor es el sesgo del resultado obtenido y cuanto mayor es la frecuencia mayor es su dispersión.

En la figura 2.17 se muestra de forma gráfica el resultado de esta simulación para una fibra utilizando parámetros de bandas de acero reales: 1800 milímetros de longitud y 50 milímetros de amplitud de onda del defecto, con 1000 repeticiones por cada frecuencia. En esta figura la línea continua de color azul muestra la elongación media y la discontinua del mismo color muestra la dispersión de las mediciones; la línea horizontal de color rojo muestra la frecuencia de muestreo para la cual la suma de errores es mínima y la vertical del mismo color muestra

el índice de planitud real de la fibra.

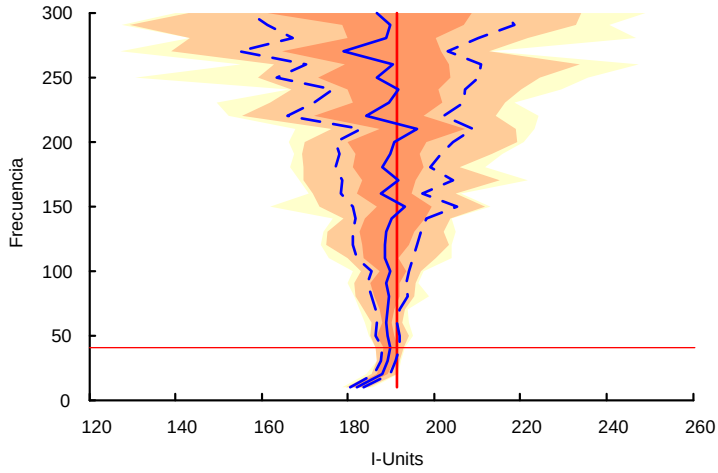


Figura 2.17: Variación del índice de planitud en función de la frecuencia de muestreo.

A partir de parámetros reales de las bandas de acero que se procesan en instalaciones industriales se puede utilizar la simulación anterior para calcular la frecuencia de muestreo óptima para un determinado sistema de medición de planitud.

2.4.7. Extracción de conocimiento de mediciones de planitud

La planitud de una banda puede representarse mediante una secuencia de perfiles de planitud. Estos perfiles pueden ser interpretados de forma sencilla por un operador humano, identificando rápidamente el tipo o tipos de defectos de planitud que presenta la banda. Sin embargo, a partir de estos perfiles es difícil identificar, de forma automatizada, el tipo de defecto de planitud de dicha banda. Por tanto, es necesario obtener un modelo que permita extraer las características más destacables del perfil de planitud que indique el tipo y la magnitud del defecto de planitud de la banda.

Generalmente, este modelo se obtiene mediante la aproximación del perfil de planitud a través de un ajuste polinomial, basado en polinomios ortogonales [Abramowitz y Stegun, 1972]. Este método de aproximación presenta varias ventajas incluyendo, entre otras, la eliminación de componentes de baja frecuencia (ruido) de la curva original y la reducción de la cantidad de información de dicha

curva. En cualquier caso, la ventaja más importante de este método es que los coeficientes de los polinomios pueden ser utilizados para describir la forma de la curva *I-Units*.

Para realizar el ajuste polinomial es posible utilizar varias alternativas [Usamentiaga *et al.*, 2006*b*], bien polinomios ortogonales de Chebyshev o de Hermite, bien polinomios de Gram, también denominados polinomios ortogonales discretos de Legendre.

Los sistemas industriales de medición de planitud Rometer (ver sección 2.5.2.1) y TopPlan (ver sección 2.5.2.8) aproximan el perfil de planitud de las bandas de acero mediante un ajuste polinomial, con el objetivo de obtener el polinomio que mejor se ajuste a dicha curva. El polinomio obtenido puede tener una forma similar a la mostrada en la ecuación (2.18).

$$\frac{\Delta L}{L} = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 + A_4 x^4 \tag{2.18}$$

Teniendo en cuenta el orden de cada coeficiente del polinomio y su signo se puede cuantificar el nivel de cada uno de los tipos de defectos de planitud que presenta la banda. Cada uno de los coeficientes de este polinomio se corresponde con un tipo de defecto diferente. En el caso de los tres primeros:

- A_0: No identifica realmente ningún tipo de defecto de planitud, sino una ondulación uniforme en la superficie de la banda.
- A_1: Identifica el defecto de planitud nivelado defectuoso.
- A_2: Identifica los defectos de planitud bucle central, cuando es mayor que cero, y bordes ondulados, cuando es menor que cero.

Las diferencias entre ambos sistemas de medición de planitud se encuentran en el grado del polinomio con el que se realiza el ajuste. Además, en el caso del sistema TopPlan los defectos de planitud se parametrizan utilizando coeficientes de Chebyshev.

Si el sistema de medición de planitud está instalado en un tren de laminación, el conjunto de mediciones obtenidas puede ser utilizado como entrada de un sistema de control predictivo para corregir los defectos de planitud que se van produciendo durante el proceso de laminación de la banda [Jelali *et al.*, 2002].

2.4.8. Visualización de mediciones de planitud

Una vez obtenidas las mediciones y las características de planitud de una banda de acero, éstas han de ser presentadas de tal forma que su interpretación sea lo más sencilla y rápida posible por parte de un operador humano. Para ello se debe utilizar un mecanismo de visualización adecuado.

En [Card *et al.*, 1999] se presenta un estudio sobre técnicas de visualización en el que se tratan aspectos tales como la forma de visualizar datos, el tipo de representación a utilizar en función de la naturaleza y significado de dichos datos, la necesidad de amplificar el conocimiento que se puede extraer de una visualización, los tipos de estructuras visuales a los que es más sensible el ojo humano, etc.

Todos estos aspectos han de ser tenidos en cuenta al diseñar los dos mecanismos básicos de visualización de mediciones de planitud: la visualización *on-line*, también denominada visualización en línea o visualización en tiempo real, y la visualización *off-line*, o visualización de históricos.

En [García *et al.*, 2003] se presentan y evalúan las diferentes técnicas para visualizar la planitud de productos elásticos, tales como bandas de acero. Además, se diseña un sistema flexible de visualización, basándose en las técnicas evaluadas, que puede ser fácilmente configurado para representar mediciones de planitud.

2.5. Sistemas de medición de planitud

La automatización del proceso de medición de planitud en entornos industriales es un campo de trabajo relativamente reciente. Hasta hace pocas décadas la planitud de bandas de acero se inspeccionaba manualmente, deteniendo su avance por el tren o la línea de producción y comparando su superficie con una barra recta. Esta técnica no permitía inspeccionar todas las bandas dado que consumía mucho tiempo y mermaba en exceso la capacidad de producción de las instalaciones.

Cuando la demanda en la calidad de los productos hizo necesaria la supervisión de la planitud de todas las bandas de acero fabricadas, emergieron los sistemas de medición y control automáticos de planitud, que se han ido perfeccionando en los últimos diez o quince años llegando a ser un elemento indispensable en los procesos de laminación.

2.5.1. Introducción a los sistemas de medición de planitud

Los sistemas de medición de planitud desarrollados en las últimas cuatro décadas se pueden clasificar, atendiendo al principio de funcionamiento utilizado para medir la elongación de las fibras que componen una banda de acero, en dos grandes grupos: sistemas mecánicos y sistemas ópticos.

2.5.1.1. Sistemas mecánicos

A principios de la década de 1970 se desarrollan los primeros sistemas de medición de planitud. Estos sistemas utilizan técnicas mecánicas para la medición

de la longitud de las fibras que forman la banda de acero. Se basan en el contacto con la banda para realizar las mediciones, utilizando transductores de fuerza o de presión integrados en un rodillo deflector. Las diferencias en las longitudes de las fibras se calculan atendiendo al hecho de que las zonas de la banda con fibras de mayor longitud ejercen menos presión sobre el rodillo que las zonas cuyas fibras son más cortas.

El sistema industrial de medición de planitud más destacado basado en esta técnica es Stressometer (ver sección 2.5.2.3).

Los puntos débiles de este tipo de sistemas son:

- Los productos que requieren una elevada calidad en el acabado de su superficie necesitan un rodillo cuya superficie sea también de muy alta calidad. El objetivo es que el proceso de medición no genere defectos en el producto.
- Se requieren tareas de mantenimiento de la superficie del rodillo así como de los sensores que lo forman. Además, es necesario disponer de rodillos de reemplazo, hecho que eleva notablemente el coste de implantación del sistema.
- La calibración del sistema requiere un intervalo de tiempo prolongado.

Para tratar de superar estas limitaciones, los sistemas que se desarrollan a continuación son sistemas que miden la planitud de la superficie de las bandas de acero sin necesidad de contacto con las mismas (*contactless flatness measurement*).

En el año 2005 se presentan los resultados de las primeras implementaciones de uno de los sistemas mecánicos de medición de planitud de productos laminados más avanzados. El sistema se denomina SIFLAT [Spreitzhofer *et al.*, 2005] (ver sección 2.5.2.5), y se basa en la excitación del material para lograr una oscilación controlada del mismo y analizar, posteriormente, las vibraciones medidas.

2.5.1.2. Sistemas ópticos

A finales de la década de 1980 y principios de la década de 1990 se desarrollan sistemas de medición de planitud que utilizan métodos ópticos, principalmente basados en la técnica de triangulación.

La técnica de triangulación es un subconjunto de las técnicas ópticas activas (ver sección 3.2.2.1), es decir, técnicas ópticas que utilizan fuentes de iluminación con unas características muy controladas, en contraposición con las técnicas ópticas pasivas (ver sección 3.2.1) que no siempre requieren de una fuente de iluminación artificial. Las técnicas ópticas activas son las más interesantes desde el punto de vista de estos sistemas, ya que consiguen una mayor precisión en la medida.

Los primeros sistemas de medición de planitud basados en técnicas ópticas activas, aún utilizados en instalaciones industriales actuales, constaban de un conjunto de emisores láser que proyectaban una serie de puntos sobre la superficie de la banda y de un conjunto de cámaras lineales. Cada cámara registraba el movimiento de uno de los puntos proyectados sobre la superficie, que servía para calcular la longitud de una fibra de la banda utilizando una técnica de triangulación simple.

Este tipo de sistemas ofrecía medidas bastante precisas, pero tenía ciertas limitaciones. Tanto los proyectores de puntos láser como las cámaras lineales estaban fijos en sendas estructuras sobre el camino de rodillos por el que se desplazaba la banda. El desplazamiento de la banda por la instalación puede producir algún tipo de movimiento lateral, por lo que las medidas no siempre se tomaban sobre la misma fibra. Las medidas tomadas de esta forma podían llegar a ser totalmente inválidas si los movimientos laterales de la banda se producían frecuentemente. Además, no todas las bandas de acero que se procesan en una instalación tienen el mismo ancho, por lo que no todos los elementos de triangulación podían ser utilizados para medir cualquier banda. En ocasiones, la banda de acero no es lo suficientemente ancha como para que la proyección de todos los puntos láser se realizara sobre su superficie, sino que algunos de estos puntos se proyectaban fuera de la banda y no podían ser utilizados para medir su planitud.

Para resolver estas limitaciones, la primera decisión de implementación adoptada fue colocar, tanto los proyectores de puntos láser como las cámaras lineales, sobre componentes móviles. El objetivo de esta decisión era eliminar las dos limitaciones que presentaba el sistema precedente. Por un lado, el sistema sería capaz de seguir los movimientos laterales de la banda, por lo que cada elemento de triangulación muestrearía siempre la misma fibra. Y, por otro, independientemente del ancho de la banda a procesar se podían utilizar todos los elementos de triangulación, ya que dichos elementos siempre se podían recolocar de manera uniforme sobre el ancho de la banda para que todos los puntos láser fueran proyectados sobre su superficie.

Uno de los principales sistemas de medición de planitud que implementa estas soluciones es Rometer (ver sección 2.5.2.1). Sin embargo, la utilización de partes móviles genera dos nuevos problemas. En primer lugar, el seguimiento automatizado de una fibra de la superficie de la banda, teniendo en cuenta los movimientos horizontales de la misma cuando se desplaza por el tren, es muy complejo y difícil de calibrar. En segundo lugar, el sistema necesita un cierto tiempo desde que detecta que debe desplazarse hasta que se estabiliza sobre la misma fibra de la banda para poder continuar tomando mediciones, haciendo que el seguimiento lateral de una fibra sea difícil y lento.

A finales de la década de 1990 se desarrollan nuevos sistemas que permiten un seguimiento lateral de las fibras de la superficie de la banda sin los problemas

introducidos por las partes móviles de los sistemas predecesores. La solución adoptada fue proyectar una línea láser sobre la superficie de la banda, que era adquirida por una cámara matricial. De esta forma el sistema captura el perfil de la superficie de la banda de forma continua, no sólo en una secuencia de puntos. Una vez extraídas las coordenadas de la proyección de la línea láser sobre la superficie de la banda se obtiene un perfil virtual de la banda. En este caso, el seguimiento de las fibras debido al movimiento horizontal de la banda se realiza a través de *software* en lugar de mecánicamente. Sólo es necesario detectar los bordes del perfil adquirido y recolocar el número de fibras que se están midiendo sobre el mismo. El sistema más destacado basado en esta técnica es ShapeFlex (ver sección 2.5.2.6).

También a finales de la década de 1990 y a principios de la década de 2000 se desarrollan sistemas basados en otras técnicas ópticas para la medición de planitud de bandas de acero, tales como patrones de Moiré, utilizados por VTT (ver sección 2.5.2.4), o luz estructurada, utilizada en TopPlan (ver sección 2.5.2.8). En ambos casos se proyecta un patrón de luz sobre la superficie de la banda y se miden las diferencias de fase en dicho patrón para calcular la elongación de las fibras. Los sistemas basados en estas técnicas requieren unas condiciones de iluminación muy estrictas, además, su coste de instalación y mantenimiento es muy elevado en comparación con los sistemas mencionados anteriormente.

2.5.2. Sistemas industriales de medición de planitud

El equipamiento necesario para la medición avanzada en los procesos de fabricación de productos planos de acero de alta calidad ha de satisfacer requisitos muy exigentes, entre los que destacan:

- *Precisión elevada en la medida.* Es un requisito indispensable para poder realizar un control preciso además de poder documentar de forma exacta los parámetros de calidad del sistema.
- *Dinámica elevada.* Es la base para sistemas de control en tiempo real.
- *Capacidad de integración elevada.* El sistema debe de ser, en términos mecánicos, lo más flexible posible para que pueda ser integrado en trenes y líneas industriales de producción ya construidas (para las que en principio no se ha previsto en su diseño la instalación del equipamiento en cuestión). Además, debe de poder ser integrado en los subsistemas de control automático del resto de dispositivos de la instalación, así como disponer de una interfaz flexible capaz de adaptarse al resto de sistemas existentes.
- *Disponibilidad elevada.* Uno de los requisitos fundamentales es que el sistema sea lo más estable posible.

- *Mantenimiento mínimo.* El proceso de calibración del sistema debe de ser simple y consumir el menor tiempo posible. Además, debe disponer de herramientas de diagnóstico fáciles de utilizar. También es fundamental que el número de componentes del sistema que puedan sufrir desgaste sea mínimo.

Los sistemas industriales de medición de planitud reconstruyen tridimensionalmente la forma de las bandas de acero a partir de la medición de varias fibras longitudinales de sus superficies para obtener, entre otras características descriptivas, su planitud.

En las secciones siguientes se describen los sistemas industriales más destacados para la medición de planitud.

2.5.2.1. Rometer

Rometer [Mairy *et al.*, 1988], desarrollado por *IRM Group*, es uno de los primeros sistemas de medición de planitud *on-line* y sin contacto disponibles para la industria del acero. Su principio de funcionamiento se basa en una técnica de triangulación óptica, proyectando puntos láser sobre la superficie del material a medir.

Las primeras implementaciones, Rometer 5, pueden medir la longitud de cinco fibras de la superficie de la banda. Para ello se proyectan cinco puntos láser sobre la superficie de la misma y, aplicando la técnica de integración, se calculan a partir de estas longitudes los índices de planitud de la banda.

Las últimas versiones del sistema, Rometer F100 y Rometer F200, pueden medir la longitud de hasta quince fibras de la superficie de la banda basándose en un principio que el fabricante denomina *3-Plane*. Mediante este principio, la longitud de cada una de las fibras se mide utilizando tres puntos láser proyectados sobre la superficie de la banda (alineados en la dirección de avance del material y separados 50 milímetros entre sí). El sistema adquiere medidas simultáneas de los tres puntos láser de cada fibra cada vez que la banda avanza 50 milímetros por el camino de rodillos. Para cada fibra, las tres mediciones se introducen en un sistema de tres ecuaciones (movimiento vertical de la banda, rotación de la banda y planitud) a partir del cual se obtiene el valor de planitud. Las variaciones sucesivas en la amplitud de onda de la fibra se integran para calcular la longitud de cada fibra y, finalmente, se obtienen los índices de planitud de la banda procesada.

Habitualmente el sistema utiliza la métrica *I-Units*, aunque de forma opcional el cliente puede solicitar que éste opere con otras métricas de planitud.

2.5.2.2. LMS shapemeter

LMS shapemeter, o medidor de forma basado en LMS (*Laser Measurement Sensor*), es un tipo de sistemas de medición de planitud *on-line* que no precisa de contacto físico con la superficie del material a medir.

Scantron Industrial Products Ltd. comercializa una versión de este tipo de sistemas que puede utilizar siete u once sensores de distancia láser para medir la altura de la superficie de la banda desde una posición fija de referencia, basándose en el principio de triangulación. Para ello utiliza, además de emisores de diodos láser, cámaras lineales con sensores CCD (*Charge-Coplued Device*) de alta resolución. Las alturas relativas de cada fibra de la banda son procesadas de forma similar a como lo hace el sistema Rometer (ver sección 2.5.2.1) obteniendo índices *I-Units* de planitud de las bandas.

Por su parte, *LAP GmbH Laser Applikationen* comercializa un medidor de planitud también basado en sensores de distancia láser, denominado Leveler-Check, y que también utiliza la técnica de triangulación para medir la distancia desde un eje de referencia a la superficie de la banda. Aplicando la técnica de integración a las sucesivas medidas de altura obtenidas, el sistema es capaz de calcular la planitud de la banda en *I-Units*, además de mostrar su mapa topográfico.

2.5.2.3. Stressometer

Stressometer [ABB, 1997] es un medidor de planitud *on-line* desarrollado por *ABB Group* que se basa en una técnica de medición con contacto para obtener la elongación de las fibras de las bandas.

Este sistema fue el primer medidor de planitud del mundo, instalado en una línea industrial en Kingstong, Canadá, en el año 1967.

El elemento principal de este sistema es un rodillo sensible a la presión que ejerce el material al desplazarse por la instalación industrial y que tiene en cuenta que las zonas de la banda con ondulaciones ejercerán menos presión sobre el mismo.

La versión comercial actual se denomina Stressometer 7.0 FSA y es capaz de generar cuatro mediciones de presión de la sección transversal de la banda por cada revolución del rodillo. Para medir la presión que ejerce la banda en un punto determinado sobre el rodillo se utiliza un dispositivo basado en la tecnología Pressductor®. Se trata de un transductor que genera una señal eléctrica al detectar cambios en el campo electromagnético cuando sobre éste se está aplicando una fuerza mecánica. Este principio de funcionamiento tiene su origen en un fenómeno metalúrgico, denominado efecto magneto-elástico, según el cual las propiedades magnéticas de un material se ven afectadas por la fuerza mecánica aplicada sobre el mismo.

2.5.2.4. VTT

VTT Electronics posee un sistema de medición de planitud *on-line* y sin contacto descrito exhaustivamente en la tesis doctoral [Paakkari, 1998], basado en la técnica de sombreado de Moiré (ver sección 3.2.2.3).

Esta técnica se basa en un fenómeno físico que se produce cuando se superponen dos patrones de luz, obteniéndose un nuevo patrón como resultado de la interferencia entre ambos, denominado patrón de interferencia o patrón de Moiré. Este nuevo patrón se proyecta sobre la superficie del material a medir. Los defectos de planitud se traducen en variaciones de forma del patrón. Un análisis en profundidad de estas variaciones permite determinar la forma y amplitud de los defectos de planitud del material observado.

Este sistema expresa la planitud medida en índices *Steepness*.

2.5.2.5. SIFLAT

SIFLAT [Spreitzhofer *et al.*, 2005] es un sistema de medición de planitud *on-line* desarrollado por *Siemens* que se basa en una técnica de medición sin contacto.

El principio de funcionamiento se basa en provocar una excitación periódica de la banda en su desplazamiento por la línea de fabricación y medir la amplitud de la excitación a través del ancho de la banda, como una medida de su distribución de tensión. La fuerza necesaria para excitar la banda se aplica por medio de un aspirador situado bajo el camino de rodillos. Un modulador se abre y se cierra dejando pasar el flujo de aire a una frecuencia constante, obteniendo una excitación periódica del aire entre la banda y los sensores de distancia colocados sobre el camino de rodillos. La amplitud del movimiento vertical de la banda, debida a la excitación producida por el flujo de aire, se mide utilizando sensores de contracorriente (*eddy current sensors*). Las señales generadas por cada sensor son filtradas en tiempo real mediante la técnica FFT (*Fast Fourier Transformation*) para obtener la planitud de la superficie de la banda.

2.5.2.6. ShapeFlex

ShapeFlex [SHAPELINE, 2001] es un sistema de medición de planitud *on-line* y sin contacto desarrollado por *Shapeline AB* basado en el principio de triangulación óptica, proyectando una línea láser sobre la superficie del material a medir.

A partir de la proyección de la línea láser se puede muestrear cualquier punto de la superficie del material, a diferencia de lo que ocurre en otros sistemas de medición de planitud, como por ejemplo Rometer (ver sección 2.5.2.1) en el que la medición de la superficie se realiza de forma discreta a través del ancho de

la banda. Esta cualidad permite detectar cambios muy pequeños en la planitud del producto observado.

El sistema de triangulación óptico basado en tecnología láser genera un mapa topográfico tridimensional de la superficie de la banda y es evaluado de acuerdo al estándar EN-10029,[4] obteniendo perfiles de planitud en *I-Units*.

Los posibles errores de medición introducidos por la vibración de la banda en su avance por el camino de rodillos son eliminados gracias a un analizador de frecuencia que actúa en una fase de preprocesamiento sobre las mediciones obtenidas.

Tras la evaluación de los datos medidos se calculan resúmenes estadísticos de los mismos y se almacenan para su posterior tratamiento por los ingenieros de proceso de la instalación industrial.

2.5.2.7. StripPLAN

StripPLAN [CSM, 2005] es un sistema de medición de planitud *on-line* desarrollado por el *Centro Sviluppo Materiali* que se basa en una técnica de medición directa y sin contacto de la longitud de las fibras de la superficie del material a inspeccionar.

Este sistema posee dos variantes: una desarrollada para superficies mates, por ejemplo para acero laminado en caliente, y otra desarrollada para superficies brillantes, por ejemplo para acero laminado en frío.

La variante del sistema para superficies mates se basa en la proyección de dos líneas, generadas por una fuente de diodos LED (*Light-Emitting Diode*), de forma transversal sobre la superficie de la banda a medir. Una cámara detecta las líneas sobre la banda, que están más o menos alejadas entre sí dependiendo de los defectos de planitud que presente la misma. Este hecho permite al sistema determinar el ángulo que forma cada fibra con el plano de proyección de las dos líneas aplicando relaciones trigonométricas básicas.

La variante del sistema para superficies brillantes se basa en el fenómeno de reflexión de la luz de una línea, también generada por una fuente de diodos LED, de forma transversal sobre la superficie de la banda a inspeccionar. Una cámara observa la desviación de la luz proyectada debida a la desalineación del plano banda-cámara. El sistema detecta esta desviación y la mide, a partir de la cual determina el ángulo que forma cada fibra con el plano de proyección de la línea.

En ambas variantes el sistema mide de manera directa el ángulo que forma la sección transversal de la banda en un momento determinado con el plano de proyección de las líneas. De esta manera, los efectos de desplazamiento y vibración

[4] Estándar EN-10029:1991. *Specification for tolerances on dimensions, shape and mass for hot rolled strip plates* 3 *mm thick or above* (tolerancias dimensionales sobre la forma y sobre la masa en chapas de acero laminadas en caliente de espesor igual o superior a 3 milímetros).

tienen una influencia mínima sobre el cálculo de la elongación relativa de cada una de las fibras que se realiza a continuación. A partir de estas elongaciones, el sistema expresa en *I-Units* la planitud medida.

2.5.2.8. TopPlan

TopPlan [Mueller, 2002], [Börchers, 2002], [Jelali *et al.*, 2002] es un sistema desarrollado y comercializado bajo licencia de *IMS Messsysteme GmbH* para la medición *on-line* y sin contacto de la forma topográfica y, en consecuencia, de la planitud de productos planos, basado en la técnica de luz estructurada (ver sección 3.2.2.2).

La técnica de luz estructurada consiste en proyectar un patrón de líneas sobre la superficie del material a inspeccionar y analizar las deformaciones que se producen en dichas líneas debido a cambios de altura, que pueden indicar la presencia de defectos de planitud.

A partir de la medición de alturas de cada una de las fibras de la superficie de la banda en numerosos puntos de la misma, el sistema aplica la técnica de integración y calcular su elongación para, finalmente, expresar la planitud en *I-Units*.

2.5.2.9. Resumen

La tabla 2.1 muestra la arquitectura de, entre otros, los sistemas de medición de planitud descritos en las secciones anteriores.

Como se puede observar, casi la totalidad de los sistemas analizados utiliza técnicas de medición sin contacto con la superficie del material a inspeccionar. Además, también se puede observar que la mayoría de los sistemas se basan en un principio de funcionamiento óptico. De todos estos sistemas, la principal característica que se puede extraer es que un elevado porcentaje requiere el uso de un sensor de imagen matricial para obtener la información necesaria para la medición de la planitud.

	Tipo		Base		Iluminación					Sensor				
	Sin contacto	Con contacto	Mecánica	Óptica	Sin iluminación	Puntos láser	Línea láser	Línea diodos LED	Luz estructurada	De presión	De proximidad	CCD Lineal	CCD Matricial	
ROMETER (1988)	■	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	■	□	
OptoFlat XAM (1991)	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	■	
LMS shapemeter (1996)	■	□	□	■	□	■	□	□	□	□	□	□	■	
Stressometer (1997)	□	■	■	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	
VSPROF (1997)	■	□	□	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	
VTT (1998)	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	■	
SIFLAT (1999)	■	□	■	□	■	□	□	□	□	□	■	□	□	
ShapeFlex (2001)	■	□	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□	■	
StripPLAN (2002)	■	□	□	■	□	□	□	■	□	□	□	□	■	
TopPlan (2003)	■	□	□	■	□	□	□	□	■	□	□	□	■	

Tabla 2.1: Comparativa de sistemas de medición de planitud.

Capítulo 3

Visión por computador en la reconstrucción 3D

En este capítulo se presenta una introducción tanto a los sistemas como a las técnicas de visión por computador que permiten obtener información tridimensional a partir de imágenes bidimensionales adquiridas de una escena. Se hace especial hincapié en las técnicas ópticas, y dentro de éstas en las activas, ya que son las más interesantes desde el punto de vista de la reconstrucción tridimensional y las más utilizadas en el ámbito industrial. Además, se estudian las limitaciones que pueden aparecer al aplicar estas técnicas para la reconstrucción tridimensional de una escena. Tras describir brevemente los elementos que componen un sistema de visión por computador, se presentan los modelos matemáticos que describen el comportamiento de una óptica y se analizan las distorsiones que ésta puede aplicar a los rayos de luz procedentes de una escena. A continuación, se estudian el proceso de formación de la imagen y los modelos matemáticos utilizados para describir el comportamiento físico y óptico de la cámara de un sistema de visión. Finalmente, se presenta una clasificación de las diferentes técnicas de calibración de la cámara de un sistema de visión y se describen los principales métodos de calibración propuestos en la literatura y utilizados actualmente, así como un resumen comparativo de los mismos.

3.1. Conceptos generales

La visión por computador, también denominada visión artificial, visión de máquina, visión de robot, visión computacional, análisis de imágenes o interpretación de escenas, es el proceso de extracción de información del mundo real a partir de imágenes utilizando como herramienta un computador.

3.1.1. Sistemas de visión por computador

Desde un punto de vista técnico, un sistema de visión por computador es un sistema autónomo que realiza alguna de las tareas que el sistema de visión

humano es capaz de realizar [Nevatia, 1982]. Este sistema es capaz de extraer o deducir la estructura y las propiedades del mundo tridimensional a partir de una o más imágenes.

Proporcionar a un computador la capacidad de emular el efecto de la visión humana a través de un sistema de percepción electrónico no es una tarea sencilla. El principal obstáculo se encuentra en que el ojo humano percibe la luz reflejada por los objetos en un espacio de tres dimensiones (3D), mientras que los computadores tratan de analizar estos objetos a partir de proyecciones en imágenes de dos dimensiones (2D). La reducción de una dimensión produce la pérdida de gran cantidad de información, lo que eleva notablemente la dificultad del proceso de visión [Sonka *et al.*, 1993]. Las imágenes manejadas por el computador son bidimensionales debido a que el proceso de muestreo de la escena del mundo real se realiza, normalmente, a través de una rejilla rectangular, donde cada uno de sus elementos se conoce como píxel (*picture element*). Cada píxel puede almacenar valores de un tipo concreto, dependiendo del formato de representación de la imagen.

Los componentes principales de un sistema de visión por computador son un sensor de imagen y un digitalizador. Un sensor de imagen es un dispositivo físico sensible en una banda del espectro de energía electromagnético que genera una señal eléctrica proporcional al nivel de energía incidente en un instante de tiempo. La señal eléctrica generada es, típicamente, una señal analógica, por lo que para obtener una imagen digital necesita ser procesada a continuación por un dispositivo digitalizador. Un digitalizador, más comúnmente conocido como tarjeta digitalizadora para un computador, es un dispositivo capaz de convertir la señal analógica de salida del sensor de imagen en una señal digital, que puede ser procesada por un computador.

La obtención de la imagen en un determinado instante de tiempo conlleva dos pasos. En primer lugar, el muestreo de la escena, definida de forma continua, obteniendo un conjunto discreto de puntos. En segundo lugar, la cuantización de la muestra, es decir, asignar a cada punto un valor discreto representativo del rango en el que varía la muestra.

3.1.2. Representación de imágenes digitales

La representación de la información de una imagen se puede realizar de varias formas: a través de imágenes de intensidad, de imágenes térmicas o de imágenes de rango.

Las imágenes de intensidad parten del concepto de luminosidad. En estas imágenes cada píxel representa el brillo o intensidad lumínica que ha detectado cada elemento fotosensible del sensor durante el período de exposición. Las imágenes térmicas, generadas por sensores infrarrojos, indican la temperatura que emite cada cuerpo de la escena. En este caso, cada píxel de la imagen representa el

valor de temperatura concreto que tiene un punto de la escena. Las imágenes de rango, también denominadas imágenes de alcance, imágenes de profundidad, mapas de profundidad, mapas XYZ o perfiles de superficie, son la forma más común de representar las coordenadas tridimensionales de los objetos de una escena. Los dispositivos capaces de realizar este tipo de mediciones se denominan sensores de rango (*range imaging sensors*). En las imágenes de rango cada píxel representa la distancia del punto de la escena a un sistema de referencia conocido. Si la referencia se toma con respecto a un sistema de coordenadas ortogonales situado en la escena, cada píxel suele representar una terna de valores que se corresponden con las coordenadas cartesianas absolutas de cada punto de la escena.

Independientemente del formato de representación, se tiene una matriz de puntos de dimensiones $M \times N$, es decir, una imagen digital, que debe ser tratada por un computador.

Como se detalla en la sección siguiente, sección 3.1.3, las imágenes, monocromáticas o en color, adquiridas por una o varias cámaras, deben ser segmentadas y mejoradas para poder extraer características de interés.

La segmentación está basada en dos principios fundamentales: discontinuidad, o segmentación orientada a bordes, y similitud, o segmentación orientada a regiones [Young y Fu, 1986]. Esta operación implica un procesamiento que supone una transformación de la imagen original, de forma que los valores de los píxeles originales son modificados mediante ciertas funciones de transformación u operadores. A veces ocurre que la imagen no es lo suficientemente buena para extraer la información necesaria de forma adecuada, por lo que es necesario disponer de ciertas técnicas de mejora de la calidad de la imagen original.

Las técnicas de mejora de la calidad de una imagen se dividen en dos grandes grupos: suavizado, encaminado a la supresión del ruido introducido durante la captura de la imagen, y realzado, encaminado a eliminar falsos reflejos y sombras. Una vez detectados los bordes o localizadas las diferentes regiones de la imagen, es decir, sus elementos de interés, el siguiente paso consiste en extraer las propiedades o atributos que serán suministrados al componente *software* del sistema de visión.

3.1.3. Etapas en un proceso de visión artificial

Las etapas de un proceso de visión artificial se suelen clasificar en dos grupos. En un primer grupo se encuentran las etapas que ejecutan métodos de bajo nivel y, en un segundo grupo, las que realizan un procesamiento de la imagen de alto nivel o un análisis a nivel de escena. El objetivo de las etapas de bajo nivel es obtener las características más básicas de la imagen, como bordes, regiones y otros atributos simples. En el caso del procesamiento de alto nivel, se recogen las características extraídas en el nivel inferior y se construye una descripción

de la escena.

A continuación, se describen de forma breve las etapas involucradas en este proceso. Dichas etapas son:

- *Adquisición de la imagen.* En esta etapa se captura una proyección en dos dimensiones de la luz reflejada por los objetos de la escena.
- *Preprocesamiento.* Se realizan tareas de eliminación de ruido y/o realce de la imagen.
- *Segmentación: detección de bordes y regiones.* Permite separar los diferentes elementos de la escena.
- *Extracción de características.* Se obtiene una representación formal de los elementos segmentados en la etapa anterior.
- *Reconocimiento y localización.* Mediante técnicas, como pueda ser la triangulación, se localiza al objeto en el espacio 3D.
- *Interpretación.* A partir de la información obtenida en las etapas previas y del conocimiento acerca del entorno se interpreta la escena.

La figura 3.1 muestra un diagrama de las etapas a considerar, de forma general, en un proceso de visión artificial.

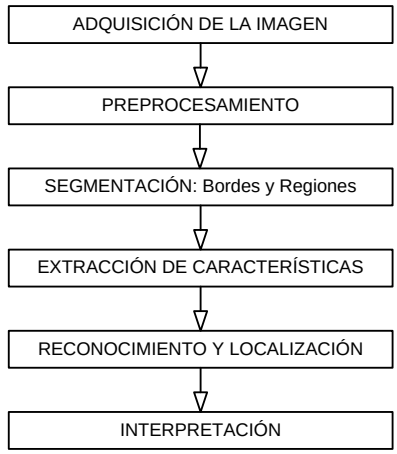


Figura 3.1: Etapas de un proceso de visión por computador.

3.1.4. Técnicas de visión por computador

La obtención de información 3D de una escena se puede realizar mediante técnicas muy diversas. Estas técnicas se dividen, según [Rocchini *et al.*, 2001], en dos grandes grupos: adquisición con contacto y adquisición sin contacto. Las técnicas de adquisición con contacto se dividen a su vez en técnicas destructivas, como el laminado, y en técnicas no destructivas, como los brazos articulados. Por su parte, las técnicas sin contacto se subdividen en técnicas transmisivas y técnicas reflectivas. Además, las técnicas reflectivas agrupan, por un lado, a las técnicas no ópticas, como radar y sonar, y por otro, a las técnicas ópticas. Por tanto, las técnicas ópticas de visión artificial son un subconjunto dentro de las técnicas que se pueden utilizar para obtener información tridimensional de una escena. En la figura 3.2 se muestra una clasificación de las diversas técnicas que pueden ser utilizadas en la adquisición de información 3D de una escena.

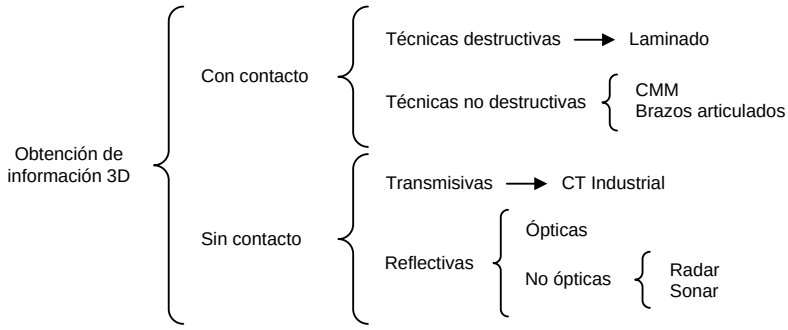


Figura 3.2: Clasificación de técnicas de adquisición de información 3D de una escena.

Las técnicas ópticas se pueden clasificar en dos grupos según las características de la fuente o fuentes de luz utilizadas para iluminar la escena [Besl, 1988]: técnicas ópticas pasivas y técnicas ópticas activas. En las técnicas pasivas la geometría de las fuentes de iluminación con respecto a la escena y al sensor no se tiene en cuenta a la hora de calcular las coordenadas tridimensionales de los objetos. En cambio, en las técnicas activas se utilizan fuentes de luz con unas características muy específicas y su posición influye directamente a la hora de determinar dichas coordenadas. A esta fuente de iluminación se la suele denominar fuente de luz activa para distinguirla del resto de iluminación de la escena. En el ámbito industrial, las técnicas ópticas activas son las que mejores resultados ofrecen a la hora de obtener imágenes de rango.

Las técnicas ópticas también se pueden clasificar en función de las caracterís-

ticas del sensor que escanea la escena [Bradshaw, 1999]:

- *Técnicas basadas en adquisición puntual.* Sólo es posible obtener un único punto de la escena en cada ciclo de muestreo.
- *Técnicas basadas en adquisición lineal.* Se obtienen una serie de puntos de la escena al mismo tiempo, correspondientes a una línea.
- *Técnicas basadas en adquisición matricial.* Proporcionan la forma más flexible de adquisición de una escena. La información obtenida se organiza en una cuadrícula o matriz (*grid*).
- *Técnicas basadas en múltiple vista.* Las coordenadas tridimensionales de un punto se obtienen a partir de múltiples imágenes de la escena que son capturadas simultáneamente.

En [Jarvis, 1993] y [Blais, 2004] se publican estudios comparativos de las principales técnicas de visión por computador para la obtención de información tridimensional. Estos trabajos se centran principalmente en la obtención de imágenes de rango utilizando técnicas ópticas activas (ver sección 3.2.2), por ser, como se ha mencionado anteriormente, las que obtienen mejores resultados en el ámbito industrial.

No existe una técnica de visión óptima para la obtención de información tridimensional. El tipo de problema define qué técnicas deberían ser utilizadas para obtener unos resultados satisfactorios y cuáles deberían ser descartadas. En términos generales, esta selección se hace en base a criterios globales del problema, tales como el coste del sistema de visión y la disponibilidad de espacio para su ubicación, entre otros. También se pueden definir varios parámetros objetivos como apoyo para la selección de la técnica más adecuada. De entre estos parámetros los más destacables son:

- *Precisión*: indica la proximidad de la medida proporcionada por el sistema de visión al valor de la propiedad medida.
- *Resolución*: indica la magnitud más pequeña de la medida que puede detectar el sistema.
- *Sensibilidad*: indica el cambio de valor más pequeño que el sistema es capaz de detectar en la propiedad medida.
- *Incertidumbre*: define un rango centrado en la medida proporcionada por el sistema dentro del cual se encuentra, con una determinada probabilidad estadística, el valor real de la propiedad medida.
- *Error absoluto*: indica el valor absoluto de la diferencia entre la medida proporcionada por el sistema y el valor real de la propiedad medida.

Además, es necesario tener en cuenta uno de los principios esenciales del método científico:

- *Reproducibilidad*, que indica el grado de similitud entre sucesivas mediciones de la misma magnitud realizadas bajo diferentes condiciones de medida,

y uno de los aspectos básicos de cualquier sistema de medición:

- *Repetibilidad*, que indica el grado de similitud entre sucesivas mediciones de la misma magnitud realizadas bajo las mismas condiciones de medida.

En el caso de que el conjunto de parámetros indicado no sea suficiente para seleccionar la técnica óptica más adecuada para el problema en estudio, se pueden utilizar otros parámetros más específicos de los sistemas de visión, tales como campo de visión, profundidad de campo, tamaño de la imagen y frecuencia de muestreo, entre otros.

3.2. Técnicas ópticas

Como se ha indicado anteriormente, las técnicas ópticas se suelen clasificar en dos grupos atendiendo a las características de las fuentes de luz utilizadas para iluminar la escena. Aún existiendo esta división se ha de tener en cuenta que, tanto las técnicas ópticas pasivas como las técnicas ópticas activas, se ven afectadas por las condiciones de iluminación del entorno de trabajo. En la práctica, en todas las técnicas se controla la iluminación de la escena, aunque en el caso de las técnicas pasivas no es necesario conocer la ubicación de la fuente de luz ya que los algoritmos implicados en la misma no utilizan este dato. En la figura 3.3 se muestra una clasificación de las diferentes técnicas ópticas.

En las secciones siguientes se describen, de forma somera, las principales técnicas ópticas utilizadas para la adquisición de información 3D de una escena.

3.2.1. Técnicas pasivas

Las técnicas ópticas pasivas pueden ser aplicadas en un mayor número de situaciones que las técnicas ópticas activas. Sin embargo, al no utilizar una fuente de iluminación controlada el grado de incertidumbre con el que se realiza la correspondencia entre puntos de la escena y puntos de la imagen limitan, en muchas ocasiones, la exactitud de la medida.

A continuación se presentan la visión estéreo y la obtención de forma a partir de la sombra, a partir de la textura y a partir del movimiento, consideradas las principales técnicas ópticas pasivas.

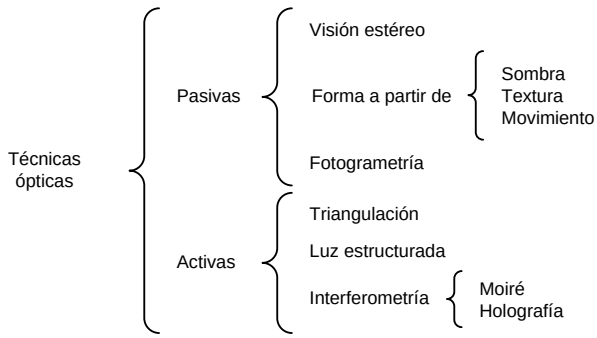


Figura 3.3: Clasificación de técnicas ópticas.

3.2.1.1. Visión estéreo

Las técnicas de visión estéreo por computador tratan de emular el sistema de visión humano, en el que se analizan las diferencias de la proyección de la escena en dos imágenes tomadas desde dos posiciones diferentes [López-Vallés *et al.*, 2006]. A las diferencias entre ambas imágenes se las denomina disparidad, y su análisis permite obtener la dimensión perdida en la proyección de la escena tridimensional en la imagen bidimensional [Gutiérrez y Marroquín, 2004].

En el caso de los seres humanos el cerebro es el encargado de combinar ambas imágenes y de calcular su disparidad.

En el caso de un sistema de visión por computador, el análisis de las imágenes adquiridas simultáneamente por dos sensores distanciados espacialmente debe permitir establecer una correspondencia entre los puntos de ambas imágenes y realizar el cálculo de la profundidad a partir de las diferencias de posición de un punto entre las dos imágenes.

El cálculo de la correspondencia se realiza a partir de algoritmos que tratan de localizar las proyecciones de un punto de la escena en las dos imágenes capturadas. La principal limitación en este cálculo es que un único píxel de una imagen no proporciona información suficiente para identificar el punto correspondiente en la otra. Las soluciones que aplican estos algoritmos son analizar los píxeles de su vecindad por medio de técnicas de correlación, detección y emparejamiento de bordes así como de segmentación de regiones [Sonka *et al.*, 1993], entre otras.

El cálculo de la profundidad se basa en el conocimiento de la geometría del sistema de visión por computador, especialmente en la posición que ocupa cada una de las cámaras en el espacio. En el caso de que las dos cámaras estén perfectamente alineadas, configuración ideal del sistema, para calcular las coordenadas tridimensionales de un punto de la escena se aplican relaciones entre

triángulos semejantes obtenidos de la geometría del sistema. En situaciones en que la geometría del sistema no cumpla la configuración ideal se debe modelar la transformación que liga los sistemas de coordenadas de ambas cámaras, o bien aplicar algún algoritmo de rectificación a las dos imágenes que proporcione las mismas imágenes en la configuración ideal [Jiménez, 1999].

3.2.1.2. Forma a partir de la sombra, la textura y el movimiento

En esta sección se describen tres de las soluciones más utilizadas para la extracción de la forma de los objetos de una escena [Sonka *et al.*, 1993]:

- Forma a partir de la sombra (*shape from shading, SFS*).
- Forma a partir de la textura (*shape from texture, SFT*).
- Forma a partir del movimiento (*shape from motion, SFM*).

Además de estas soluciones, la forma de los objetos de una escena se puede obtener a partir del contorno (*shape from contour*) [Brady y Yuille, 1984], a partir del enfoque (*shape from focus*) [Krotkov, 1989] y a partir de la igualdad (*shape from vergence*) [Krotkov *et al.*, 1990].

En cualquier caso, suele ser frecuente el uso de estas técnicas de forma combinada para obtener información tridimensional acerca de los objetos de una escena. Uno de los ejemplos más recientes se puede observar en [White y Forsyth, 2006], en el que se reconstruye la forma de superficies deformadas a partir de una sola imagen combinando técnicas de obtención de forma a partir de la sombra y a partir de la textura.

Se denomina fotometría a las técnicas que tratan de obtener información tridimensional de objetos a partir de las sombras que producen las fuentes de iluminación que inciden sobre sus superficies. Estas técnicas proporcionan indicaciones acerca de la localización de bordes ocultos y de la orientación de superficies próximas. Además, las propiedades generales de las sombras se utilizan en la deducción de la profundidad de los puntos de la escena. En [Horn y Brooks, 1989] se publica un estudio de los trabajos más significativos desarrollados en estas técnicas, y en [Zhang *et al.*, 1999] se realiza un estudio comparativo de seis algoritmos SFS comúnmente utilizados, con el objeto analizar el rendimiento de cada uno de ellos sobre un conjunto de imágenes sintéticas.

Las técnicas que tratan de obtener información tridimensional de objetos a partir de la textura de sus superficies se basan en dos efectos que se producen al observar un objeto en el que la textura de su superficie está descrita por un patrón regular, [Blostein y Ahuja, 1989]. El primer efecto es que el ángulo con el que se observa la superficie puede causar una distorsión en las unidades de textura mínimas (*texture element, texel*) de la superficie del objeto. El análisis

de esta distorsión en un sistema de visión por computador permite determinar el ángulo que forman las superficies de los objetos con el sensor del sistema. El segundo de los efectos es que el tamaño relativo de los elementos de textura mínimos varía de acuerdo a su distancia con respecto al observador. El análisis de esta variación en un sistema de visión por computador permite determinar la profundidad de cada uno de los puntos de la escena a partir de la imagen bidimensional capturada, habitualmente utilizando descriptores de Fourier [Bajcsy y Lieberman, 1976]. En el caso de que las superficies de los objetos a reconstruir no presenten un patrón de textura regular, la solución que se suele utilizar es proyectar sobre los objetos una fuente de luz que sea capaz de generar en los mismos una sensación de textura. De esta forma, la técnica ya no sería una técnica óptica pasiva sino activa y recibiría el nombre de luz estructurada (ver sección 3.2.2.2).

Las técnicas de obtención de información tridimensional a partir del movimiento se basan en el análisis del movimiento relativo de los objetos de la escena con respecto al sensor del sistema de visión, así como en la traslación y rotación relativas de dichos objetos [Weng *et al.*, 1991]. A partir de este análisis se puede obtener la forma de los objetos y la profundidad de cada uno de los puntos de la escena. Este análisis se basa en el hecho de que, si el objeto a reconstruir es un cuerpo rígido, los puntos de su superficie que estén más próximos al sensor se moverán a una velocidad menor que los puntos que estén más alejados de éste. Dado que la velocidad será proporcional al movimiento del objeto y a la distancia de su superficie con el sensor, si se conoce con precisión el movimiento del objeto es posible estimar una imagen de rango a partir de cada uno de los puntos de la escena. Estas técnicas tienen la limitación de que no pueden ser aplicadas con objetos flexibles o que cambien de aspecto a lo largo del tiempo.

3.2.2. Técnicas activas

Las técnicas ópticas activas son consideradas las más interesantes desde el punto de vista de la reconstrucción tridimensional de una escena, dado que consiguen mayor precisión que las técnicas ópticas pasivas. Sin embargo, su implementación resulta mucho más costosa debido, entre otros factores, a las estrictas condiciones de iluminación necesarias. Aún así, son las más utilizadas en el ámbito industrial.

3.2.2.1. Triangulación

La técnica de triangulación es la técnica más simple que se puede utilizar para obtener información tridimensional de una escena a partir de puntos fácilmente reconocibles en la misma. Para que ciertos puntos de la escena se puedan reconocer de forma sencilla se suele proyectar sobre ésta un patrón de luz estructurada.

El análisis de la deformación que sufre el patrón al proyectarse sobre la superficie de los objetos de la escena permite extraer información tridimensional de éstos. Los patrones que se utilizan en esta técnica son, entre otros, un punto o una línea generados a partir de una fuente de luz láser.

Esta técnica se basa en el cálculo de triángulos semejantes entre los elementos sensor óptico, emisor de luz y objeto de la escena. El proceso de cálculo se puede realizar de múltiples formas atendiendo a las características y posición de cada uno de los elementos del sistema, aunque siempre se realiza estableciendo una relación de semejanza entre dos triángulos que comparten un vértice común: el punto focal de la cámara (ver sección 3.4.2). Esta relación se puede observar en la figura 3.4, donde el punto de la escena $P_{\mathrm{W}}(X, Y, Z)$ se proyecta en la imagen como el punto $P_u(x, y)$.

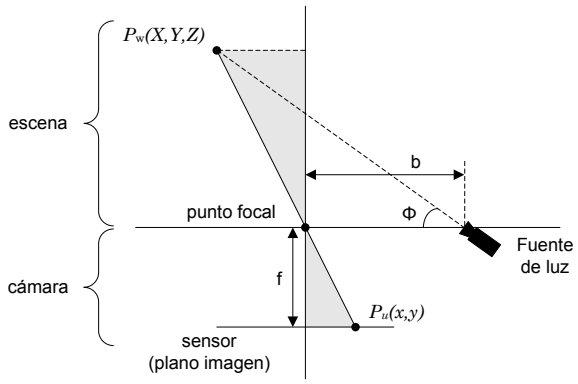


Figura 3.4: Relación de triángulos semejantes en la técnica de triangulación.

Por la relación existente entre triángulos semejantes, ecuaciones (3.1) y (3.2), se pueden calcular las coordenadas del punto $P_{\mathrm{W}}(X, Y, Z)$ aplicando las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5), donde f es la distancia focal de la cámara y ϕ es el ángulo que forma la fuente de luz con respecto al plano de la cámara. (ver figura 3.4).

$$x \times Z = X \times f \tag{3.1}$$

$$y \times Z = Y \times f \tag{3.2}$$

$$X = \frac{b}{f \times \cot(\phi - x)} \times x \tag{3.3}$$

$$Y = \frac{b}{f \times \cot(\phi - x)} \times y \tag{3.4}$$

$$Z = \frac{b}{f \times \cot(\phi - x)} \times f \tag{3.5}$$

En [Hartley y Sturm, 1997] se presenta una descripción exhaustiva de la técnica de triangulación, así como de la solución al problema de correspondencia que genera entre puntos de la imagen y puntos de la escena.

3.2.2.2. Luz estructurada

Las técnicas ópticas de luz estructurada, también denominadas de luz codificada, utilizan patrones de luz, más o menos complejos, proyectados sobre la escena para obtener información tridimensional de ésta. En estas técnicas, la información tridimensional se obtiene analizando las deformaciones de la proyección del patrón sobre la escena con respecto al patrón original proyectado [Battle *et al.*, 1998]. El problema de la correspondencia entre los puntos de la imagen y los puntos del patrón original se resuelve de forma sencilla dado que los patrones de luz están codificados.

Existen diversas estrategias para codificar los patrones a proyectar sobre una escena [Salvi *et al.*, 2003]: multiplexado temporal, vecindad espacial y codificación directa. Las estrategias de multiplexado temporal proyectan una secuencia de patrones diferentes sobre la escena a lo largo del tiempo, por lo que la estructura de cada patrón puede ser muy simple. En esta estrategia se suelen utilizar códigos binarios, códigos n-arios y códigos Gray, entre otros. La codificación basada en la vecindad espacial crea un código para cada zona del patrón a proyectar a partir de los códigos asignados a sus vecinos. Los métodos de codificación más utilizados en este caso son secuencias de Bruijn y M-arrays. En el caso de la codificación directa, se define un código para cada píxel a partir de paletas de niveles de gris o de color.

3.2.2.3. Interferometría

Las técnicas interferométricas hacen interferir la luz emitida por los objetos de la escena con la generada por otras fuentes de iluminación. Por tanto, en la cámara del sistema de visión se obtiene un patrón de interferencia. La holografía convencional, la holografía conoscópica y las técnicas interferométicas basadas en láser y en el efecto *Speckle* son las más utilizadas actualmente.

Cada uno de los píxeles de la cámara de un sistema de visión convencional registra información acerca de la intensidad de la luz que incide en él. En el caso de la holografía se busca, además de esta intensidad, la fase de la luz

incidente [Guenther, 1990]. Los rayos procedentes de un punto de la escena no son focalizados a un punto concreto de la imagen sino que llegan a todo el plano de ésta, interfiriendo con los rayos de un haz de referencia, lo que genera un patrón de interferencia denominado holograma. Aunque con apariencia desordenada el holograma contiene información más completa de la escena que una fotografía ordinaria. Si los hologramas se generan a partir de luz incoherente, la técnica aplicada recibe el nombre de holografía conoscópica.

Finalmente, aunque no se trate en realidad de una técnica interferométrica, la técnica basada en patrones de Moiré suele clasificarse junto a éstas debido a que las imágenes obtenidas y los algoritmos de procesamiento necesarios para obtener información tridimensional de la escena son similares. Matemáticamente, un patrón de Moíré es un patrón interferencial de baja frecuencia que se produce cuando dos patrones de mayor frecuencia espacial se interponen [Blais, 2004]. El fenómeno de Moiré permite obtener información de todos los puntos de la escena a partir de una única imagen. Atendiendo a la forma en la que se genere el patrón de Moiré, se distinguen dos técnicas [Paakkari, 1998]: sombreado de Moiré y proyección de Moiré. En ocasiones también se utilizan variaciones o combinaciones de estas dos técnicas.

3.3. Limitaciones de las técnicas ópticas

Las técnicas ópticas obtienen información tridimensional de una escena a partir del análisis de una o varias imágenes adquiridas de dicha escena a través de un sensor del sistema de visión por computador. Este análisis requiere que las imágenes reúnan ciertas condiciones tanto de iluminación como de enfoque. Si estas condiciones no se cumplen, la precisión con la que se obtiene la información tridimensional de la escena se ve considerablemente reducida.

A continuación se describen las principales limitaciones que pueden aparecer al aplicar técnicas ópticas para la reconstrucción tridimensional de una escena [Bradshaw, 1999], referidas principalmente a técnicas de triangulación activa, aunque estas limitaciones se pueden encontrar al aplicar la mayoría de técnicas ópticas descritas anteriormente.

- *Iluminación adversa.* En los sistemas de visión por computador una iluminación incorrecta de la escena limita la obtención de información tridimensional de la misma. Si la escena está insuficientemente iluminada, a partir de la imagen capturada por el sensor será difícil extraer sus características. Si la escena está muy iluminada, el contraste en la imagen obtenida se reduce considerablemente, dificultando también la extracción de características de la escena.

  La solución a este problema suele pasar por ajustar el tiempo de exposición

de la cámara para controlar la cantidad de luz que incide en el sensor de la misma. También se pueden utilizar filtros específicos que impidan el paso de ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético al sensor y sólo permitan el paso de las necesarias para la reconstrucción de la escena, es decir, las longitudes de onda del patrón proyectado.

- *Oclusión.* La limitación más importante que presentan las técnicas ópticas, especialmente las basadas en triangulación activa y en luz estructurada, es la oclusión, producida principalmente en los bordes de los objetos o en cambios bruscos de la geometría de su superficie. Esta limitación se presenta de dos formas diferentes. La primera de ellas se denomina oclusión de cámara y se produce cuando, desde el punto de vista de la cámara, hay puntos de la escena que están ocultos por otros. La segunda recibe el nombre de oclusión de iluminación y se pone de manifiesto cuando existen ciertos puntos de la escena que producen sombras sobre otros, ocultando el patrón proyectado.

  Para evitar esta limitación, el diseño de la geometría del sistema de visión debe tener en cuenta las posibles oclusiones que se puedan producir y minimizarlas modificando la posición de la cámara y de las fuentes de iluminación. En caso de no poder eliminar todas las oclusiones con un diseño adecuado, se pueden utilizar varias cámaras y varias fuentes de iluminación para compensarlas.

- *Plegamiento de bordes.* En los bordes de los objetos parte de la luz del patrón proyectado sobre la escena se refleja y parte continúa su trayectoria recta al no entrar en contacto con la superficie del objeto. Este hecho motiva que la posición de un punto de la escena se calcule de forma errónea que, aplicado a todo el borde de un objeto, produce como resultado que dicho borde aparezca ligeramente plegado. El tamaño de este efecto es proporcional al ancho del patrón proyectado.

  La solución principalmente adoptada para reducir este efecto es utilizar una fuente de iluminación que pueda ser focalizada de forma muy precisa, es decir, que pueda ser proyectada en áreas muy pequeñas, como por ejemplo un láser.

- *Textura.* Los cambios bruscos de textura en la superficie de los objetos de la escena provocan un efecto similar al plegamiento de bordes, debido a que el patrón proyectado sobre la escena es reflejado con diferentes intensidades. Esta limitación suele aparecer sobre objetos que presentan defectos de fabricación o que contienen impurezas o suciedad.

  Los sistemas de visión por computador encargados de obtener información tridimensional de una escena cuyos objetos presentan múltiples cambios

de textura, utilizan técnicas de procesamiento de señales con el objetivo de filtrar las imágenes capturadas para reducir errores en las medidas.

- *Dispersión del patrón.* En caso de que la fuente de iluminación que proyecta el patrón sobre la escena lo haga con un elevado grado de paralelismo a algún objeto de la misma, el patrón se verá disipado sobre la superficie de dicho objeto, con lo que se dificulta la detección posterior del patrón sobre la imagen capturada por el sensor del sistema de visión.

  La solución a esta limitación pasa por reposicionar el proyector del patrón atendiendo a la geometría de los objetos del sistema.

- *Reflexión.* Si las superficies de los objetos son muy reflectantes, es posible que parte del patrón proyectado originalmente sobre la escena sea reflejado por la superficie de un objeto e ilumine otra parte de la escena (reflejo especular).

  La solución adoptada en los sistemas de visión para mitigar estos efectos es aplicar a la superficie de los objetos alguna capa de pintura que permita reducir su índice de reflexión.

- *Movimiento.* El movimiento de los objetos de la escena o del patrón proyectado sobre ésta puede ocasionar desenfoque en las imágenes adquiridas por la cámara del sistema de visión en el caso de que la frecuencia de muestreo del sensor sea relativamente baja en comparación con el movimiento de los objetos o del patrón. Este desenfoque provoca un efecto similar al del plegamiento de bordes durante el proceso de obtención de la información tridimensional de la escena a partir de las imágenes capturadas.

  Esta limitación está directamente relacionada con la iluminación adversa, ya que si se aumenta la frecuencia de muestreo del sensor para evitar el desenfoque, se reduce la cantidad de luz que incide en éste procedente de la escena.

3.4. Componentes de un sistema de visión por computador para la reconstrucción 3D

Un sistema de visión por computador para la reconstrucción de la forma tridimensional de una escena está compuesto por un conjunto de elementos. La distribución de estos elementos en el espacio, así como su distancia relativa con referencia a la escena, se denomina geometría del sistema de visión. Según las características de los elementos que forman el sistema de visión se establecerá una serie de restricciones que debe cumplir su geometría, definiendo un conjunto de configuraciones posibles. La elección de la geometría a implementar entre una

de las posibles configuraciones válidas se realiza en función de la naturaleza del problema y del entorno de instalación.

En las siguientes secciones se describen los elementos principales que componen un sistema de visión por computador.

3.4.1. Fuente de iluminación

La iluminación es la característica que utilizan las técnicas de visión por computador para extraer información de los objetos de una escena. La iluminación de una escena se puede realizar con luz natural o mediante la utilización de lámparas.

Las tecnologías de iluminación más comúnmente utilizadas son lámparas halógenas, lámparas fluorescentes, diodos LED y láser.

La luz láser posee ciertas particularidades, tales como coherencia espacial y temporal [Bachs *et al.*, 1988], que la diferencian claramente del resto de tecnologías de iluminación. Estas características indican que la luz láser es puramente monocromática, es decir, todas sus longitudes de onda se encuentran dentro de un rango muy pequeño y, además, se puede orientar y enfocar de forma muy precisa, permitiendo formar líneas o patrones utilizados en muchas de las técnicas de triangulación.

La utilización de dispositivos láser como fuente de iluminación requiere la utilización de medidas de seguridad adecuadas según la clasificación del dispositivo láser. En el apéndice D se muestran las distintas clases de láser existentes.

3.4.2. Cámara

La cámara de un sistema de visión por computador es el dispositivo que recibe la luz reflejada por la escena y la utiliza para generar imágenes. El elemento más importante de la cámara es su sensor, que está formado por una capa de material fotosensible que transforma la luz incidente en señales eléctricas.

El sensor puede estar construido en base a una tecnología analógica (cámaras de tubo) o en base a una tecnología digital (cámaras de estado sólido). La tecnología digital más utilizada actualmente para la construcción de sensores de imagen es CCD.

Además de la tecnología de fabricación, un aspecto importante del sensor de una cámara digital es su factor de forma. Los dos tipos básicos son lineal y matricial. Las cámaras lineales obtienen mucha menos información de la escena pero poseen una tasa de transferencia mucho más elevada que las cámaras matriciales.

Otros factores destacables del sensor de la cámara son su respuesta a las diferentes longitudes de onda, que indica la curva de sensibilidad de la cámara en el espectro; las dimensiones, que indican el número de píxeles con que genera

la imagen (número de píxeles en horizontal por número de píxeles en vertical); la configuración de la ganancia (contraste de la imagen) y del desplazamiento (brillo de la imagen); y, finalmente, el ruido que introduce el sensor en la imagen generada debido a las diferentes sensibilidades de cada elemento fotosensible básico.

3.4.3. Óptica

La óptica es uno de los elementos más importantes de cualquier sistema de visión. Su objetivo es concentrar la luz reflejada por los objetos de la escena en el sensor de la cámara para generar la imagen.

Las ópticas están formadas por un conjunto de lentes positivas o convergentes y negativas o divergentes, que aplican una transformación a la luz recibida de la escena, definida matemáticamente mediante una proyección perspectiva. Esta transformación consiste en una inversión y en un escalado de los objetos de la escena [Forsyth y Ponce, 2002]. En la sección 3.5 se describen los tres modelos más importantes que definen la transformación que aplica una óptica a la luz recibida.

Todas las ópticas están definidas por un conjunto de parámetros. El más importante es la distancia focal de las lentes, es decir, la distancia que separa el centro de la lente de su foco. También se pueden destacar la distancia de enfoque y la profundidad de campo, que contribuyen a la nitidez con la que el sensor de la cámara generará la imagen. Además, se debe tener en cuenta que la transformación perspectiva que realiza la óptica no es perfecta, sino que introduce cierta distorsión que deforma la imagen con relación a la escena original. Esta distorsión tiende a ser mayor cuanto menor es la distancia focal, y afecta en gran medida a los sistemas de visión que requieran una precisión elevada, por lo que es necesario medirla y corregirla.

Las distorsiones que introduce una óptica, también denominadas aberraciones ópticas, modeladas matemáticamente según la ley de Snell [Hoyer, 1989], se deben a las propiedades de refracción de las lentes que la componen. Aberraciones típicas son la distorsión radial, la distorsión descentrada o tangencial, la distorsión de prisma fino, la curvatura de campo, la aberración esférica, el astigmatismo, la coma y las aberraciones cromáticas, entre otras. La distorsión radial desplaza los puntos de la imagen radialmente a partir del centro, mientras que la distorsión tangencial los desplaza perpendicularmente a la línea radial. Las causas fundamentales que producen distorsiones en una óptica son un pulido defectuoso de la superficie de las lentes en el caso de la distorsión radial, una falta de alineación entre los componentes ópticos en el caso de la distorsión tangencial e imperfecciones en el diseño y ensamblaje de las lentes en el caso de la distorsión de prisma fino.

En la sección 3.5.4 se describe de forma más exhaustiva la distorsión introducida por una óptica.

Las ópticas con lentes esféricas, las que se han comentado hasta el momento, son las más comunes en cualquier sistema de visión. Sin embargo, en determinadas ocasiones este tipo de ópticas no representan la mejor opción para el sistema. Un ejemplo está en el problema de la diferencia entre la relación de aspecto del sensor de la cámara y la relación de aspecto del área de interés de la escena. Esta diferencia hace que se desperdicie cierto porcentaje de píxeles en las imágenes, por lo que no se aprovecha por completo la resolución del sensor de la cámara. Un tipo de óptica que permite solucionar este problema es un sistema de lentes anamórficas, aunque su utilización, como se comenta a continuación, introduce otro problema.

Una óptica basada en lentes anamórficas se caracteriza porque tiene diferentes distancias focales a lo largo de sus meridianos, es decir, el factor de aumento de la lente es mayor en una dirección que en otra. La característica fundamental de estas lentes es que consiguen que la distancia focal en el eje X sea totalmente independiente de la distancia focal en el eje Y. De esta forma, eligiendo los factores de aumento adecuados en uno y otro eje se puede expandir o contraer la región que forma el área de interés de la escena para que se exponga exactamente en la superficie del sensor de la cámara, eliminando los problemas derivados de la diferencia entre las relaciones de aspecto. Una consecuencia directa de la utilización de este tipo de ópticas es que la resolución de la imagen no es la misma en ambos ejes.

Además, la utilización de este tipo de ópticas tiene el inconveniente de que el proceso de modelado y compensación de las distorsiones que genera es mucho más complejo que en las ópticas basadas en lentes esféricas. Los modelos matemáticos que se utilizan para eliminar las distorsiones radiales y tangenciales en las ópticas con lentes esféricas no funcionan correctamente con las lentes anamórficas dado que estas últimas poseen dos planos principales: uno para el eje X y otro para el eje Y. El modelo matemático necesario para transformar coordenadas de la imagen en coordenadas tridimensionales utilizando lentes anamórficas es mucho más complejo que utilizando lentes esféricas [Blais y Beraldin, 1997].

3.4.4. Filtro

En el extremo de la óptica a través del cual entran los rayos de luz procedentes de la escena se puede colocar un elemento de cristal, o de otro material transparente, que filtre la luz antes de que ésta incida en el sensor de la cámara. Este elemento se denomina filtro y su cometido es atenuar o eliminar ciertas longitudes de onda del espectro electromagnético.

Si la información relevante de la escena está proporcionada por rayos de luz en un determinado rango de longitudes de onda puede ser necesario eliminar

el resto de rayos de luz con longitudes de onda fuera de este rango, que se consideran ruido en la imagen. Con este propósito se suele utilizar un filtro, redundando además en un decremento considerable de la complejidad de la etapa de preprocesamiento de la imagen (ver sección 3.1.3).

Las características de cada filtro se representan mediante su curva de transmitancia fotométrica, que indica la atenuación que aplica el filtro a cada una de las longitudes de onda del espectro electromagnético.

En función de sus características, los filtros se pueden clasificar en filtros de paso alto, que eliminan las longitudes de onda corta del espectro; filtros de paso bajo, similares a los anteriores pero que eliminan las longitudes de onda larga; filtros de cristal coloreado, que permiten el paso de un rango de frecuencias concreto (generalmente este rango coincide con las frecuencias de un color determinado); filtros interferenciales o filtros de banda estrecha, que permiten el paso de longitudes de onda que se encuentran en intervalos muy pequeños (del orden de nanómetros); filtros neutros, que tienen una curva de transmitancia plana y se utilizan para reducir la intensidad lumínica sin afectar a la distribución espacial de la iluminación; y filtros polarizadores, que sólo dejan pasar la luz que oscila en un determinado plano, eliminando todos los rayos procedentes de otros planos.

3.4.5. Tarjeta capturadora

En un sistema de visión por computador, el computador encargado de realizar el procesamiento de las imágenes necesita un dispositivo *hardware* para capturar las imágenes que le envía la cámara. Además de tareas de captura, este dispositivo puede realizar algunas tareas de procesamiento de las imágenes, liberando de esta tarea al procesador principal del computador.

Tarjeta capturadora y cámara se comunican mediante un protocolo de transferencia de datos que define los parámetros de la señal de vídeo a transmitir, el formato de codificación de las imágenes y la sincronización. Todos estos parámetros son función de los estándares de vídeo utilizados en cada caso: NTSC y RS-170 en Estados Unidos, PAL y CCIR en Europa, y *Camera Link*, entre otros.

El estándar *Camera Link* [PULNiX, 2000] surge del trabajo de los principales fabricantes de cámaras para desarrollar un protocolo de transmisión de datos que proporcione un mayor ancho de banda que los disponibles hasta el momento. Este estándar define la especificación del cable que conecta la cámara y la tarjeta capturadora, permitiendo una tasa de transferencia máxima de 2,3 GB/s.

3.5. Modelos matemáticos y distorsión de una óptica

En esta sección se describen los tres modelos matemáticos más importantes que definen la transformación que aplica la óptica de un sistema de visión a la luz que recibe: modelo del agujero o modelo *pinhole*, modelo de lente delgada y modelo de lente gruesa. Además, se describe cómo distorsionan las ópticas los rayos de luz procedentes de la escena.

Si se utilizan los valores proporcionados por el fabricante de la óptica para los parámetros que requiere cada modelo no se logra una precisión muy elevada. La solución comúnmente adoptada es calcular los valores de estos parámetros mediante técnicas de calibración (ver sección 3.8).

3.5.1. Modelo *pinhole*

El modelo *pinhole* es el modelo de transformación más comúnmente utilizado en visión por computador para eliminar las deformaciones en imágenes causadas por distorsiones no lineales de la óptica, dado que la mayoría de las aplicaciones de visión por computador sólo necesitan explicar la formación de la imagen desde un punto de vista geométrico.

En este modelo se considera la óptica del sistema formada por una única lente representada por un punto infinitesimal, denominado foco, a través del cual pasan los rayos de luz procedentes de la escena hacia el sensor de la cámara. La figura 3.5 muestra una representación del modelo *pinhole*.

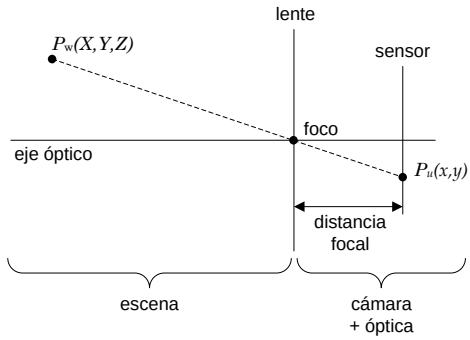


Figura 3.5: Modelo *pinhole*.

Dado que el foco en este modelo representa un agujero de diámetro infinitesimal, sólo uno de los rayos de luz de todos los que proceden del mismo punto de

la escena llega al sensor de la cámara, es decir, sobre cada elemento del sensor sólo incide un único rayo de luz. Por tanto, todos los puntos de la escena estarán perfectamente enfocados en la imagen.

Este modelo matemático equivale a una transformación perspectiva y el único parámetro del modelo es la distancia focal de la cámara.

3.5.2. Modelo de lente delgada

El modelo de lente delgada es más completo y, por tanto, más complejo que el modelo *pinhole* ya que trata de expresar la formación de la imagen tanto desde el punto de vista geométrico como desde el punto de vista radiométrico, teniendo en cuenta todos los parámetros fundamentales de la óptica.

En este modelo se considera la óptica del sistema formada por un conjunto de lentes de ancho cero, es decir, se representa dicho conjunto mediante un plano.

La figura 3.6 muestra una representación del modelo de lente delgada.

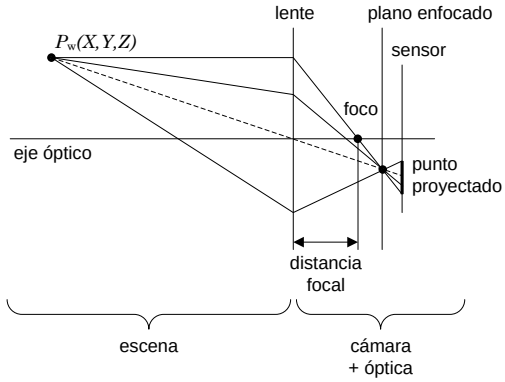


Figura 3.6: Modelo de lente delgada.

En este modelo se deben cumplir las siguientes restricciones:

- Todos los rayos de luz que emanan de un punto de la escena deben converger en un solo punto en el plano de la imagen. En caso contrario, el punto de la escena se proyecta sobre un área en el plano de la imagen, provocando desenfoque en la misma.

- Todo rayo de luz que entra por un extremo de la lente paralelo al eje óptico atraviesa el foco en el otro extremo.

3.5.3. Modelo de lente gruesa

El modelo de lente gruesa es el modelo matemático más completo de una óptica. En la mayoría de las ocasiones se utiliza para modelar ópticas con *zoom* y conjuntos complejos de lentes.

La figura 3.7 muestra una representación del modelo de lente gruesa.

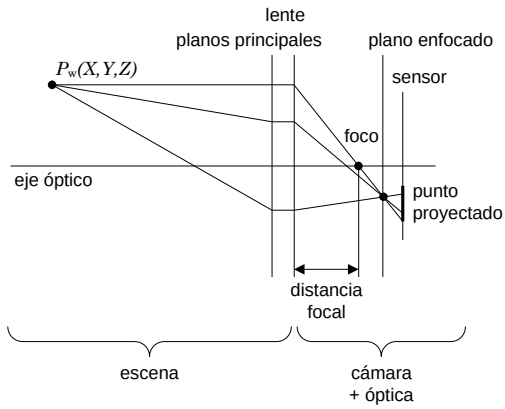


Figura 3.7: Modelo de lente gruesa.

En este modelo la óptica se divide en dos planos, denominados planos principales, que representan una superficie imaginaria de refracción. El primero de ellos representa la pupila de entrada y el segundo la pupila de salida.

3.5.4. Distorsión óptica

En la sección 3.4.3 se introducen los principales tipos de distorsión que puede presentar la óptica de un sistema de visión. Las distorsiones radial, tangencial y de prisma fino afectan a la geometría de los objetos en la imagen, por tanto resultan muy influyentes en un sistema de medición tridimensional, mientras que el resto de aberraciones afectan al enfoque y, por tanto, sólo a la nitidez de la imagen.

En [Hartley y Kang, 2007] se propone un modelo de distorsión no paramétrico que sólo tiene en cuenta la distorsión radial de la óptica, dado que esta distorsión es predominante sobre la tangencial y sobre la de prisma fino. Aún así, en ciertas ocasiones puede no ser suficiente con modelar la distorsión radial sin considerar la distorsión tangencial y la de prisma fino, sino que es necesario modelar la distorsión de la óptica como suma de estas tres.

Para describir este modelo se parte de un punto sin distorsión con coordenadas x_u e y_u en el plano de la imagen, $P_u(x_u, y_u)$, y se definen $\delta_x(x_u, y_u)$ y $\delta_y(x_u, y_u)$, distorsión en las direcciones x e y, respectivamente, para obtener un punto distorsionado en el plano imagen, $P_d(x_d, y_d)$, de acuerdo a los tres tipos de distorsión introducidos por la óptica, según la ecuación (3.6).

$$\begin{aligned} x_d &= x_u + \delta_x(x_u, y_u) \\ y_d &= y_u + \delta_y(x_u, y_u) \end{aligned} \tag{3.6}$$

La distorsión radial introducida por una óptica se describe según la ecuación (3.7), donde $k_i, i \in \{1, 2, 3, \dots\}$, son los coeficientes de la distorsión radial y r es la distancia desde un punto (x, y) al centro de dicha distorsión, ecuación (3.8).

$$\begin{aligned} \delta_{xr}(x, y) &= x(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \cdots) \\ \delta_{yr}(x, y) &= y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \cdots) \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.8}$$

En la ecuación (3.7), el primer término de la serie es predominante, por tanto, la distorsión radial se expresa comúnmente según la ecuación (3.9).

$$\begin{aligned} \delta_{xr}(x, y) &= x k_1 r^2 \\ \delta_{yr}(x, y) &= y k_1 r^2 \end{aligned} \tag{3.9}$$

La distorsión tangencial se expresa mediante la ecuación (3.10), donde p_1 y p_2 son los coeficientes de la distorsión.

$$\begin{aligned} \delta_{xd}(x, y) &= p_1(3x^2 + y^2) + 2p_2 xy \\ \delta_{yd}(x, y) &= p_2(3y^2 + x^2) + 2p_1 xy \end{aligned} \tag{3.10}$$

Por su parte, la distorsión de prisma fino se expresa según la ecuación (3.11), donde s_1 y s_2 son los coeficientes de dicha distorsión.

$$\begin{aligned}\delta_{xp}(x,y) &= s_1(x^2+y^2)\\ \delta_{yp}(x,y) &= s_2(x^2+y^2)\end{aligned} \tag{3.11}$$

Por tanto, la distorsión de una óptica se puede modelar de acuerdo a la ecuación (3.12), que permite transformar un punto sin distorsión en el plano imagen, $P_u(x_u, y_u)$, en un punto distorsionado en el mismo plano, $P_d(x_d, y_d)$.

$$\begin{aligned}\delta_x(x,y) &= xk_1r^2 + p_1(3x^2+y^2) + 2p_2xy + s_1(x^2+y^2)\\ \delta_y(x,y) &= yk_1r^2 + p_2(3y^2+x^2) + 2p_1xy + s_2(x^2+y^2)\end{aligned} \tag{3.12}$$

3.6. Formación de la imagen. Geometría

La proyección de la luz reflejada por los objetos de la escena en el plano de la imagen se considera realizada, independientemente de la óptica utilizada en el sistema de visión, mediante una transformación perspectiva. Esta transformación define, geométricamente, la formación de la imagen a partir de la proyección de un espacio tridimensional a otro bidimensional.

Para comprender esta transformación es necesario conocer cómo se obtienen las coordenadas homogéneas, así como ciertas transformaciones elementales, de un punto cualquiera del espacio.

3.6.1. Coordenadas homogéneas

Las coordenadas homogéneas de un punto tridimensional con coordenadas cartesianas (X, Y, Z) se definen como el punto tetradimensional (kX, kY, kZ, k), donde k es una constante arbitraria distinta de 0 (habitualmente se suele utilizar $k = 1$). Por tanto, un punto P del espacio, representado mediante coordenadas cartesianas, se expresa en forma vectorial como

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

y representado mediante coordenadas homogéneas se expresa como

$$P_h = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix}$$

Para aplicar ciertas transformaciones elementales sobre un punto del espacio es necesario que dicho punto esté expresado en coordenadas homogéneas.

3.6.2. Transformaciones elementales

En esta sección se presentan las transformaciones elementales que permiten modelar el funcionamiento del conjunto cámara más óptica de un sistema de visión.

3.6.2.1. Traslación

La traslación de un punto del espacio $P = [XYZ]^{\mathrm{T}}$ expresada mediante coordenadas homogéneas se puede observar en la ecuación (5), donde $[X_0Y_0Z_0]^{\mathrm{T}}$ es el vector de traslación.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_0 \\ 0 & 1 & 0 & Y_0 \\ 0 & 0 & 1 & Z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

3.6.2.2. Escalado

El escalado de un punto del espacio $P = [XYZ]^{\mathrm{T}}$ con los factores S_X, S_Y y S_Z en los ejes cartesianos X, Y y Z, respectivamente, expresado en coordenadas homogéneas se puede observar en la ecuación (3.14).

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

En el caso de pretender un escalado uniforme en los tres ejes cartesianos se debe tener en cuenta la restricción $S_X = S_Y = S_Z$.

3.6.2.3. Rotación

La rotación de un punto del espacio $P = [XYZ]^{\mathrm{T}}$ respecto a cada uno de los ejes cartesianos, de forma que α es el ángulo de rotación en el eje X, β el ángulo

en el eje Y y γ el ángulo en el eje Z, expresada en coordenadas homogéneas viene dada por las matrices R_α, R_β y R_γ para los ejes X, Y y Z, respectivamente.

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_\beta = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_\gamma = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.6.3. Proyección perspectiva

La proyección perspectiva, también denominada proyección central o transformación perspectiva, es la proyección de puntos tridimensionales del espacio (la escena) en puntos bidimensionales de un plano (la imagen) por medio de líneas de proyección que pasan a través de un punto, denominado centro de proyección o centro óptico.

La proyección perspectiva explica la formación de imágenes en una cámara cuyo funcionamiento se representa mediante el modelo *pinhole* (ver sección 3.5.1).

La figura 3.8 ilustra la formación de la imagen mediante proyección perspectiva, siendo $\{\mathrm{C}\}(x, y, z)$ el sistema de coordenadas de la cámara, de manera que el plano de la imagen coincida con el plano (x, y), el centro del plano se sitúe en el origen de coordenadas y el centro óptico coincida con el eje z. Además, se supone que el sistema de coordenadas de la cámara está alineado con el sistema de coordenadas de la escena, $\{\mathrm{W}\}(X, Y, Z)$. En esta figura se denota por f la distancia focal de la lente.

A partir de este modelo tan simple en que el sistema de referencia de la escena y el sistema de referencia de la cámara coinciden, se extraen las ecuaciones de proyección perspectiva (3.15), mediante semejanza de triángulos, de las que se obtienen las coordenadas del punto $P_u(x, y)$, es decir, de la proyección en el plano de la imagen del punto de la escena $P_{\mathrm{W}}(X, Y, Z)$.

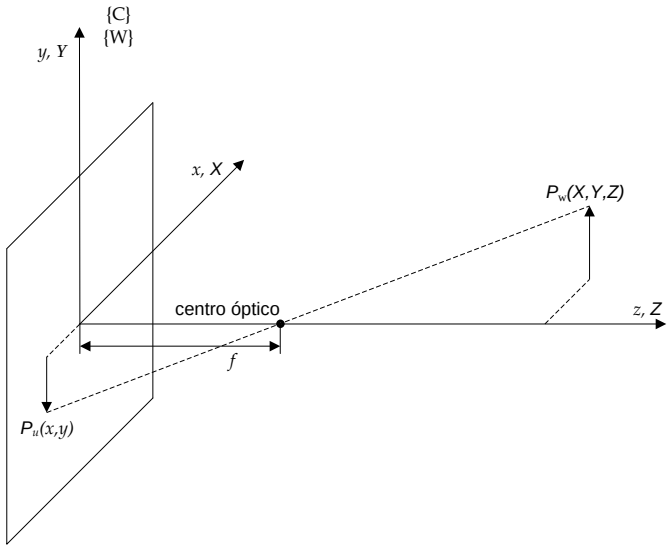


Figura 3.8: Formación de la imagen mediante proyección perspectiva.

$$\begin{aligned} \frac{x}{f} &= -\frac{X}{Z-f} = \frac{X}{f-Z} \quad \rightarrow \quad x = \frac{fX}{f-Z} \\ \frac{y}{f} &= -\frac{Y}{Z-f} = \frac{Y}{f-Z} \quad \rightarrow \quad y = \frac{fY}{f-Z} \end{aligned} \tag{3.15}$$

Las ecuaciones de proyección perspectiva son no lineales en el sistema de coordenadas cartesiano ya que existen divisiones por la variable Z, motivo por el cual no se pueden expresar en forma matricial. Sin embargo, si se define la matriz de transformación de perspectiva P como

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

utilizando coordenadas homogéneas, las ecuaciones (3.15) pueden expresarse según la ecuación (3.16), siendo w_h las coordenadas homogéneas del punto de la

escena y c_h las coordenadas homogéneas de su proyección en la imagen.

$$\mathrm{c}_h = P \times \mathrm{w}_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ -\frac{kZ}{f} + k \end{bmatrix} \tag{3.16}$$

Como se indica en la sección 3.6.1, estas coordenadas se pueden expresar en forma cartesiana si se dividen las tres primeras componentes de c_h por la cuarta, en este caso $\left(-\frac{kZ}{f} + k\right)$. De esta forma, las coordenadas cartesianas de cualquier punto en el sistema de coordenadas de la cámara se obtienen como

$$\mathrm{c} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{fX}{f-Z} \\ \frac{fY}{f-Y} \\ \frac{fZ}{f-Z} \end{bmatrix}$$

Las dos primeras componentes de c son las coordenadas (x, y) en el plano de la imagen del punto tridimensional (X, Y, Z) proyectado. La tercera componente, z, no resulta de interés.

Para cada punto de la imagen el modelo matemático de la cámara sólo indica la dirección en la que se encuentra dicho punto en la escena, es decir, la transformación inversa, de puntos de la imagen a puntos de la escena, no está totalmente definida. Dado un punto proyectado no se puede conocer el punto tridimensional que lo generó. En este caso sólo es posible obtener la recta de proyección de un punto del plano imagen (x_0, y_0) como la recta que pasa por $(x_0, y_0, 0)$ y $(0, 0, f)$ (ver figura 3.8) y que viene dada por la intersección de los planos X e Y, ecuación (3.17).

$$\begin{aligned} X &= \frac{x_0}{f} \times (f - Z) \\ Y &= \frac{y_0}{f} \times (f - Z) \end{aligned} \tag{3.17}$$

Estas ecuaciones también pueden obtenerse a partir de la inversa de la matriz de transformación perspectiva según la ecuación (3.18).

$$\mathrm{w}_h = P^{-1} \times \mathrm{c}_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} kx_0 \\ ky_0 \\ kz \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kx_0 \\ ky_0 \\ kz \\ \frac{kz}{f} + k \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Al pasar a coordenadas cartesianas proporciona

$$\mathrm{w} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{fx_0}{f+Z} \\ \frac{fy_0}{f+z} \\ \frac{fz}{f+z} \end{bmatrix}$$

3.7. Modelos matemáticos de una cámara

Los modelos matemáticos que definen el comportamiento de una cámara se pueden clasificar en modelos lineales, basados en transformaciones lineales que no modelan la distorsión de las lentes, y en modelos no lineales, que modelan de forma precisa el comportamiento de las lentes. La utilización de unos u otros para modelar la cámara de un sistema de visión depende de la precisión que se le exija al sistema.

3.7.1. Modelos lineales

El modelo matemático más simple de una cámara trata de encontrar una relación lineal entre puntos tridimensionales de la escena y sus proyecciones en puntos bidimensionales sobre el plano imagen [Hall *et al.*, 1982].

Esta relación se expresa a través de una matriz de transformación A, mostrada en la ecuación (3.19), resultante de concatenar las transformaciones de traslación y rotación efectuadas para hacer coincidir los sistemas de coordenadas de la escena, {W}, y de la cámara, {C}.

$$\mathrm{c}_h = \begin{bmatrix} kx \\ ky \\ k \end{bmatrix} = A \times \mathrm{w}_h = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

3.7.2. Modelos no lineales

En muchas ocasiones, la precisión exigida a un sistema de visión por computador es superior a la que se logra al modelar el comportamiento de la cámara mediante transformaciones lineales. Por tanto, se definen modelos que describen el comportamiento de una cámara mediante transformaciones no lineales: [Tsai, 1987] y [Weng *et al.*, 1992], entre otros.

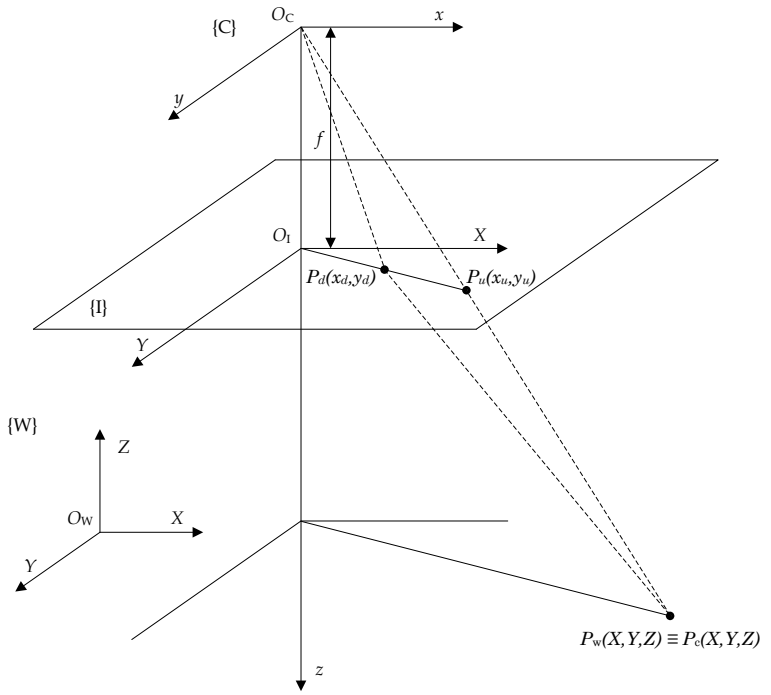


Figura 3.9: Geometría de la cámara, proyección perspectiva y distorsión radial de la lente.

El proceso para modelar el comportamiento de una cámara utilizando modelos no lineales (ver figura 3.9) se suele dividir en cuatro fases [Tsai, 1987], [Salvi *et al.*, 2002]:

1. Dado un punto P_W expresado en coordenadas de la escena, {W}, se transforma al sistema de coordenadas de la cámara, {C}, obteniéndose P_C. Esta transformación se realiza mediante una matriz de rotación y un vector de traslación (ver sección 3.6.2).

2. Se proyecta el punto P_{C}, expresado en el sistema de coordenadas de la cámara, en el plano imagen, obteniendo el punto P_u, también expresado en coordenadas de la cámara, mediante una transformación perspectiva. Dado que cualquier sensor óptico se puede modelar según el modelo *pinhole* (ver sección 3.5.1), el plano imagen se sitúa a una distancia f del centro óptico, O_{C}, y es paralelo al plano definido por los ejes X e Y del sistema de coordenadas de la cámara. Así, si se proyecta un punto $P_{\mathrm{C}}(X_{\mathrm{C}}, Y_{\mathrm{C}}, Z_{\mathrm{C}})$, expresado en el sistema de coordenadas de la cámara, hasta el centro óptico, la recta de proyección intercepta el plano imagen en el punto $P_u(x_u, y_u)$, cumpliendo la relación mostrada en la ecuación (3.20).

$$\begin{aligned} x_u &= f \times \frac{X_{\mathrm{C}}}{Z_{\mathrm{C}}} \\ y_u &= f \times \frac{Y_{\mathrm{C}}}{Z_{\mathrm{C}}} \end{aligned} \tag{3.20}$$

3. Se modela la distorsión introducida por la lente. El punto proyectado $P_u(x_u, y_u)$ se transforma, según la ecuación (3.21) en la proyección real $P_d(x_d, y_d)$, que debería coincidir con el punto real capturado por la cámara. En esta transformación, δ_x y δ_y representan la distorsión de la lente, que se descompone según la ecuación (3.22), donde δ_{xr} y δ_{yr} describen la distorsión radial, δ_{xd} y δ_{yd}, la distorsión tangencial y, δ_{xp} y δ_{yp}, la distorsión de prisma fino (ver sección 3.5.4).

$$\begin{aligned} x_u &= x_d + \delta_x \\ y_u &= y_d + \delta_y \end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned} \delta_x &= \delta_{xr} + \delta_{xd} + \delta_{xp} \\ \delta_y &= \delta_{yr} + \delta_{yd} + \delta_{yp} \end{aligned} \tag{3.22}$$

4. Finalmente, se realiza una nueva transformación entre sistemas de coordenadas, pasando del sistema de coordenadas métrico de la cámara, {C}, al sistema de coordenadas en píxeles de la imagen.

3.8. Calibración de un sistema de visión por computador para la reconstrucción 3D

La óptica en un sistema de visión por computador aplica una transformación de perspectiva a la luz que incide sobre ella procedente de la escena (ver sección 3.4). Esta transformación, denominada transformación directa, permite relacionar el sistema de coordenadas tridimensional de la escena con el sistema de coordenadas bidimensional de la imagen, dado que la transformación realizada sobre dicho sistema consiste en proyectar puntos del espacio tridimensional de la escena sobre el plano bidimensional de la imagen.

En un sistema de visión por computador, la imagen generada por la cámara a partir de la luz procedente de la escena es sólo un medio para obtener información tridimensional de dicha escena. Para reconstruir tridimensionalmente la escena a partir de una imagen bidimensional es necesario realizar una transformación inversa que permita calcular las coordenadas tridimensionales correspondientes a cada punto de la imagen. Por tanto, es necesario conocer con exactitud la transformación que realiza la cámara para poder construir un modelo matemático que permita realizar la operación inversa.

La calibración es el proceso que permite determinar los parámetros de la transformación entre puntos de la escena y puntos de la imagen, es decir, de la transformación perspectiva. Esta transformación está definida por dos tipos de parámetros:

- *Parámetros intrínsecos*. Caracterizan las propiedades físicas de una cámara y de su óptica. Habitualmente se suelen considerar los siguientes:
  - *distancia focal*: f,
  - *desplazamiento del centro de la imagen*: (c_x, c_y), y
  - *coeficiente de distorsión radial*: k_1.

  En ocasiones estos parámetros son suministrados directamente por el fabricante de la cámara, aunque existen multitud de técnicas para su obtención.

- *Parámetros extrínsecos*. Definen la posición y orientación de la cámara con respecto al sistema de coordenadas de la escena:
  - *traslación*: T_x, T_y, T_z, y
  - *rotación*: α, β, γ.

  Existen muchas técnicas para obtener los parámetros extrínsecos de una cámara, aunque los más habituales son los que utilizan conocimiento específico acerca de la escena.

La calibración de una cámara se divide en dos fases [Salvi *et al.*, 2003]. En la primera de ellas se modela matemáticamente el comportamiento físico y óptico del sensor, definiendo un conjunto de parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo. En la segunda fase se estiman los valores de los parámetros del modelo obtenido en la fase anterior. Esta segunda fase se divide a su vez en el siguiente conjunto de tareas [Jiménez, 1999]:

1. Situar un conjunto de referencias en la escena y capturar una serie de imágenes de la misma para determinar con precisión la posición de un conjunto de puntos tridimensionales.
2. Determinar la correspondencia entre los puntos proyectados en la imagen y la referencia correspondiente en la escena.
3. Ajustar los parámetros del modelo que resuelve la correspondencia entre puntos en la imagen y referencias en la escena.

3.8.1. Clasificación de las técnicas de calibración

Los algoritmos de calibración de una cámara se pueden clasificar en base a diferentes criterios según el tipo de modelo, las ecuaciones que lo definen, sus parámetros y las referencias que se toman para realizar la calibración. De acuerdo a estos criterios, las técnicas de calibración se clasifican en parametrizadas e interpoladas, lineales y no lineales, implícitas y explícitas, e intrínsecas y extrínsecas.

3.8.1.1. Parametrizadas e interpoladas

Las técnicas de calibración parametrizadas utilizan un modelo matemático para describir el comportamiento físico de la cámara. En cambio, las técnicas interpoladas no utilizan ningún modelo matemático, sino que suelen tomar una cierta cantidad de referencias en la escena y sus correspondientes proyecciones en la imagen para obtener la posición en la escena de cualquier otro punto en base a las posiciones conocidas de las referencias más próximas.

Las técnicas parametrizadas, al modelar el comportamiento físico de la cámara, necesitan conocer menos referencias en la escena para ajustar el modelo.

La precisión que se logra mediante técnicas parametrizadas es muy superior a la que se logra mediante técnicas interpoladas, a no ser que se utilice en estas últimas una cantidad muy elevada de puntos de referencia en la escena.

3.8.1.2. Lineales y no lineales

Se dice que una técnica de calibración es lineal cuando las ecuaciones utilizadas para calcular los parámetros del modelo matemático del comportamiento de la

cámara son lineales. Del mismo modo, en caso de utilizar ecuaciones no lineales, se dice que la técnica es no lineal. Las técnicas lineales son mucho más sencillas de aplicar, pero tienen la limitación de que no pueden modelar adecuadamente determinadas características de la cámara, como por ejemplo las distorsiones que aplica la óptica.

Las técnicas lineales suelen ajustar los parámetros del modelo a los puntos de referencia de la escena mediante un ajuste de mínimos cuadrados. En el caso de las técnicas no lineales se suelen utilizar procesos de optimización iterativa de los parámetros del modelo, partiendo de una solución inicial e iterando hasta que se alcanza la precisión requerida por el sistema.

La precisión que se logra con técnicas no lineales es muy superior a la que se logra con técnicas lineales.

3.8.1.3. Implícitas y explícitas

Las técnicas de calibración implícitas calculan los parámetros del modelo matemático del comportamiento de la cámara sin descomponer ésta en matrices de traslación, proyección y rotación.

En las técnicas explícitas, los parámetros del modelo matemático del comportamiento de la cámara tienen un significado físico y representan características del sistema, tales como la distancia focal, el centro de la imagen o la posición de la cámara con respecto a la escena.

3.8.1.4. Intrínsecas y extrínsecas

Las técnicas de calibración intrínsecas se centran en la obtención de los parámetros físicos y ópticos de la cámara.

Por otro lado, las técnicas de calibración extrínsecas miden la posición y la orientación de la cámara con respecto a la escena.

3.8.2. Métodos de calibración

Según [Jiménez, 1999] un método de calibración debe cumplir las siguientes características:

- *Autonomía.* No debe requerir intervención por parte del usuario del sistema de visión por computador.
- *Precisión.* Debe lograr la precisión requerida por el sistema.
- *Eficacia.* El procedimiento completo de calibración debe tener un coste computacional asumible por el sistema.

- *Versatilidad*. Debe poder calibrar el sistema aún con diferentes ópticas y distintos niveles de precisión.

A continuación, se describen brevemente los principales métodos de calibración que se utilizan en la actualidad.

3.8.2.1. Método de Hall

El método de calibración de Hall [Hall *et al.*, 1982] es el más sencillo ya que sólo tiene en cuenta la transformación perspectiva y no incluye ningún tipo de distorsión en el modelo.

Las ecuaciones de este modelo establecen una relación entre puntos del espacio y puntos proyectados en la imagen. La calibración se basa en obtener un conjunto de puntos de referencia de la escena y sus correspondientes proyecciones en la imagen y, a continuación, aproximar los parámetros de la matriz de transformación mediante mínimos cuadrados.

3.8.2.2. Método de Faugeras

El método de Faugeras [Faugeras y Toscani, 1986] es una ampliación del método de Hall (ver sección 3.8.2.1) que expresa de forma diferente las ecuaciones del modelo matemático, en función de los parámetros intrínsecos y extrínsecos.

El modelo básico de Faugeras no tiene en cuenta ningún tipo de distorsión, aunque se puede ampliar el modelo fácilmente incluyendo la distorsión radial de la óptica. Al incluir la distorsión en el modelo, el sistema de ecuaciones deja de ser lineal y, por tanto, no se puede resolver mediante mínimos cuadrados. Para obtener una solución del modelo ampliado, se utiliza una estrategia dividida en dos fases. En la primera de las fases se resuelve el modelo de Faugeras sin distorsión y se utiliza esta solución como punto de partida para la segunda fase, en la que se aplica un método iterativo de optimización.

3.8.2.3. Método de Tsai

El método de Tsai [Tsai, 1987] es el método de calibración más utilizado debido a su precisión y versatilidad. Al igual que el método ampliado de Faugeras (ver sección 3.8.2.2), modela la distorsión radial de la óptica a partir de ciertos parámetros de la cámara que proporciona el fabricante (número de píxeles de la imagen en sentido horizontal y en sentido vertical además del tamaño físico de cada píxel en el sensor), reduciendo así el número de parámetros iniciales para la calibración. Al tener en cuenta la distorsión radial de la óptica, el modelo resultante es no lineal.

El procedimiento de calibración se divide en cuatro fases (las mismas que se describen en la sección 3.7.2). En la primera de ellas, se transforma el sistema de

coordenadas de la escena al sistema de coordenadas de la cámara, calibrando la matriz de transformación y el vector de traslación. En la segunda fase se transforman las coordenadas de la cámara a coordenadas de puntos sin distorsión en el plano imagen, utilizando el modelo de proyección perspectiva. En esta fase se calibra la distancia focal. En la siguiente fase se transforma la imagen ideal proyectada en el sensor en imagen distorsionada (considerando solamente distorsión radial), calibrando los coeficientes de distorsión de la óptica. Finalmente, en la cuarta fase, se transforman las coordenadas de la imagen distorsionada en el sensor a coordenadas de la imagen en el computador, calibrando el factor de escala de la imagen.

Este método se sustenta en la restricción de alineamiento radial, que indica que la óptica desvía los rayos de luz radialmente con respecto al eje óptico.

3.8.2.4. Método de Gremban

El método de Gremban [Gremban y Thorpe, 1988] está basado en la técnica de los dos planos propuesta por Martins [Martins *et al.*, 1981]. Esta técnica resuelve la transformación entre puntos de la imagen y puntos de la escena a través de un método de interpolación, y no mediante el modelo de transformación habitual que utilizan otras técnicas. Este método de interpolación se basa en tomar una serie de puntos de referencia de la escena y calcular las rectas de proyección de todos los demás píxeles a partir de las proyecciones sobre la imagen de los puntos de referencia más próximos. Para obtener los puntos de referencia se utilizan dos plantillas de calibración paralelas entre sí y separadas una cierta distancia, de ahí el nombre de técnica de los dos planos.

La principal característica de la técnica de Martins es que proporciona directamente la recta de proyección correspondiente a cada píxel de la imagen sin tener que modelar matemáticamente el funcionamiento de la cámara. Sin embargo, presenta el inconveniente de que se consigue una precisión relativamente baja dado que se trata de una técnica de interpolación y no de un modelo matemático.

El método de Gremban es una ampliación de la técnica de Martins, que realiza la calibración de la cámara mediante un conjunto de ecuaciones lineales.

3.8.2.5. Método de Weng

En ocasiones, cuando es necesario modelar de forma muy precisa la óptica de una cámara una aproximación radial simple de las distorsiones no suele ser suficiente. El método de Weng [Weng *et al.*, 1992] modifica el modelo básico de Faugeras (ver sección 3.8.2.2) incluyendo tres tipos de distorsión de la óptica: distorsión radial, distorsión tangencial y distorsión de prisma fino.

Al igual que todos los métodos no lineales, este método parte de una solución aproximada que se va refinando mediante un algoritmo iterativo.

3.8.2.6. Método de Zhang

Los métodos de calibración descritos en las secciones anteriores, Hall, Faugeras, Tsai, Gremban y Weng, necesitan conocer la posición exacta en el espacio de un conjunto de puntos de referencia para llevar a cabo el proceso de calibración. Este requisito puede ser un inconveniente dado que colocar las referencias en posiciones exactas de la escena no es una tarea trivial y, en cualquier caso, complica el proceso de calibración.

El método de Zhang [Zhang, 2000] resuelve el modelo a partir de puntos de referencia obtenidos de una plantilla plana cubierta por un patrón de cuadrados, cuyos centros se utilizan como puntos de referencia. No se requiere conocer la posición de la plantilla en la escena para la resolución del modelo. El factor determinante en esta técnica es la posición que ocupan los puntos de referencia dentro de la plantilla, concretamente la distancia que separa los cuadrados, y no su posición absoluta en el espacio.

Este método obtiene los parámetros del modelo a partir de dos o más imágenes tomadas en diferentes posiciones y orientaciones de la citada plantilla. La calibración que realiza es de tipo explícita y no lineal, ya que tiene en cuenta los coeficientes de distorsión radial de la óptica. Por tanto, requiere una aproximación inicial de los parámetros que posteriormente refina mediante iteraciones sucesivas.

3.8.2.7. Método de Heikkila

El método de Heikkila [Heikkila y Silven, 1997], al igual que el método de Zhang (ver sección 3.8.2.6), no necesita conocer la posición absoluta de los puntos de referencia para realizar el proceso de calibración.

Este método obtiene los parámetros intrínsecos y extrínsecos del modelo, teniendo en cuenta las distorsiones radial y tangencial de la óptica. Al tratarse de un método no lineal calcula, en primer lugar, una aproximación inicial de la matriz de transformación basándose en las características de la óptica proporcionadas por el fabricante. A partir de esta solución inicial, utiliza el método iterativo de Levenberg-Marquardt para aproximar los parámetros del modelo.

El método de Heikkila ha servido de base para desarrollar una herramienta de calibración de libre distribución [CCT, 2007] que forma parte de la librería de visión por computador de Intel (*Intel Open Source Computer Vision Library*) [OpenCV, 2007].

3.8.3. Comparación de métodos de calibración

En [Salvi *et al.*, 2002] se analiza la precisión que alcanzan los principales métodos de calibración de la cámara de un sistema de visión, centrándose en

los métodos de Hall (ver sección 3.8.2.1), Faugeras con y sin distorsión (ver sección 3.8.2.2), Tsai con y sin optimización (ver sección 3.8.2.3) y Weng (ver sección 3.8.2.5). En cualquiera de estos métodos, los resultados finales del proceso de calibración dependen de varios factores ajenos al propio método, tales como la precisión con la que se extraen los puntos de referencia de la imagen y la precisión con la que se conoce la posición real de los puntos de referencia en la escena.

Para realizar una comparación lo más objetiva posible entre los diferentes métodos de calibración, en este trabajo se ha utilizado la librería de imágenes de ejemplo de Tsai, librería de referencia clásica en términos de calibración de cámaras.

Para cada uno de los métodos estudiados, el autor ha estimado el error cometido tanto en la transformación directa como en la transformación inversa. Los resultados experimentales obtenidos permiten agrupar los métodos de calibración en dos grupos según la precisión alcanzada. Por un lado, los métodos que no tienen en cuenta la distorsión radial, Hall y Faugeras, y, por otro, los métodos que tienen en cuenta la distorsión que aplica la óptica, Tsai y Weng. La precisión lograda por estos últimos es superior a la obtenida por los primeros. Sin embargo, dentro de cada grupo no se encuentran diferencias significativas. De hecho, los resultados obtenidos por el método de Faugeras con distorsión, el método de Tsai y el método de Weng, son similares. Es decir, el incremento de la complejidad del modelo matemático no aporta mejoras significativas en la precisión de las mediciones. Por tanto, cualquiera de los métodos que tienen en cuenta en sus modelos la distorsión que introduce la óptica es igualmente válido para calibrar el funcionamiento de la cámara.

Las precisiones obtenidas por los métodos de Zhang (ver sección 3.8.2.6) y Heikkila (ver sección 3.8.2.7) no son directamente comparables con las del trabajo realizado por Salvi, ni tampoco son comparables entre sí dado que se realizan bajo condiciones experimentales diferentes. Sin embargo, dado que estos dos métodos modelan las distorsiones de la óptica, parece lógico suponer que lograrán una precisión similar, o incluso superior, a la de los métodos de Tsai y de Weng.

Capítulo 4

Análisis y diseño de un sistema de medición de planitud basado en triangulación óptica por láser

En este capítulo se presentan el análisis y el diseño de un sistema de inspección industrial que permite reconstruir en tiempo real la forma tridimensional de productos laminados. La reconstrucción de la forma de estos productos se utiliza para la medición de su planitud. Este sistema se basa en la técnica de la triangulación y utiliza un dispositivo emisor láser como fuente de luz activa. Tanto el análisis como el diseño se basan en los conceptos descritos en el capítulo 2, acerca de la planitud y su medición, y se apoyan en los conceptos de visión por computador descritos en el capítulo 3. A partir de la adquisición de varias medidas longitudinales de la superficie del producto a inspeccionar el sistema debe expresar su planitud utilizando la métrica *I-Units*. Si bien los procesos de análisis y diseño son totalmente generalizables para cualquier instalación o línea industrial que procese productos laminados, en el desarrollo de esta tesis y a modo de demostración, se adaptan dichos procesos para la realización del análisis y el diseño de un sistema de medición de planitud que será instalado en una linea de producción industrial específica.

4.1. Entorno industrial de funcionamiento

El sistema de medición de planitud se debe diseñar de acuerdo a las restricciones y limitaciones introducidas por el entorno industrial en el que será ubicado. Estas restricciones se pueden clasificar en varios tipos:

- *Físicas*. La geometría del sistema de medición debe tener en cuenta las dimensiones de la línea de producción, tales como distancias libres a otros sistemas o mecanismos, techos o paredes, etc.
- *Mecánicas*. El sistema de medición se debe instalar en algún tramo de la línea en el que el material se encuentre desbobinado. Se debe tener en

cuenta que no todos los tramos que cumplen esta condición son válidos, ya que la tensión que ejercen los mecanismos de tracción del material (conjuntos de rodillos) puede ocultar ciertos tipos de defectos de planitud [Ginzburg, 1990]. Además, debido al paso de las bandas de acero por la línea de producción, se pueden generar vibraciones que pueden afectar al sistema si el diseño de los mecanismos de sujeción de dicho sistema no son los adecuados.

- *Iluminación.* Aunque el sistema de medición se base en una técnica óptica activa se han de tener en cuenta las condiciones de iluminación del entorno de trabajo. Se debe conocer si éstas son o no cambiantes, si proceden de una fuente de luz natural o artificial y, en este último caso, el tipo de lámpara que las genera.

- *Ambientales.* Las lineas industriales de producción de acero son instalaciones con un ambiente hostil, en el que las condiciones de suciedad y humedad son bastante severas. Estas condiciones pueden afectar, principalmente, a los componentes que realizan el proceso de visión por computador del sistema de medición.

- *Características físicas y estado del material.* En el diseño del sistema de medición de planitud se debe tener en cuenta que sobre la superficie del material a inspeccionar pueden depositarse gotas de agua, aceite u óxido que pueden ocasionar que la medición de planitud proporcionada no sea correcta.

El sistema de medición de planitud se diseña para su instalación en la línea de saneo de la planta siderúrgica del grupo ArcelorMittal en Avilés (Asturias). En esta línea industrial las bobinas de acero se desbobinan en un extremo de la misma, se procesan y se bobinan de nuevo en el otro extremo. La figura 4.1 muestra un esquema simplificado de la línea industrial en la que será instalado el sistema.

El objetivo principal de esta línea, como su nombre indica, es sanear físicamente las bobinas de acero que procesa. Las operaciones de saneo consisten en eliminar un trozo del inicio (cabeza) y un trozo del final (cola) de la bobina, en caso de estar defectuosos. Para ello se utiliza un dispositivo denominado tijera. Además, el proceso de saneo también puede consistir en reducir, en un determinado porcentaje, el ancho de la bobina, recortando en la etapa de procesamiento cada borde longitudinal mediante un dispositivo denominado rebordeadora.

A continuación se describen las características y restricciones particulares de esta instalación industrial que han de ser tenidas en cuenta para la adaptación de los procesos de análisis y diseño del sistema de medición de planitud. Además, se describe detalladamente la secuencia de operaciones que se llevan a cabo en

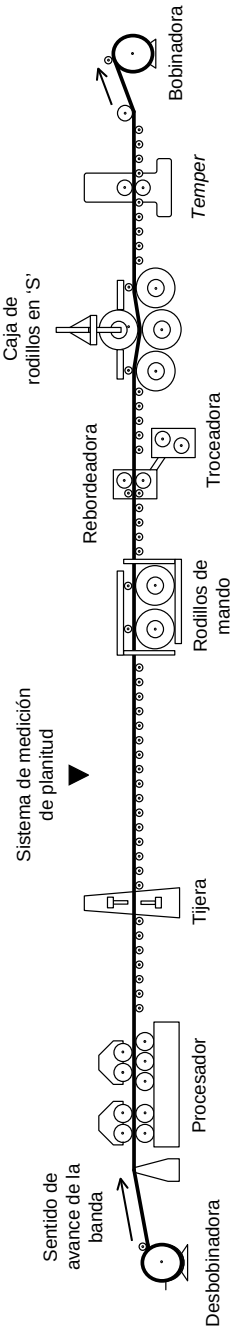


Figura 4.1: Línea de producción en la que se instala el sistema.

la línea de producción para procesar una bobina, haciendo especial hincapié en las que puedan afectar al funcionamiento del sistema.

4.1.1. Restricciones físicas

Un análisis en profundidad de las características físicas de la línea industrial en la que será instalado el sistema de medición de planitud proporciona tres posibles zonas en que las podría ser ubicado. La altura de la instalación y la distancia libre hasta otros elementos de la línea permite la ubicación de un sistema de medición de planitud basado en triangulación láser en las zonas siguientes (ver figura 4.1):

- Entre el conjunto de rodillos denominado procesador y la tijera.
- Entre la tijera y el conjunto de rodillos de mando.
- Entre la rebordeadora y la caja de rodillos en 'S'.

Una vez definidas las posibles ubicaciones del sistema de medición de planitud en la línea de producción se ha de seleccionar su ubicación óptima en función de las restricciones mecánicas que impone la instalación.

4.1.2. Restricciones mecánicas

Se debe seleccionar un punto de la instalación lo más alejado posible de rodillos de mando y de rodillos de tracción para evitar la oclusión de defectos de planitud debido a las tensiones ejercidas sobre las bandas de acero.

Además, se debe seleccionar una ubicación que permita la instalación del sistema de medición de planitud sobre un conjunto de elementos de sujeción anclados al suelo e independientes del resto de elementos de la línea. El objetivo es aislar al sistema de medición de las vibraciones que produce el avance de las bandas de acero por la línea.

Teniendo en cuenta estas restricciones, la ubicación óptima para un sistema de medición de planitud basado en triangulación láser se representa mediante el símbolo ▼ en el esquema de la línea de la figura 4.1.

4.1.3. Condiciones de iluminación

En esta línea de producción un elevado porcentaje de la iluminación diurna proviene de la incidencia indirecta de luz natural. Cuando la luz natural disminuye, la iluminación proviene completamente de luz artificial. Las fuentes de luz más utilizadas para el alumbrado general de la línea son lámparas de tungsteno (wolframio).

Además de la iluminación general de la línea se debe tener en cuenta que las condiciones de iluminación en la ubicación en la que será instalado el sistema de medición de planitud son bastante cambiantes:

- Existen tres puntos de luz (lámparas de tungsteno) que los operadores de la línea utilizan en ciertas ocasiones para iluminar, directamente, la superficie de la banda de acero y medir la planitud de una sección determinada de forma manual.

- Sobre el camino de rodillos de la línea de producción hay instalada una grúa puente en cuya parte inferior posee varios puntos de luz (también lámparas de tungsteno). Cuando esta grúa se desplaza sobre la ubicación en la que será instalado el sistema de medición de planitud, ilumina de forma directa dicha ubicación.

Por tanto, los componentes que forman parte del sistema de visión por computador en el sistema de medición de planitud a instalar en esta línea industrial se deben diseñar de tal forma que su funcionamiento no se vea afectado ante condiciones de iluminación tan diversas como las descritas en esta sección.

4.1.4. Condiciones ambientales

El sistema de medición de planitud, al igual que el resto de elementos de la línea de producción, va a estar expuesto a unas condiciones de funcionamiento bastante severas.

La principal agresión que se ha de tener en cuenta en la fase de diseño es la producida por la suciedad que se genera como consecuencia del procesamiento de las bandas de acero en la línea y que se transmite como partículas de polvo por el aire. Se debe prestar especial atención al aislamiento de los componentes del sistema de medición de planitud ante estas partículas.

También se ha de proteger el sistema frente a impactos físicos, por ejemplo de la propia banda al desplazarse por la línea ya que, en determinadas ocasiones, se pueden generar bucles.

4.1.5. Características físicas y estado del material

El diseño del sistema de medición de planitud debe tener en cuenta las siguientes características y estados en los que se pueden encontrar las bandas de acero que se procesan en la línea industrial:

- Las bandas de acero tienen un ancho máximo de 1800 milímetros.

- Las variaciones de altura observadas en bandas de acero con defectos de planitud graves en su avance por la línea de producción son, como máximo, de 100 milímetros.
- Las superficies de las bandas pueden tener depositadas gotas de agua, humedad, óxido, restos de aceite u otro material lubricante utilizado en procesos anteriores, que hacen variar notablemente la reflexión de la luz incidente sobre las mismas.
- La velocidad máxima de desplazamiento de las bandas de acero por la línea de producción es, aproximadamente, de 180 metros por minuto.

4.1.6. Secuencia de procesamiento de una bobina en la línea de saneo

En esta sección se describe la secuencia de procesamiento de una bobina en la línea de saneo, haciendo especial hincapié en las etapas que debe conocer el sistema de de medición de planitud a desarrollar porque afecten directamente a su modo de funcionamiento.

En primer lugar, el ordenador que controla el proceso de producción en la instalación informa a todos los sistemas conectados a la red local de dicha instalación acerca de la bobina que se va a procesar (su identificador y principales características físicas). En cuanto el sistema de medición de planitud se integre como un sistema más de la línea de producción, también recibirá esta información.

A continuación, una grúa coloca la bobina en la desbobinadora y comienza el proceso de desbobinado, haciendo avanzar el extremo libre de la bobina por el camino de rodillos hasta que llegue a la bobinadora y quede sujeto a ésta (ver figura 4.1).

Una vez que el extremo inicial de la bobina (cabeza) está sujeto a la bobinadora, esta última puede comenzar un proceso de tracción. Este proceso hace que la bobina se vaya desbobinando en un extremo de la línea y se vaya bobinando en el otro.

Debido a la tensión ejercida por la bobinadora y demás rodillos de mando de la instalación la banda puede elevarse unos centímetros y avanzar sin contacto sobre el camino de rodillos. Este hecho debe ser tenido en cuenta en el diseño del sistema de medición de planitud dado que habrá períodos de procesamiento de la banda sin tensión (avance de un extremo hasta la bobinadora, tanto en el inicio como en el final del procesamiento de la bobina) y períodos de procesamiento de la banda con tensión (cuando los extremos de la bobina están sujetos, uno a la bobinadora y otro a la desbobinadora).

Aunque no suele ser muy habitual, bajo ciertas condiciones de procesamiento la banda extendida sobre el camino de rodillos puede retroceder (en sentido de

bobinadora hacia desbobinadora en lugar de desbobinadora hacia bobinadora, que es el sentido de proceso normal). En este caso, los sensores de velocidad de la línea indicarán una velocidad de desplazamiento negativa de la banda, por lo que el sistema de medición de planitud deberá tener en cuenta este hecho.

En algunas ocasiones el procesamiento de una bobina en la línea de saneo tiene como objetivo dividirla en dos o más bobinas. Para ello se bobina en el extremo final de la línea una determinada longitud de la bobina original colocada en la desbobinadora. A continuación se realiza un corte con la tijera de la instalación, separando físicamente la bobina en dos trozos. En ese momento se acciona la bobinadora para que bobine el trozo de banda extendido sobre el camino de rodillos. Seguidamente se hace avanzar el otro extremo del corte por la línea hasta que llegue a la bobinadora, y se repite el proceso de nuevo hasta que finalice la bobina original. Esta funcionalidad de la línea ha de ser tenida en cuenta en la fase de diseño del sistema de medición de planitud dado que durante el procesamiento de una misma bobina puede haber varios intervalos de tiempo en los que la banda no esté en tensión. Además, en esta situación habrá momentos en los que el sistema perciba que no hay banda sobre el camino de rodillos aunque la bobina original no haya sido procesada completamente.

Por último, el ordenador de proceso de la instalación es el encargado de notificar a todos los sistemas de la línea de producción que se ha finalizado el procesamiento de una bobina, quedando estos a la espera de un mensaje que indique el comienzo de una nueva bobina.

En ocasiones excepcionales el ordenador de proceso notifica a los sistemas de la línea de producción un cambio en la identificación de la bobina que se encuentra en la línea. Este hecho se debe a fallos en el seguimiento de la bobina por la planta siderúrgica detectados por los operadores de la línea al procesar la bobina. En el diseño del sistema de medición de planitud se debe tener en cuenta que, ante estas circunstancias, el sistema debe poder actualizar la identificación de una bobina durante su procesamiento.

4.2. Análisis y diseño de la arquitectura física y de los componentes *hardware*

En esta sección se presenta el diseño de la arquitectura física y se eligen los componentes *hardware* que van a formar parte del sistema de medición en tiempo real de la planitud de productos laminados.

El sistema de medición se basa en una técnica de triangulación en la que se proyecta un patrón lineal sobre la superficie del producto a inspeccionar, transversalmente a su dirección de avance por la línea de producción. El sistema analiza las deformaciones que presenta la proyección de dicho patrón como

consecuencia de los defectos de planitud del producto inspeccionado.

En primer lugar se describe el funcionamiento del núcleo del sistema de medición de planitud: el subsistema de visión por computador. Seguidamente, se presentan los subsistemas que complementan a éste y que proporcionan al sistema de medición una interfaz con el entorno en el que trabaja: comunicación con sensores y actuadores de planta, comunicación con equipos de gestión de proceso, comunicación con sistemas de visualización remota y comunicación con sistemas de almacenamiento remoto de la instalación industrial. La figura 4.2 muestra los diferentes subsistemas en los que se divide el sistema de medición de planitud así como la interacción entre los mismos.

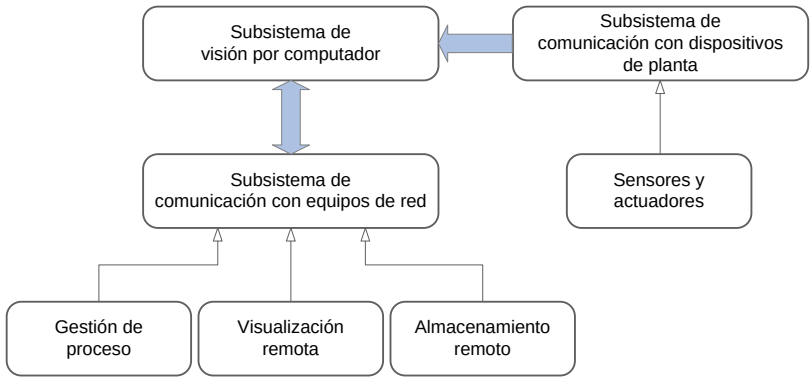


Figura 4.2: División en subsistemas del sistema de medición de planitud.

4.2.1. Subsistema de visión por computador

En esta sección se describe el proceso de selección de los componentes que van a formar parte del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

4.2.1.1. Geometría del subsistema de visión por computador

Como se ha descrito en la sección 2.4.2, la longitud de la fibra j-ésima de una banda de acero, L^j, se puede calcular, utilizando la técnica de integración, a partir de la ecuación (4.1), donde t_i es el instante de muestreo, v_i la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción en el instante t_i, h_i^j la altura de la fibra j en el instante t_i con respecto a un eje de referencia y n el número total de muestras obtenidas.

$$L^j = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(h_i^j - h_{i-1}^j)^2 + v_i^2(t_i - t_{i-1})^2} \tag{4.1}$$

El diseño de la geometría del subsistema de visión por computador se hace atendiendo a las restricciones impuestas por el entorno de la línea de producción en la que se va a instalar el sistema de medición de planitud (ver sección 4.1). Este proceso de diseño consiste en definir en qué puntos del espacio se han de colocar la cámara y el dispositivo emisor de luz láser conociendo la posición de la superficie de las bandas de acero en su desplazamiento por la línea de producción.

El diseño completo de la geometría del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud de acuerdo a las restricciones particulares de la línea industrial en la que se va a instalar el sistema se puede observar en la sección 4.3. Para realizar este proceso de diseño se debe seleccionar previamente el dispositivo emisor láser ya que se necesitan conocer parámetros del mismo tales como el ángulo de apertura del patrón de luz generado. También es necesario seleccionar, antes de iniciar el proceso de diseño de la geometría del sistema, la cámara con la que va a trabajar el subsistema de visión dado que se necesitan conocer características de la misma, como las dimensiones físicas de su sensor, entre otras.

4.2.1.2. Fuente de iluminación

En el subsistema de visión por computador, una fuente de luz debe proyectar un patrón lineal sobre la superficie de la banda de acero, de forma transversal a su eje longitudinal, cuando ésta se desplaza por la línea de producción. Cada imagen generada por la cámara de este subsistema contendrá un perfil transversal de la superficie de la banda, es decir, la proyección del patrón sobre dicha superficie (ver figura 4.3). A partir de este perfil se puede calcular la altura relativa de cada punto de la sección transversal de la superficie de la banda. En concreto, se calculan las alturas de los puntos relevantes para la obtención de medidas de planitud. Se consideran relevantes los puntos en los que se encuentran las fibras de la superficie de las que se desea medir su longitud para, comparando las elongaciones existentes entre ellas (ver sección 2.4), obtener métricas de planitud de la banda de acero.

El patrón lineal que se proyecta sobre la superficie del material a medir debe ser una línea recta con mucha intensidad y muy fina. Es necesario que tenga una elevada intensidad para que la proyección sobre la superficie de bandas de acero poco o nada reflectantes sea distinguible. Y es necesario que sea fina para que pueda ser detectada con precisión por el sistema.

Estos dos requisitos implican que el patrón lineal debe ser generado por un

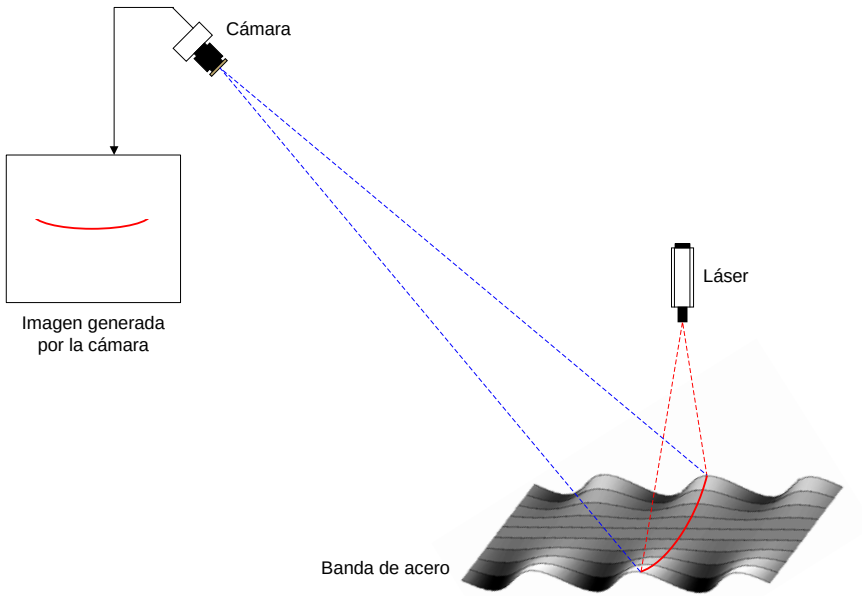


Figura 4.3: Captura, por el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud, de la proyección del patrón lineal sobre la superficie de un producto laminado.

dispositivo láser (ver sección 3.4.1).

El emisor de la línea de luz láser ha de ser colocado de tal forma que el plano de proyección sea perpendicular a la superficie de la banda y que la proyección de dicha línea cubra completamente el ancho de la misma. Para que la línea proyectada por el láser cubra el ancho de la banda se puede actuar sobre dos parámetros del subsistema de visión:

- Ángulo de apertura con el que el láser emite la línea.
- Distancia a la que se ubica el dispositivo emisor de luz láser con respecto a la superficie de la banda (siempre en un plano perpendicular a ésta).

El ángulo de apertura horizontal debe ser tal que le permita proyectar una línea que cubra todo el ancho de la banda teniendo en cuenta la distancia a la que se ubique el dispositivo sobre la banda.

La distancia a la que se debe colocar el emisor láser estará determinada por la potencia con la que genere la línea. Esta potencia deberá de ser la máxima

posible para garantizar que dicha línea sea visible en cualquier circunstancia de procesamiento, siempre que su utilización no requiera, por motivos de seguridad, una instalación aislada completamente de los operadores humanos de la línea de producción.

Se han realizado pruebas tanto en laboratorio como en planta con dispositivos de diferente potencia, desde 20 hasta 500 mW, que emiten luz roja con una longitud de onda de 670 nanómetros, en condiciones de iluminación cambiantes y sobre bandas de acero con tonalidades superficiales diferentes. Los resultados de estas pruebas determinan que es necesario utilizar el dispositivo láser de 500 mW, el de más potencia, para garantizar que la proyección de la línea láser sea perceptible en el mayor número de condiciones y situaciones posible.

La utilización de un dispositivo de más potencia se situaría en el límite entre un láser de clase 3B y un láser de clase 4, la clase más alta de radiación según la norma IEC 60825-1 (ver apéndice D). La utilización de un dispositivo de esta última clase requeriría una instalación totalmente aislada para garantizar la seguridad de los operadores de la línea de producción, por lo que se descarta su uso en el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

Por tanto, el emisor láser seleccionado es un láser *StockerYale*, modelo *Lasiris Magnum* [StockerYale, 2005], perteneciente a la clase 3B. La potencia nominal de este dispositivo es de 500 mW y la longitud de onda del haz de luz emitido es de 670 nanómetros. Esta luz se distribuye uniformemente por todo el patrón lineal proyectado gracias a un colimador que elimina la forma gausiana habitual de la distribución de potencia de un láser. La forma de línea se obtiene mediante una lente cilíndrica integrada en el emisor que proyecta la luz generada con un ángulo de apertura determinado. En la tabla 4.1 se muestran las características principales de este modelo.

Láser *StockerYale Lasiris Magnum*	
Potencia	500 mW
Longitud de onda	670 nanómetros
Ángulo de apertura	10º, 15º, 20º, 30º, 40º, 45º, 55º y 60º
Grosor de línea (enfoque)	ajustable
Clase según IEC 60825-1	3B

Tabla 4.1: Especificaciones ópticas del dispositivo láser seleccionado.

4.2.1.3. Cámara

Además de por las características de la línea de producción, la geometría del subsistema de visión por computador estará determinada por el campo de visión efectivo de la cámara. Éste debe cubrir completamente la zona en la que se moverá la proyección de la línea láser sobre la superficie de la banda según los defectos de planitud que presente la misma, es decir, el área de interés de la escena.

Teniendo en cuenta las características de las bandas de acero que se procesan en la línea (ver sección 4.1.5) se determina que el área de interés que debe cubrir el campo de visión de la cámara debe tener unas dimensiones mínimas de 1800 milímetros de ancho por 200 milímetros de alto en el plano de proyección del haz de luz láser, como se representa en la figura 4.4.

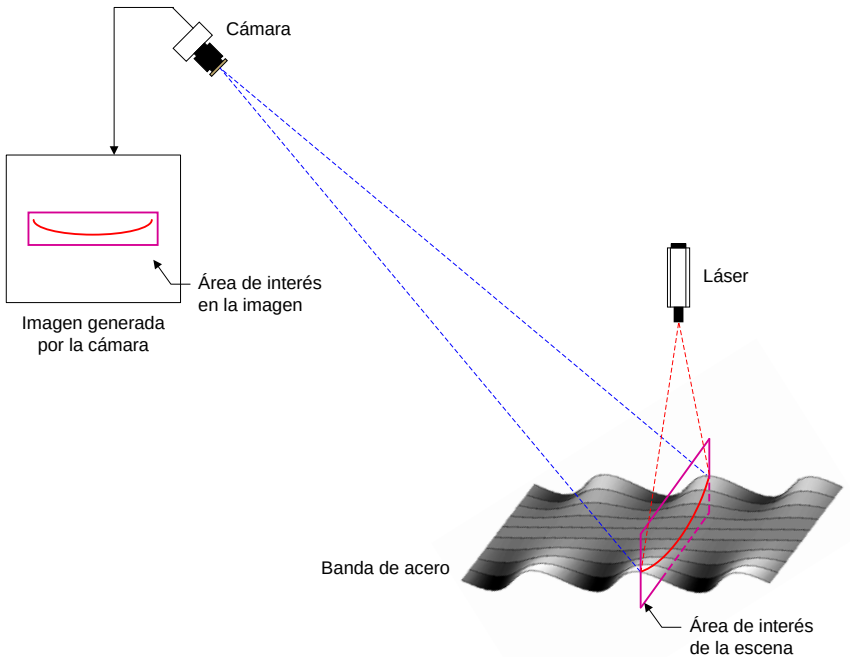


Figura 4.4: Campo de visión de la cámara y área de interés de la escena.

Para que la imagen generada por la cámara cubra todo el área de interés de la escena se puede actuar sobre dos parámetros del subsistema de visión:

- Distancia y posición en la que se ubica la cámara con respecto al área de interés de la escena.

- Ángulo de apertura de la óptica que se acopla a la cámara.

Como se ha indicado anteriormente, y se puede observar en la ecuación (4.1), el sistema necesita conocer, además de la velocidad de desplazamiento de la banda y el intervalo de tiempo transcurrido entre dos muestras consecutivas, la altura a la que se encuentra la fibra de la superficie de la banda de la que se quiere medir su longitud.

Por tanto, esta medida de altura debería de ser lo más precisa posible. Es decir, la dimensión vertical del área de interés de la escena debería de cubrir completamente el rango vertical de la cámara del subsistema de visión por computador.

Existe una limitación debida a la relación de aspecto del área de interés de la escena, 9 a 1, y es que en sensores de imagen matriciales estándar esta relación de aspecto no está disponible. Por este motivo, habrá que ajustar la resolución horizontal de la cámara a la dimensión horizontal del área de interés (la mayor de las dos dimensiones) y desaprovechar parte de la resolución vertical.

Otra posible solución a esta limitación sería utilizar una óptica con lentes anamórficas (ver sección 3.4.3) acoplada a la cámara del subsistema de visión que modifique la relación de aspecto del área de interés de la escena para aprovechar todo el tamaño del sensor de la cámara. El uso de este tipo de lentes se descarta para este sistema debido a la elevada distorsión que introducen en la imagen. El diseño del subsistema de visión por computador debe hacerse teniendo en cuenta la restricción de que la óptica a utilizar debe ser, por tanto, una óptica compuesta por lentes esféricas.

Por todo lo anterior, la cámara seleccionada es una cámara *Basler*, modelo *A501k* [Basler, 2007], basada en un sensor CMOS de alta velocidad con una resolución de 1280×1024 píxeles y una profundidad de color de 8 bits, que genera imágenes monocromas con una frecuencia de muestreo máxima de 74 fotogramas por segundo. Esta cámara tiene una interfaz *Camera Link* para comunicarse con el *hardware* de digitalización (ver sección 3.4.5). Además, ofrece la posibilidad de capturar sólo un rango de filas de píxeles del sensor, especialmente indicado para seleccionar sólo el área de interés de la escena del sistema, aumentando como consecuencia la frecuencia de muestreo. En la tabla 4.2 se muestran las características principales de este modelo.

Tras realizar el proceso de diseño de la geometría del subsistema de visión por computador descrito detalladamente en la sección 4.3, y habiendo comprobado que la geometría obtenida permite la utilización de la cámara y el dispositivo láser propuestos en esta sección, se selecciona el resto de componentes *hardware* que formarán parte del susbistema.

Cámara *Basler A501k*		
Imagen	Formato	monocromo
	Profundidad de color	8 bits
Sensor	Tecnología	CMOS
	Resolución	1280×1024 píxeles
	Relación de aspecto	1,25:1
	Dimensiones	15,36×12,29 milímetros
	Tamaño de píxel	12×12 micrómetros
Frecuencia de muestreo		máximo 74 *fps* @ 1280×1024
Tasa de transferencia		máxima 95 MiB/s
Salida de vídeo		*Camera Link* LVDS

Tabla 4.2: Especificaciones ópticas y técnicas de la cámara seleccionada.

4.2.1.4. Óptica

El diseño de la geometría del subsistema de visión, detallado en la sección 4.3, define la distancia focal de la óptica a utilizar: 35 milímetros. Por tanto, se debe seleccionar una óptica que cumpla este requisito, además de ser compatible con la cámara seleccionada anteriormente.

Otro requisito deseable para la óptica del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud es que sea lo más luminosa posible.

La óptica seleccionada es una óptica *Nikon*, modelo *Nikkor F 35mm f/2*. La tabla 4.3 muestra las especificaciones principales de esta óptica.

Óptica *Nikkor F 35mm f/2*	
Distancia focal	35 milímetros
Apertura	máxima f/2
Distancia de enfoque mínima	0,3 metros

Tabla 4.3: Especificaciones de la óptica seleccionada.

4.2.1.5. Filtro

Para eliminar de la imagen la información de la escena que no pertenece a la proyección de la línea láser sobre la superficie del material a inspeccionar se

plantean dos alternativas: un proceso de filtrado *software* o la utilización de filtros ópticos. Los filtros *software* realizan un filtrado por programa de la imagen generada por la cámara. Este tipo de filtros tiene el inconveniente de que, habitualmente, limita la velocidad de captura de la cámara del subsistema de visión. Los filtros ópticos eliminan un rango de frecuencias del espectro electromagnético de la luz que incide en ellos para que no llegue a la óptica y, por tanto, a la cámara del subsistema.

En esta sección sólo se seleccionan los filtros ópticos a utilizar. En caso de que sea necesaria la utilización de un filtro *software* éste se diseñará junto con la arquitectura lógica del sistema.

La distancia a la que se coloca la cámara con respecto al área de interés de la escena en la geometría obtenida para el subsistema de visión por computador permite la utilización de un filtro interferencial (ver sección 3.4.4).

Se debe seleccionar un filtro cuya longitud de onda de corte sea igual a la longitud de onda de la línea generado por el láser del sistema. De esta forma, todos los rayos de luz procedentes de la escena con longitudes de onda diferentes serán filtrados y no incidirán en el sensor de la cámara.

El filtro interferencial seleccionado para ser acoplado a la óptica del sistema tiene una longitud de onda de corte de 670 nanómetros y un ancho de pico de 20 nanómetros. Este valor del ancho de pico define un rango muy pequeño de longitudes de onda que el filtro permite pasar sin apenas atenuación a través de sí mismo.

La ventaja de un rango tan pequeño es que se filtrará casi todo el ruido de la escena (información que no pertenece a la línea láser). Sin embargo, también posee una desventaja. Al proyectarse la línea láser con una longitud mínima de 1800 milímetros (para iluminar todo el ancho de la banda) los extremos de esta línea reflejada en la escena se proyectarán en el filtro con un ángulo de incidencia tal que se aplicará cierta atenuación sobre los mismos.

4.2.1.6. Tarjeta capturadora

El último componente que falta por seleccionar es la tarjeta capturadora. La tarjeta capturadora del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud debe permitir controlar la cámara seleccionada anteriormente y disponer de una interfaz de conexión estándar con el computador utilizado por el subsistema.

Además, deberá permitir realizar por *hardware* algunas operaciones de preprocesamiento de imágenes para liberar al procesador principal del sistema de estas tareas en caso de que sea necesario.

La tarjeta capturadora seleccionada es una tarjeta *Matrox*, modelo *Meteor II CL* [Matrox, 2002], con interfaz externa *Camera Link*, para comunicarse con la cámara, e interfaz interna PCI, para comunicarse con el computador que realiza,

entre otras, la tarea de adquisición de imágenes. Esta tarjeta genera una señal de reloj de 50 MHz que se utiliza como señal de control de la cámara. Dispone de un *buffer* interno, implementado con memoria SDRAM, de 32 MiB para almacenar las imágenes generadas. Además, posee la capacidad de realizar tareas básicas de preprocesamiento por *hardware*, tales como redimensión de la imagen y tablas de búsqueda (LUT). En la tabla 4.4 se muestran las especificaciones técnicas de la tarjeta capturadora seleccionada.

Tarjeta capturadora *Matrox Meteor II CL*	
Interfaz externa	2 × *Camera Link*
Interfaz interna	PCI 32 bits, 33 MHz
Frecuencia de adquisición	máxima 50 MHz
Tasa de transferencia	máxima sostenida 130 MiB/s
Buffer interno	32 MiB SDRAM

Tabla 4.4: Especificaciones de la tarjeta capturadora seleccionada.

Una vez definido el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud se definen los subsistemas que le complementan y que proporcionan al sistema una interfaz con el entorno en el que debe trabajar.

4.2.2. Subsistema de comunicación con dispositivos de planta

De la ecuación (4.1) se desprende que el sistema de medición de planitud necesita conocer la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción para poder calcular la longitud de cada una de las fibras de la superficie de una banda a partir de las muestras de altura relativa obtenidas. En la línea de producción en la que será instalado el sistema, la velocidad a la que se desplaza la banda se obtiene a través de un tacómetro[1] acoplado a uno de los rodillos de la línea. Este dispositivo genera un nivel de tensión eléctrica proporcional al número de revoluciones por minuto del rodillo al cual está acoplado.

Por tanto, el sistema de medición de planitud debe implementar un subsistema de adquisición de señales analógicas procedentes de sensores de la línea de producción. Este subsistema debe capturar la diferencia de potencial proporcionada por el citado tacómetro y calcular, a partir de ésta, la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea. La captura de la señal analógica generada por el tacómetro de la línea de producción se lleva a cabo mediante una tarjeta de adquisición A/D, también denominada DAQ (*Data Acquisition*) (ver figura 4.5).

[1] Dispositivo que mide el número de revoluciones de un eje.

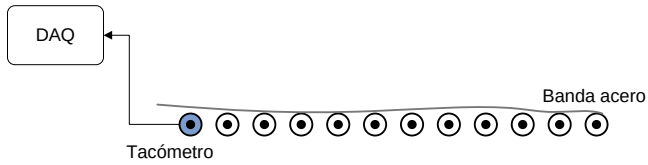


Figura 4.5: Subsistema de comunicación con dispositivos de planta.

La tarjeta de adquisición del subsistema de comunicación con dispositivos de planta debe ser capaz de muestrear la evolución de la señal analógica que representa la velocidad de desplazamiento de las bandas por la línea de producción, como mínimo, a una frecuencia igual a la máxima frecuencia de muestreo de la cámara del subsistema de visión por computador. Este requisito es imprescindible dado que se deberá obtener un valor de la velocidad de desplazamiento de la banda asociado a cada una de las imágenes capturadas por el sistema.

La frecuencia de muestreo máxima de la cámara seleccionada es de 74 imágenes por segundo a una resolución de 1280×1024 píxeles (ver tabla 4.2). Además, se debe tener en cuenta que el área de interés de la escena no cubre completamente el sensor de la cámara (ver figura 4.17, en la seción 4.3). Por tanto, la frecuencia de muestreo puede ser superior si se descartan píxeles del sensor para generar la imagen.

En el proceso de diseño de la geometría del subsistema de visión por computador realizado en la sección 4.3 se obtiene que el área de interés de la escena ocupa un rango de 97 píxeles en vertical en el sensor de la cámara. Suponiendo que este es el tamaño vertical más pequeño que puede tener una imagen generada por la cámara del área de interés de la escena, y teniendo en cuenta la información técnica proporcionada por el fabricante de la misma [Basler, 2007], se obtiene que la frecuencia de muestreo máxima en este caso sería de 782 imágenes por segundo.[2] Por tanto, esta debe de ser la frecuencia mínima de muestreo de la tarjeta de adquisición A/D del sistema.

La tarjeta seleccionada para realizar el proceso de adquisición de la señal de velocidad es una tarjeta *National Instruments*, modelo *PCI-6013*, con interfaz externa propietaria para comunicarse con el tacómetro e interfaz interna PCI para comunicarse con el computador. Esta tarjeta de adquisición posee 16 canales analógicos de entrada en modo común u 8 canales en modo diferencial con una frecuencia de muestreo de 200 kS/s y una resolución de 16 bits por muestra.

[2] Este caso siempre será el más desfavorable dado que la imagen capturada de la escena se ajusta exactamente al área de interés de la misma, mientras que en un proceso normal contendrá un determinado margen de seguridad añadido, tanto por la parte superior como por la parte inferior de la escena, lo que reducirá la frecuencia de muestreo.

Además, dispone de un *buffer* interno para 512 muestras. La tabla 4.5 muestra las especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición seleccionada.

Tarjeta de adquisición *National Instruments DAQ PCI-6013*	
Interfaz externa	NI SCH 68
Interfaz interna	PCI 32 bits, 33 MHz
Frecuencia de adquisición	máxima 200 kS/s
Resolución	16 bits por muestra
Buffer interno	512 muestras

Tabla 4.5: Especificaciones de la tarjeta de adquisición seleccionada.

4.2.3. Subsistema de comunicación con equipos de red

En el diagrama de la figura 4.2 se puede observar cómo el subsistema de comunicación con equipos de la red de la instalación industrial se divide en:

- Comunicación con un equipo de gestión del proceso de producción de la instalación, denominado ordenador de proceso.
- Comunicación con un equipo de visualización remota de las mediciones de planitud.
- Comunicación con un equipo de almacenamiento remoto de planitud.

La comunicación con estos tres equipos se realiza a través de una red de área local (LAN) *Ethernet* de la instalación, denominada red de proceso, utilizando el protocolo TCP/IP. Para conectarse a ésta, el sistema de medición de planitud debe utilizar una tarjeta de red (NIC).

La tarjeta seleccionada es una tarjeta de red 10/100 Mbit/s, con *chipset Realtek*, modelo 8139, que posee interfaz externa *Ethernet* para conectarse con el medio físico e interfaz interna PCI para conectarse con el computador.

En la figura 4.6 se muestran la arquitectura física y los componentes *hardware* que forman parte del sistema de medición de planitud.

Finalmente, en la figura 4.7 se muestran los componentes que forman parte del sistema de medición de planitud y los que interactúan con éste, así como su ubicación relativa con respecto a la línea de producción en la que será instalado el sistema.

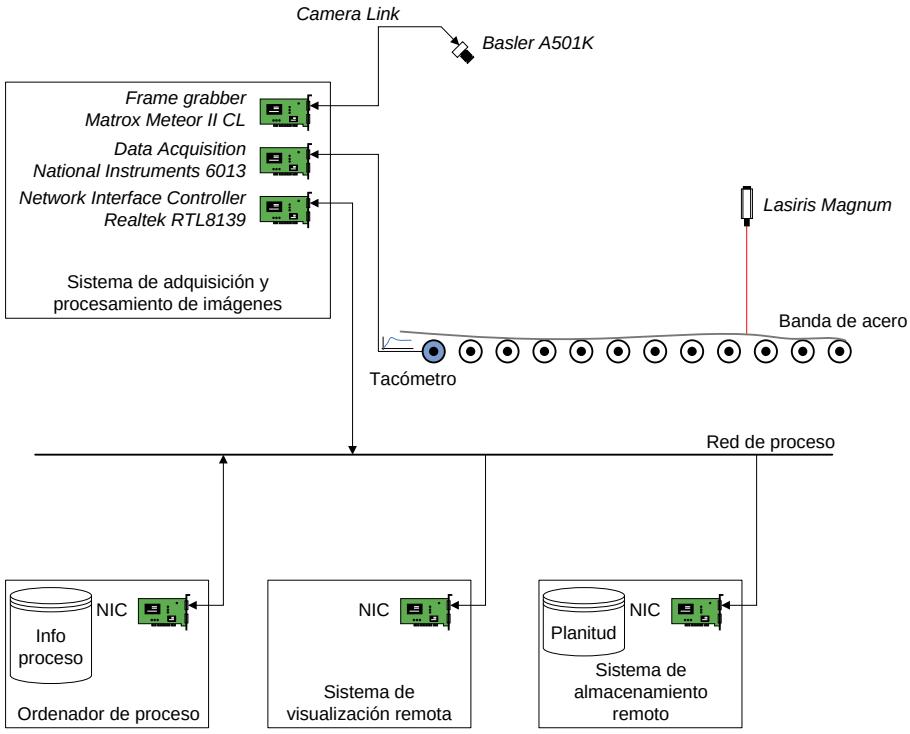


Figura 4.6: Arquitectura física y componentes *hardware* del sistema de medición de planitud.

4.3. Diseño de la geometría del subsistema de visión por computador

El diseño de la geometría del subsistema de visión por computador de un sistema de medición de la planitud de productos laminados basado en triangulación óptica por láser consiste, como se indica en la sección 3.4, en determinar tanto la distribución de sus elementos en el espacio como su distancia relativa con respecto a la escena. De acuerdo a las características del sistema de medición de planitud, este subsistema de visión debe implementar una técnica de triangulación óptica (ver sección 3.2.2.1) en la que el emisor láser es una fuente de luz activa. Dado que la posición que ocupan las bandas en su desplazamiento por la línea es siempre la misma, salvo por la variación de altura debida a defectos de planitud o a ondulaciones de la banda, se debe elegir la ubicación de la fuente

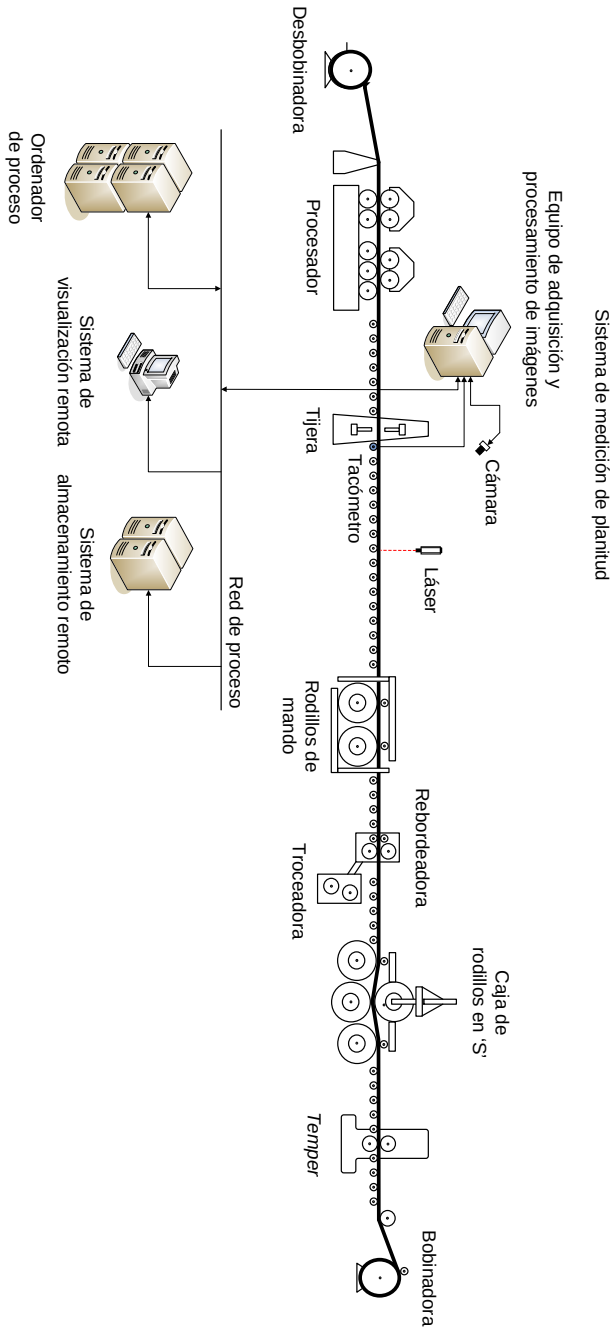


Figura 4.7: Sistema de medición de planitud en la línea de producción.

de luz, es decir, del dispositivo emisor de luz láser, y de la cámara.

4.3.1. Ubicación del emisor de luz láser

En primer lugar se determina la ubicación de la fuente de luz que definirá el plano en el que se situará el área de interés de la escena. Según se ha introducido en la sección 4.2.1, la fuente de iluminación debe generar una línea que se proyecte de forma transversal al eje longitudinal de la banda. Para que la variación de esta línea en función de los defectos de planitud de la banda se realice en un plano perpendicular a su superficie, el emisor láser debe instalarse en dicho plano, tal como se muestra en la figura 4.8. Es decir, el plano de la cortina láser debe ser perpendicular al plano por el que se desplaza la banda.

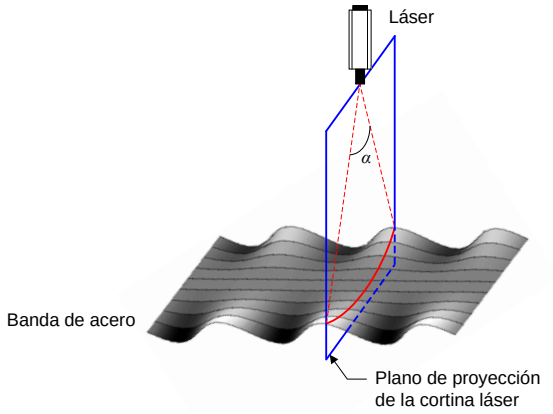


Figura 4.8: Ubicación del emisor láser del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

Para generar una línea, los emisores láser integran una óptica cilíndrica que les permite proyectar el haz de luz generada con un ángulo de apertura determinado.

Sabiendo que la proyección de la línea sobre la banda de acero debe tener una longitud mínima de 1800 milímetros (ver sección 4.2.1) se debe definir el ángulo de apertura, α, del emisor láser y la altura, h, a la que se ubica con respecto al punto más alto del área de interés de la escena (ver figura 4.9). La relación de estos dos parámetros se muestra en la ecuación (4.2). El entorno de trabajo de la línea de producción permite seleccionar cualquier ángulo de apertura para el emisor láser, por tanto, se selecciona el mayor de ellos para colocar el láser lo más cerca posible de la superficie del material a inspeccionar, ya que de esta forma se aprovecha toda la potencia del dispositivo láser. Según las especificaciones

ópticas del emisor láser seleccionado este ángulo es de 60º (ver tabla 4.1).

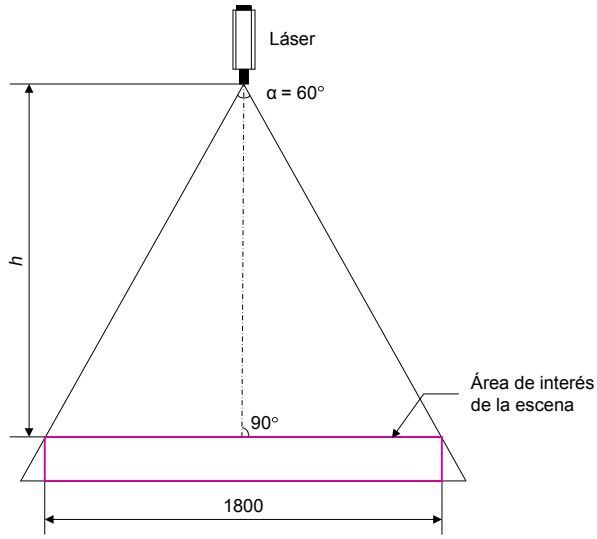


Figura 4.9: Cálculo de la altura para la ubicación del láser del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{900}{h} \tag{4.2}$$

La resolución de esta ecuación así como la altura del área de interés de la escena concluyen que la altura mínima a la que se ha de colocar el láser sobre el plano de desplazamiento de la banda es de 1758,8 milímetros.

4.3.2. Ubicación de la cámara

Una vez determinada la ubicación de la fuente de luz se determina la ubicación de la cámara, definiendo esta ubicación los parámetros principales de su óptica.

Los dos criterios principales para seleccionar la posición de la cámara en el espacio son los siguientes:

- El campo de visión de la cámara debe contener por completo el área de interés de la escena, que requiere unas dimensiones mínimas de 1800 milímetros de ancho por 200 milímetros de alto.

- La distorsión que aplique la óptica a la imagen generada por la cámara debe ser la mínima posible.

Para cumplir el primer criterio de selección se define un mapa de posibles ubicaciones de la cámara en función de la distancia horizontal y vertical con respecto al área de interés de la escena. Para cumplir el segundo criterio, de las ubicaciones posibles definidas en los mapas anteriores, se tienen en cuenta aquellas en las que se utilice una óptica con la mayor distancia focal posible dado que, según se ha descrito en la sección 3.4.3, la distorsión de una óptica tiende a ser mayor cuanto menor es su distancia focal. En este proceso de diseño se ha planteado el uso de ópticas con distancia focal de 14, 20, 24, 28, 35 y 50 milímetros (distancias focales comerciales estándar).

El ángulo de apertura de la óptica va a estar impuesto por el ancho del área de interés de la escena, ya que su altura es mucho menor.

El proceso de cálculo de la distancia focal máxima que puede tener la óptica de la cámara para que el área de interés de la escena esté comprendida completamente dentro de su campo de visión, parte de la posición más alejada posible en la que se puede ubicar la cámara en la instalación, tanto en distancia horizontal como en distancia vertical desde el área de interés (ambas distancias son de 3100 milímetros). De este modo se cumple el requisito de que la distorsión aplicada por la óptica a la imagen generada por la cámara sea mínima.

A partir de estas distancias, mostradas en la figura 4.10, se calcula la distancia de la cámara al punto más bajo del área de interés, que es de 4245 milímetros.

Considerando esta distancia, y teniendo en cuenta el ancho del área de interés de la escena, se calcula el ángulo de apertura horizontal mínimo, γ_0, que debe tener la óptica (ver figura 4.11). Este ángulo se calcula según la ecuación (4.3), de donde se obtiene $\gamma_0 = 23{,}94^{\text{o}}$.

$$\tan\left(\frac{\gamma_0}{2}\right) = \frac{900}{4245} \tag{4.3}$$

La distancia focal máxima de la óptica, f_0, se calcula a partir del ángulo de apertura horizontal mínimo, γ_0, y de las dimensiones físicas del sensor de la cámara (ver tabla 4.2). En la figura 4.12 se representa la distancia focal máxima en función del tamaño del sensor de la cámara y del angulo de apertura horizontal mínimo.

El valor de f_0 se calcula a partir de la ecuación (4.4), obteniendo una distancia focal de 36,2 milímetros.

$$\tan\left(\frac{\gamma_0}{2}\right) = \frac{7{,}68}{f_0} \tag{4.4}$$

Se debe seleccionar una óptica cuya distancia focal estándar, f, sea lo más

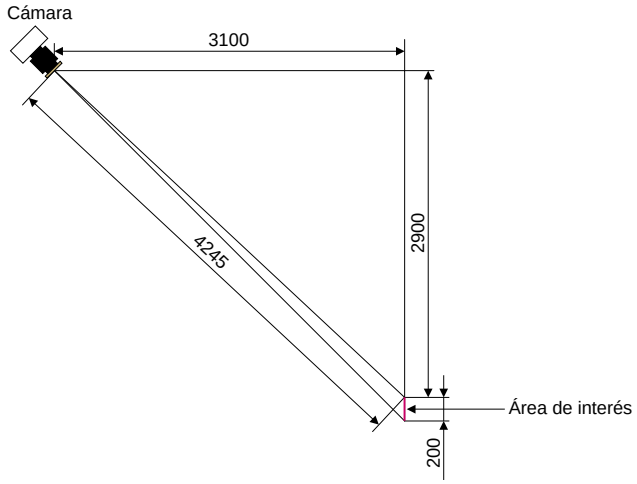


Figura 4.10: Ubicación de la cámara del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud con respecto al área de interés de la escena.

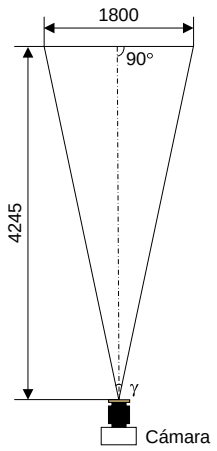


Figura 4.11: Ángulo de apertura horizontal mínimo de la óptica de la cámara.

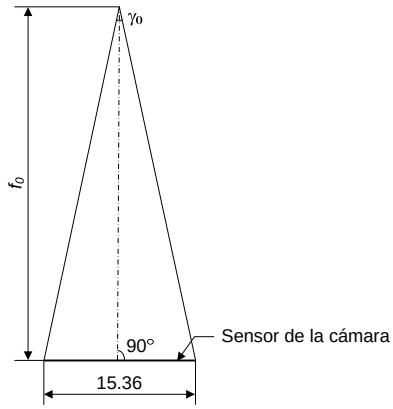


Figura 4.12: Distancia focal máxima de la óptica de la cámara.

próxima a la distancia focal máxima, f_0, calculada de forma teórica, siendo menor o igual a ésta. De esta forma se garantiza que se cumple el ángulo de apertura horizontal mínimo, γ_0, y, por tanto, que el área de interés de la escena queda cubierto totalmente por el campo de visión de la cámara. Por tanto, la distancia focal de la óptica que se debe acoplar a la cámara del subsistema de visión por computador es de 35 milímetros, ya que es el estándar comercial más próximo por debajo de la distancia focal máxima calculada.

Una vez seleccionada la distancia focal de la óptica se puede calcular su ángulo de apertura horizontal, γ. Este ángulo se calcula según la ecuación (4.5), de donde se obtiene $\gamma = 24{,}75^{\text{o}}$, comprobando que realmente se encuentra por encima del ángulo de apertura horizontal mínimo, γ_0. Por tanto, el campo de visión de la cámara cubrirá el ancho del área de interés de la escena.

$$\tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) = \frac{7{,}68}{f} \tag{4.5}$$

Las ubicaciones definitivas del emisor láser y de la cámara se pueden observar en la figura 4.13, donde se representa la geometría del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud en la línea de producción en la que será instalado.

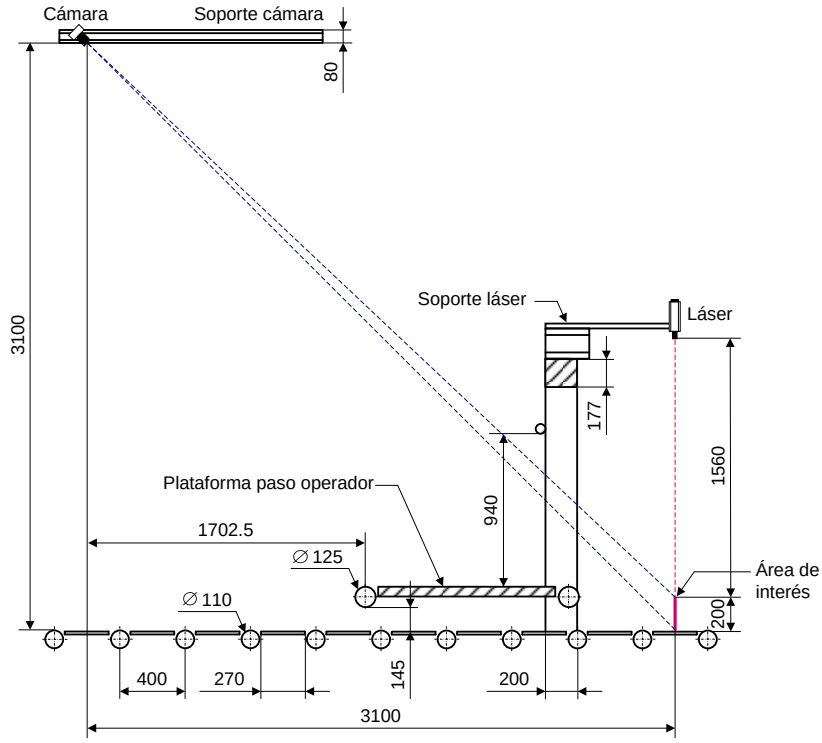


Figura 4.13: Geometría del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

4.3.3. Incidencia del área de interés de la escena en el sensor de la cámara

A partir de la geometría propuesta en la figura 4.13, y teniendo en cuenta la altura del área de interés de la escena (200 milímetros), se puede calcular el ángulo de apertura vertical que cubrirá dicha área, β, tal como se muestra en la figura 4.14. Para ello se aplica el teorema del seno según la ecuación (4.6), donde a se obtiene aplicando el teorema general de Pitágoras según la ecuación (4.7) y ϕ es igual a 45º, obteniendo un ángulo de apertura vertical de 1,91º.

$$\frac{\mathrm{a}}{\sin\phi} = \frac{200}{\sin\beta} \tag{4.6}$$

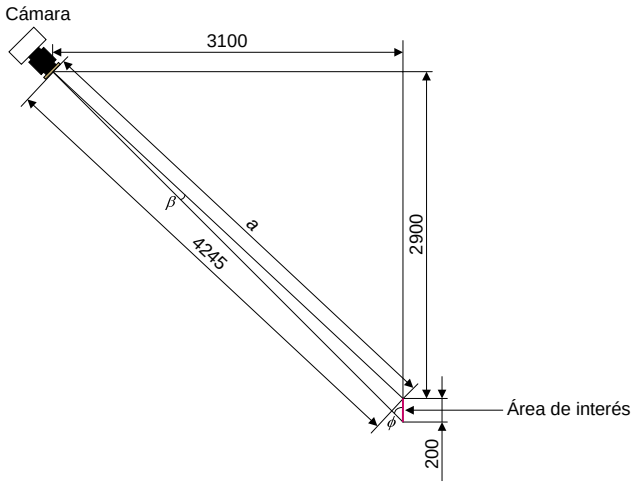


Figura 4.14: Ángulo de apertura vertical necesario para cubrir el rango vertical del área de interés de la escena.

$$\mathrm{a}^2 = 200^2 + 4242{,}6^2 - 2 \times 200 \times 4245 \times \cos\phi \tag{4.7}$$

Considerando los ángulos de apertura horizontal y vertical que contienen información del área de interés de la escena, γ_0 y β, se pueden calcular el ancho y el alto, en milímetros, que ocupa dicha información en el sensor de la cámara. Y, teniendo en cuenta la resolución y las dimensiones físicas del sensor, se pueden calcular estas dimensiones en número de píxeles.

La anchura de la proyección del área de interés de la escena en el sensor de la cámara (ver figura 4.15) se puede calcular a partir de la ecuación (4.8), donde s se calcula aplicando el teorema general de Pitágoras según la ecuación (4.9). Este ancho, $2 \times d$ en la figura 4.15, es de 14,847 milímetros.

$$d = \sqrt{s^2 - f^2} \tag{4.8}$$

$$s = \frac{f}{\cos\left(\dfrac{\gamma_0}{2}\right)} \tag{4.9}$$

La altura de la proyección del área de interés de la escena en el sensor de la cámara (ver figura 4.16) se puede calcular a partir de la ecuación (4.10), donde

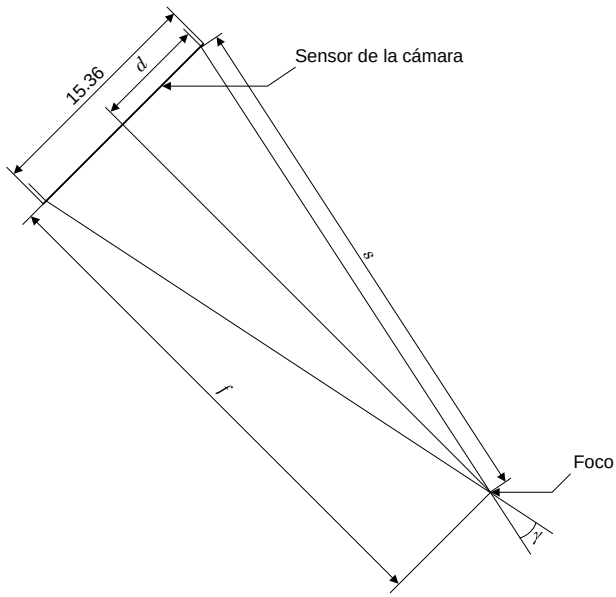


Figura 4.15: Incidencia horizontal del área de interés de la escena en el sensor de la cámara.

l se calcula aplicando el teorema general de Pitágoras según la ecuación (4.11). Esta altura, $2 \times c$ en la figura 4.16, es de 1,167 milímetros.

$$c = \sqrt{l^2 - f^2} \tag{4.10}$$

$$l = \frac{f}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)} \tag{4.11}$$

Considerando las dimensiones físicas del área del sensor que ocupa la proyección del área de interés de la escena, 14,847×1,167 milímetros, se pueden calcular estas dimensiones en función del número de píxeles del sensor. Para ello, de la tabla 4.2 se tiene que cada píxel del sensor es cuadrado con 0,012 milímetros de lado. Por tanto, el área de interés de la escena ocupará 1237×97 píxeles. Esta área, comparada con el tamaño del sensor, se representa en la figura 4.17.

A partir de las dimensiones del área de interés de la escena y de las dimensiones de su proyección en la imagen se puede calcular la relación existente entre ambas.

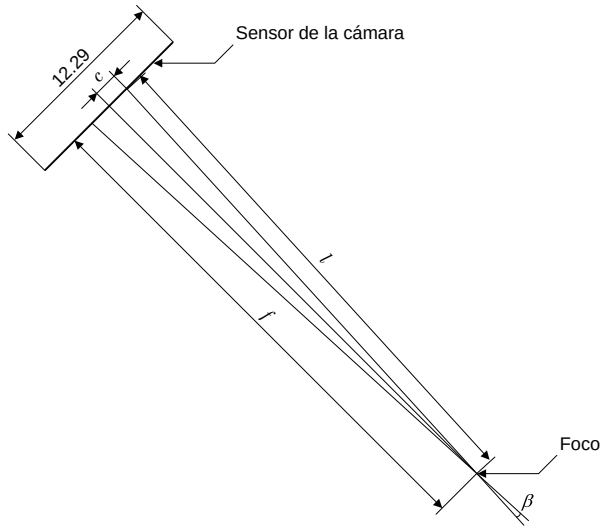


Figura 4.16: Incidencia vertical del área de interés de la escena en el sensor de la cámara.

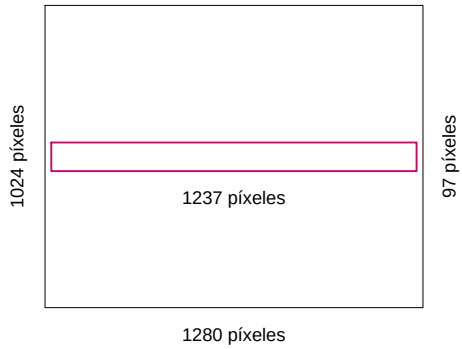


Figura 4.17: Área del sensor en la que incide el área de interés de la escena.

Esta relación es, en promedio, de 1,455 milímetros por píxel en horizontal y de 2,056 milímetros por píxel en vertical.

La relación más importante de píxeles por milímetro es la vertical, dado que el sistema necesita medir las alturas de cada fibra de la superficie de la banda para integrarlas y calcular su longitud. Sin embargo, la relación píxeles por milímetro en horizontal no es tan importante, ya que el seguimiento de los desplazamientos laterales de la banda no requiere tanta precisión como la tarea anterior. Por este motivo no se van a generar las imágenes con todos los píxeles de una fila del sensor, sino que se utilizarán sólo las columnas pares o sólo las columnas impares del sensor de la cámara para generar cada imagen. De esta forma se reduce el tiempo de procesamiento de cada una de las imágenes por parte del sistema al no necesitar una resolución horizontal elevada.

También se tiene en cuenta que cada imagen generada contenga cierto margen de seguridad tanto en vertical como en horizontal con respecto al área de interés de la escena que se debe adquirir.

Por tanto, las imágenes que genera la cámara del sistema tendrán unas dimensiones de 640 píxeles en horizontal por 260 píxeles en vertical, mostrándose en cada una de ellas un área de la escena de 1900 milímetros en horizontal por 480 milímetros en vertical, incluyendo por completo el área de interés (1800×200 milímetros). En la sección 5.2 se pueden observar varios ejemplos de imágenes adquiridas por la cámara del sistema.

4.3.4. Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño de la geometría del subsistema de visión por computador se ha realizado para cumplir las especificaciones de un sistema concreto y teniendo en cuenta las restricciones de una instalación industrial determinada. El procedimiento utilizado es totalmente generalizable para las especificaciones de cualquier sistema de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados basado en triangulación óptica y para las restricciones de cualquier instalación industrial.

El procedimiento presentado es un procedimiento de diseño directo, que proporciona la distancia focal de la óptica de la cámara del subsistema de visión. Si el valor de la distancia focal obtenido no es un valor comercial estándar, es posible utilizar una óptica con distancia focal variable para implementar el diseño realizado. Sin embargo, este tipo de ópticas presenta dos limitaciones importantes para su uso en una instalación industrial.

La primera de estas limitaciones es que, en general, las ópticas con distancia focal variable son menos luminosas que las ópticas con distancia focal fija. En este tipo de sistemas es deseable que las ópticas utilizadas sean lo más luminosas posible ya que la utilización de cualquier filtro óptico, y en especial la utilización

de filtros interferenciales, reducen considerablemente la luminosidad con la que la luz reflejada de la escena incide en el sensor de la cámara.

La segunda de las limitaciones es que las ópticas con distancia focal variable tienen más componentes móviles que las ópticas con distancia focal fija, aspecto que en entornos hostiles de trabajo se traduce en mayor probabilidad de fallo.

Para salvar estas dos limitaciones, el procedimiento propuesto se convierte en un proceso iterativo. Este proceso, una vez obtenida la distancia focal teórica de la óptica a utilizar, elige la óptica con distancia focal fija estándar más próxima que permita cumplir las restricciones impuestas y calcula la posición de la cámara para que su campo de visión cubra exactamente la mayor dimensión del área de interés de la escena. A continuación se comprueba si físicamente es factible la instalación de la cámara en esa posición.

El resultado final del procedimiento de diseño se obtiene como un compromiso entre la posición óptima de la cámara para una óptica con distancia focal fija estándar y la posición en la que se puede colocar físicamente en la instalación industrial.

4.4. Análisis de la arquitectura lógica y de los componentes *software*

En esta sección se desarrolla el proceso de análisis de los componentes *software* que forman parte del sistema de medición de planitud. Este proceso se realiza utilizando una metodología orientada a objetos, basándose en la notación UML [Douglass, 1999].

El análisis de la arquitectura lógica del sistema de medición de planitud pretende obtener una especificación detallada del mismo que sirva de base para el proceso de diseño que se realizará posteriormente (ver sección 4.5).

En este proceso no se sigue la descomposición en subsistemas definida en la sección 4.2 al diseñar la arquitectura física del sistema. Tanto el análisis como el diseño de los componentes *software* del sistema se realizan definiendo el conjunto de tareas que cada uno de estos componentes debe realizar, independientemente del subsistema o subsistemas *hardware* con lo que interactúe.

4.4.1. Descripción del sistema

El *software* del sistema de medición de planitud debe permitir la adquisición y el procesamiento en tiempo real de imágenes bidimensionales que representan escenas en las que una línea láser se proyecta sobre la superficie de bandas de acero. Además, debe de ser capaz de adquirir la señal que representa la velocidad de desplazamiento de estas bandas por la línea de producción. El objetivo final

es calcular y transmitir a equipos del entorno métricas de planitud de las bobinas que se procesan en la instalación.

Por tanto, los componentes *software* del sistema de medición de planitud realizarán los siguientes procesos:

- Adquisición de las imágenes generadas por la cámara del subsistema de visión por computador. Para realizar este proceso es necesario gestionar la tarjeta capturadora de este subsistema (ver sección 4.2.1).
- Adquisición de la señal analógica que representa la velocidad de desplazamiento de las bobinas en la línea de producción. Para ello es necesario gestionar la tarjeta de adquisición del subsistema de comunicación con dispositivos de planta (ver sección 4.2.2).
- Procesamiento de imágenes y cálculo de planitud en tiempo real. El sistema debe extraer la proyección de la línea láser de las imágenes y, combinado con la velocidad asociada a cada imagen, calcular la longitud de las fibras de la superficie de la banda para obtener su planitud.
- Comunicación con el ordenador de proceso de la instalación industrial para recibir información acerca de la bobina que está siendo procesada en cada momento, además de su estado en la línea de producción. Se debe gestionar el acceso a la red local de proceso de la instalación a través del subsistema de comunicación con equipos de red (ver sección 4.2.3).
- Comunicación con el ordenador de proceso para enviarle en tiempo real medidas de planitud de la bobina que se procesa en cada momento. Este equipo realiza dos tareas con la información de planitud recibida. En primer lugar envía, en tiempo real, las medidas recibidas al equipo de visualización remota de la planitud en la línea de producción. En segundo lugar, introduce las medidas de planitud en una base de datos que contiene toda la información de procesamiento que la bobina ha sufrido en la planta siderúrgica.
- Comunicación con el ordenador de proceso para enviarle informes, a modo de resúmenes de planitud, de cada bobina que se procesa en la línea.
- Comunicación con el equipo de almacenamiento remoto de planitud para enviarle, tras el procesamiento de una bobina, toda la información de planitud obtenida, además de cierta información intermedia necesaria para calcular dicha planitud.
- Administración, configuración y mantenimiento del sistema por parte de los operadores de la línea de producción a través de una interfaz gráfica de usuario.

4.4.2. Entidades participantes

Los componentes *software* del sistema de medición de planitud interaccionan con los siguientes componentes *hardware* del sistema (ver figura 4.6):

- *Tarjeta capturadora de imágenes*. Realiza las tareas de interfaz entre el equipo de adquisición y procesamiento de imágenes y la cámara del subsistema de visión por computador.

- *Tarjeta de adquisición A/D*. Realiza las tareas de interfaz entre el equipo de adquisición y procesamiento de imágenes y el tacómetro de la línea de producción.

- *Ordenador de proceso*. Controla la producción de la instalación. Informa al sistema de la bobina que se procesa en cada momento. Además, debe ser informado en tiempo real de las medidas de planitud que se vayan obteniendo para que las envíe al sistema de visualización remota.

- *Sistema de almacenamiento remoto*. El equipo de adquisición y procesamiento de imágenes no almacena información acerca de la planitud de las bobinas procesadas en la línea. Esta información se envía a un equipo de almacenamiento remoto encargado de realizar esta tarea.

4.4.3. Catálogo de requisitos

En esta sección se define el catálogo de requisitos del sistema de medición de planitud, es decir, se define tanto el funcionamiento del sistema como las restricciones sobre su operación e implementación.

4.4.3.1. Requisitos funcionales

El sistema de medición de planitud debe cumplir los siguientes requisitos funcionales:

1. El sistema debe de ser capaz de medir la planitud de productos laminados que reúnan las características físicas enumeradas en la sección 4.1.5, así como de expresar las medidas obtenidas utilizando la métrica *I-Units* (ver sección 2.4.3) cuando estos productos se desplazan por una línea de producción industrial.

2. El sistema debe de ser capaz de enviar al ordenador que controla la producción de la instalación, para cada intervalo de integración del índice de planitud (ver sección 2.4.5), la planitud medida en dicho intervalo.

3. El sistema debe de ser capaz de generar dos mapas bidimensionales por cada bobina que se procese en la línea de producción:
   - Un mapa que represente las alturas relativas medidas de cada fibra longitudinal de la superficie de la banda. Este mapa constituye la reconstrucción tridimensional de la forma de la superficie del producto laminado, tal como se observaría durante su procesamiento en la línea industrial.
   - Un mapa que represente la planitud de la banda.

   Además, el sistema de medición de planitud debe enviar estos mapas al sistema de almacenamiento remoto de planitud de la instalación al finalizar el procesamiento de cada bobina.

4. El sistema debe de ser capaz de almacenar, a petición del usuario, la secuencia de imágenes que genera la cámara del subsistema de visión por computador y la velocidad instantánea de desplazamiento de la banda por la línea de producción asociada a cada imagen. Esta información debe ser almacenada en un contenedor multimedia en el equipo de adquisición y procesamiento de imágenes (ver figura 4.6). El almacenamiento de esta información, que representa toda la información de entrada que el sistema necesita para medir la planitud de una banda, posibilitará la depuración *off-line* del sistema de medición de planitud con datos reales de la línea de producción. Además, también hará posible la comparación de diferentes algoritmos de procesamiento de imágenes, u otras pruebas, sobre la misma bobina, hecho que no sería posible si no se almacenan los datos de entrada al sistema de medición de planitud dado que una bobina se procesa una sola vez en la línea de producción.[3]

   El sistema debe de ser capaz de realizar esta operación al mismo tiempo que realiza las operaciones necesarias para llevar a cabo las tareas exigidas en los requisitos funcionales números 1, 2 y 3.

5. El sistema debe ser capaz de medir la planitud de productos laminados tal cual se expresa en el requisito funcional número 1, así como realizar las operaciones necesarias para llevar a cabo las tareas exigidas en el requisito funcional número 3, utilizando como secuencia de imágenes y evolución de la señal de velocidad de desplazamiento de la banda las almacenadas previamente por el sistema de medición de planitud en un contenedor multimedia durante el procesamiento de una bobina de acero determinada en la línea de producción, según el requisito funcional número 4.

[3] En el caso de que una bobina se procesara más de una vez en la línea de producción los resultados obtenidos por el medidor de planitud no serían comparables directamente ya que las acciones de desbobinado y bobinado provocan efectos notables sobre la planitud del material.

4.4.3.2. Requisitos no funcionales

Además de los requisitos que definen su funcionamiento, el sistema de medición de planitud debe cumplir los siguientes requisitos no funcionales:

1. La corrección del funcionamiento del sistema depende, además de la medición de planitud, del instante de tiempo en el que el sistema obtiene la medida. Esta restricción temporal define al sistema de medición de planitud como un sistema de tiempo real blando (*soft real-time*) [Buttazzo, 1997], ya que el incumplimiento del plazo de presentación de resultados, *deadline*, no repercute en un resultado catastrófico pero sí en una pérdida de funcionalidad.

   La restricción de tiempo real está impuesta por la frecuencia de muestreo de la cámara del subsistema de visión por computador, dado que el sistema debe de haber finalizado el procesamiento de una imagen antes de que la cámara, a través de la tarjeta capturadora, le envíe la siguiente. En caso de que el sistema no sea capaz de procesar en tiempo real todas las imágenes generadas por la cámara, éstas serán descartadas.

2. El sistema debe procesar un elevado volumen de información procedente de la cámara del subsistema de visión por computador. Este volumen de información ha de ser tenido en cuenta en el momento de almacenar la secuencia de imágenes generadas durante el procesamiento de una bobina, según indica el requisito funcional número 4.

4.4.4. Alternativas de implementación

En esta sección se analizan las posibles alternativas en cuanto al sistema operativo sobre el cual se va a ejecutar el *software* del sistema de medición de planitud en el equipo de adquisición y procesamiento de imágenes.

Dependiendo de su finalidad, los sistemas operativos se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Sistemas operativos de propósito general*, cuya finalidad consiste en servir de plataforma para diversos tipos de aplicaciones genéricas, tales como aplicaciones ofimáticas, sistemas de gestión de bases de datos, etc. Los principales sistemas operativos de este tipo son los sistemas *Windows* y los sistemas *Linux*.

- *Sistemas operativos de propósito específico*, cuya finalidad consiste en servir de plataforma para la ejecución de un tipo concreto de aplicaciones, como por ejemplo aplicaciones de tiempo real. Los principales sistemas operativos de este tipo, sistemas operativos de tiempo real (RTOS), son *QNX* y *VxWorks*.

En realidad esta clasificación no es muy estricta dado que, por motivos comerciales, los sistemas operativos de propósito general incluyen ciertas características de sistemas operativos específicos de tiempo real, tales como tareas planificadas por prioridad o planificador *preemptivo*, entre otras. Del mismo modo, los sistemas operativos específicos de tiempo real tienden a incluir características de sistemas operativos genéricos.

La utilización de un sistema operativo de propósito general presenta la ventaja de que se dispone de potentes herramientas de desarrrollo de aplicaciones, de múltiples librerías y de controladores de dispositivos, *drivers*, que facilitan la tarea de creación de programas. Sin embargo, este tipo de sistemas tiene, entre otros, el inconveniente de no disponer de servicios que faciliten la programación de sistemas de tiempo real. Además, su diseño les hace impredecibles respecto a su respuesta temporal en muchas ocasiones, por lo que no pueden ser utilizados para ejecutar aplicaciones de tiempo real duro (*hard real-time*).

En el caso de los sistemas operativos específicos ocurre lo contrario. En concreto, los sistemas operativos de tiempo real tienen la ventaja de poseer multitud de servicios que facilitan el desarrollo de aplicaciones con restricciones de tiempo real, pero tienen el inconveniente de que la documentación existente para los mismos, las herramientas de desarrollo y los controladores de dispositivos son más bien escasos.

Por ello, el análisis anterior concluye en la utilización del sistema operativo de propósito general *Microsoft Windows XP* como plataforma de ejecución del *software* del sistema de medición de planitud, basándose principalmente en las dos siguientes razones:

1. El uso de un sistema operativo de propósito específico no estándar, como por ejemplo *QNX*, implicaría un rechazo del sistema de medición de planitud por parte de los usuarios finales del mismo (operadores de la línea de producción y tecnólogos de la instalación industrial) ya que sólo utilizan sistemas *Windows*. Además, dado que este tipo de sistemas no está implantado en la instalación, se deberían adquirir licencias de usuario para su utilización. También se complicarían las labores de mantenimiento ya que no existe personal en la línea de producción formado para realizarlas.

2. Los fabricantes de *hardware* específico, como por ejemplo la tarjeta capturadora de imágenes o la tarjeta de adquisición de datos (ver secciones 4.2.1 y 4.2.2, respectivamente) que requiere el sistema de medición de planitud, solamente proporcionan controladores para sistemas operativos de propósito general. En caso de utilizar este tipo de dispositivos desde un sistema operativo de propósito específico es necesario desarrollar un controlador propio, aunque en ocasiones ni siquiera esta solución resulta viable ya que ciertos fabricantes no suministran documentación de programación del dis-

positivo a bajo nivel[4] (a nivel de registros de *hardware*).

4.4.5. Modelo lógico

En esta sección se muestra el modelo lógico del sistema de medición de planitud mediante su diagrama de casos de uso (ver figura 4.18).

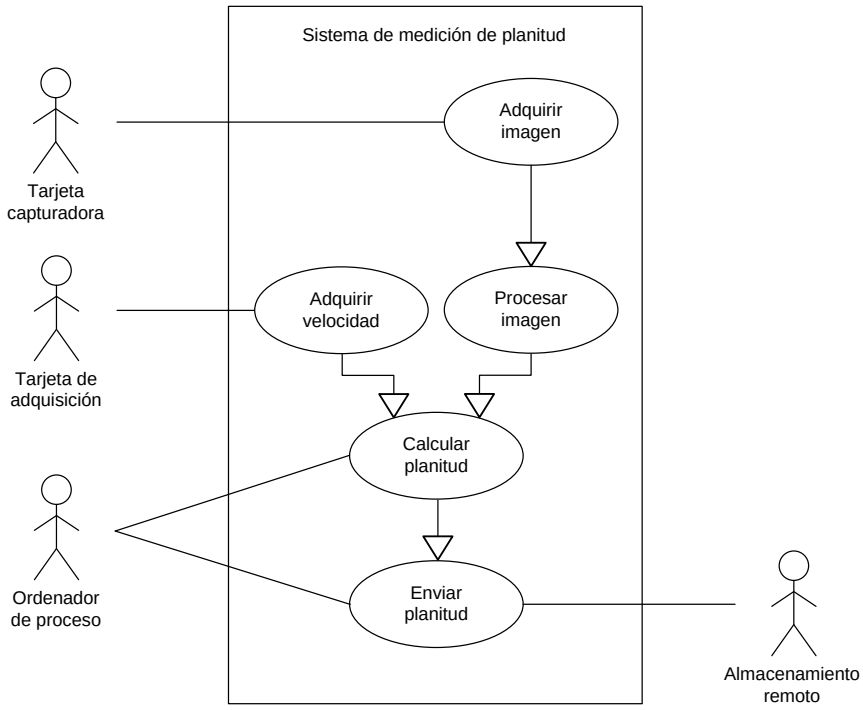


Figura 4.18: Diagrama de casos de uso del sistema de medición de planitud.

La especificación de cada caso de uso, desarrollando su escenario, se puede obtener directamente a partir de la descripción de los subsistemas de visión por computador, de comunicación con dispositivos de planta y de comunicación con equipos de red (ver secciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, respectivamente), por lo que no se indica en esta sección por considerarse redundante.

[4] Como sucede con la tarjeta de adquisición de datos seleccionada para el sistema de medición de planitud (*National Instruments PCI-6013*), en la que sólo se podrían realizar operaciones de adquisición básicas pero sin utilizar la técnica de acceso directo a memoria (DMA) al estar el chip que controla este tipo de transferencia indocumentado.

4.4.6. Modelo estructural simplificado

En esta sección se identifican las clases, y las relaciones existentes entre ellas, necesarias para implementar el modelo lógico del sistema de medición de planitud especificado en la sección 4.4.5. A partir del diagrama de casos de uso del sistema (ver figura 4.18) se extrae, para cada caso de uso, una lista de objetos candidatos a ser clases. Una vez identificadas cada una de las clases se definen sus relaciones con el resto de clases del sistema. Tras la realización de este proceso, la figura 4.19 muestra el diagrama de clases simplificado del sistema.

El *hardware* del sistema de medición de planitud está encapsulado en tres interfaces: *CDigitizer*, *CCamera* y *CTacometer*, que representan a la tarjeta capturadora de imágenes, a la cámara y a la tarjeta de adquisición de datos, respectivamente. El resto de los objetos del sistema deben acceder al *hardware* a través de los métodos que publican estas tres clases.

Para controlar un dispositivo *hardware* concreto se debe diseñar una clase específica que herede de alguna de las anteriores. De esta forma, el resto del sistema no debe preocuparse por las características propias de cada dispositivo que se conecte al mismo (por ejemplo si se selecciona una tarjeta capturadora diferente) dado que la interfaz para su control es genérica.

El funcionamiento del sistema de medición de planitud está dirigido por un objeto de la clase *CFrameGrabber*, siendo la clase *CFlatness* la que realiza las tareas principales de preprocesamiento y segmentación de la imagen, además del cálculo propiamente dicho de la planitud. Tras realizar este cálculo, un objeto de la clase *CFlatness* copia los resultados de las mediciones y otros datos importantes sobre un objeto de la clase *CStripInfo*.

Un objeto de la clase *CFrameGrabber* debe realizar, repetidamente, las siguientes operaciones:

- Solicitar una nueva imagen, *frame*, a la clase *CDigitizer*.
- Enviar la imagen proporcionada por la interfaz de la tarjeta capturadora a un objeto de la clase *CFlatness*.
- Cuando el objeto de la clase *CFlatness* finalice el procesamiento de la imagen vuelve a realizar la primera operación de este conjunto, repitiendo la secuencia mientras no se detenga el sistema.

La clase más importante del sistema de medición de planitud es la clase *CFlatness*. Las operaciones que debe realizar un objeto de esta clase son las siguientes:

- Preprocesar y segmentar cada una de las imágenes que recibe de *FrameGrabber* para extraer la línea láser contenida en las mismas.
- Calcular la altura relativa de la proyección de la línea láser extraída en la operación anterior.

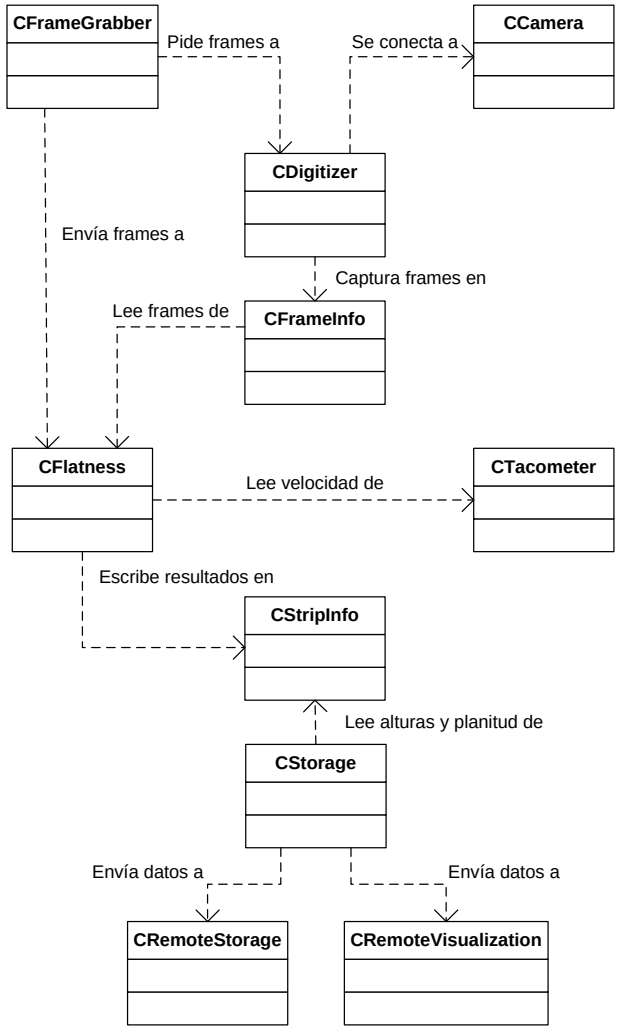


Figura 4.19: Diagrama de clases simplificado del sistema de medición de planitud.

- Calcular la planitud, expresada en la métrica *I-Units*, para cada intervalo de integración de la superficie de la banda.
- Enviar a un objeto *CStripInfo* los datos calculados.

Un objeto de la clase *CStripInfo* almacena la información más reciente sobre la bobina que se procesa en cada momento en la línea de producción. Para cada medida de planitud que genere el sistema, un objeto de la clase *CStorage* lo lee de *CStripInfo* y lo convierte a un formato propio para que un objeto de la clase *CRemoteVisualization* lo envíe al ordenador de proceso de la instalación para su representación, en tiempo real, en la sala de operadores de la línea de producción.

Del mismo modo, cuando finalice el procesamiento de la bobina actual, un objeto de la clase *CStorage* convierte toda la información que el objeto *CStripInfo* mantiene de la bobina a un formato propio para que un objeto de la clase *CRemoteStorage* lo envíe al equipo de almacenamiento remoto de la instalación industrial. Además, cuando se finaliza una bobina, el objeto de la clase *CRemoteVisualization* envía un resumen de su planitud al ordenador de proceso.

4.4.7. Modelo del comportamiento simplificado

Una vez definida la estructura básica que implementará el modelo lógico del sistema de medición de planitud se presenta un modelo del comportamiento del sistema. Este modelo se muestra en la figura 4.20 mediante un diagrama de secuencia simplificado. En este diagrama se pueden observar los procesos fundamentales que va a ejecutar el sistema de medición de planitud.

Para cada imagen que el sistema capture de la escena (*Obtener Imagen*) debe adquirir el valor de la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción (*Obtener Velocidad*) asociada a la imagen. De cada una de las imágenes debe extraer en tiempo real la posición de la proyección de la línea sobre la superficie de la banda, es decir, las coordenadas de cada uno de los puntos de dicha proyección (*Coordenadas Fibras*). A partir de esta información debe calcular, también en tiempo real, el valor de la longitud de cada una de las fibras de la superficie de la banda desde la última imagen procesada.

Cuando el sistema detecte que la banda ha avanzado la distancia correspondiente a un intervalo de integración (*Fin Intervalo Integración*), debe calcular el perfil de planitud del intervalo y enviarlo al ordenador de proceso de la instalación (*Perfil Planitud*) para su representación gráfica en tiempo real.

Al finalizar el procesamiento de la bobina en la línea (*Fin Bobina en Línea*), el sistema debe calcular un resumen de su planitud que sirva para catalogar sus principales defectos y enviarlo al ordenador de proceso (*Resumen Planitud*). Además, debe enviar los mapas de alturas y de planitud al sistema de almacenamiento remoto de la instalación (*Mapas Altura y Planitud*) para integrarlos con el resto de información de procesamiento de la bobina en la planta siderúrgica.

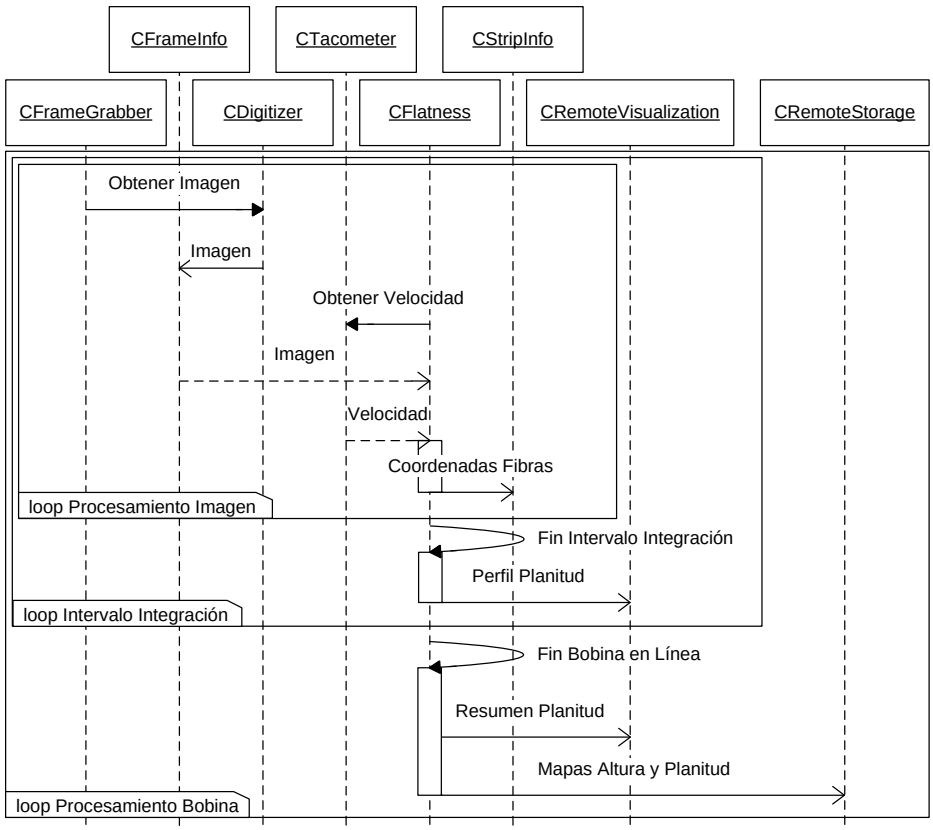


Figura 4.20: Diagrama de secuencia simplificado del sistema de medición de planitud.

4.5. Diseño de la arquitectura lógica y de los componentes *software*

En esta sección se desarrolla el proceso de diseño de los componentes *software* que forman parte del sistema de medición de planitud. Este proceso se realiza utilizando una metodología orientada a objetos, basándose en la notación UML.

El objetivo del proceso de diseño de los componentes *software* del sistema de medición de planitud es definir su arquitectura y la arquitectura del entorno que les va a dar soporte, además de obtener una especificación detallada de dichos

componentes para la fase de implementación.

En este proceso no se sigue la descomposición en subsistemas definida en la sección 4.2 al diseñar la arquitectura física del sistema. Al igual que el proceso de análisis (ver sección 4.4), el diseño de los componentes *software* del sistema se realiza definiendo el conjunto de tareas que cada uno de estos componentes debe realizar, independientemente del subsistema o subsistemas *hardware* con los que interactúe.

4.5.1. División del sistema en tareas

La funcionalidad del sistema de medición de planitud se implementa en los cinco conjuntos de tareas siguientes:

- *Adquisición y procesamiento de imágenes.* Este conjunto de tareas se activa cuando el sistema desea obtener una imagen de la escena de proceso.
- *Cálculo del perfil de planitud.* Cuando el sistema detecta que la banda ha avanzado una distancia similar a la definida para un intervalo de integración calcula el perfil de planitud de la banda para dicho intervalo.
- *Generación de mapas y resumen de planitud.* Al finalizar el procesamiento de una banda en la línea de producción se activa un conjunto de tareas que generan los mapas bidimensionales de alturas y de planitud de la banda, así como un resumen de su planitud.
- *Grabación y reproducción de vídeo en tiempo real.* De forma opcional, durante el procesamiento de una banda se puede ejecutar este conjunto de tareas para almacenar todos los datos que utiliza el sistema para la medición de su planitud y utilizarlos posteriormente como datos de entrada del sistema (por ejemplo, para experimentos con un prototipo de laboratorio utilizando datos reales de planta en lugar de datos sintéticos).
- *Actualización de la interfaz gráfica de usuario.* Periódicamente se debe actualizar la información que se muestra al usuario a través de la interfaz de administración del sistema.

El conjunto de tareas de adquisición y procesamiento de imágenes se ejecutan secuencialmente en alta prioridad. Estas tareas se detallan a continuación. La figura 4.21 muestra la secuencia de activaciones de este conjunto de tareas.

Tarea 1. *Pipeline de adquisición de imágenes.* Gran parte de esta tarea es llevada a cabo en la tarjeta capturadora del subsistema de visión por computador. Se descompone en las siguientes subtareas:

Tarea 1.1. Inicialmente, esta tarea solicita una imagen a la tarjeta capturadora, en modo asíncrono. A continuación, solicita, también en modo asíncrono, una nueva imagen a la tarjeta. La segunda petición es bloqueante hasta que el sistema recibe la imagen generada por la cámara como respuesta a la primera petición. De esta forma, mientras el sistema espera por la generación de la segunda imagen, pueden comenzar la tarea de procesamiento de la primera.

El sistema captura imágenes del área de interés de la escena con una frecuencia variable de entre 1 y 40 *fps*.

Tarea 1.2. Cuando la primera imagen está disponible para el sistema, éste la copia a un *buffer* intermedio, al cual puede acceder la tarea de procesamiento.

Tarea 2. *Pipeline de procesamiento imágenes.* Esta tarea se descompone en varias subtareas:

Tarea 2.1. El procesamiento de una imagen conlleva la activación de esta subtarea para caracterizar la línea láser de la escena. Se realiza el siguiente conjunto de operaciones:

- Extraer la proyección de la línea láser de la escena, expresada en coordenadas de la imagen (dada la complejidad de esta operación, se describe de forma exhaustiva en el capítulo 6).
- Transformar el perfil de la línea del sistema de coordenadas de la cámara al sistema de coordenadas del espacio utilizando los mapas obtenidos en el proceso de calibración de la cámara del subsistema de visión por computador (ver apéndice B).
- Calcular la altura relativa de cada punto de la superficie de la banda que represente una fibra de la misma (muestra o *scan* de alturas). Estos valores de alturas se almacenan en un *buffer* temporal hasta que finalice el procesamiento de la banda para generar su mapa bidimensional de alturas (ver tarea 5). Como se ha indicado en la sección 4.4.3.1, este mapa constituye la reconstrucción tridimensional de la forma de la banda.

Tarea 2.2. Adquirir la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción (ver apéndice C).

Tarea 2.3. Calcular la distancia que ha recorrido la banda desde la última muestra de alturas generada. Si esta distancia es superior a un valor dado, la imagen se procesa. En caso contrario, la imagen se descarta. De ahí que, como se puede observar en la figura 4.20, esta tarea tiene una duración variable en función de las subtareas que se activen para cada imagen que captura el sistema.

Tarea 2.4. Calcular el incremento de longitud de cada una de las fibras de la superficie de la banda desde la última imagen procesada y actualizar el valor de la longitud de cada una de estas fibras.

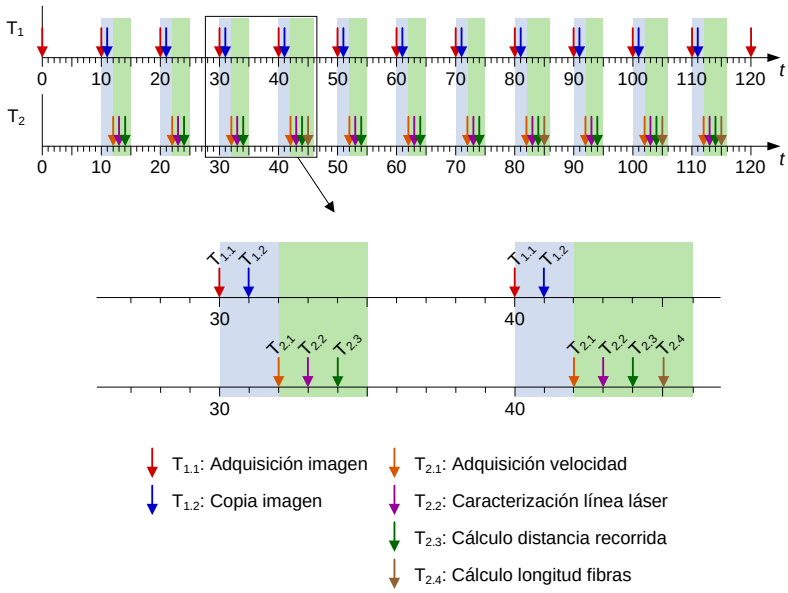


Figura 4.21: Secuencia de activaciones de las tareas de adquisición y evaluación de la imagen en el sistema de medición de planitud.

La figura 4.22 representa un ejemplo de la ejecución de las tareas de adquisición y procesamiento de una secuencia de imágenes, I_1 a I_{11}, a partir del ejemplo de secuencia de activaciones de este conjunto de tareas mostrado en la figura 4.21.

Las tareas que debe realizar el sistema cada vez que detecte la finalización de un intervalo de integración se indican a continuación. Estas tareas se ejecutan en un nivel de prioridad normal.

Tarea 3. Calcular el perfil de planitud (muestra o *scan* de planitud) del intervalo de integración, expresado en *I-Units*. Estos perfiles de planitud se almacenan en un *buffer* temporal hasta que finalice el procesamiento de la banda para generar su mapa bidimensional de planitud (ver tarea 6).

Tarea 4. Enviar el perfil de planitud calculado, a través de la red local de la instalación, al ordenador que controla el proceso de producción para su

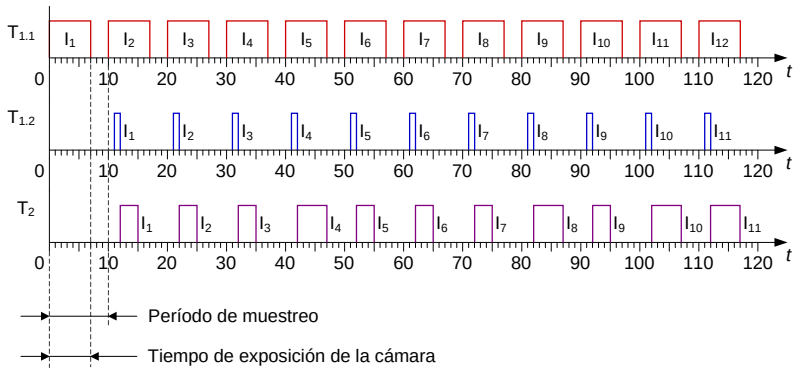


Figura 4.22: Cronograma de ejecución de las tareas de adquisición y evaluación de la imagen en el sistema de medición de planitud.

representación gráfica en tiempo real en el púlpito de los operadores de la línea de producción y su almacenamiento en la base de datos de la instalación.

Al finalizar el procesamiento de una banda en la línea de producción se realizan las tareas que se enumeran a continuación. Este conjunto de tareas se ejecutan en baja prioridad.

Tarea 5. Generar y enviar el mapa de alturas de la banda. Esta tarea se divide en las siguientes subtareas:

5.1 Almacenar las alturas relativas de las fibras de la banda medidas en cada imagen procesada por el sistema en un fichero binario en bruto.

5.2 Convertir el mapa bidimensional de alturas de la banda a un formato representable por la aplicación *CODES Viewer* [García *et al.*, 2001*b*].

5.3 Enviar el mapa bidimensional de alturas de la banda en formato *CODES Viewer* al sistema de almacenamiento remoto de la instalación. Esta información se integra con el resto de la información de procesamiento de la bobina en la planta siderúrgica.

Tarea 6. Generar y enviar el mapa de planitud de la banda. Esta tarea se divide en las siguientes subtareas:

6.1 Almacenar los perfiles de planitud generados para cada uno de los intervalos de integración de la banda en un fichero binario en bruto.

6.2 Convertir el mapa bidimensional de planitud de la banda a un formato representable por la aplicación *CODES Viewer*.

6.3 Enviar el mapa bidimensional de planitud de la banda en formato *CODES Viewer* al sistema de almacenamiento remoto de la instalación. Esta información se integra con el resto de la información de procesamiento de la bobina en la planta siderúrgica.

El principal objetivo del almacenamiento de los mapas de alturas y de planitud en un fichero binario en bruto es servir de formato intermedio para generar ambos mapas en el formato *CODES Viewer*. El motivo radica en que este último formato necesita conocer, entre otros datos, el número de muestras de los mapas y, obviamente, este valor no se obtiene hasta que no haya finalizado el procesamiento de la bobina.

Tarea 7. Calcular y enviar un resumen de la planitud de la banda. Esta tarea se divide en las siguientes subtareas:

7.1. Calcular los índices de planitud simétricos y asimétricos (ver sección 2.4.4) de tres zonas significativas de la banda: cabeza, cuerpo y cola.

7.2. Una vez calculados los índices de planitud de las tres regiones de la banda se envían al ordenador de proceso de la instalación.

Durante la ejecución de las tareas 1 y 2 el sistema puede almacenar, a petición del usuario, toda la información que recibe del entorno durante el procesamiento de una bobina completa o de una sección de la misma. El objetivo es simular posteriormente el procesamiento de una banda con datos reales fuera de la instalación industrial. Estas tareas forman parte del *pipeline* de adquisición y procesamiento de imágenes, por tanto se ejecutan en alta prioridad.

Tarea 8. Grabación de vídeo en tiempo real procedente del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud. Esta tarea se descompone en las siguientes subtareas:

8.1. Almacenar, de forma comprimida en un contenedor multimedia, cada una de las imágenes que el sistema obtiene de la tarjeta capturadora.

8.2. Almacenar, para cada imagen anterior, el instante de tiempo en el que ha sido adquirida.

8.3. Almacenar el valor de la velocidad instantánea de desplazamiento de la banda por la línea de producción asociado a cada imagen.

Tarea 9. Reproducción de vídeo en tiempo real procedente de un contenedor multimedia para utilizarlo como fuente de información de proceso sustituyendo a la cámara y al sensor de velocidad del sistema de medición de planitud. Esta tarea se descompone en las siguientes subtareas:

9.1. Extraer de un contenedor multimedia y descomprimir cada una de las imágenes que han sido introducidas en la subtarea 8.1.

9.2. Enviar cada una de las imágenes extraídas por la subtarea anterior, junto con su instante de adquisición asociado, al *pipeline* de procesamiento de imágenes del sistema.

9.3. Extraer del contenedor multimedia el dato de velocidad instantánea de desplazamiento de la banda por la línea de producción y enviarlo, de forma sincronizada con la imagen correspondiente, al *pipeline* de procesamiento de imágenes del sistema.

Gracias a la funcionalidad implementada por las tareas 8 y 9, el sistema podrá ejecutar las tareas del *pipeline* de adquisición (tarea 1) y del *pipeline* de procesamiento (tarea 2) de imágenes desde un contenedor multimedia como origen de datos en lugar de utilizar la tarjeta capturadora de imágenes y la tarjeta de adquisición de datos.

Además, el sistema puede ejecutar una tarea en un instante dado que le permite capturar una imagen de la escena. La funcionalidad aportada por esta tarea permite obtener el conjunto de imágenes necesarias para realizar el proceso de calibración de los parámetros extrínsecos del conjunto cámara más óptica del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud. Esta tarea se detalla a continuación.

Tarea 10. Adquisición de una imagen generada por la cámara con posibilidad de modificación de los parámetros de configuración de la misma, tales como tiempo de exposición, en un fichero en bruto que pueda ser procesado posteriormente por cualquier aplicación informática.

Finalmente, el sistema ejecuta un conjunto de tareas destinado a la actualización de la información referente al procesamiento de la banda mostrada en la interfaz gráfica de usuario. Estas tareas, mostradas a continuación, se ejecutan con prioridad normal en el sistema.

Tarea 11. Mostrar información del estado del sistema así como enviar órdenes al mismo procedentes del usuario.

Tarea 12. Mostrar información gráfica al usuario acerca del procesamiento de la banda. Esta tarea se divide en las siguientes subtareas:

Tarea 12.1. Representar gráficamente el último *scan* de alturas de la banda generado por el sistema.

Tarea 12.2. Representar gráficamente el último *scan* de planitud de la banda generado por el sistema.

Tarea 12.3. Representar gráficamente el mapa bidimensional de alturas de la banda mientras la banda se procesa en la línea.

Tarea 12.4. Representar gráficamente el mapa bidimensional de planitud de la banda mientras la banda se procesa en la línea.

4.5.2. Patrones de diseño

Un patrón de diseño es la descripción de la solución de un problema que se repite con frecuencia en un entorno determinado [Gamma *et al.*, 1994]. El objetivo de la utilización de un patrón de diseño es aportar una solución eficiente para un problema común.

En los procesos de análisis y diseño del sistema se han detectado varias tareas que tratan de resolver problemas que se corresponden con la descripción de situaciones que han sido solucionadas mediante patrones de diseño conocidos. Estos patrones y su utilización en el sistema son:

- Patrón *pipeline*. Se trata de un patrón de ejecución paralela consistente en la ejecución de múltiples operaciones donde la salida de una operación es la entrada de la siguiente [Mattson *et al.*, 2004]. Este patrón se ha aplicado parcialmente a la adquisición y al procesamiento de imágenes.

- Patrón *observer*. Define una dependencia entre objetos de forma que cuando un objeto cambia de estado todos los que dependen de él son notificados y actualizados. Este patrón se ha aplicado parcialmente a las clases que dependen del procesamiento de las imágenes adquiridas por el sistema, para notificar eventos relacionados con el resultado de dicho procesamiento.

- Patrón *singleton*. Garantiza que una clase tiene una única instancia y proporciona un punto de acceso global a ella [Alexandrescu, 2001]. Este patrón se ha aplicado, entre otras, a las clases que implementan la comunicación con el ordenador de proceso de la instalación.

- Patrón *state*. Permite a un objeto alterar su comportamiento cuando su estado interno cambia, simulando que el objeto cambia su clase. Este patrón también se ha aplicado, entre otras, a las clases que implementan la comunicación con el ordenador de proceso de la instalación.

- Patrón *shared memory*. Describe una solución para una estructura de memoria que es accedida de forma concurrente. Este patrón se ha aplicado a las clases que implementan la actualización de la información mostrada en la interfaz gráfica de usuario.

4.5.3. Modelo estructural y modelo del comportamiento

En esta sección se definen los conjuntos de clases que encapsulan a los conjuntos de tareas del sistema descritos en la sección 4.5.1, así como las relaciones existentes entre las mismas. También se definen las operaciones y el comportamiento de los objetos principales del sistema.

***Pipeline* de adquisición de imágenes.** El conjunto de clases que implementa la funcionalidad del *pipeline* de adquisición de imágenes se detalla a continuación. La figura 4.23 representa las relaciones entre estas clases.

- *CFrameGrabber*. Interfaz que controla el proceso de adquisición indicando en qué momento se debe capturar una imagen. Además, indica al objeto encargado de su procesamiento cuando ésta está disponible en el *buffer* correspondiente. La clase derivada que implementa esta interfaz es la siguiente:
  - *CContinuousFrameGrabber*. Solicita imágenes a la tarjeta capturadora de forma continua de acuerdo a la frecuencia de muestreo definida por *CMilFPMController*.
- *CMilFPMController*. Controla la latencia de exposición de la cámara, es decir, el tiempo que transcurre desde que finaliza el período de exposición de una imagen hasta que comienza el de la siguiente. Este proceso de control se realiza de forma adaptativa y en tiempo real en función de la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción y de un parámetro, FPM, que recibe el sistema. Este parámetro define el número de *frames* por metro que debe mantener el sistema como objetivo de captura, independientemente de la velocidad de avance de la banda. De esta forma, cuando la banda avance a una velocidad elevada, el ratio de muestreo de la cámara será mucho más elevado que cuando la banda avance a una velocidad reducida. Si la banda está parada en la línea, o no hay banda, el sistema mantiene una frecuencia de muestreo mínima de un *frame* por segundo.
- *CMilCamera*. Interfaz que permite controlar la cámara conectada a la tarjeta capturadora del subsistema de visión por computador. La clase que implementa esta interfaz es la siguiente:
  - *CMilCameraBasler501K*. Permite controlar una cámara *Basler*, modelo *A501K*, a través de la interfaz *Camera Link* de la tarjeta capturadora.
- *CDigitizer*. Interfaz que controla la tarjeta capturadora de imágenes del subsistema de visión por computador. Dispone de un *buffer* interno, que

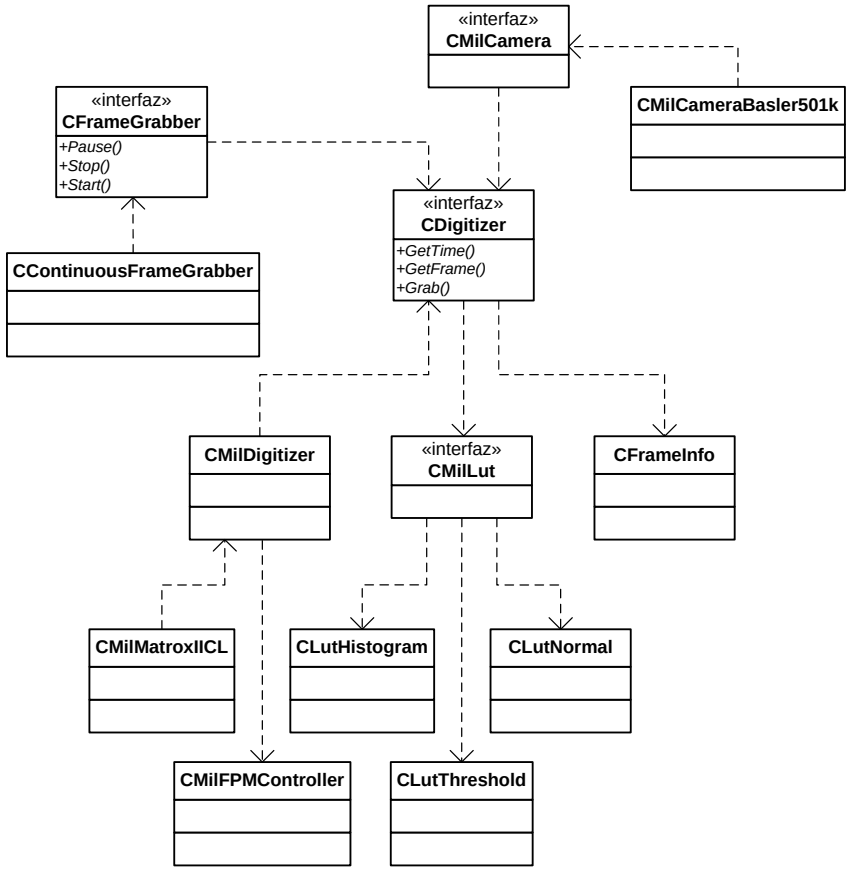


Figura 4.23: Relaciones entre las clases del *pipeline* de adquisición de imágenes del sistema de medición de planitud.

se puede implementar mediante *software* o mediante *hardware*, en el que se depositan las imágenes para ser compartidas con el resto de objetos del sistema. El acceso a la tarjeta capturadora se realiza dentro de una sección crítica, evitando el acceso simultáneo de varios objetos al recurso. La clase que implementa esta interfaz es la siguiente:

- *CMilDigitizer*. Permite controlar una tarjeta capturadora de imágenes *Matrox* genérica que utilice la librería MIL (*Matrox Imaging Library*). A su vez, esta funcionalidad se extiende en la clase:

    - *CMilMatroxIICL*. Permite controlar una tarjeta capturadora *Matrox*, modelo *Meteor II CL*. Se basa en la clase *CMilDigitizer* pero está optimizada para este modelo de tarjeta capturadora.

- *CFrameInfo*. Implementa el *buffer* en el que un objeto de la clase *CDigitizer* almacena las imágenes generadas por la cámara y al cual acceden los objetos que implementan el *pipeline* de procesamiento de imágenes del sistema.

- *CMilLut*. Interfaz que define la tabla de asociación que puede ser cargada en la tarjeta capturadora de imágenes. Las clases derivadas que implementan esta interfaz son las siguientes:
    - *CLutNormal*. Define una tabla de asociación de acuerdo a la función $f(x) = x$. El efecto de esta tabla de asociación sobre la imagen es mantener la luminancia original de cada píxel.
    - *CLutThreshold*. Define una tabla de asociación de acuerdo a la función $f(x) = (x > t)? \ 255 : 0$. El efecto de esta tabla de asociación sobre la imagen es aplicar un umbralizado en el que el límite es t.
    - *CLutHistogram*. Define una tabla de asociación de acuerdo a la función $f(x) = K \times (x - InLow) + OutLow$, donde $K = \frac{OutHigh - OutLow}{InHigh - InLow}$. El efecto de esta tabla de asociación sobre la imagen es ajustar su histograma de luminancia redistribuyendo las frecuencias de aparición en el intervalo $[InLow, InHigh]$ sobre el intervalo $[OutLow, OutHigh]$.

***Pipeline* de procesamiento de imágenes.** El conjunto de clases que implementa la funcionalidad del *pipeline* de procesamiento de una imagen, del proceso de cálculo del perfil de planitud de cada período de integración de la banda y del envío de dicho perfil al ordenador de proceso se detalla a continuación. La figura 4.24 representa las relaciones entre estas clases.

- *CTacometer*. Interfaz que encapsula el *hardware* de medición de la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción. La funcionalidad de esta interfaz se implementa en la clase:
    - *CNiDAQTacometer*. Permite controlar una tarjeta de adquisición *National Instruments*, modelo *PCI-6013*.

- *CFrameFunction*. Interfaz que define el procesamiento de la imagen recibida de un objeto *CFrameGrabber* a través de un objeto *CFrameInfo*.
    - *CFilter*. Implementa las posibles operaciones de filtrado *software* que se pueden aplicar a una imagen generada por la cámara antes de realizar la tarea de caracterización de la línea láser.

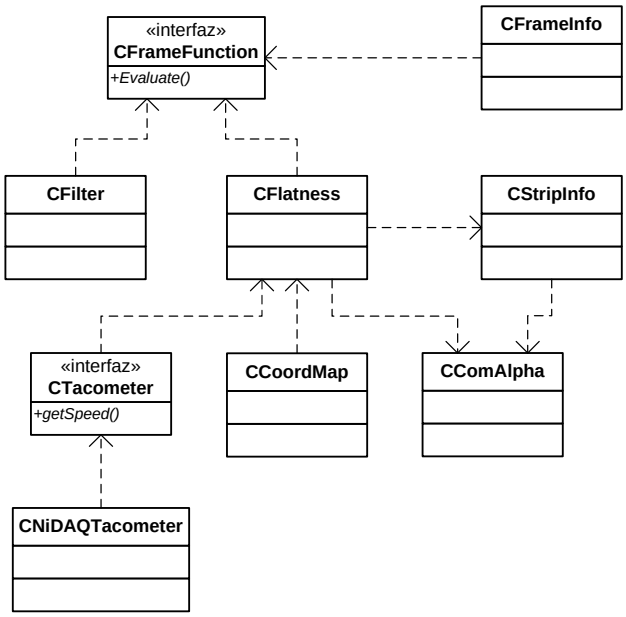


Figura 4.24: Relaciones entre las clases del *pipeline* de procesamiento de imágenes, del proceso de calculo del perfil de planitud en cada intervalo de integración y del envío del perfil al ordenador de proceso de la instalación.

- *CFlatness*. Procesa la imagen con el objetivo de caracterizar la línea láser que contiene.
- *CStripInfo*. Almacena el resultado del proceso de caracterización llevado a cabo por un objeto de la clase *CFlatness*.
- *CCoordMap*. Define una tabla en la que se almacenan las coordenadas en el espacio de un plano. Esta tabla será el resultado del proceso de calibración de la cámara del subsistema de visión por computador (ver apéndice B).
- *CComAlpha*. Implementa la comunicación con el ordenador que controla el proceso de producción de la instalación para enviarle el perfil de planitud de la banda en cada intervalo de integración.[5]

[5] La denominación de esta clase se debe a que el ordenador de proceso de la instalación industrial es un equipo *Hewlett-Packard AlphaServer*.

En la figura 4.25 se representa, mediante un diagrama de estados, la secuencia de operaciones que realizan las tareas de adquisición y procesamiento para cada una de las imágenes generadas por la cámara del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

Transferencia de perfiles y resúmenes de planitud en tiempo real. La tarea 4 y la subtarea 7.1 definidas en la sección 4.5.1 comunican al sistema con el ordenador de proceso de la instalación. Esta comunicación se realiza mediante un protocolo que implementa, además, las tareas de recepción por parte del sistema de medición de planitud de información de procesamiento de una bobina en la línea de producción (ver sección 4.1.6).

La figura 4.26 representa la especificación de las tareas de comunicación con el ordenador de proceso por medio de su diagrama de estados. En esta comunicación, basada en la arquitectura cliente-servidor, el sistema de medición de planitud ejerce el papel de servidor.

A partir de este diagrama de estados, aplicando el patrón de diseño estado, se obtiene el diagrama de clases que implementará la funcionalidad de comunicación con el ordenador de proceso de la instalación. Este diagrama de clases se muestra en la figura 4.27.

Generación y transferencia de mapas de alturas y de planitud. Los conjuntos de tareas de generación de mapas bidimensionales de alturas y de planitud, de conversión de estos mapas al formato de visualización *CODES Viewer* y de envío al sistema de almacenamiento remoto de la instalación se implementan en el conjunto de clases que se detalla a continuación. La figura 4.28 representa las relaciones existentes entre estas clases.

- *CMapTransfer*. Transfiere a fichero las muestras de altura generadas para cada fibra de la superficie de la banda, constituyendo un mapa bidimensional.

- *CIUnitTransfer*. Transfiere a fichero los perfiles de planitud generados para cada intervalo de integración de la banda, constituyendo un mapa bidimensional.

- *CStorage*. Encapsula el *hardware* de almacenamiento de datos.

- *CSigExport*. Exporta los mapas de alturas y de planitud de una banda al formato SIG de la aplicación *CODES Viewer*.[6]

[6] El formato SIG es un formato de archivo definido por la aplicación *CODES Viewer* que almacena señales multidimensionales.

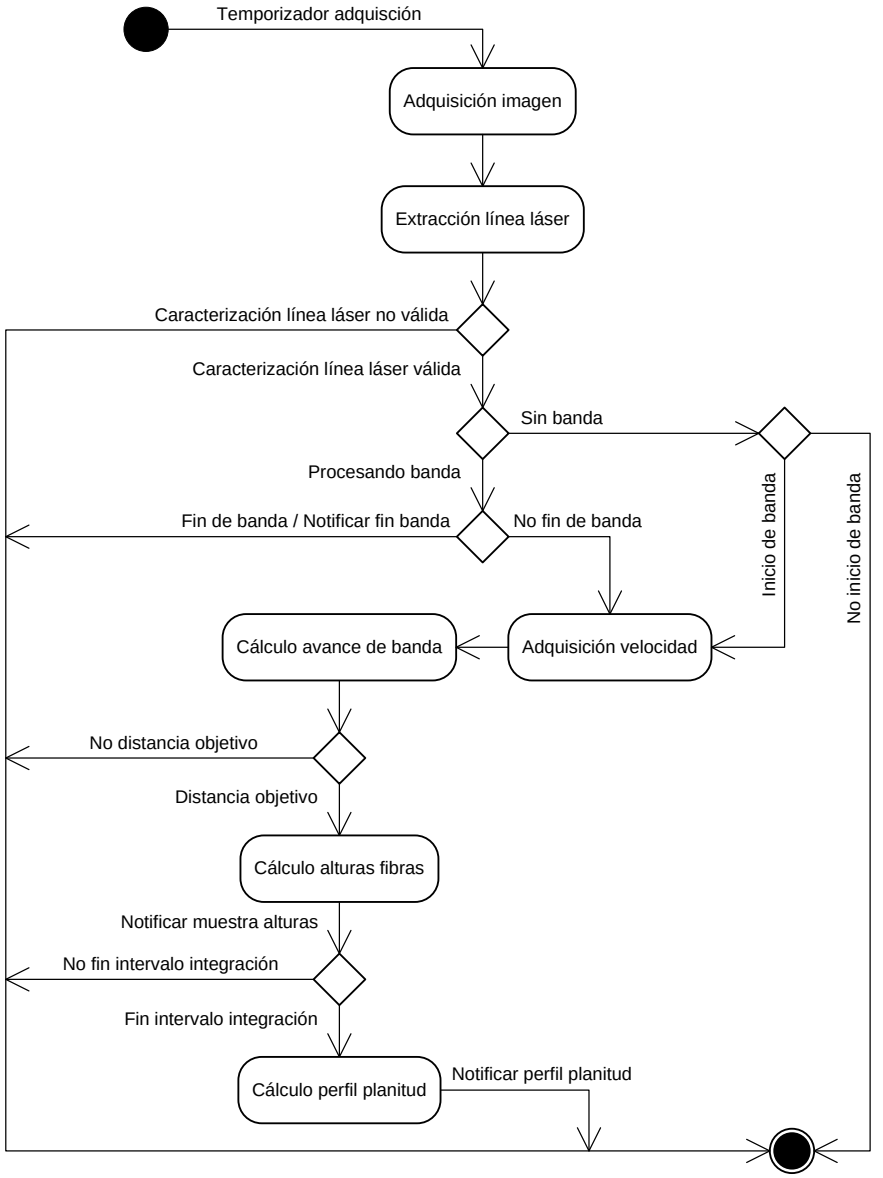


Figura 4.25: Diagrama de estados que define la secuencia de operaciones de las tareas de adquisición y procesamiento de imágenes.

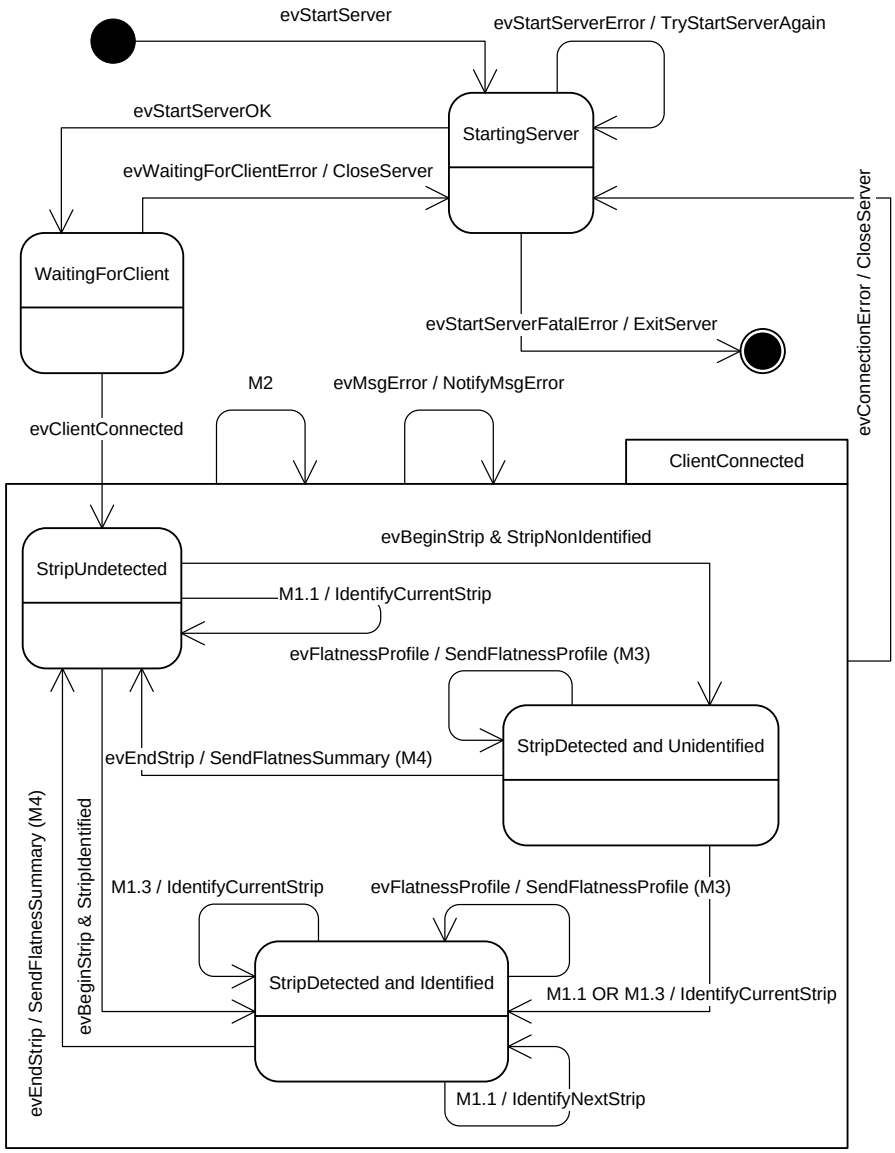


Figura 4.26: Diagrama de estados que especifica las tareas de comunicación del sistema de medición de planitud con el ordenador de proceso de la instalación.

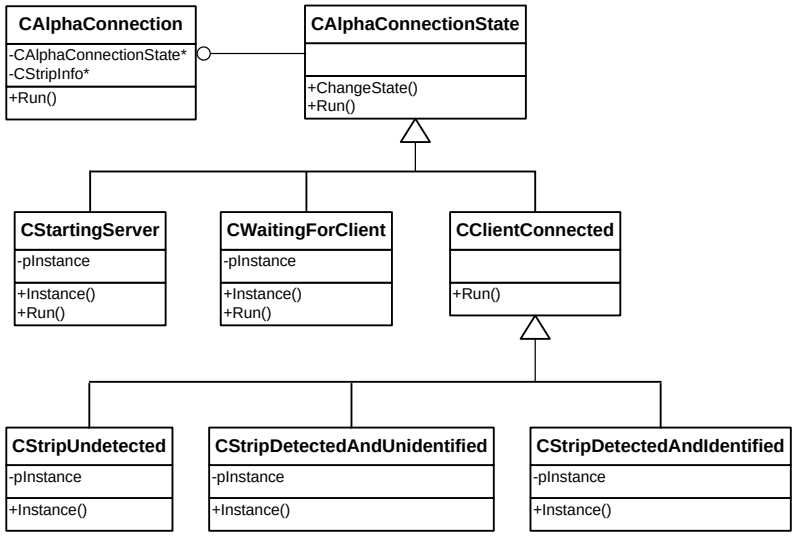


Figura 4.27: Diagrama de clases del servidor de comunicación con el ordenador de proceso de la instalación.

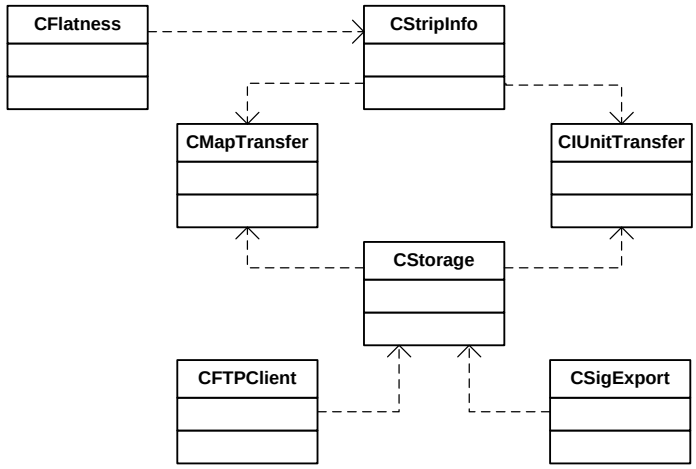


Figura 4.28: Relaciones entre las clases de generación de mapas de alturas y de planitud, de conversión a formato de visualización *CODES Viewer* y de envío al sistema de almacenamiento remoto de la instalación.

- *CFTPClient*. Permite transferir los mapas de la banda, utilizando el protocolo FTP (*File Transfer Protocol*), al sistema de almacenamiento remoto de la instalación.

Grabación y reproducción de vídeo en tiempo real. El conjunto de clases que implementan la funcionalidad de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real se detallan a continuación. La figura 4.29 representa las relaciones existentes entre estas clases.

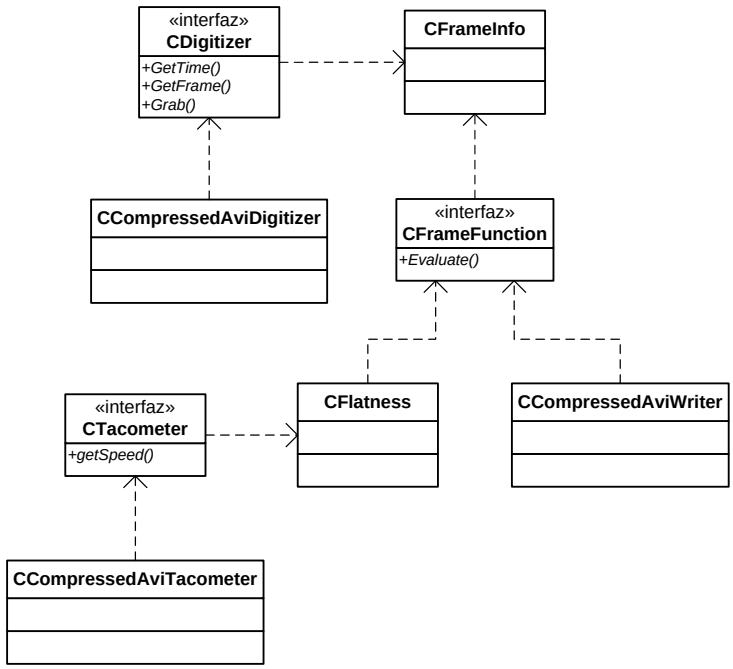


Figura 4.29: Relaciones entre las clases de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real.

- *CCompressedAviWriter*. Permite almacenar en tiempo real las imágenes capturadas por un objeto que implemente la interfaz *CDigitizer*, comprimidas en un contenedor multimedia. Además, junto con cada imagen se almacena el instante de tiempo en el que ha sido capturada y la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea.

- *CCompressedAviDigitizer*. Permite utilizar un contenedor multimedia para emular el funcionamiento de la tarjeta capturadora de imágenes del subsistema de visión por computador. Extrae las imágenes en el mismo orden y en los mismos instantes de tiempo en los que se obtuvieron originalmente por la tarjeta capturadora.
- *CCompressedAviTacometer*. Permite utilizar un contenedor multimedia para emular el funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos que muestrea la señal proporcionada por el sensor de velocidad de la línea de producción. Extrae el dato de velocidad asociado a cada imagen del mismo contenedor multimedia en el que se almacenan las imágenes.

Interfaz gráfica de usuario. Finalmente, se detalla el conjunto de clases que implementan la funcionalidad de actualización de la interfaz gráfica de usuario. La figura 4.30 representa las relaciones entre estas clases.

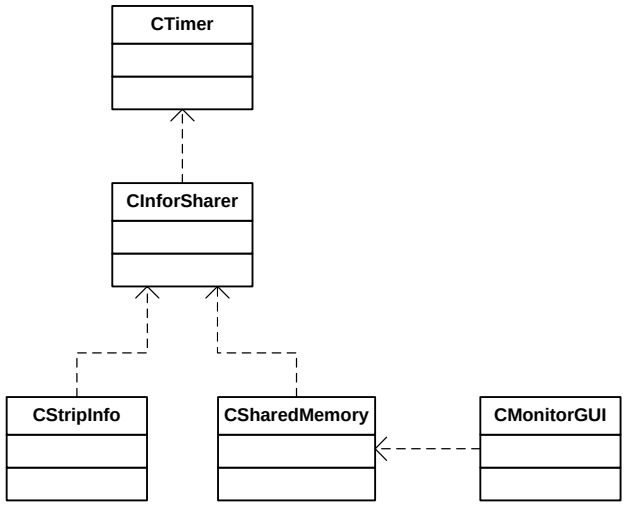


Figura 4.30: Relaciones entre las clases de actualización de la interfaz gráfica de usuario.

- *CTimer*. Ejecuta una acción cada vez que concluye un determinado intervalo de tiempo.
- *CInforSharer*. Permite acceder periódicamente a la información de procesamiento de la banda actual que mantiene el sistema de medición de planitud y la copia en una zona de memoria compartida.

- *CSharedMemory*. Implementa el mecanismo IPC (*Inter Process Communication*) de memoria compartida, garantizando la exclusión mutua en el acceso a los datos.
- *CMonitorGUI*. Accede a la información de procesamiento de la banda actual a través de una zona de memoria compartida y la muestra en la interfaz gráfica de usuario. Además, permite gestionar órdenes de control que el usuario envía al sistema.

Finalmente, en la figura 4.31 se muestra el diagrama de clases que representa el modelo estructural de todo el sistema de medición de planitud aunque, debido a la elevada complejidad de dicho sistema, se muestran sólo sus clases fundamentales.

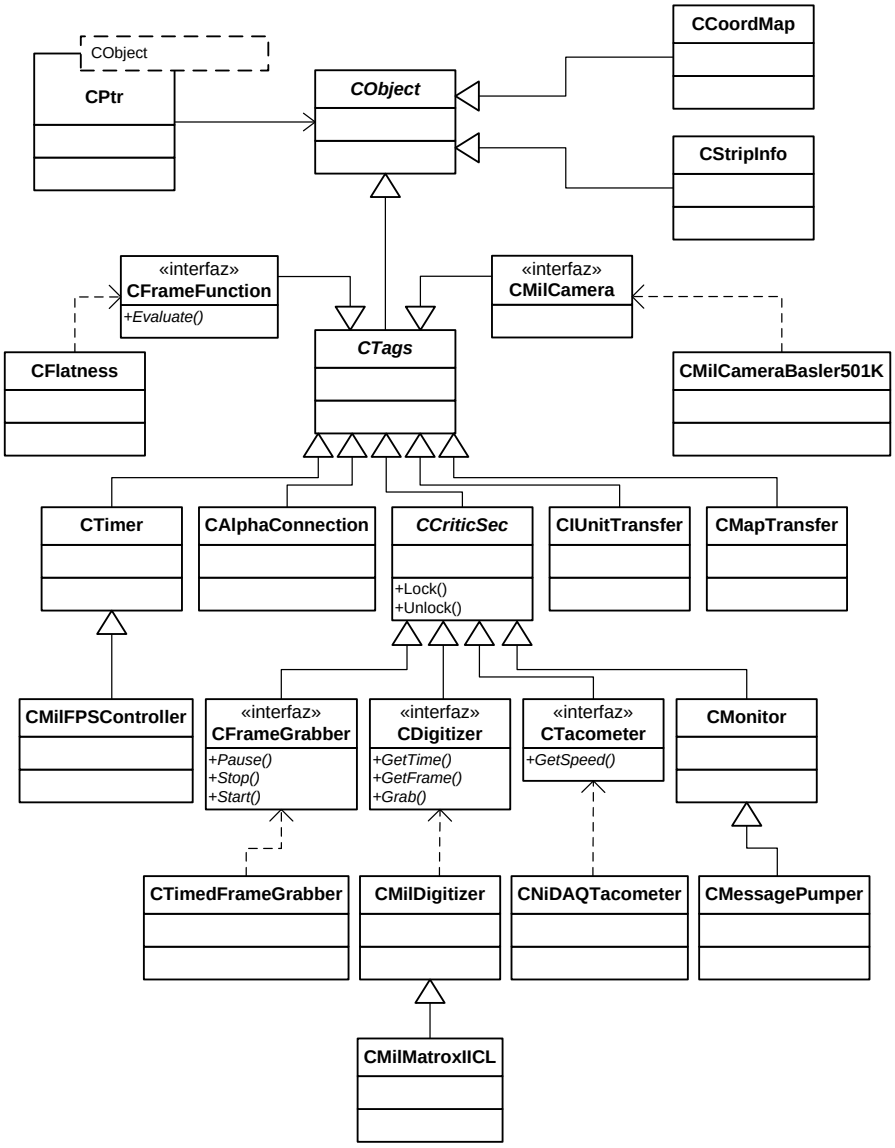


Figura 4.31: Diagrama de clases fundamentales del sistema de medición de planitud.

Capítulo 5

Integración de mecanismos de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real en sistemas de visión por computador

En este capítulo se analizan las principales dificultades existentes en los procesos de validación de un sistema de inspección industrial para su puesta en marcha en el entorno de funcionamiento definitivo. Estas dificultades están originadas tanto por la simulación de los productos a inspeccionar como por la simulación de las condiciones del entorno en el que se realizarán los procesos de inspección. Para superar estas dificultades en el proceso de validación de un sistema de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados basado en técnicas de visión por computador se diseña un componente *software* capaz de registrar los datos de entrada al sistema con el objetivo de reproducir fielmente las condiciones de procesamiento en un laboratorio sobre un prototipo del sistema. La finalidad de este componente es almacenar la secuencia de imágenes generada por la cámara del sistema, así como información necesaria para su procesamiento, en un contenedor multimedia. Para ello se analizan los contenedores más relevantes existentes actualmente y se selecciona el más adecuado para esta tarea. Además, se realiza un diseño experimental para evaluar el rendimiento de algoritmos de compresión de secuencias de imágenes para seleccionar el más adecuado de acuerdo al tipo de imágenes generadas por el sistema.

5.1. Registro de las condiciones de procesamiento en un entorno industrial

Los sistemas industriales de inspección y de medición deben ser validados en laboratorio antes de su instalación definitiva en el entorno funcionamiento. Habitualmente, este proceso de validación se encuentra con dos dificultades.

La primera de estas dificultades es la dimensión del sistema que se pretende validar. Por ejemplo, en la industria del acero, las dimensiones de los sensores y actuadores de los sistemas de monitorización y de control de calidad, así como la geometría necesaria para su funcionamiento, impiden la validación directa del sistema en el laboratorio. La solución adoptada en estos casos suele ser una validación indirecta a través de la validación de una réplica a escala reducida del sistema.

La segunda de las dificultades se deriva de los productos a inspeccionar o a medir y de las condiciones del entorno de funcionamiento. Para validar el sistema en laboratorio se debe poder simular un conjunto de muestras de los productos a inspeccionar y un conjunto de condiciones del entorno en las que el sistema deba realizar la inspección.

En el caso de la industria del acero, la simulación de muestras para el sistema es un proceso extremadamente complejo, aunque puede ser simplificado si se utiliza un conjunto de muestras reales representativo de los productos que se procesan en la instalación industrial. Por otra parte, la simulación de las condiciones del entorno real en el que se ubicará el sistema tras su validación es también un proceso extremadamente complejo para el que no existe una solución sencilla. Las condiciones más difíciles de simular son las referidas a la temperatura (tanto del producto como del entorno de procesamiento), las condiciones ambientales (polvo, gases, humedad...) y las condiciones de iluminación.

Estas dos dificultades se ponen de manifiesto al tratar de validar el funcionamiento del sistema de medición de planitud diseñado en el capítulo 4.

Por tanto, para validar el funcionamiento de este sistema se presenta un mecanismo optimizado de registro en tiempo real de las condiciones de procesamiento de productos laminados en una instalación industrial. Este componente *software* de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real registra, a través del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud mencionado, la secuencia de imágenes capturadas así como información complementaria de procesamiento.

Este componente será el encargado de cumplir con los requisitos funcionales número 4 y número 5 definidos en la fase de diseño del sistema de medición de planitud (ver sección 4.4.3.1). De forma resumida estos requisitos establecen:

- El sistema de medición de planitud debe de ser capaz de almacenar la secuencia de imágenes generada por la cámara del subsistema de visión así como la velocidad instantánea de desplazamiento de la banda por la línea de producción asociada a cada imagen.

- El sistema debe de ser capaz de medir la planitud de productos laminados utilizando como secuencia de imágenes y evolución de la señal de velocidad de desplazamiento de la banda las almacenadas según el requisito anterior.

Este componente trata de emular la funcionalidad de sistemas comerciales como *Q-EYE* [UNILUX, 2008], que permite realizar inspecciones de productos laminados por parte de un operador de forma remota ya que envía una secuencia de vídeo de proceso a un sistema de monitorización, u otros sistemas VCS (*Video Capture System*) similares. Además, amplía la funcionalidad de estos sistemas en el sentido de que las secuencias de vídeo generadas pueden actuar, además, como datos de entrada del sistema de medición.

Para desarrollar este componente se utilizará un contenedor multimedia que almacenará la secuencia de imágenes generada por el sistema y la señal de velocidad de desplazamiento del producto laminado por la instalación. Además, se almacenará el instante de tiempo en el que se captura cada imagen, con lo que podrán ser procesadas posteriormente por el sistema de medición de planitud siguiendo la distribución temporal en la que fueron adquiridas.

Para obtener un componente de grabación óptimo se deben comprimir las imágenes antes de su almacenamiento. Este proceso es realizado mediante un *codec*: compresor-descompresor o codificador-descodificador.

En este capítulo se evalúan los principales contenedores multimedia que pueden ser utilizados para registrar la información de entrada a un sistema industrial de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados y se selecciona el más adecuado. Además, se evalúan los diferentes algoritmos de compresión y descompresión que pueden ser aplicados sobre las imágenes generadas por el sistema para reducir el tamaño de almacenamiento en disco de la información.

Antes de realizar estos dos procesos de evaluación se muestran varios ejemplos de imágenes generadas por la cámara del sistema de medición de planitud. Este conjunto de imágenes, además de servir para definir el contenedor multimedia y el algoritmo de compresión a utilizar, sirven para ilustrar un conjunto de estados de procesamiento del sistema.

5.2. Imágenes adquiridas por el sistema

La cámara del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud genera imágenes monocromas en escala de grises con una profundidad de color de 8 bits (ver tabla 4.2). La tasa de muestreo está, dependiendo de la velocidad de desplazamiento de los productos laminados por la instalación, entre 1 y 40 *fps*. Estas imágenes tienen un tamaño de 640 píxeles en horizontal por 260 píxeles en vertical (ver sección 4.3.2). La figura 5.1 muestra una fotografía de la escena de proceso.

En la figura 5.2 se muestra una imagen generada por la cámara del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud, tomada de la escena de proceso tal cual se observa en la fotografía de la figura 5.1, pero con las dimensiones del área de interés de la escena. La luminancia de esta imagen

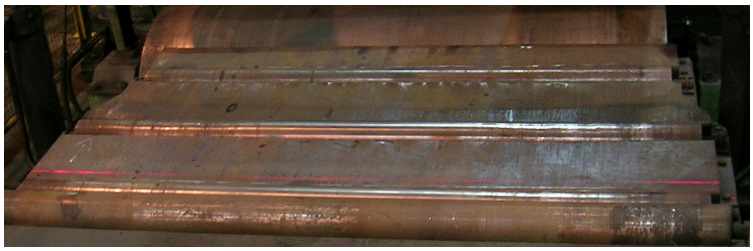


Figura 5.1: Fotografía de la proyección de la línea láser en reposo.

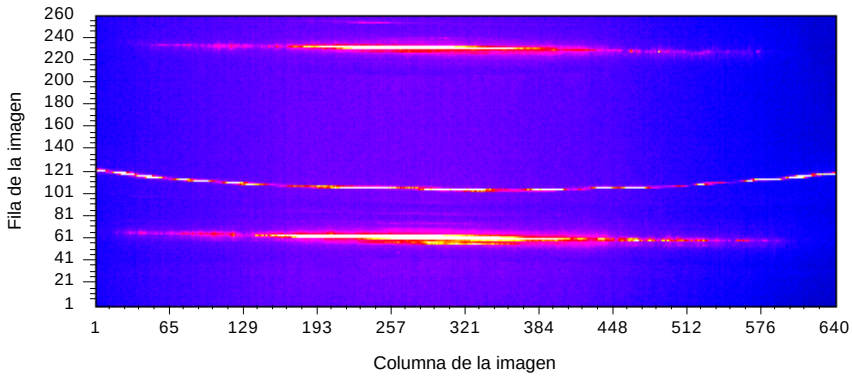


Figura 5.2: Imagen de la proyección de la línea láser en reposo.

está representada utilizando la escala de colores mostrada en la figura 5.3. Todas las imágenes generadas por el sistema de medición de planitud incluidas en esta tesis estarán representadas utilizando esta escala de colores, por lo que no se adjuntará a cada una de ellas.

La imagen de la figura 5.2 representa un estado de procesamiento en el que no hay banda en la escena observada por el sistema de medición. Por tanto, la imagen muestra la proyección de la línea generada por el dispositivo láser sobre el camino de rodillos de la línea de producción (entre las filas 105 y 125, aproximadamente). En esta imagen se pueden observar también reflejos de la iluminación ambiente sobre dos rodillos de la línea de producción (filas 55 a 65 y 225 a 235, aproximadamente).

La figura 5.4 muestra dos fotografías de la escena de proceso. En el caso de la figura 5.4(a) la iluminación ambiental es relativamente alta, mientras que en

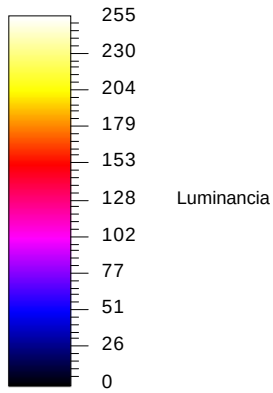


Figura 5.3: Escala de colores utilizada para representar la luminancia en las imágenes generadas por la cámara del sistema.

el caso de la figura 5.4(b) la iluminación ambiental es relativamente baja, salvo reflejos que aparecen en la escena.

La figura 5.5 representa un estado de procesamiento en el que hay banda en la escena observada por el sistema de medición de planitud, tal cual se observa en la fotografía de la figura 5.4. La figura 5.5(a) muestra un instante del procesamiento de una banda de acero cuando la iluminación ambiental es relativamente alta. La figura 5.5(b) muestra un instante de procesamiento de otra banda en el que la iluminación ambiental es relativamente baja. Además, en esta última figura se puede observar que la banda que se procesa tiene un ancho menor que la mostrada en la figura 5.5(a). Estas dos imágenes han sido generadas por la cámara del sistema con los mismos parámetros de configuración: tiempo de exposición, apertura de la óptica, etc. Los cambios en las condiciones de iluminación se deben tanto a la iluminación ambiente como a la iluminación artificial del entorno de funcionamiento del sistema (ver sección 4.1.3).

El componente de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real para el sistema de medición de planitud debe ser capaz de procesar este tipo de imágenes.

5.3. Contenedores multimedia

En esta sección se analizan varios tipos de contenedores multimedia que pueden dar soporte al almacenamiento de la secuencia de imágenes generada por la cámara del sistema de medición de planitud así como a la señal de velocidad de

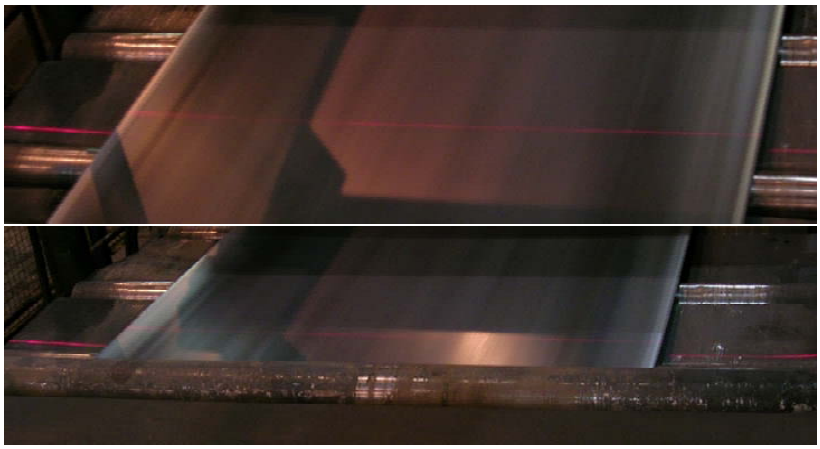


Figura 5.4: Fotografía de la proyección de la línea láser sobre la superficie de una banda de acero: (a) Con iluminación ambiental alta. (b) Con iluminación ambiental baja.

desplazamiento de la banda por la línea de producción.

Un contenedor multimedia es un fichero que almacena información de diversos tipos además de meta-información e información de sincronización para su procesamiento. Los tipos habituales de información son audio, vídeo y texto. En un contenedor multimedia la información se organiza en flujos (*streams*), es decir, secuencias de muestras de determinados tipos.

Estos ficheros son meramente contenedores de información, por lo que el formato de la información contenida y su procesamiento son aspectos independientes del propio fichero. Debido al considerable tamaño que pueden alcanzar las secuencias de muestras en uno de estos contenedores, sobre todo las secuencias de vídeo, es muy habitual que éstas estén comprimidas dentro del contenedor. Estas tareas de compresión son realizadas mediante *codecs*.

A continuación se presentan los principales contenedores multimedia existentes actualmente y que pueden ser adecuados para almacenar la información generada por un sistema de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados.

5.3.1. *Audio Video Interleave*

El contenedor AVI (*Audio Video Interleave*) fue diseñado originalmente por *Electronic Arts* basándose en el formato RIFF (*Resource Interchange File For-*

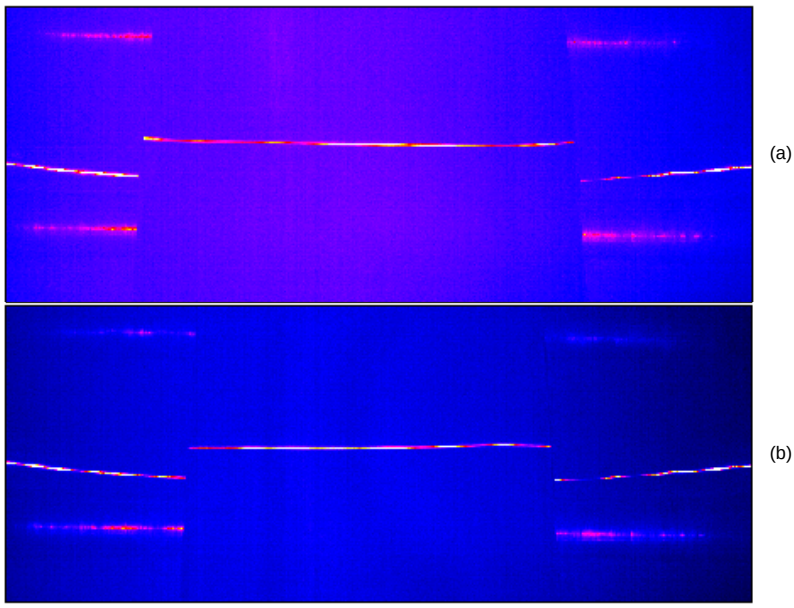


Figura 5.5: Imagen de la proyección de la línea láser sobre la superficie de una banda de acero: (a) Con iluminación ambiental alta. (b) Con iluminación ambiental baja.

mat). Posteriormente fue redefinido por *Microsoft* en el año 1992 convirtiéndose en un estándar de facto. Es el tipo de contenedor más utilizado actualmente para almacenar información multimedia.

La estructura de un fichero AVI debe contener, al menos, un *stream* de vídeo y, opcionalmente, uno o varios *streams* de audio. También pueden almacenar *streams* de tipo texto o MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*). Tanto los *streams* de vídeo como los de audio pueden estar codificados. En [FOURCC, 2008] se muestra una lista completa de los *codecs* que pueden aplicarse a *streams* a almacenar en este contenedor.

Este contenedor puede almacenar *streams* de vídeo obtenidos con una tasa de muestreo variable, VFR (*Variable Frame Rate*), y *streams* de audio con un número de bits variable por unidad de tiempo, VBR (*Variable Bit Rate*). Además, permite utilizar imágenes clave (*key frames*), que se utilizan para almacenar las imágenes siguientes del *stream* solamente almacenando los cambios producidos con respecto a la imagen clave, reduciendo así el tamaño del *stream* de vídeo.

Desde el punto de vista del desarrollador de aplicaciones existen dos formas

de crear y editar ficheros AVI: utilizando las tecnología *Video for Windows* o la tecnología *DirectShow*. Para ello se dispone de todas las herramientas necesarias en *Microsoft Platform SDK* en el primer caso y en *Microsoft DirectX* en el segundo.

5.3.2. *Advanced Streaming/Systems Format*

El contenedor ASF (*Advanced Streaming/Systems Format*) fue diseñado por *Microsoft* con un objetivo similar al contenedor AVI (ver sección 5.3.1).

Aunque este tipo de contenedor se puede utilizar en cualquier computador de forma local, su diseño está orientado al uso en una red de computadores y está basado en la utilización de objetos *serializados*. De esta forma puede ser utilizado para realizar *streaming*. Esta técnica permite transmitir la información del contenedor desde un servidor a un cliente a través de una red de computadores al tiempo que se reproduce en el cliente. Es decir, permite la reproducción del contenido del fichero sin que el cliente disponga del contenedor completo.

Los *streams* de vídeo y de audio se suelen comprimir habitualmente, para almacenarlos en este contenedor, mediante *Windows Media Video* y *Windows Media Audio*.

Para crear y editar ficheros ASF se pueden utilizar las herramientas disponibles en el *Microsft Windows Media Framework*.

5.3.3. *QuickTime*

QuickTime es una tecnología multimedia cuya primera versión fue desarrollada por *Apple Computer*. Fue utilizada como base por la organización ISO para desarrollar el estándar MPEG-4 (ISO/IEC 14496) (ver sección 5.3.4) que define, entre otros, *codecs* para vídeo, audio y *streaming* así como un contenedor multimedia.

Un fichero de tipo *QuickTime* contiene una o varias pistas que pueden almacenar un *stream* de cualquiera de los tipos soportados por *QuickTime* o una referencia a un *stream* que puede estar almacenado en otro fichero o en otro computador accesible por red. Además de pistas de vídeo, este contenedor permite almacenar sonido, texto, números enteros y reales, MIDI, vídeo basado en incrementos, imágenes estáticas, imágenes tridimensionales e imágenes interactivas.

Las pistas de vídeo y audio pueden estar comprimidas con una amplia variedad de *codecs* mediante *QuickTime Codec Manager* y *QuickTime Sound Manager*, respectivamente. Además, al igual que el contenedor AVI (ver sección 5.3.1) permite almacenar *streams* de vídeo VFR y *streams* de audio VBR.

Desde el punto de vista del desarrollador de aplicaciones es posible crear y editar ficheros *QuickTime* utilizando la API del *QuickTime Framework*.

5.3.4. *Moving Picture Experts Group*

El contenedor MPEG-4 fue definido por la organización ISO en la parte 14 del estándar MPEG-4 y está basado en el contenedor *QuickTime* (ver sección 5.3.3).

Este contenedor permite almacenar *streams* de vídeo, audio y texto así como cualquier tipo de información en *streams* privados. Siguiendo la tendencia actual en el desarrollo de contenedores multimedia, también permite hacer *streaming*.

Uno de los principales inconvenientes que presenta este contenedor es que admite la información comprimida con una variedad más reducida de *codecs* de vídeo y audio que en el caso de los contenedores AVI (ver sección 5.3.1) o *QuickTime*.

A diferencia de los contenedores AVI, ASF (ver sección 5.3.2) y *QuickTime*, la especificación de este tipo de ficheros no es gratuita.

5.3.5. OGG/OGM

El contenedor OGG fue desarrollado inicialmente por la fundación *Xiph* como un contenedor multimedia de código abierto, diseñado para realizar tareas de edición y de *streaming* de forma eficiente.

A partir del contenedor OGG se desarrolla el contenedor OGM, que presenta unas ligeras mejoras con respecto a su predecesor, entre ellas la posibilidad de dividir el vídeo en varios fragmentos así como contener múltiples pistas de audio.

Este contenedor admite información comprimida con una amplia variedad de *codecs*, aunque lo más habitual es utilizar los proporcionados por *Xiph*.

La especificación del contenedor OGG es de código abierto mientras que la del contenedor OGM no lo es. Para crear y editar ficheros de tipo OGG se puede utilizar la API proporcionada por *Xiph* para este propósito.

5.3.6. Matroska

Matroska es un contenedor de vídeo desarrollado por *The Matroska Project*. Su principal funcionalidad es que permite acceder a diferentes secuencias dentro del *stream* de vídeo como si se tratara de capítulos del mismo, además de proporcionar un menú de navegación sobre ellos favoreciendo una búsqueda eficiente dentro del *stream*. Además, permite hacer *streaming*.

La información que almacena puede estar comprimida con una amplia variedad de *codecs*, tanto de vídeo como de audio.

La especificación de este contenedor está disponible bajo licencia pública GNU, GNU GPL (*General Public Licence*). Para cear y editar ficheros de este tipo se debe utilizar la API proporcionada por *The Matroska Project* para este propósito.

5.4. Algoritmos de compresión y descompresión: *codecs*

En esta sección se analizan varios algoritmos de compresión y descompresión, *codecs*, que pueden ser utilizados para comprimir la secuencia de imágenes generada por la cámara de un sistema de reconstrucción 3D basado en técnicas de visión por computador.

Un *codec* es una especificación *software*, *hardware* o una combinación de ambos que se encarga de codificar una señal para su almacenamiento y de descodificarla para su posterior procesamiento, siendo de gran utilidad en el manejo de secuencias de vídeo debido al gran volumen de información involucrado. En función de la compresión aplicada existen dos tipos de *codecs*: con pérdida y sin pérdida.

Los *codecs* con pérdida, *lossy codecs*, comprimen los datos originales de tal forma que eliminan la información que no es perceptible por el ojo humano en el caso de *codecs* de vídeo, y eliminan la información que no es perceptible por el oído humano en el caso de los *codecs* de audio. En ocasiones también se elimina parte de la información visible y parte de la información audible para obtener ratios de compresión más elevados, siempre mermando la calidad de la información comprimida. La principal ventaja de este tipo de *codecs* es que logran unos ratios de compresión relativamente altos. Sin embargo, su principal desventaja es que no pueden reconstruir la información original a partir de la información comprimida.

Los *codecs* sin pérdida, *lossless codecs*, aplican algoritmos que permiten reducir el tamaño de la información garantizando siempre que se puede reconstruir, a partir de la información comprimida, la información original.

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de seleccionar el *codec* de vídeo a utilizar es el modo en el que se codifica la información de color de cada una de las imágenes de la secuencia a comprimir. Cada *codec* está optimizado para trabajar con uno o varios modelos de color diferentes, e incluso algunos *codecs* pueden no ser capaces de procesar la información de color expresada en algún modelo particular.

Los modelos más comunes son YUV, RGB y escala de grises. El modelo YUV define el espacio de color en función de tres componentes: uno de luminancia, o intensidad lumínica, y dos de crominancia, o color. El modelo RGB define el espacio de color en base a tres colores primarios: el rojo, el verde y el azul. El modelo de escala de grises, en lugar de almacenar colores, almacena la intensidad lumínica asociada a cada píxel de la imagen.

Tras una selección previa basada, entre otros, en el estudio realizado en [Vatolin *et al.*, 2007] de los diferentes *codecs* que podría utilizar el sistema de medición de planitud en el componente de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real se obtiene un conjunto de cuatro *codecs* que cumplen con los requisitos

necesarios. Estos requisitos son, en primer lugar, que el *codec* sea de tipo sin pérdida para que se pueda recuperar una copia exacta de la información original adquirida por el sistema. En segundo lugar que el *codec* sea capaz de procesar secuencias de imágenes en escala de grises. Y, finalmente, que no utilice imágenes clave, puesto que de esta forma será más robusto y necesitará un tiempo menor de procesamiento para cada imagen.

Este conjunto está formado por los *codecs* LEAD, ZLIB, MSZH y PICVideo. A continuación se presentan las principales características de cada uno de ellos.

5.4.1. LEAD MCMP/MJPEG

MJPEG (*Motion Joint Photographic Experts Group*) es una adaptación para vídeo del estándar JPEG, utilizado para comprimir imágenes estáticas con 24 bits de profundidad de color o en escala de grises. Esta adaptación trata un *stream* de vídeo como una secuencia de imágenes independientes que comprime de forma individual con el algoritmo JPEG sin utilizar compresión *interframe*, es decir, sin utilizar imágenes clave. Por su parte, MCMP (*Motion CMP*) es una adaptación para vídeo del algoritmo de compresión CMP desarrollado por *LEAD Technologies* [LEAD, 2008], que obtiene unos resultados similares a MJPEG tanto en tamaño de ficheros como en calidad.

Este *codec* está diseñado para procesar imágenes en color RGB de 24 bits e imágenes en escala de grises de 8, 12 y 16 bits. En todos los casos permite realizar una compresión sin pérdida y en tiempo real.

5.4.2. ZLIB

La mayoría de los *codecs* existentes actualmente no permiten parametrizar el grado de compresión que aplican a la información original. ZLIB es el único *codec* sin pérdida que permite configurar el nivel de compresión que aplica a imágenes en escala de grises. Posee dos formas de configuración. Una orientada a la compresión de la secuencia de vídeo en tiempo real con un nivel bajo de compresión, denominada *HiSpeed*, y otra más lenta pero con un nivel más alto de compresión, denominada *HiCompress*. Además, proporciona la ventaja de soportar procesamiento multihilo.

Este *codec*, que forma parte de una librería de *codecs* de vídeo sin pérdida LCL (*Lossless Codec Library*), permite procesar imágenes y animaciones 3D en color, YUV y RGB, así como en escala de grises.

5.4.3. MSZH

El *codec* MSZH es similar al *codec* ZLIB (ver sección 5.4.2), pero utiliza un algoritmo que no permite parametrizar el grado de compresión aplicado a cada

una de las imágenes de la secuencia.

Este *codec* no presenta ninguna restricción en el formato de imágenes que puede procesar, ni en color ni en escala de grises. Al igual que el *codec* ZLIB, pertenece a la librería LCL.

5.4.4. PICVideo

PICVideo es un *codec* desarrollado por *Pegasus Imaging Corporation* [PEGASUS, 2008] con el objetivo de ser utilizado por usuarios profesionales.

Este *codec* permite comprimir información sin pérdida tanto en formatos de color RGB de 24 bits como en escalas de grises de 8 bits. Está diseñado específicamente para aplicaciones que requieran compresión y descompresión sin pérdida con restricciones de tiempo real.

5.5. Selección del contenedor y del *codec* adecuados

En esta sección se seleccionan el tipo de contenedor multimedia y el algoritmo de compresión que se van a utilizar en el componente de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real del sistema de medición de planitud.

Todos los contenedores descritos en la sección 5.3 son apropiados para el almacenamiento de los datos de entrada del sistema. En todos ellos es posible crear *streams* de vídeo para almacenar la secuencia de imágenes generada por la cámara del sistema y *streams* de texto para almacenar la secuencia que representa la evolución de la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción.

Las restricciones sobre el formato de las imágenes que pueden contener no las impone el fichero, sino el *codec* que las comprime. Por tanto, se considera más apropiado el contenedor AVI, ya que es compatible con un mayor número de *codecs* que el resto de contenedores analizados. Además, las funcionalidades que ofrecen contenedores multimedia más recientes están orientadas, en su mayoría, al procesamiento efectivo de películas. Estas funcionalidades, que no ofrece el contenedor AVI, son edición de vídeo, menús interactivos y múltiples *streams* de audio, entre otras. Ninguna de estas funcionalidades se requiere para un sistema de reconstrucción 3D.

Por tanto, el contenedor multimedia seleccionado para almacenar la información del sistema es el contenedor AVI. Además, este contenedor tiene la ventaja de ser el más simple desde el punto de vista del desarrollador de aplicaciones.

La elección del *codec* a utilizar en el sistema requiere una evaluación exhaustiva de los posibles algoritmos que se pueden aplicar para comprimir la información antes de introducirla en el contenedor multimedia seleccionado.

En [Vatolin *et al.*, 2007] se realiza una comparación del rendimiento de *codecs* sin pérdida sobre secuencias de vídeo en color, tanto en formato YUV como RGB. En esta comparativa no se realizan pruebas con secuencias de vídeo almacenadas en escala de grises. En otras comparativas similares sucede prácticamente lo mismo: no existe información acerca del rendimiento de *codecs* cuando éstos procesan imágenes en escala de grises.

5.5.1. Evaluación del rendimiento de *codecs* con imágenes en escala de grises

La falta de información acerca del rendimiento de *codecs* sin pérdida con imágenes en escala de grises motiva la realización de un proceso de evaluación sobre el conjunto de *codecs* definido en la sección 5.4.

El diseño de este proceso de evaluación se realiza según el procedimiento sistemático propuesto en [Jain, 1991]. La primera fase de este procedimiento consiste en seleccionar un conjunto de métricas de rendimiento apropiadas para el sistema o los componentes que se desean evaluar. En la segunda fase se identifican los factores que pueden afectar a las métricas de rendimiento seleccionadas en la fase anterior. Seguidamente, se realiza un experimento de evaluación del rendimiento para cada combinación relevante de valores de los factores identificados en la segunda fase del procedimiento.

Para evaluar el rendimiento del conjunto de *codecs* preseleccionado, en la primera fase del diseño de este procedimiento se selecciona como métrica fundamental el ratio de compresión que obtiene cada algoritmo de una secuencia de imágenes dada. Este ratio se expresa como la relación entre el tamaño de la imagen original y el tamaño de la imagen comprimida. Por tanto, cuanto mayor sea esta relación mejor será la compresión alcanzada por el algoritmo. En general, para obtener un ratio de compresión alto se requiere un tiempo de procesamiento relativamente alto. El tiempo de ejecución del algoritmo de compresión, equivalente al tiempo de CPU, se utiliza como una métrica que indica el coste computacional del proceso de compresión. En este proceso se considera una métrica fundamental al tener restricciones de tiempo real el sistema de reconstrucción 3D en el que va a ser utilizado el algoritmo seleccionado. Bajo estas restricciones de tiempo real, se debe obtener un compromiso entre las dos métricas fundamentales de evaluación de rendimiento.

Estas dos métricas son la principal medida de rendimiento de cualquier sistema. Sin embargo, es interesante en este caso analizar métricas secundarias, como el consumo de recursos del sistema realizado por cada algoritmo, para conocer su eficiencia de compresión.

En la segunda fase del proceso de evaluación se ha tenido en cuenta que existen multitud de factores que afectan las métricas de rendimiento. Evidentemente, el factor fundamental en la evaluación es el algoritmo de compresión utilizado en

cada experimento. Además, se consideran dos conjuntos de factores secundarios. El primero de estos conjuntos, identificado como carga de trabajo, especifica cómo son las imágenes que el algoritmo debe comprimir. Este conjunto de factores está definido por el tamaño de la imagen, por su contenido y por el formato de representación de la información. El segundo de los conjuntos, identificado como factores de la plataforma, engloba aspectos tales como la implementación *software* del algoritmo así como el procesador y el disco de la plataforma en la que se realizan los experimentos.

En la figura 5.6 se muestra de forma gráfica el proceso de evaluación del rendimiento del conjunto de *codecs* preseleccionado.

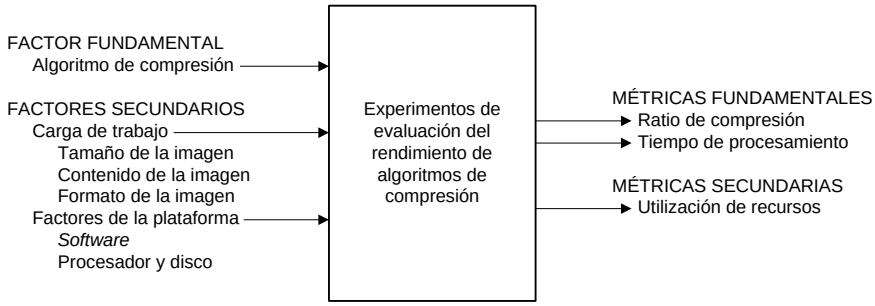


Figura 5.6: Factores que afectan a las métricas de rendimiento en los experimentos de evaluación del conjunto de *codecs* preseleccionado.

Por tanto, la elección del *codec* a utilizar en el sistema se basa en el resultado de un conjunto de pruebas experimentales sobre imágenes generadas por la cámara del subsistema de visión por computador que determinarán el ratio de compresión, el tiempo de procesamiento y el uso de recursos del sistema de cada uno de los *codecs* analizados en la sección 5.4.

El diseño experimental se debe centrar en la evaluación del impacto del factor fundamental sobre las dos métricas de rendimiento principales. Además, los valores de los factores secundarios deben de ser ajustados a unos valores típicos tanto de la carga de trabajo como de la plataforma y no deben ser modificados durante el proceso de evaluación.

Los valores de los factores que definen la carga de trabajo de cada experimento se fijan de acuerdo a las características de las imágenes generadas por la cámara del subsistema de visión por computador descritas en la sección 5.2. La carga va a estar definida por una secuencia de imágenes en escala de grises, con una resolución de 640×260 píxeles y 8 bits de profundidad de color para cada píxel (un ejemplo de imágenes de esta carga de trabajo se puede observar en la

figura 5.5).

Los factores de la plataforma que definen el segundo conjunto de factores secundarios del proceso de evaluación serán los mismos en todo el proceso de evaluación. La implementación de cada *codec* se obtiene del sitio web de su desarrollador. Para la realización de estos experimentos cada algoritmo se ejecuta en un equipo PC con las características mostradas en la tabla 5.1. Este equipo es idéntico al que ejecutará el sistema en su instalación definitiva en la línea industrial.

Plataforma de experimentación	
Procesador	Intel Pentium D 930, Presler 65 nm 2×16 KiB caché L1, 2×2048 KiB caché L2
Memoria principal	2048 MiB (2×1024 MiB) PC2-5300 CL4-4-4-12-16
Disco duro	Seagate Barracuda SATA 3,0 Gb/s 250 GB 7200 rpm 8 MB caché, 4,16 ms latencia media
Sistema operativo	Microsoft Windows XP Professional 32 bits, SP2

Tabla 5.1: Características de la plataforma de experimentación.

Para realizar las medidas de tiempo de procesamiento se utiliza el monitor de altas prestaciones que proporciona el equipo de experimentación. La resolución de este contador es del orden de 1 microsegundo.

Tras realizar las pruebas de evaluación del rendimiento de cada *codec* se selecciona el más adecuado para su utilización en el sistema de reconstrucción 3D. Una vez seleccionado el *codec* se realiza un conjunto de pruebas de integración para evaluar el rendimiento del sistema con dicho *codec*.

A continuación se muestran los resultados de la ejecución de los experimentos realizados para evaluar el rendimiento de cada *codec* preseleccionado sobre una secuencia de imágenes generada por la cámara del sistema de medición de planitud en escala de grises. Esta secuencia está formada por un conjunto de 636 imágenes muestreadas a una tasa de 37 *fps*.

5.5.1.1. Evaluación del rendimiento sin compresión

En primer lugar se muestran los resultados obtenidos al introducir la secuencia de imágenes en el contenedor multimedia seleccionado sin aplicar ningún tipo de compresión. Estos resultados servirán de base para realizar las comparaciones entre los diferentes *codecs*.

En la figura 5.7 se pueden observar el tiempo de procesamiento de cada imagen, o el tiempo de respuesta del *codec* para cada imagen, para realizar esta tarea así como la utilización de recursos.

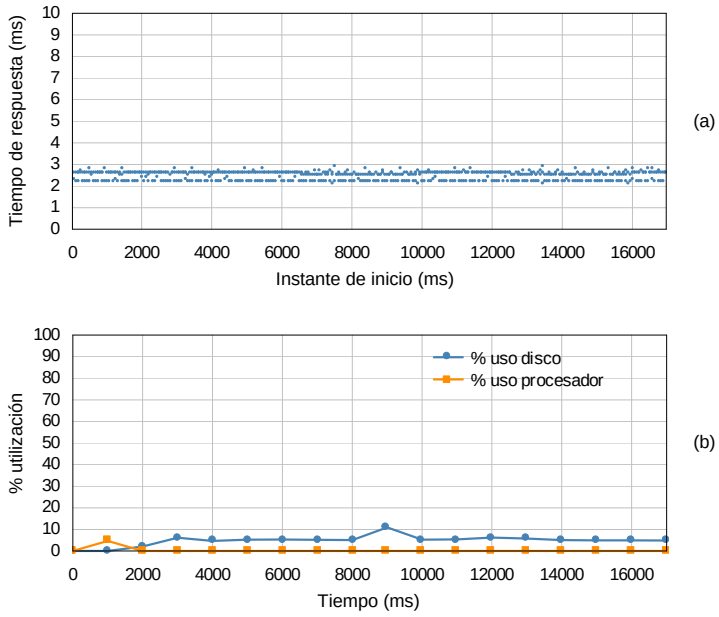


Figura 5.7: Rendimiento sin compresión de imágenes: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

El comportamiento bimodal que se puede apreciar en el tiempo de procesamiento, mostrado en la figura 5.7(a), se debe a que las operaciones de acceso a disco para almacenar las imágenes de la secuencia se realizan de forma *buffereada*, necesitando más tiempo de procesamiento cuando la memoria intermedia se llena y debe ser enviada a disco.

En cuanto a la utilización de recursos mostrada en la figura 5.7(b), en este experimento se debería de apreciar la menor utilización del procesador de todo el conjunto de experimentos a realizar dado que no se efectúa ninguna operación de compresión sobre las imágenes. Del mismo modo, la utilización del disco debería de ser la más elevada dado que se generará el contenedor multimedia de mayor tamaño de todo el conjunto de experimentos. En este caso el contenedor generado para la secuencia de imágenes de prueba es de 100 MiB.

5.5.1.2. Evaluación del rendimiento del *codec* LEAD

Tras la realización del experimento inicial en el que no se aplica compresión alguna a las imágenes de la secuencia de prueba, se desarrolla el conjunto de ex-

perimentos en el que se comprime cada una de las imágenes antes de introducirla en el contenedor multimedia.

El primero de los experimentos de este conjunto evalúa el rendimiento del *codec* LEAD MCMP/MJPEG (ver sección 5.4.1). La implementación utilizada en este experimento es la proporcionada en la versión 1.0.0.39.

En la figura 5.8 se pueden observar el tiempo de procesamiento consumido así como la utilización de recursos durante la compresión y el almacenamiento de la secuencia de imágenes de prueba.

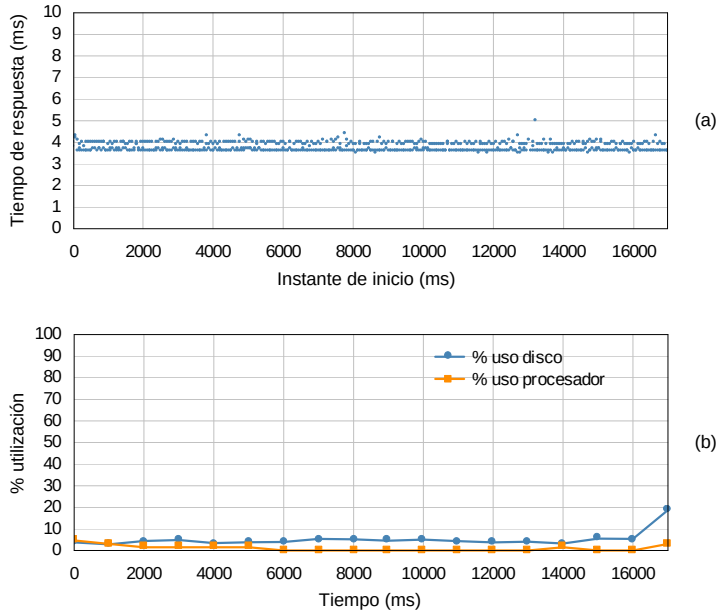


Figura 5.8: Rendimiento del *codec* LEAD MCMP/MJPEG: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

En la evolución del tiempo de procesamiento, mostrado en la figura 5.8(a), se puede observar que el tiempo de respuesta para cada imagen, es decir, el tiempo que tarda el *codec* en comprimir la imagen y enviarla al contenedor, presenta, al igual que en el experimento inicial, un comportamiento bimodal causado por la utilización de memoria intermedia en la operaciones de acceso a disco. También se puede observar que el tiempo de procesamiento aumenta con respecto al experimento inicial, dado que se realiza alguna operación más sobre cada imagen: la operación de compresión.

En relación con la utilización de recursos, mostrada en la figura 5.8(b), se

puede apreciar una ligera disminución en el uso del disco en detrimento de un ligero aumento en el uso del procesador. Esta distribución en el consumo de recursos explica que el tamaño del contenedor generado en este caso sea de 54,1 MiB.

5.5.1.3. Evaluación del rendimiento del *codec* ZLIB

Como se ha indicado en la sección 5.4.2, este *codec* posee dos modos de funcionamiento: un modo de tiempo real y un modo de alta compresión, *HiSpeed* y *HiCompress*, respectivamente. A continuación se resumen los resultados de la experimentación en cada uno de ellos.

La implementación del *codec* utilizada en este experimento es la proporcionada en la librería LCL-AVIzlib, en su versión 2.2.3.

ZLIB *HiSpeed*. En este modo de funcionamiento el *codec* ofrece un tiempo de respuesta para cada una de las imágenes procesadas relativamente bajo, como se puede observar en la figura 5.9(a), con una penalización nada excesiva en el tamaño del contenedor generado, 30,3 MiB. Además, el consumo de recursos, mostrado en la figura 5.9(b), también es bajo.

ZLIB *HiCompress*. En este modo de funcionamiento el *codec* necesita un tiempo de procesamiento para cada imagen muy alto, más de 60 milisegundos como se puede observar en la figura 5.10(a). Sin embargo, este elevado tiempo de procesamiento, que como se puede observar en la figura 5.10(b) requiere un uso excesivo del procesador, no repercute en una reducción notable del tamaño del contenedor generado con respecto al modo de funcionamiento anterior, ya que en este caso es de 27,1 MiB, tan solo un 10 % menor con una diferencia de utilización del procesador de más del 90 %.

Con este tiempo de procesamiento para cada imagen, el modo de funcionamiento de alta compresión de este *codec* no es admisible para el sistema de medición de planitud dado que sólo permitiría comprimir imágenes en tiempo real a una tasa de muestreo máxima de 15 *fps*, muy alejado del objetivo de 40 *fps* que persigue el sistema.

5.5.1.4. Evaluación del rendimiento del *codec* MSZH

La implementación del *codec* utilizado en este experimento es la proporcionada en la librería LCL-AVImszh, en su versión 2.2.3.

A partir de la observación del tiempo de procesamiento de cada imagen, mostrado en la figura 5.11(a), se deduce que este *codec* no permitiría cumplir con los requisitos de compresión en tiempo real de las imágenes generadas por el sistema de medición de planitud. El tiempo medio utilizado en el procesamiento

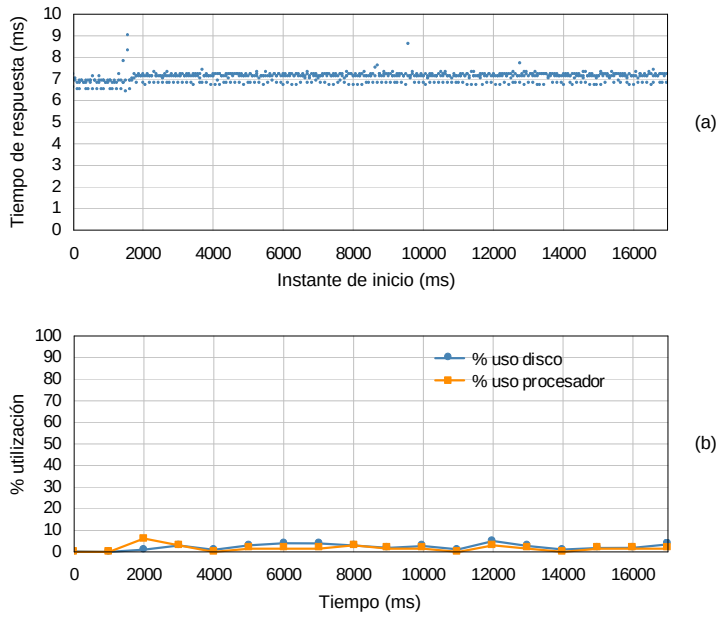


Figura 5.9: Rendimiento del *codec* ZILB *HiSpeed*: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

de una imagen es de 33 milisegundos, por lo que sólo garantizaría compresión en tiempo real para tasas de muestreo por debajo de 33 *fps*, un valor alejado del objetivo del sistema. Además, como se muestra en la figura 5.11(b) la sobrecarga que introduce en el procesador es demasiado elevada y no logra un ratio de compresión destacable. El tamaño final del contenedor generado es de 42,9 MiB.

5.5.1.5. Evaluación del rendimiento del *codec* PICVideo

La implementación del *codec* utilizado en este experimento es la proporcionada en la versión 2.10.0.27.

Como se puede observar en la figura 5.12(a), el tiempo de procesamiento de cada una de las imágenes de la secuencia de prueba es muy bajo, comparable incluso con el tiempo registrado en el experimento inicial sin compresión (ver figura 5.7(a)). Además, como se puede observar en la figura 5.12(b), la utilización de recursos para realizar las tareas de compresión y almacenamiento también es baja.

Sin embargo, este *codec* tiene la limitación de que el ratio de compresión

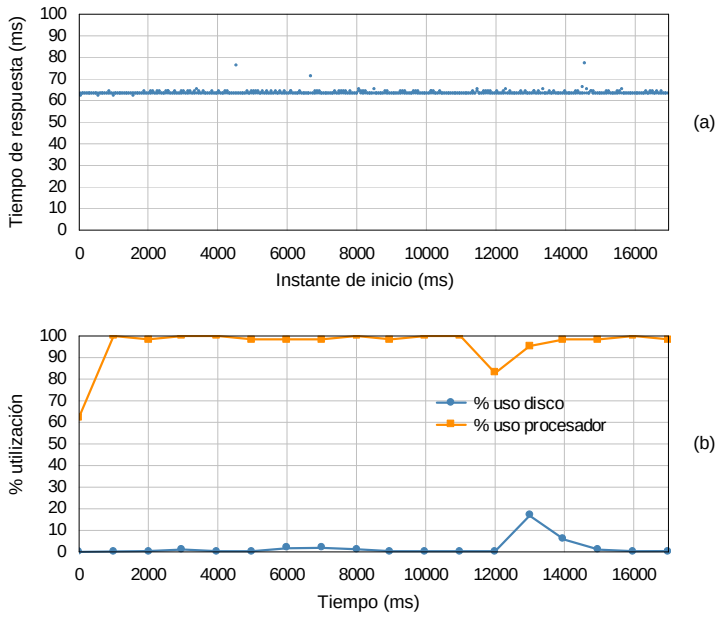


Figura 5.10: Rendimiento del *codec* ZILB *HiCompress*: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

alcanzado también es relativamente bajo. El tamaño del contenedor generado es de 60,7 MiB.

5.5.1.6. Comparación de resultados

En esta sección se resumen los resultados obtenidos en el proceso de experimentación y se selecciona el *codec* más adecuado para su utilización en el sistema de medición de planitud.

En la tabla 5.2 se muestran las dos métricas fundamentales evaluadas: el ratio de compresión, kx, obtenido por cada uno de los *codecs* así como los tiempos mínimo, medio y máximo de procesamiento de las imágenes de la secuencia, $t^p_{mín}$, t^p_{med} y $t^p_{máx}$, respectivamente. Esta tabla también resume la métrica secundaria evaluada: la utilización de recursos del equipo para llevar a cabo las tareas de compresión: porcentaje de utilización del procesador, $\%_{cpu}$, y porcentaje de utilización del disco, $\%_{disco}$. Además, se muestra el porcentaje de imágenes retrasadas en cada uno de los experimentos $\%_{retr}$, es decir, el número de imágenes que el algoritmo no ha podido comprimir en tiempo real para una

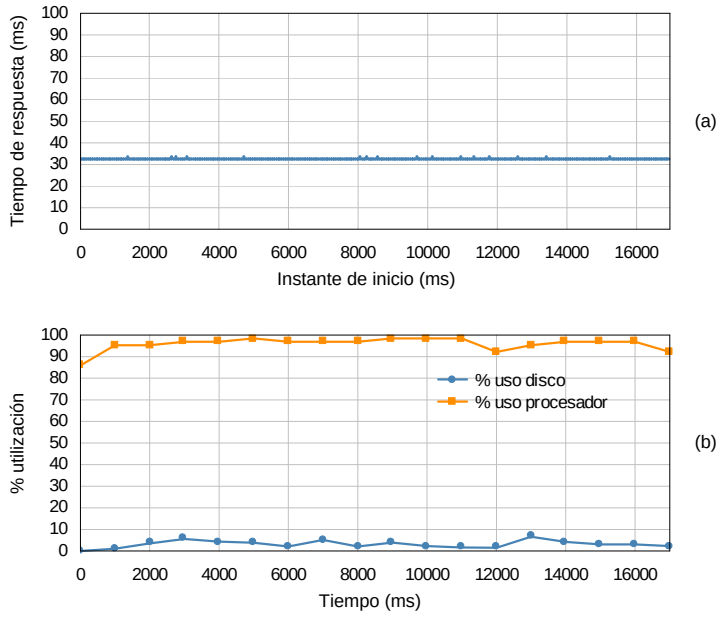


Figura 5.11: Rendimiento del *codec* MSZH: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

tasa de muestreo de 37 *fps*.

A partir de los resultados obtenidos en este conjunto de experimentos se selecciona el *codec* ZLIB en modo de funcionamiento *HiSpeed* para su integración en el sistema de medición de planitud. Este *codec* ofrece una relación entre ratio de compresión y tiempo de procesamiento aceptable con un consumo de recursos relativamente bajo. En caso de que las restricciones de tiempo real del sistema no se vieran cumplidas con la utilización de este *codec*, la segunda alternativa sería el *codec* PICVideo, que necesita menos tiempo de procesamiento por imagen y consume menos recursos, con la desventaja de que el ratio de compresión descendería a la mitad.

5.5.2. Evaluación de la integración del *codec* seleccionado en el sistema de medición de planitud

Una vez seleccionado el algoritmo de compresión de las imágenes generadas por el subsistema de visión por computador se completa el componente *software* de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real. Este *codec* se integra en el

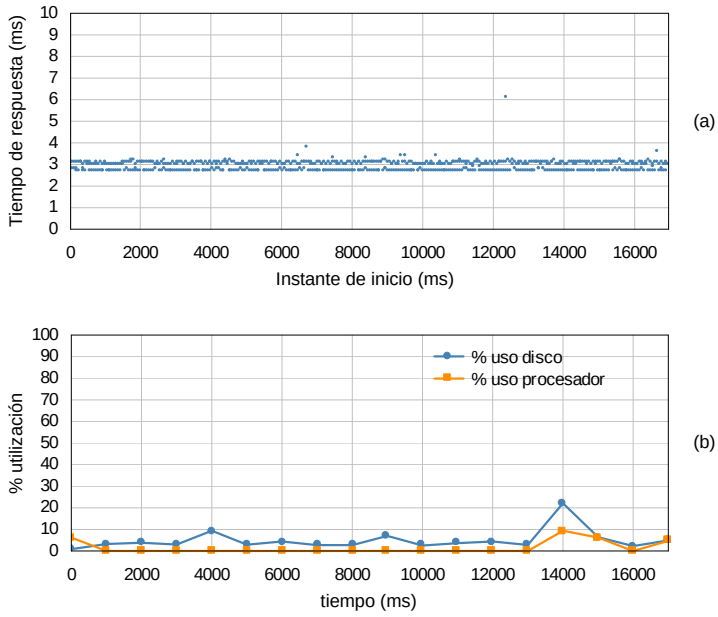


Figura 5.12: Rendimiento del *codec* PICVideo: (a) Tiempo de procesamiento. (b) Utilización de recursos.

sistema utilizando la tecnología *Video for Windows*.

Una vez integrado el *codec* en el sistema se realizan una serie de pruebas de rendimiento orientadas a comprobar tanto el cumplimiento de las restricciones de tiempo real como la utilización de recursos.

Estas pruebas de rendimiento se organizan en dos grupos. En el primer grupo se utilizan la cámara del sistema de medición de planitud y el tacómetro de la línea de producción como fuente de información de entrada al sistema. En el segundo grupo se utiliza como fuente de información la almacenada previamente por el sistema en el contenedor multimedia y con el *codec* seleccionados.

5.5.2.1. El subsistema de visión por computador como origen de datos

En este primer conjunto de pruebas el sistema debe medir la planitud de bandas de acero procesadas en la instalación industrial al mismo tiempo que almacena, de forma comprimida en un contenedor multimedia, las imágenes generadas por la cámara del subsistema de visión.

En la figura 5.13 se puede observar el consumo de procesador y de disco

Factor	Sin compresión	LEAD	PICVideo	ZLIB HS	ZLIB HC	MSZH
kx	1,00	1,85	1,65	3,30	3,69	2,33
$t^p_{mín}$	2,15	3,52	2,66	6,42	62,39	31,63
t^p_{med}	2,46	3,83	2,96	7,39	63,31	32,10
$t^p_{máx}$	2,85	36,50	25,91	52,82	77,31	32,84
$\%_{cpu}$	0,25	1,81	1,40	3,62	96,06	95,81
$\%_{disco}$	4,84	4,89	4,73	7,83	1,87	3,36
$\%_{retr}$	0,00	15,72	0,00	0,37	97,54	99,84

Tabla 5.2: Evaluación del rendimiento de *codecs*.

realizado por el sistema durante diez minutos de procesamiento.[1] En este tiempo el sistema sólo ha realizado tareas de medición de planitud.

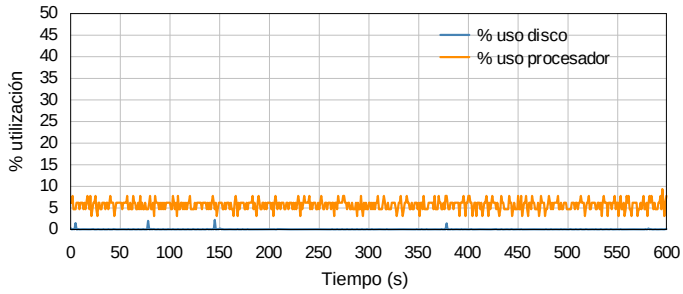


Figura 5.13: Utilización de recursos por parte de las tareas de medición de planitud con el subsistema de visión por computador como origen de datos.

En la figura 5.14 se puede observar el consumo de procesador y de disco durante el mismo intervalo de tiempo pero en este caso, además de las tareas orientadas a la medición de la planitud de la banda que se procesa en la instalación, el sistema ha comprimido cada una de las imágenes generadas por la cámara y las ha almacenado en un contenedor multimedia junto con la evolución de la señal de velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción.

Se puede observar un aumento en el consumo de procesador al realizar las

[1] Diez minutos es el tiempo medio de procesamiento de una bobina completa en la línea de producción industrial en la que se instala el sistema de medición de planitud.

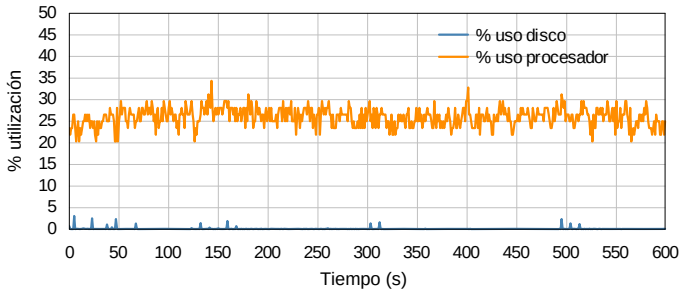


Figura 5.14: Utilización de recursos por parte de las tareas de medición de planitud y de grabación de vídeo en tiempo real con el subsistema de visión por computador como origen de datos.

tareas de generación de vídeo, debido principalmente a la sincronización que debe realizar el sistema entre estas tareas y las tareas de medición de planitud. Del mismo modo, se pueden apreciar incrementos puntuales de la actividad del disco coincidiendo con los instantes en los que la librería *Video for Windows* envía una secuencia de vídeo desde memoria hacia el contenedor ya creado en disco.

5.5.2.2. El contenedor multimedia como origen de datos

En este segundo conjunto de pruebas el sistema debe medir la planitud de bandas de acero obteniendo tanto la secuencia de imágenes a procesar como la señal de velocidad de un contenedor multimedia generado previamente con datos reales de procesamiento de una banda en la línea de producción. Además de realizar las tareas de medición de planitud, el sistema puede almacenar la secuencia de imágenes que procesa así como la señal de velocidad en un nuevo contenedor multimedia.[2]

En la figura 5.15 se puede observar el consumo de procesador y de disco realizado por el sistema durante los diez minutos de procesamiento de una banda. En este tiempo el sistema sólo ha realizado tareas de medición de planitud.

En la figura 5.16 se puede observar el consumo de procesador y de disco durante el mismo intervalo de tiempo pero en este caso, además de las tareas orientadas a la medición de la planitud de la banda que se obtiene del contenedor multimedia, el sistema ha comprimido cada una de las imágenes obtenidas de

[2] Esta funcionalidad está disponible ya que el sistema realiza exactamente las mismas operaciones independientemente de que la fuente de la que obtiene la información sea la cámara del sistema o un contenedor multimedia.

dicho contenedor y las ha almacenado en un nuevo contenedor junto con la evolución de la señal de velocidad.

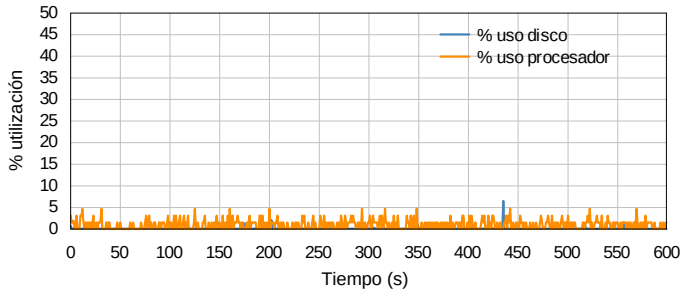


Figura 5.15: Utilización de recursos por parte de las tareas de medición de planitud con un contenedor multimedia como origen de datos.

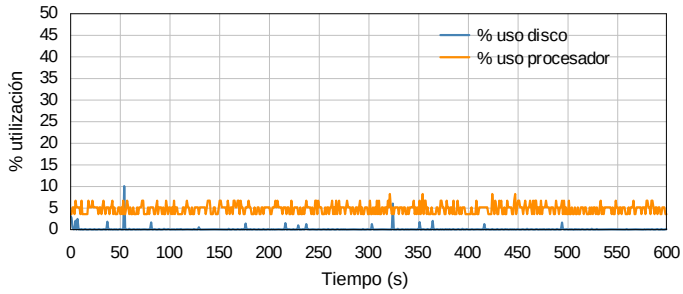


Figura 5.16: Utilización de recursos por parte de las tareas de medición de planitud y de grabación de vídeo en tiempo real con un contenedor multimedia como origen de datos.

5.5.2.3. Resumen de resultados

En esta sección se resumen los resultados obtenidos en el proceso de pruebas de integración del sistema con el *codec* seleccionado para realizar las tareas de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real.

En la tabla 5.3 se muestran el uso de recursos por parte el sistema, $\%_{cpu}$ y $\%_{disco}$, así como una indicación del número de imágenes que el sistema no ha

podido comprimir y enviar al contenedor multimedia, en los casos en los que es aplicable.

Origen de datos	Tareas	$\%_{cpu}$	$\%_{disco}$	Imágenes perdidas
Cámara	Planitud	5,69	0,07	–
Cámara	Planitud y vídeo	25, 98	0, 12	0
Contenedor	Planitud	0, 99	0, 12	–
Contenedor	Planitud y vídeo	4, 79	0, 16	0

Tabla 5.3: Pruebas de integración del *codec* en el sistema

A partir de la observación de esta tabla se deduce que en ninguna de las condiciones posibles de funcionamiento del sistema se saturan los recursos disponibles de la plataforma de experimentación. Además, la realización de tareas de medición de planitud conjuntamente con las tareas de grabación y reproducción de vídeo cumple las restricciones de tiempo real con el *codec* seleccionado dado que se almacenan en el contenedor multimedia todas las imágenes que genera la cámara del sistema.

El diseño estructural de este componente de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real está documentado en la sección 4.5.3, incluido con el resto de tareas de diseño del sistema de medición de planitud.

Capítulo 6

Extracción de la línea láser

En este capítulo se presenta un método robusto y eficiente para la extracción de una línea láser de las imágenes generadas por un sistema de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados basado en técnicas de visión por computador. El método propuesto se divide en dos etapas. En primer lugar se realiza un proceso de búsqueda local de la línea sobre el fondo de la imagen con el objetivo de determinar la región de búsqueda de la proyección de dicha línea sobre la superficie del producto laminado. En segundo lugar se aplica un proceso de detección del láser sobre la región de búsqueda seguido de un ajuste de segmentos basado en la división y en la unión. Este método es robusto ya que no se ve afectado por las condiciones de iluminación hostiles inherentes a un entorno industrial. Además es eficiente dado que todas las operaciones que realiza han sido optimizadas para permitir cumplir las restricciones de tiempo real al sistema en el cual se integra. Antes de describir el método propuesto se definen las condiciones particulares para la detección del láser en un entorno industrial y se revisan los métodos propuestos en la literatura, analizando la idoneidad de cada uno de ellos para la resolución de este problema.

6.1. La línea láser

Para medir la planitud de un producto laminado mediante un sistema basado en triangulación óptica por láser como el diseñado en el capitulo 4, es necesario integrar la altura de la superficie sobre la cual se proyecta el láser a lo largo del tiempo. Un elemento fundamental de este proceso es el cálculo de la altura, que se determina en función de la zona de la imagen en la que se se encuentra la proyección de la línea láser. La detección robusta y precisa de la línea láser en la imagen es de gran importancia debido a que va a condicionar la calidad con la que se obtiene la medición final de la planitud.

La detección de la línea láser en unas condiciones controladas es un proceso sencillo. Por ejemplo, en un laboratorio se puede ajustar perfectamente la cantidad y el tipo de luz con la que se ilumina la escena de forma que ésta no interfiera con la luz del láser. En [Forest *et al.*, 2004] se hace un análisis de varios métodos

para la detección de la línea láser en este tipo de condiciones. Otros trabajos, tales como [Haug y Pritschow, 1998], utilizan alguno de estos métodos para la detección de la línea láser con buenos resultados. Sin embargo, estos métodos no son directamente aplicables a situaciones en las que el láser se adquiere en un entorno industrial, principalmente porque son susceptibles al ruido y porque no tienen en cuenta la continuidad de la línea láser.

La detección de la línea láser proyectada sobre una banda de acero en un entorno industrial conlleva una serie de dificultades particulares que no se han tenido en cuenta en trabajos previos, cuya solución resulta vital para que la medición de planitud se pueda realizar con éxito. Algunas de estas dificultades son las siguientes:

- En un entorno industrial las condiciones de iluminación son inherentemente variables. Esto afecta a la imagen adquirida notablemente debido a que la intensidad luminosa del fondo de la escena cambia, lo cual debe ser tenido en cuenta a la hora de discernir el láser del fondo.

- Pueden aparecer reflejos luminosos incontrolados que finalmente aparezcan en la imagen como espurios. Este tipo de ruido es muy problemático si se parte de la suposición de que el láser va a aparecer en la imagen con la intensidad luminosa máxima, ya que puede hacer que se confunda la posición del láser con la de un espurio.

- Otra variable importante en la detección del láser es la superficie sobre la cual se proyecta. El índice de reflexión afecta significativamente al proceso de detección de la línea láser [Forest *et al.*, 2004]. La superficie optima debe tener un alto índice de reflexión para poder discernir con claridad la línea láser del fondo. En el caso de bandas de acero, el índice de reflexión puede variar entre distintas bandas e incluso dentro de la misma banda. Además, el óxido u otros defectos superficiales producen variaciones bruscas de la reflexividad que suponen un problema en la detección de láser.

- El dispositivo emisor láser proyecta una línea mediante un mecanismo óptico que transforma un punto de luz en una línea (ver sección 4.2.1.2). Cuanto más alejado se encuentre el láser de la superficie sobre la cual se proyecta, es decir, cuanto más larga se desee que sea la línea láser, con menor potencia se proyectará sobre dicha superficie. Además, la transformación del punto de luz láser en una línea de luz láser se degrada a lo largo del tiempo, apareciendo zonas de la línea donde el láser es apenas perceptible.

La figura 6.1 muestra algunos ejemplos de las dificultades específicas que aparecen en la detección de la línea láser proyectada sobre una banda de acero en un entorno industrial.

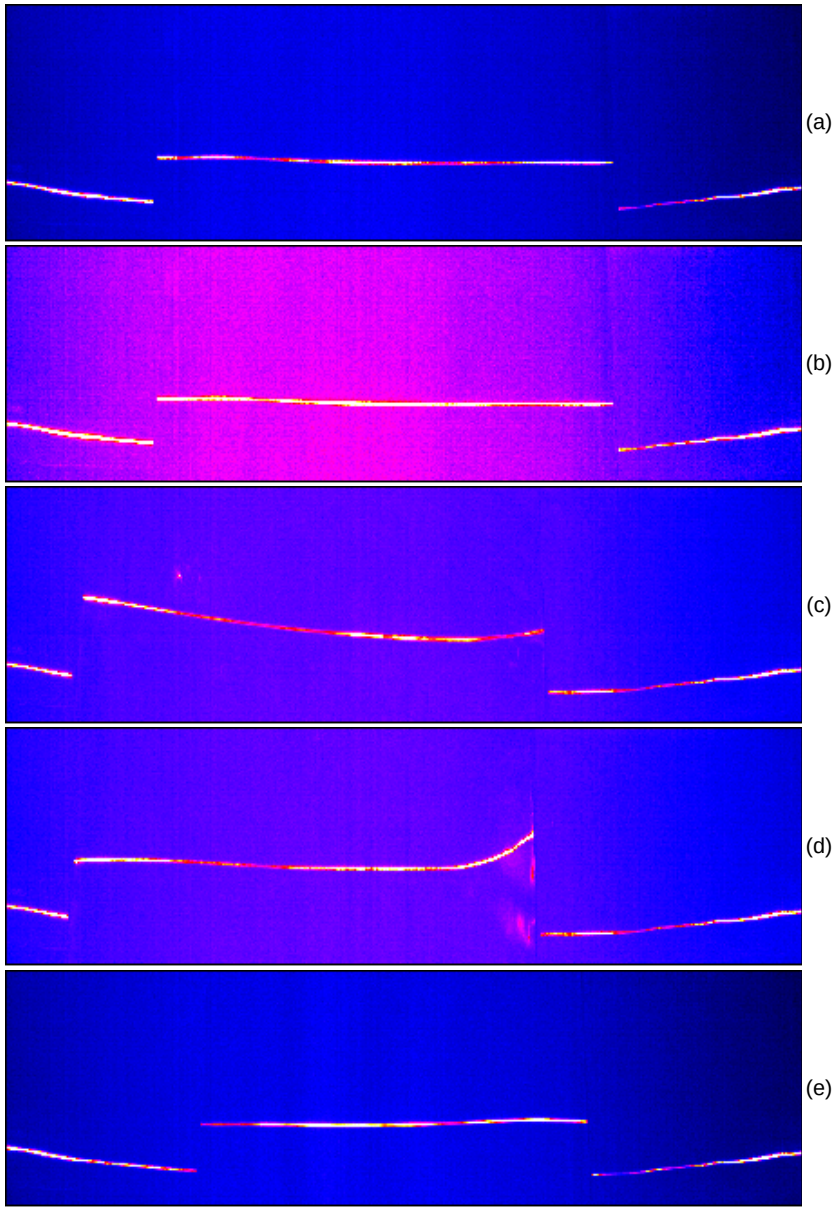


Figura 6.1: Problemáticas en la detección de la línea láser: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

En la figura 6.1(a) se puede observar la proyección de la línea láser sobre la superficie de una banda cuando la iluminación ambiental de la escena es relativamente baja. Del mismo modo, en la figura 6.1(b) se puede observar la proyección de la línea láser sobre una banda en este caso cuando la iluminación ambiental de la escena es relativamente alta. En la figura 6.1(c) se muestra una imagen en la que aparecen reflejos sobre la superficie de la banda. En la figura 6.1(d) se puede observar la aparición de ruido en el borde derecho de la banda debido a defectos o suciedad en su superficie. Finalmente, en la figura 6.1(e) se muestra una imagen en la que la proyección de la línea láser está debilitada debido a la degradación que sufre el dispositivo emisor láser con el paso del tiempo.

Las imágenes mostradas en la figura 6.1 han sido obtenidas por el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud diseñado en el capítulo 4. Estas imágenes contienen el área de interés de la escena (ver figura 4.4) con un cierto margen de seguridad tanto en vertical como en horizontal.

Para que el proceso de extracción de la línea láser sea más eficiente se realiza sobre un área de 640 píxeles en horizontal por 130 píxeles en vertical de las imágenes de 640 píxeles en horizontal por 260 píxeles en vertical generadas por la cámara del sistema (ver sección 4.3.3). Este área de extracción se corresponde con el área comprendida entre las filas 90 y 219 de las imágenes generadas por la cámara (ver figura 5.2).

Todas las imágenes mostradas en este capítulo generadas por la cámara del sistema de medición de planitud muestran solamente en área sobre el que se realizará el proceso de extracción de la línea láser.

6.2. Trabajo previo

El proceso de extracción de la línea láser se plantea habitualmente en dos fases. En primer lugar se realiza un proceso de detección de la línea láser, normalmente considerando cada columna o fila de la imagen como una señal independiente. A continuación, se realiza un proceso de enlazado del láser para evitar los posibles problemas causados en su detección por el ruido. Este segunda fase puede no ser necesaria dependiendo de las condiciones del entorno, por tanto, en muchos casos no se aplica.

6.2.1. Métodos de detección del láser

El proceso de detección del láser en una imagen se ha planteado típicamente como el proceso de detección considerando cada columna como una señal independiente [Forest *et al.*, 2004]. En este caso, el láser se verá reflejado en cada señal siguiendo un perfil gaussiano [Forest *et al.*, 2004] y, por tanto, el punto de la señal en el cual se encuentre la máxima intensidad de luz debería corres-

ponder al centro del láser. Sin embargo, el ruido inherente en las señales puede hacer que este procedimiento no sea correcto, ya que la máxima intensidad puede corresponder a un espurio. El uso de filtros interferenciales para ajustar la adquisición de la imagen a intensidades que coincidan con la longitud de onda del láser reduce el ruido significativamente pero no lo evita del todo [Vodanovic, 1996].

Los métodos más comunes para detectar de una manera robusta el centro del láser para cada columna son [Fisher y Naidu, 1996]: la aproximación gausiana, el centro de masas, la aproximación lineal, el detector de Blais and Rioux y el estimador parabólico. El método que mejores resultados ofrece es el centro de masas, aunque es susceptible a los espurios [Haug y Pritschow, 1998]. Además, en [Haug y Pritschow, 1998] se usa un método que se basa en la búsqueda del máximo para luego calcular el centro de masas de los puntos adyacentes. Todos estos métodos proporcionan la posición del centro del láser con una precisión subpíxel.

Los métodos propuestos realizan la detección de láser considerando cada columna de la imagen como una señal independiente y, por tanto, no tratan el tema de la continuidad de la línea láser. En condiciones controladas este tipo de procesos es suficiente para la extracción de la línea láser, sin embargo, en condiciones donde el ruido es una variable la extracción de la línea láser requiere un proceso más elaborado.

6.2.2. Métodos de enlazado del láser

Los métodos analizados en el apartado anterior detectan el láser para cada fila o columna de la imagen. En un entorno de trabajo ideal, estos métodos deberían proporcionar píxeles que identifican la línea láser de forma continua. En la práctica, en condiciones donde la iluminación del entorno no puede ser controlada, como por ejemplo en entornos industriales, la secuencia de píxeles en los que se detecta el láser para cada fila o columna puede no mostrar una secuencia continua a causa del ruido y de los espurios. En algunos casos pueden incluso aparecer regiones de la imagen donde el láser no ha sido detectado. Todo esto implica que, en situaciones como la que se plantea en esta tesis, el proceso de detección del láser tenga que ser complementado con un proceso de enlazado del láser. Un proceso de enlazado es un proceso que, a partir de la secuencia de píxeles en los que se ha detectado el láser, produce una información más robusta sobre la posición de la línea láser.

Aunque no existen métodos específicos para el enlazado del láser, el problema se puede asimilar a un proceso de enlazado de bordes en un sistema más genérico de procesamiento de imagen. En este caso, los métodos de enlazado de bordes se clasifican en dos grandes grupos: métodos que usan información local a cada punto y métodos que usan información global [Gonzalez y Woods, 1987].

6.2.2.1. Procesamiento local

Los métodos de procesamiento local se basan en el análisis de una ventana de píxeles alrededor de cada punto en el que haya sido detectado el láser (o el borde en el caso del procesamiento clásico de imagen). Habitualmente, se suele trabajar con ventanas de tamaño 3×3 ó 5×5 píxeles. Los puntos que son similares dentro de una ventana se enlazan. En el caso de enlazado de bordes se suele utilizar como criterio la similitud de la respuesta y la dirección del operador gradiente en ese punto. En el caso del láser, una vez que ha sido detectado usando alguno de los métodos descritos en la sección 6.2.1, el proceso consistiría en enlazar las posiciones del láser que se encuentren dentro de la misma ventana. El proceso se repetiría desplazando la ventana a partir de un punto origen. Uno de los métodos de enlazado de bordes con procesamiento local más utilizado es el propuesto en [Roberts, 1963].

Este tipo de métodos tiene el inconveniente de que no son capaces de enlazar puntos que estén separados a una distancia mayor del tamaño de ventana. Por tanto, la definición del tamaño de ventana se debe realizar teniendo en cuenta la mayor separación prevista o aceptable entre puntos que finalmente se van a considerar como continuos. Esta información, en muchos casos, no se encuentra disponible cuando se define el tamaño de la ventana.

6.2.2.2. Procesamiento global

Este tipo de métodos, a diferencia de los métodos basados en el procesamiento local (ver sección 6.2.2.1), consideran relaciones globales entre los bordes o, en el caso del láser, entre los puntos en los que ha sido detectado el láser. Dentro de este grupo de métodos se pueden diferenciar aquellos que parten de información sobre la forma esperada que debe proporcionar el enlazado y aquellos que no tienen información a priori.

El método más conocido entre los que parten con información a priori es la transformada de Hough [Illingworth y Kittler, 1988]. Este método es utilizado para detectar líneas rectas en una imagen y, por tanto, parte con la información a priori de que la forma del enlazado debe coincidir con una línea recta. En la transformada de Hough los puntos son mapeados en líneas especificadas en coordenadas polares en un espacio 2D discreto. Cada celda del espacio 2D acumula el número de líneas que coinciden con esas coordenadas. Al final, las celdas con los mayores números acumulados representan las líneas rectas que mejor encajan con los puntos de la imagen. Mediante un procedimiento similar, la transformada de Hough también se usa para detectar líneas curvas [Duda y Hart, 1972].

Otros métodos de procesamiento global se basan en el ajuste del conjunto de puntos mediante una secuencia de segmentos continuos. Los segmentos pueden

ser ajustados mediante una línea recta, una curva cuadrática u otro tipo de curvas. Este tipo de métodos no parten de información a priori sobre la forma final del enlazado de bordes sino que iteran sobre el conjunto de puntos hasta encontrar una secuencia de segmentos que se ajusta a este conjunto. Un ejemplo de este tipo de métodos es el denominado *iterative endpoint fit* [Duda y Hart, 1973]. Este método comienza ajustando la forma de la línea láser mediante una línea recta que une los puntos extremos A y B. El punto intermedio C, entre A y B, en el que ajuste lineal cometa el mayor error divide la línea recta en dos: la delimitada por los puntos A y C y la delimitada por los puntos C y B. El proceso se repite para cada nueva línea hasta que el error de ajuste no supere un determinado umbral. El mismo proceso se puede realizar con curvas cuadráticas, o de mayor grado, aumentando el número de puntos utilizados para el ajuste inicial [Ramer, 1972], [Pavlidis y Horowitz, 1974]. El principal problema de este método es que tiene muy mal comportamiento ante espurios ya que afectan muy negativamente al ajuste. Para evitar este problema algunos autores han propuesto añadir un paso final de unión de segmentos [Dunham, 1986].

6.3. Método propuesto

En esta sección se describe el método para la extracción de la línea láser propuesto en esta tesis. Este método implementa una de las tareas fundamentales del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud: extraer la proyección de la línea láser de cada imagen adquirida de la escena, expresándola en coordenadas de la imagen (ver sección 4.5.1).

6.3.1. Detección del láser considerando independientes las columnas de la imagen

La detección de la línea láser se asimila a un proceso de eliminación del fondo de una imagen. Para este tipo de tarea es habitual la realización de una umbralización (*thresholding*), de forma que los valores de la imagen que se encuentren por debajo de un determinado umbral se consideran fondo y los que estén por encima se consideran láser. Normalmente, a la umbralización le seguiría otro proceso que se encargaría de determinar la posición concreta del láser para la zona de la imagen no establecida como fondo. Las imágenes que se presentan en este capítulo son adquiridas con una iluminación variable debido a las condiciones en las que son adquiridas (ver secciones 4.1.4 y 6.1). Este hecho imposibilita la utilización de un umbral fijo, que podría ser aplicado por *hardware*. El problema generado se puede observar en la figura 6.2 donde se muestra una columna tomada de la imagen mostrada en la figura 6.1(b) junto a otra tomada de la imagen mostrada en la figura 6.1(e). Como se puede comprobar, no existe nin-

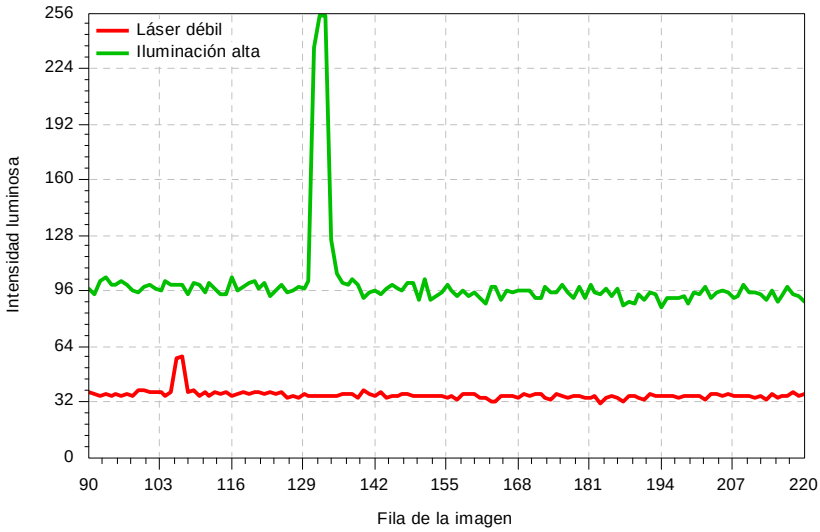


Figura 6.2: Comparativa de una columna de una imagen en distintas situaciones que imposibilita el uso de un umbral fijo.

gún valor de umbral que permita discernir el fondo de la escena de la línea láser en ambas imágenes a la vez, ya que el óptimo para un caso resultaría incorrecto para el otro, y viceversa.

Una solución al problema del umbral fijo sería trabajar con un umbral dinámico que se adapte a cada caso particular. Uno de los métodos más utilizados para el cálculo del umbral de forma automática es el método de Ridler [Ridler y Calvard, 1978]. Aplicando dicho método a los ejemplos mostrados en la figura 6.2 se obtienen los resultados mostrados en la figura 6.3 y en la figura 6.4 donde, como se puede observar, se establece correctamente el nivel de umbral.

Un problema de los métodos de cálculo del umbral es que suponen un fondo uniforme, por tanto, en una imagen con iluminación variable el cálculo del umbral falla. En la figura 6.5 se muestra un ejemplo de este tipo de fallos.

La aplicación de métodos de detección del láser propuestos en trabajos previos tampoco produce buenos resultados debido a la problemática introducida en las imágenes por las condiciones en las que son adquiridas. La figura 6.6 muestra el resultado de aplicar el método de detección propuesto en [Haug y Pritschow, 1998] sobre el conjunto de imágenes mostrado en la figura 6.1. Los resultados son incorrectos debido a que el máximo en algunos casos se corresponde con un espurio y en otros se detecta láser donde no lo hay. Otros métodos basados también en el máximo, como el propuesto en [Forest *et al.*, 2004], producirían

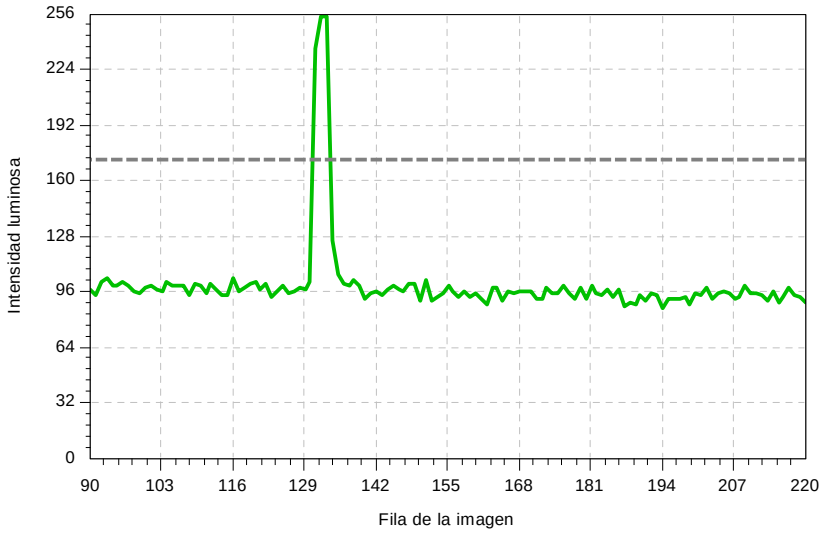


Figura 6.3: Cálculo del umbral por el método de Ridler para un caso con iluminación alta.

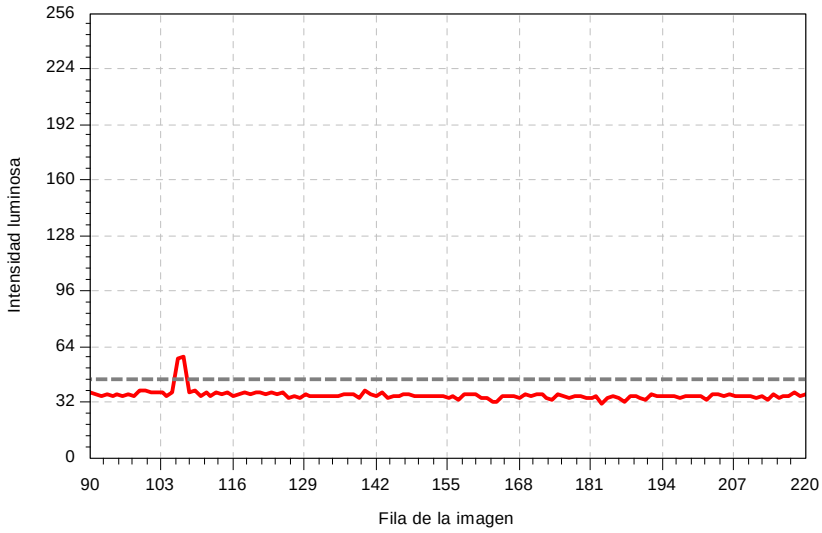


Figura 6.4: Cálculo del umbral por el método de Ridler para un caso con iluminación baja.

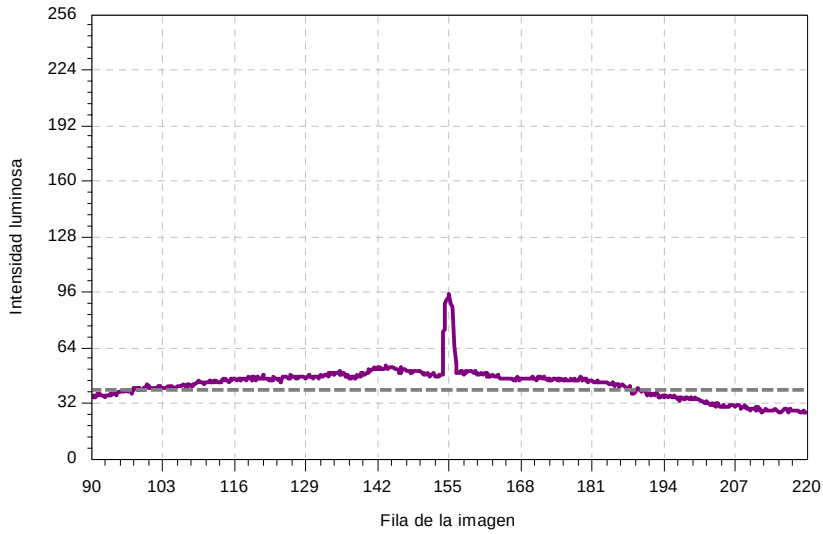


Figura 6.5: Cálculo del umbral por el método de Ridler para un caso con iluminación variable.

resultados similares.

La detección del láser cuando no lo hay es debida a que los métodos previos suponen que tiene que aparecer láser en cada columna de la imagen. Sin embargo, como se ha podido comprobar en instalaciones industriales reales y se puede apreciar en la figura 6.1(e), el láser se degrada con el tiempo y provoca que, en ocasiones, no sea posible discernir la línea proyectada del fondo de la escena. Además, la geometría del subsistema de visión por computador hace que haya una zona en la cual el láser incide en la banda y genera sombra en el fondo, apareciendo en la imagen una zona sin láser. Para tener esta información en cuenta a la hora de detectar el láser se propone una variación del método descrito en [Haug y Pritschow, 1998]: calcular la posición del láser sólo cuando la diferencia de intensidad luminosa entre el fondo y el máximo sea significativa. Esto va a provocar que aparezcan agujeros a la hora de detectar el láser. Sin embargo, con la idea de integrar la detección de la línea en un algoritmo de nivel superior de enlazado del láser, es preferible que aparezcan agujeros que espurios en el proceso de detección.

El algoritmo de detección del láser propuesto en esta tesis comienza buscando el máximo valor de intensidad luminosa, ya que será el punto más probable en el que se encuentre el láser, exactamente igual que el método propuesto en [Haug y Pritschow, 1998] o el propuesto en [Forest *et al.*, 2004]. Una vez detectado este

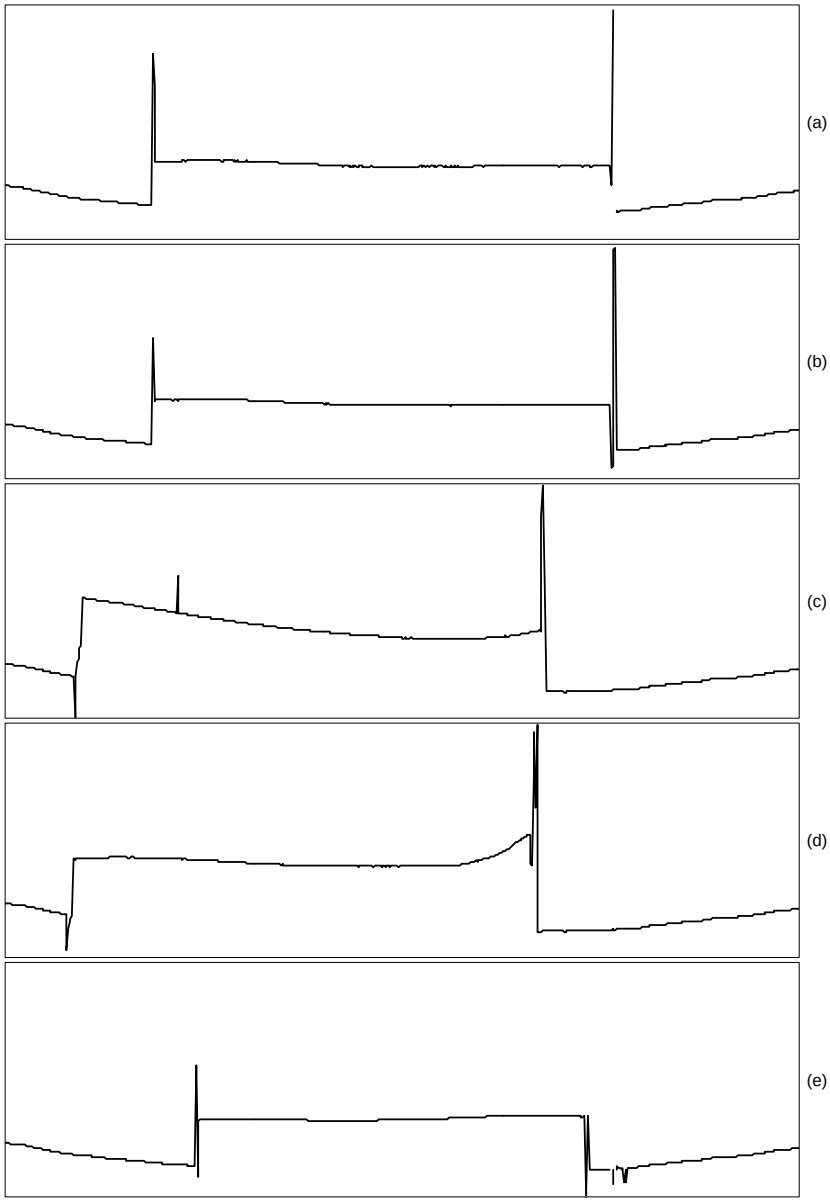


Figura 6.6: Resultados de la detección del láser usando métodos basados en el máximo: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

punto se establecerá un conjunto de puntos adyacente al máximo como puntos influidos por el láser. El área de influencia del láser, es decir, el conjunto de píxeles en los que se ve el láser depende de la geometría del subsistema de visión por computador, y será un parámetro del sistema. Todos los puntos que no se encuentren dentro del área de influencia del máximo se considerarán fondo. La caracterización de la luminosidad del fondo se realizará mediante una distribución normal parametrizada por la media y la desviación típica de la intensidad luminosa de ese conjunto de puntos. Usando esta información se puede establecer un intervalo sobre la intensidad luminosa media del fondo. El algoritmo propuesto considera que el máximo valor de intensidad luminosa se corresponde con el láser si su diferencia con el límite superior del intervalo de la media luminosa del fondo supera cierto umbral. En caso afirmativo se calcula la posición del láser como el centro de masas del área de influencia del láser. El proceso de detección del láser propuesto se resume en los siguientes pasos:

1. Búsqueda del máximo.
2. Establecimiento del área de influencia del láser alrededor del máximo.
3. Caracterización del fondo mediante un intervalo. Para facilitar los cálculos y cumplir con las restricciones de tiempo real del sistema (ver sección 4.4.3.2), el intervalo se obtiene multiplicando la desviación típica por un factor de cobertura.
4. Cálculo de la diferencia de intensidad entre el máximo y el límite superior del intervalo del fondo.

El proceso propuesto para la detección del láser se ilustra sobre el ejemplo mostrado en la figura 6.7.

La figura 6.8 muestra los resultados obtenidos por el procedimiento de detección de láser propuesto sobre las imágenes de ejemplo mostradas en la figura 6.1. Como se puede observar en esta figura, el procedimiento propuesto es capaz de evitar la detección incorrecta del láser cuando éste no es claramente discernible del fondo, es decir, el método prefiere no proporcionar una posición posible del láser cuando hay información que indica que el fondo y el láser no son diferenciables. Esta característica hace que los resultados proporcionados por este método sean mejores que los obtenidos por el método propuesto en [Haug y Pritschow, 1998]. Sin embargo, el método propuesto en esta tesis también se basa en el cálculo de la posición del máximo para cada columna de la imagen y, por tanto, es susceptible a equivocarse ante la aparición de espurios.

No importa cómo de sofisticado se haga el método de detección, el problema es que un espurio, u otro tipo de ruido en la imagen, no puede ser detectado considerando cada columna de la imagen como una señal independiente. Ciertamente, como se indica en [Forest *et al.*, 2004], el proceso de detección del

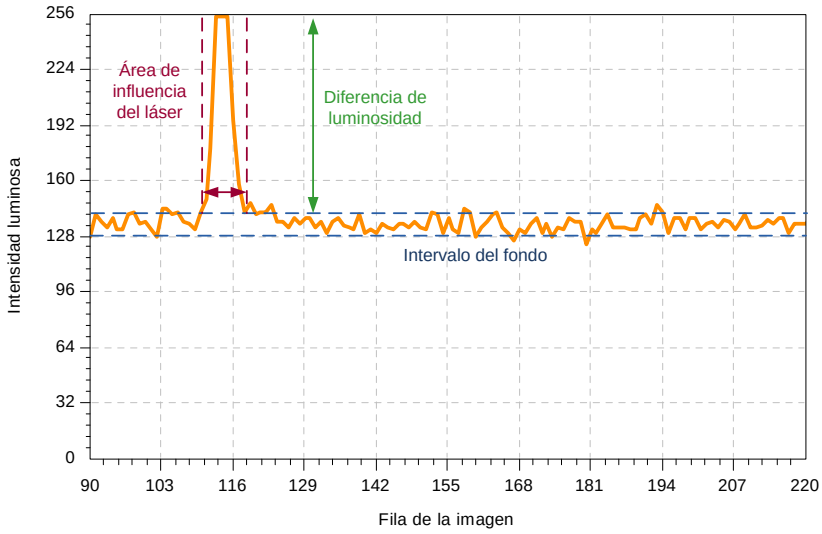


Figura 6.7: Procedimiento propuesto para la detección del láser en cada columna de la imagen.

láser puede estar basado en un procesamiento considerando cada columna de la imagen independientemente, pero solamente cuando las imágenes carecen de la problemática anteriormente comentada de un escenario industrial real. Para proporcionar la posición del láser en toda la imagen de manera robusta es necesario desarrollar un procedimiento de mayor nivel que permita utilizar la información de varias columnas y, de esta forma, hacer un seguimiento adecuado del láser.

Parámetros. El procedimiento propuesto para la detección del láser en cada columna de la imagen tiene los siguientes parámetros:

1. Tamaño del área de influencia del láser.
2. Factor de cobertura para la creación del intervalo sobre el fondo.
3. Diferencia de iluminación necesaria para considerar que existe láser.

6.3.2. Detección del láser que se proyecta sobre el fondo

El objetivo de la adquisición de la línea láser es la obtención de la altura a la que se encuentra una sección de la banda. Esta altura permite obtener las longitudes de las fibras que se usan en la reconstrucción 3D de la banda. Sin embargo,

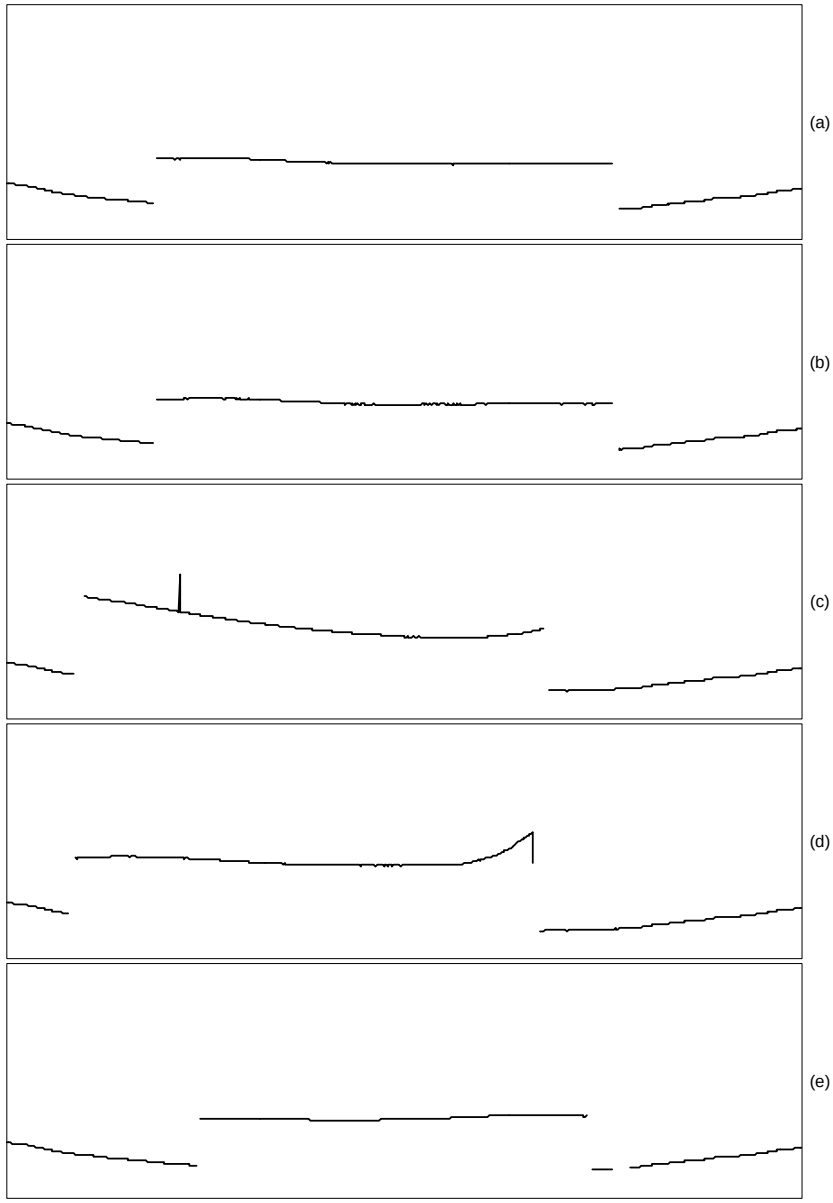


Figura 6.8: Resultado de la detección del láser usando el método propuesto: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

la longitud de la línea láser es superior a la anchura de la banda más ancha que puede ser procesada en la instalación industrial. Esta característica del sistema implica que la porción del láser que no incide sobre la banda debe ser eliminada del procedimiento de reconstrucción 3D. Además, la proyección de la línea láser sobre el fondo aporta una información que es muy útil a la hora de extraer la línea láser de la imagen. La razón es que el fondo es un elemento controlable, es decir, se puede utilizar un fondo que haga que la línea láser proyectada se vea de la mejor manera posible. Esto no ocurre con la superficie banda, ya que sus características están fuera del control del sistema (ver sección 4.1.5).

Debido a que existen grandes diferencias entre cómo se va a proyectar la línea láser sobre el fondo y sobre la banda se va a dividir el procedimiento de extracción de la línea láser en dos fases. En primer lugar se va a detectar el láser sobre el fondo. A continuación se detectará y extraerá el láser sobre la banda, utilizando la información obtenida previamente acerca de la posición del láser sobre el fondo.

Para la detección de la línea láser sobre el fondo se propone un procedimiento que combina el método propuesto de detección del láser por columnas con un enlazado basado en procesamiento local. La razón para combinar ambos métodos se debe principalmente a que la aparición de espurios o agujeros en la línea láser que se proyecta sobre el fondo es poco frecuente, por lo que una ventana local de búsqueda se prevé suficiente.

El procedimiento propuesto es esencialmente el mismo para la detección de la línea láser sobre el fondo en el lado derecho y en el lado izquierdo de la imagen. En el caso del lado derecho, en primer lugar se debe detectar la línea láser sobre la primera columna de la imagen. Las opciones son dos: realizar una búsqueda en toda la columna para detectar la posición o definir esta posición es un parámetro del sistema.

La línea láser en reposo, cuando no hay banda bajo el emisor láser, es estática con lo que resulta viable memorizar su posición para facilitar su detección. Una vez que se ha detectado la primera posición del láser se establece una ventana en forma de trapecio, donde el lado paralelo corto está centrado sobre el punto donde se ha detectado el láser y es paralelo al eje de ordenadas. La distancia hasta el lado paralelo largo del trapecio es el ancho de la ventana. La utilización de un trapecio en lugar de un rectángulo se debe a que se conoce que la proyección de la línea láser en reposo sobre el fondo de la escena no es recta y, de esta forma, a medida que la búsqueda dentro de la ventana se aleja del punto inicial se incrementa su área aumentando las opciones de detectar correctamente el láser. La longitud de los lados paralelos del trapecio son dos parámetros adicionales del procedimiento, así como la distancia entre ambos. Dentro de la ventana de búsqueda se aplica la detección de láser por columnas propuesta en la sección 6.3.1, empezando en la columna adyacente al punto de partida, avanzando hacia el lado paralelo largo, y terminando cuando se detecte láser o cuando termine la

ventana. Si el láser es detectado dentro de la ventana, la ventana trapezoidal se desplaza hasta hacer coincidir esa nueva posición con el centro del lado paralelo corto del trapecio. El proceso es iterativo y termina cuando dentro de la ventana no se detecte láser, es decir, cuando termine la línea láser que se ha proyectado sobre el fondo.

El proceso para detectar la línea de fondo sobre el lado izquierdo es similar, salvo que la ventana se desplaza en sentido contrario y que el trapecio es la proyección especular del trapecio usado en el lado derecho. En este caso el lado paralelo corto coincide con el origen de búsqueda de la ventana. Este procedimiento se aprovecha de que el método propuesto para detectar el láser en una columna de la imagen es capaz de determinar la ausencia de láser, hecho que sirve para que este procedimiento de búsqueda local termine.

La figura 6.9 muestra un esquema del funcionamiento del procedimiento propuesto. Las ventanas de búsqueda se desplazan hacia el centro de la imagen, empezando por ambos lados, hasta que no se detecte láser dentro de la ventana.

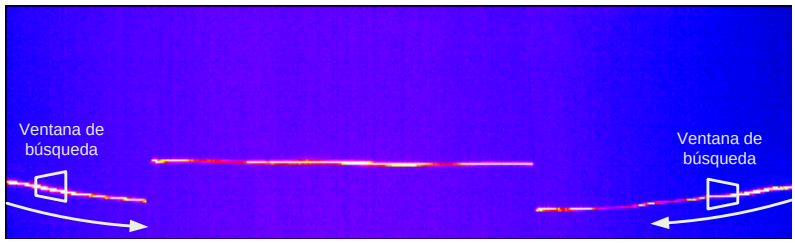


Figura 6.9: Procedimiento para la detección de la línea láser sobre el fondo.

La figura 6.10 muestra los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento de detección a las imágenes de ejemplo mostradas en la figura 6.1. Las líneas verticales indican dónde se ha encontrado el límite de la línea láser en el fondo (de la línea láser en reposo) y el punto inferior de las líneas verticales representa el último píxel detectado de la línea láser en el fondo. Como se puede apreciar, el procedimiento funciona correctamente, excepto cuando existe ruido en la imagen en una zona cercana a los extremos interiores de la línea láser en el fondo, como ocurre en la imagen mostrada en la figura 6.10(d). Para evitar este error se proponen varias mejoras que utilizan información adicional de la escena.

6.3.2.1. Caracterización de la línea láser sobre el fondo

La posición del láser sobre el fondo es estática, es decir, no varia con el tiempo. Esta información es de gran utilidad para mejorar el procedimiento de detección del láser en el fondo, ya que evitaría que ruido cercano a la línea láser se confunda con ésta.

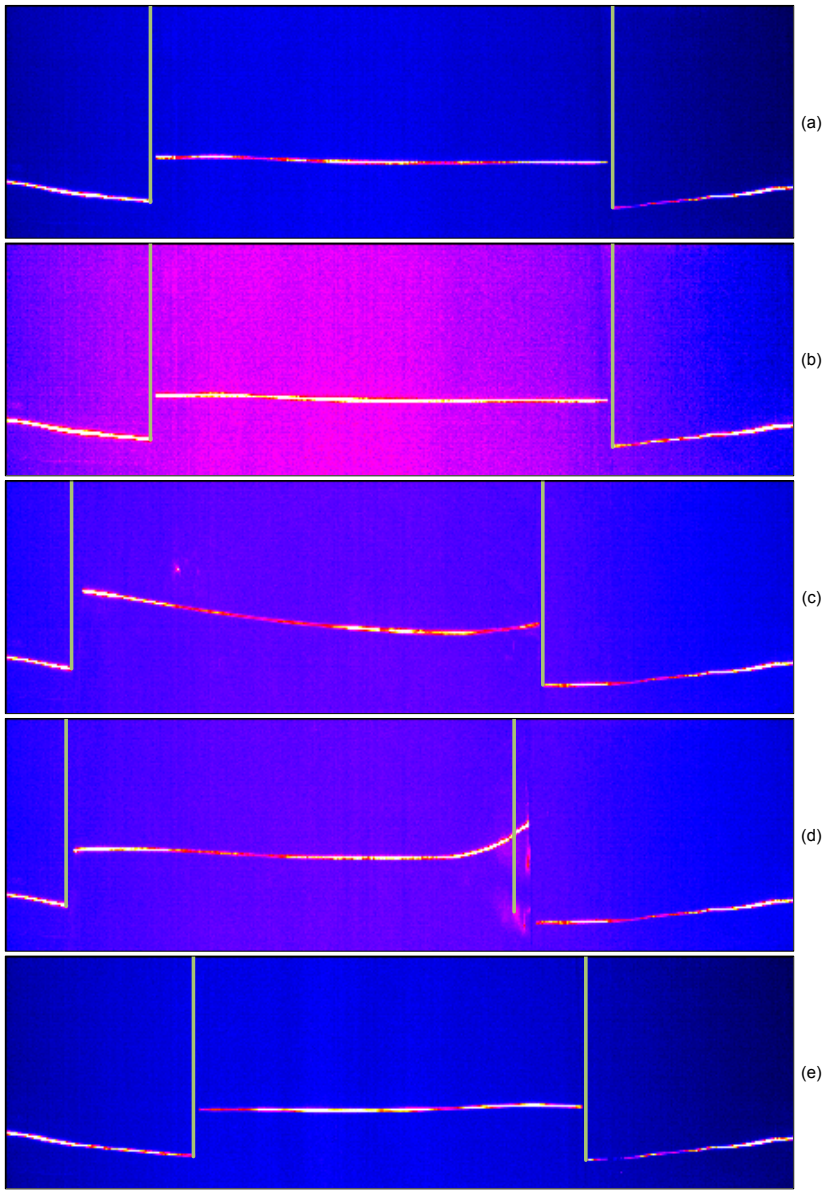


Figura 6.10: Resultados de la detección de la línea láser sobre el fondo: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

Para utilizar la información sobre la posición de la línea del fondo se va a comenzar caracterizando la línea láser cuando no existe banda, es decir, la proyección de la línea láser en reposo. Para realizar la caracterización se ha obtenido una imagen del láser sin banda bajo buenas condiciones de iluminación del entorno para facilitar su detección. La imagen con el láser proyectado en el fondo del camino de rodillos se puede observar en la figura 6.11(a). A continuación se aplica el procedimiento de detección del láser por columnas independientes propuesto en la sección 6.3.1 y se ajusta el conjunto de posiciones obtenidas mediante una curva cuadrática utilizando mínimos cuadrados. El resultado de la detección del láser y su ajuste por una curva cuadrática se muestra en la figura 6.11(b). Como se puede observar en esta figura, el ajuste resulta ser muy preciso, obteniéndose un error medio de 0,003 píxeles con una desviación típica sobre la media de 0,533 píxeles. Este ajuste permite caracterizar la línea láser sobre el fondo de una manera precisa y simplificada Sólo en necesario conocer tres valores: los coeficientes del polinomio cuadrático $Ax^2 + Bx + C$ que ajusta la línea láser sobre el fondo.

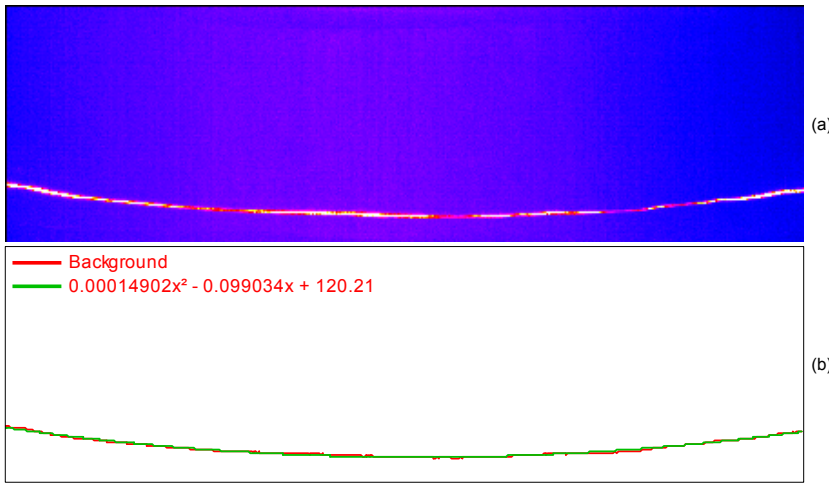


Figura 6.11: Caracterización de la línea láser sobre el fondo: (a) Imagen con la línea láser en reposo. (b) Láser detectado y ajuste cuadrático representados de forma superpuesta.

El ajuste de la línea sobre el fondo permite establecer de forma bastante precisa la zona en la que se debe detectar el láser en reposo. Es posible establecer un intervalo sobre la posición esperada del láser sobre el fondo utilizando la curva de ajuste y el error cometido. Este intervalo se puede construir igual que el de la iluminación del fondo, pero en este caso utilizando el error medio en el ajuste

y su desviación. El intervalo de la posición de la línea láser sobre el fondo se muestra en la figura 6.12.

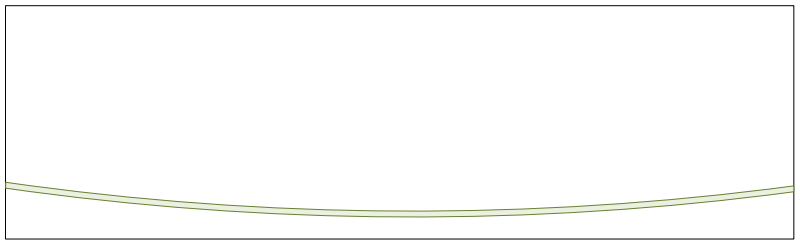


Figura 6.12: Intervalo de la posición de la línea láser sobre el fondo.

El proceso de ajuste de la línea sobre el fondo parte de la suposición de que la línea siempre se va a proyectar sobre la misma posición. Sin embargo, esta posición podría cambiar si se producen vibraciones en el lugar donde está instalada la cámara. Estas vibraciones desplazan la cámara verticalmente y no producen giros ni desplazamientos horizontales. Evidentemente, un desplazamiento de la cámara hace que la posición del láser en la imagen se desplace y la caracterización de la línea láser sobre el fondo pierda su sentido. Para poder adaptar el procedimiento a este problema se puede compensar la posición de la línea láser sobre el fondo en función de la posición en la que se encuentre el láser en los extremos de la imagen. Debido a que el desplazamiento es vertical una modificación del coeficiente independiente del polinomio que ajusta el fondo es suficiente. Por ejemplo, si la posición en la que se ha encontrado el láser en una columna de la imagen es y_{laser} se puede calcular la diferencia de esta posición con la obtenida por el polinomio que caracteriza la línea sobre el fondo usando la ecuación (6.1). Una vez obtenida la diferencia se puede compensar el polinomio que caracteriza la línea sobre el fondo usando la ecuación (6.2). El valor C' se puede calcular como la media obtenida para los extremos de la imagen, es decir, para la primera y para la última columna.

$$C' = (Ax^2 + Bx + C) - y_{laser} \tag{6.1}$$

$$Ax^2 + Bx + C - C' \tag{6.2}$$

La información sobre la posición del láser en el fondo se puede utilizar para mejorar el procedimiento de detección. Este procedimiento desplaza la ventana hasta que ya no se detecta el láser. Una posible mejora consiste en validar la posición detectada del láser y obligar a que, para considerar a esa detección como válida se haya tenido que producir dentro del intervalo del fondo. En

caso de que el láser se detecte fuera del intervalo se interpretará como si no se hubiera detectado láser para esa columna de la ventana de búsqueda. La aplicación de esta mejora del procedimiento de detección de la línea láser sobre el fondo a las imágenes de ejemplo mostradas en la figura 6.1 produce los mismos resultados que los mostrados en la figura 6.10, salvo en el caso de la imagen de la figura 6.1(d), donde se produce una variación y cuyo resultado se muestra en la figura 6.13.

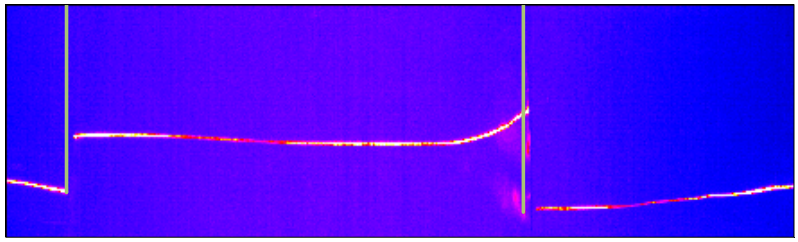


Figura 6.13: Resultados del procedimiento de detección de la línea láser sobre el fondo aplicado a la imagen de la figura 6.1(d) caracterizando la línea láser sobre el fondo.

La inclusión del requisito sobre la posición en la que puede encontrarse el láser hace que el procedimiento de detección del láser sobre el fondo sea más robusto. En el caso de la imagen de la figura 6.13 se muestra cómo se obliga a que la línea del láser sobre el fondo tenga unas coordenadas determinadas por la caracterización previa. Sin embargo, se sigue cometiendo un error ya que la inclusión del requisito de la posición no sirve para evitar ruido que pueda aparecer en posiciones cercanas a la proyección de la línea láser en reposo, como se puede observar en la imagen de la figura 6.13.

6.3.2.2. Caracterización de la intensidad luminosa del fondo de la imagen

La utilización de información acerca de la posición de la línea láser sobre el fondo no es útil en caso de que el ruido en la imagen se produzca coincidiendo con esa posición. Para evitar este tipo de problemática se propone añadir al procedimiento de detección de la línea láser sobre el fondo información acerca de la intensidad luminosa de los píxeles adyacentes al láser.

El patrón de energía de la luz láser en una columna de la imagen se corresponde con un perfil gausiano [Forest *et al.*, 2004]. Esta información puede ser utilizada para discernir láser de ruido, ya que el ruido muestra un perfil bastante diferenciado del láser. Considerando como fondo todos aquellos píxeles que no sean iluminados por el láser (píxeles fuera del área de influencia del láser, tal y como fue definido previamente) se puede calcular su intensidad luminosa media

a medida que las ventanas de búsqueda se desplazan. El resultado de obtener esta información sobre la imagen de la figura 6.1(d) se muestra en la figura 6.14. En esta figura se puede apreciar claramente un cambio brusco alrededor de la columna 423, debido a la aparición de ruido en la imagen.

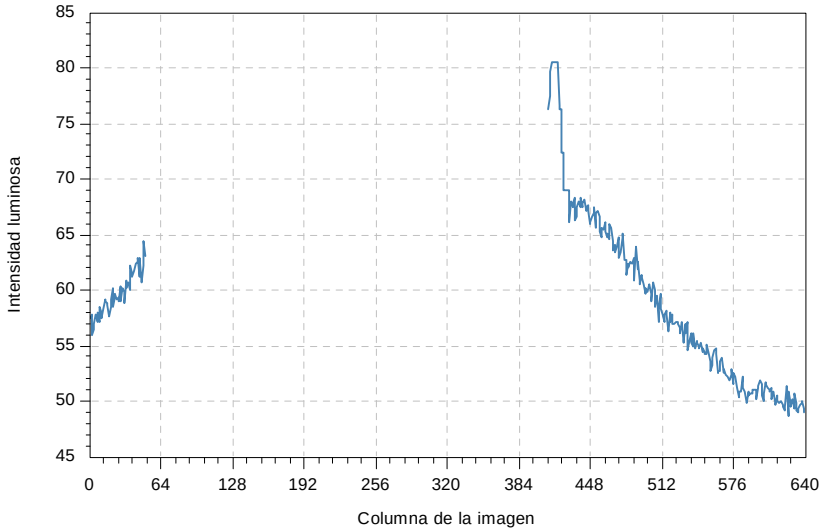


Figura 6.14: Intensidad luminosa media del fondo de la imagen mostrada en la figura 6.1(d).

Para utilizar la información acerca de la intensidad luminosa media del fondo se propone calcular la media móvil de dicha intensidad luminosa a medida que las ventanas de búsqueda se desplazan. Posteriormente, esta media será contrastada con la intensidad del fondo en una columna de la imagen en la que se haya detectado láser usando el método de detección por columnas independientes propuesto en la sección 6.3.1. Esta comprobación de la intensidad luminosa del fondo se une a la realizada sobre la posición de la línea con lo que se hace más robusta la validación.

Para calcular la media móvil de la intensidad luminosa media del fondo es necesario especificar el tamaño con el cual se van a realizar los cálculos. En la figura 6.15 se muestra la media móvil con varios tamaños calculada sobre la intensidad luminosa media del fondo de una imagen. En primer lugar es interesante observar cómo la intensidad luminosa media del fondo varía, siendo mayor en el centro que en los lados. Este hecho se debe, principalmente, a que el filtro interferencial utilizado por la cámara del sistema deja pasar con mayor intensidad la luz que es perpendicular al plano de la imagen (ver sección 4.2.1.5).

Por tanto, el centro de la imagen tendrá habitualmente una intensidad luminosa mayor que los lados derecho e izquierdo. La figura 6.15 muestra, además, la influencia que tiene el tamaño de la media móvil en el resultado obtenido. A mayor tamaño para el cálculo de la media móvil, mayor suavizado de la señal de salida pero peor ajuste con la señal original. Teniendo en cuenta estos resultados se debe utilizar un tamaño intermedio que suavice la señal permitiendo obtener un valor aproximado al real. En principio este tamaño puede coincidir con el ancho de la ventana de búsqueda.

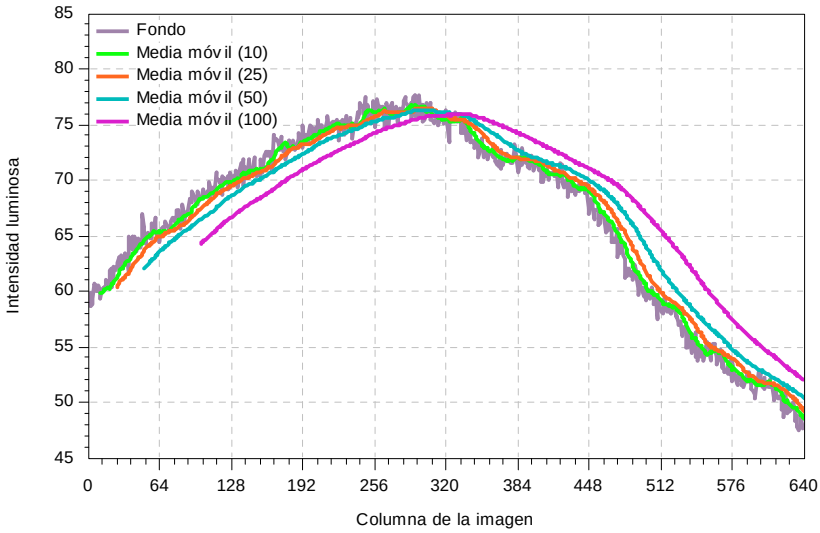


Figura 6.15: Media móvil, calculada con varios tamaños, de la intensidad luminosa media del fondo de una imagen.

La figura 6.16 muestra los resultados obtenidos aplicando la validación de la intensidad luminosa. Se puede comprobar la mejora obtenida respecto a la detección de la línea láser sobre el fondo en la imagen mostrada en la figura 6.1(d). Como se puede apreciar, la validación de la intensidad luminosa del fondo aplicada a la detección de la línea láser produce mejoras significativas en caso de que el ruido coincida con la posición esperada del láser. En el caso de la imagen de la figura 6.1(d) esto implica que se detecta correctamente dónde termina la línea láser y que el procedimiento no se vea afectado por el ruido de la imagen.

Parámetros. Los parámetros del procedimiento de detección de la línea láser sobre el fondo son los siguientes:

1. Tamaño de la ventana de búsqueda:

   a) Altura del lado paralelo corto del trapecio.
   b) Altura del lado paralelo largo del trapecio.
   c) Anchura del trapecio (distancia entre los lados paralelos).

2. Caracterización del fondo ($Ax^2 + Bx + C$):
   a) Coeficiente de segundo grado de la curva que ajusta el fondo (A).
   b) Coeficiente de primer grado de la curva que ajusta el fondo (B).
   c) Coeficiente independiente de la curva que ajusta el fondo (C).
3. Diferencia máxima para la validación de la intensidad luminosa del fondo.

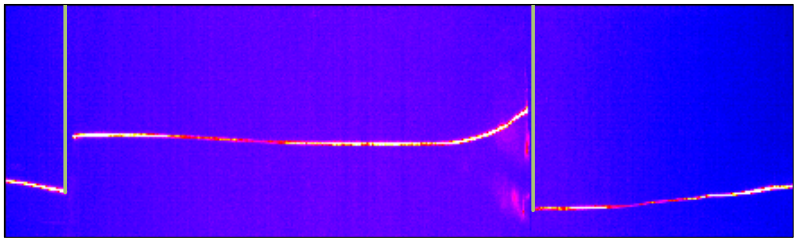


Figura 6.16: Resultados del procedimiento de detección de la línea láser sobre el fondo aplicado a la imagen de la figura 6.1(d) validando la intensidad luminosa del fondo de la imagen.

6.3.3. Determinación de la región de búsqueda del láser sobre la banda

Una vez que se ha determinado la posición de la línea láser sobre el fondo se puede utilizar esta información para delimitar la región de búsqueda del láser sobre la banda. Es evidente que si se han determinado los límites derecho e izquierdo de la línea láser sobre el fondo la proyección del láser sobre la banda se debe encontrar entre dichos límites verticales, como se muestra en las imágenes de la figura 6.10. Además, la línea láser sobre la banda debe encontrarse siempre por encima de la posición que ocupa la proyección de la línea láser sobre el fondo o en reposo. Es decir, debe encontrarse por encima de la línea mostrada en la figura 6.11(b), que representa la proyección de la línea cuando no hay banda bajo el dispositivo láser. Por tanto, la curva que ajusta la línea láser sobre el fondo indica la frontera inferior de la región de búsqueda.

Las coordenadas en el eje de abscisas de los límites de la línea láser sobre el fondo y la curva que ajusta la línea láser cuando no hay banda proporcionan las

coordenadas de la región de búsqueda del láser sobre la banda. Sin embargo, se puede reducir esta región de búsqueda si se tiene en cuenta la forma en la que el dispositivo láser proyecta la línea. Este dispositivo emite luz concentrada en un punto que, tras atravesar una lente, se convierte una línea de luz láser. Todos los puntos sobre los que se proyecta la luz láser parten de un mismo punto común en el espacio: el foco de luz láser.

La figura 6.17 muestra cómo se realiza la proyección de la línea láser. En esta figura se puede observar que, cuando la línea láser se proyecta sobre objetos a distintas alturas, como ocurrirá en el caso de la reconstrucción 3D de la banda, hay zonas donde el láser no se llega a proyectar. De estas zonas son de especial interés aquellas donde no llega el láser debido a la forma en la que se proyecta la línea partiendo de un punto, es decir, las zonas donde no llega el por oclusión de la propia banda (ver sección 3.3). Estas zonas, representadas en color gris en la figura 6.17, se denominarán zonas de sombra láser, y sus dimensiones están delimitadas por la geometría del sistema.

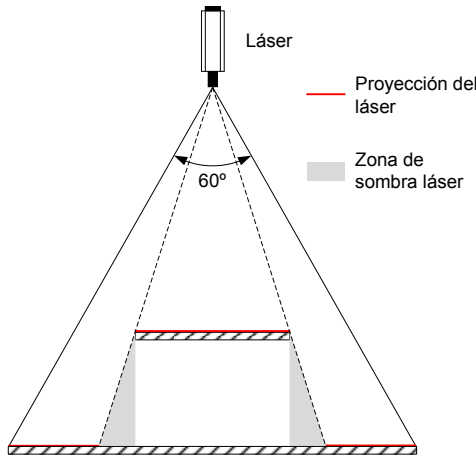


Figura 6.17: Proyección de la línea láser sobre la banda.

En el caso del sistema de reconstrucción 3D, la longitud de las zonas de sombra láser depende de la anchura de la banda y de la altura a la que se encuentre. Además, debido a la forma en la que se proyecta el láser partiendo de un punto en el espacio, siempre se debe cumplir que su proyección sobre una banda se encuentre delimitada por las líneas que unen los límites derecho e izquierdo de la luz láser sobre la banda con el foco láser, representadas mediante líneas discontinuas en la figura 6.17.

Las líneas discontinuas de la figura 6.17 y la curva que ajusta la línea láser sobre el fondo determinan la región donde se debe encontrar la luz del láser sobre

la banda. Esta información implica una reducción del área de búsqueda dentro de la imagen así como una indicación sobre la longitud que va a tener la línea láser proyectada sobre la banda. El único problema para poder determinar esta región es que es necesario conocer la posición del foco láser con respecto al sistema de referencia físico del plano del láser utilizado en el sistema de reconstrucción 3D.

Para obtener la posición en el espacio del foco láser se proponen dos soluciones:

1. *Automática.* El proceso consiste en utilizar la información de los límites del láser sobre la banda y sobre el fondo, obtenidos de una secuencia de imágenes, para determinar la posición del foco láser en el espacio que cumpla el modelo de proyección presentado en la figura 6.17.

2. *Manual.* En este caso el proceso consiste en la medición de la posición del foco láser respecto a un punto de la imagen cuyas coordenadas en el sistema de referencia de la imagen (coordenadas del píxel) sean conocidas. Por ejemplo, se puede medir de forma precisa la altura desde el foco láser hasta la zona donde se proyecta el láser sobre el fondo y, además, determinar a qué píxel corresponde ese punto del fondo. Este procedimiento proporciona la coordenada del foco láser en el sistema de referencia físico del plano del láser, ya que la coordenada en el eje de abscisas del punto sobre el fondo coincide con la del foco láser en ese eje, y la coordenada en el eje de ordenadas del punto más la altura medida coincide con la del foco láser en ese eje.

Para determinar de forma automática la posición del foco láser se puede partir de tres puntos para cada lado de la imagen. En el lado izquierdo se debe conocer el punto que indica el límite del láser en el fondo, F_L, el punto que indica el límite láser sobre la banda, B_L, y, además, el primer punto que se encuentre dentro de la zona de sombra láser, es decir, el punto consecutivo a B_L, que se denominará S_L. Para el lado derecho se deben conocer los tres puntos equivalentes: F_R, B_R y S_R. Conocidos estos puntos se puede determinar la región posible donde se ubica el foco láser. En concreto la posición del foco láser debe estar delimitada por cuatro puntos:

- La posición superior máxima que puede tener el foco láser será aquella que permita que el láser se proyecte sobre B_L y B_R pero no sobre S_L y S_R. Esta posición se calcula como la intersección de la recta que pasa por B_L y S_L con la recta que pasa por B_R y S_R, como se muestra en la figura 6.18(a).

- La posición inferior máxima que puede tener el foco láser será aquella que permita que el láser se proyecte sobre B_L y B_R así como sobre F_L y F_R. Esta posición se calcula como la intersección de la recta que pasa

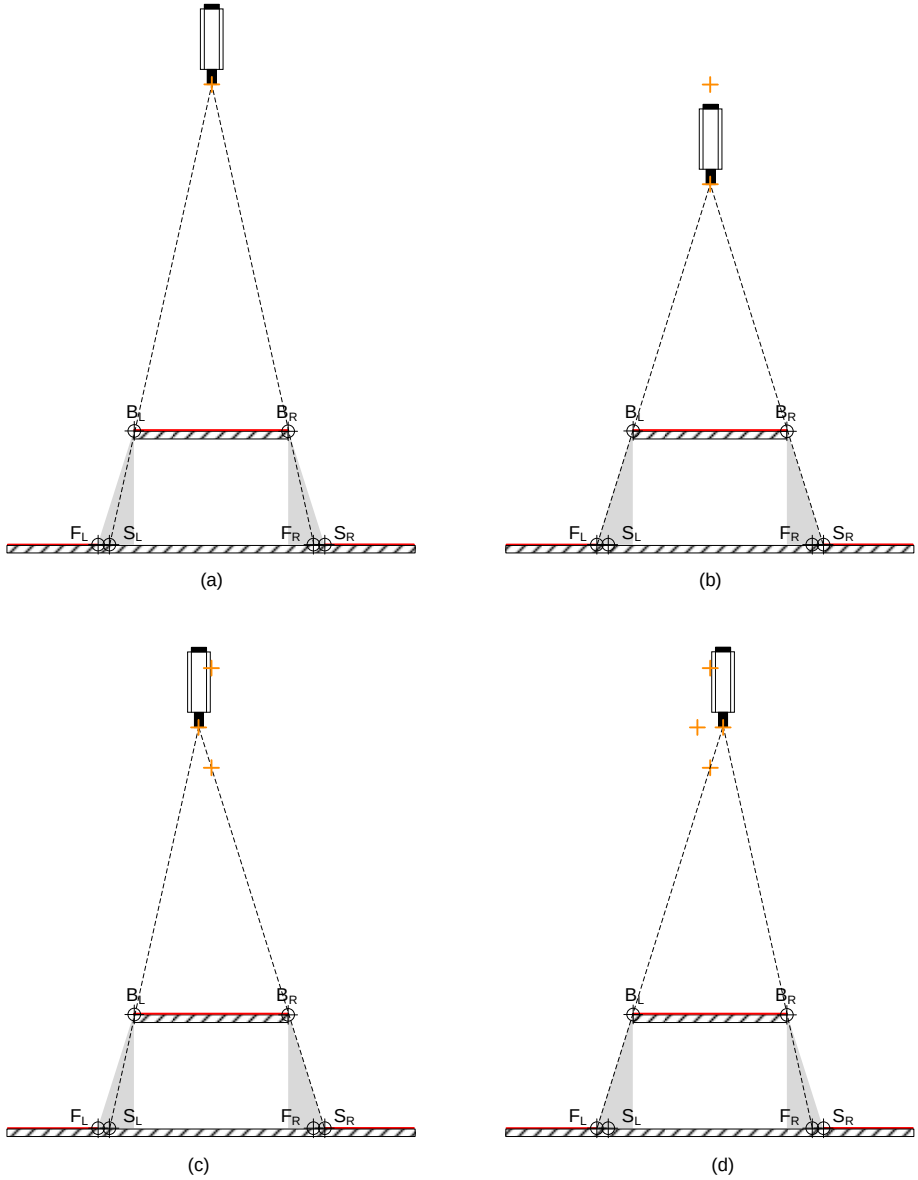


Figura 6.18: Cálculo de la posible región de ubicación del foco láser: (a) Posición superior. (b) Posición inferior. (c) Posición izquierda. (d) Posición derecha.

por B_L y F_L con la recta que pasa por B_R y F_R, como se muestra en la figura 6.18(b).

- La posición más a la izquierda que puede tener el foco láser será aquella que permita que el láser se proyecte sobre B_L y B_R, que no se proyecte sobre S_L pero sí sobre F_R. Esta posición se calcula como la intersección de la recta que pasa por B_L y S_L con la recta que pasa por B_R y F_R, como se muestra en la figura 6.18(c).

- La posición más a la derecha que puede tener el foco láser será aquella que permita que el láser se proyecte sobre B_L y B_R, que no se proyecte sobre S_R pero sí sobre F_L. Esta posición se calcula como la intersección de la recta que pasa por B_L y F_L con la recta que pasa por B_R y S_R, como se muestra en la figura 6.18(d).

Los cuatro puntos de intersección forman un rombo cuyo interior indica las posibles posiciones del foco láser para una imagen. En la figura 6.19 se muestra de forma gráfica la intersección de estos cuatro puntos.

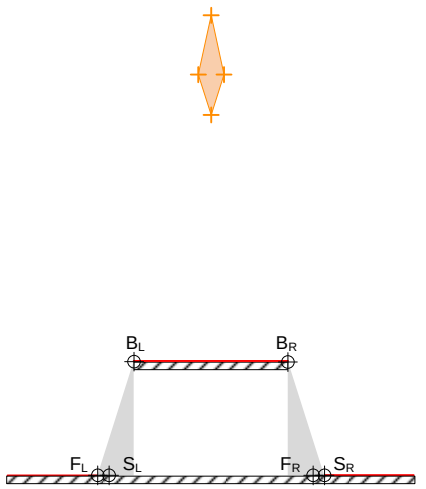


Figura 6.19: Posible región de ubicación del foco láser.

La aplicación de este procedimiento a una secuencia de imágenes donde la banda se desplace o presente variaciones de ancho proporcionará una secuencia de rombos indicando posiciones posibles del foco láser. Aquella posición que se repita más frecuentemente, esto es, aquella que esté más veces contenida en la secuencia de rombos, será la que tenga más probabilidades de ser la posición en

la que se encuentra el foco láser. Para calcular la frecuencia con la que cada posición está contenida en la secuencia de rombos se puede muestrear el espacio de posiciones posibles de forma discreta, siguiendo un mecanismo similar al utilizado en la transformada de Hough. Las figuras 6.20, 6.21, 6.22 y 6.23 muestran los resultados obtenidos al calcular los rombos sobre los vídeos del procesamiento de cuatro bandas de acero en la línea de producción.[1] Aquellas coordenadas con mayor intensidad se corresponden con las posiciones que se han repetido en la secuencia de rombos con mayor frecuencia.

En la tabla 6.1 se muestra la posición resultante del foco láser usando el procedimiento automático para cada uno de los cuatro vídeos, su valor medio y la posición obtenida con el procedimiento manual.

Origen de los resultados	Posición en el eje X (milímetros)	Posición en el eje Y (milímetros)
Vídeo 1	−12,47	1671,82
Vídeo 2	−5,72	1674,57
Vídeo 3	−17,65	1667,47
Vídeo 4	3,98	1690,77
Media de los vídeos	−7,96	1676,16
Procedimiento manual	6,22	1759,75

Tabla 6.1: Resultados obtenidos en el proceso de detección de la posición del foco láser

Los resultados obtenidos por el procedimiento manual y por el automático son dispares. La diferencia entre las posiciones proporcionadas por ambos en el eje X es de 14,18 milímetros y en el eje Y de 83,59 milímetros. Esta diferencia se atribuye a dos razones fundamentales:

1. *Errores en la calibración espacial.* La posición del rombo en el espacio se obtiene a partir de la posición en el espacio de los píxeles cuyas coordenadas coinciden con los puntos F_L, B_L, S_L, F_R, B_R y S_R. Un pequeño error en la calibración espacial que proporciona una traducción entre píxeles y distancias puede provocar una variación en la posición del rombo en el espacio de magnitudes similares a las obtenidas en la tabla 6.1.

[1] Para realizar estas tareas de cálculo se han utilizado las secuencias de imágenes adquiridas por el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud durante el procesamiento de cuatro bandas de acero en la línea de producción en la que se instala el sistema. La secuencia de imágenes del procesamiento de cada banda ha sido almacenado en un contenedor multimedia por el mecanismo de grabación de vídeo en tiempo real descrito en el capítulo 5.

Pruebas de sensibilidad variando exclusivamente la posición en el eje X del punto F_L en 1 milímetro se traducen en una variación de la posición superior del rombo en 9,80 milímetros en el eje X y de 20,78 milímetros en el eje Y. Una variación de la posición en el eje Y del punto F_L en 1 milímetro produce una variación de la posición superior del rombo en 4,37 milímetros en el eje X y de 9,27 milímetros en el eje Y. Estas diferencias en la posición superior del rombo se obtienen variando únicamente un punto de los cuatro que son necesarios. Este hecho indica que los errores en la calibración espacial afectan significativamente a la posición del rombo.

2. *Resolución.* De la misma forma que los errores en la calibración espacial afectan a la posición del rombo debido al posicionamiento erróneo de los píxeles en el espacio, la resolución píxeles/distancias es otro elemento fundamental. La posición de los puntos F_L, B_L, S_L, F_R, B_R y S_R en el espacio se basa en las coordenadas de estos puntos en el sistema de referencia de la imagen (columna y fila de la imagen). La cantidad de píxeles por milímetro es un indicador de la precisión con la que se va a poder obtener la posición en el espacio de los puntos que se usan para establecer la posición del rombo, tal y como se determinó anteriormente.

La geometría del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud diseñado así como las dimensiones del área de interés de la escena hacen que los resultados del procedimiento de detección automático de la posición del láser no sean fiables. Para otro tipo de geometrías donde la relación píxel por milímetro sea netamente superior se considera que es una forma elegante y eficiente de obtener la posición del foco láser, y como tal se deja propuesto el procedimiento en esta tesis.

A la vista de estos resultados, el proceso de extracción de la línea láser utilizará la posición del foco láser obtenida a partir del procedimiento manual.

Utilizando esta información sobre la posición del foco láser se puede establecer finalmente la región de búsqueda de la línea láser sobre la banda. La figura 6.24 muestra esta región de búsqueda para las imágenes de ejemplo mostradas en la figura 6.1.

Parámetros. Los parámetros necesarios para determinar la región de búsqueda de la línea láser sobre la banda son dos:

1. Posición en el eje de ordenadas del foco láser.

2. Posición en el eje de abcisas del foco láser.

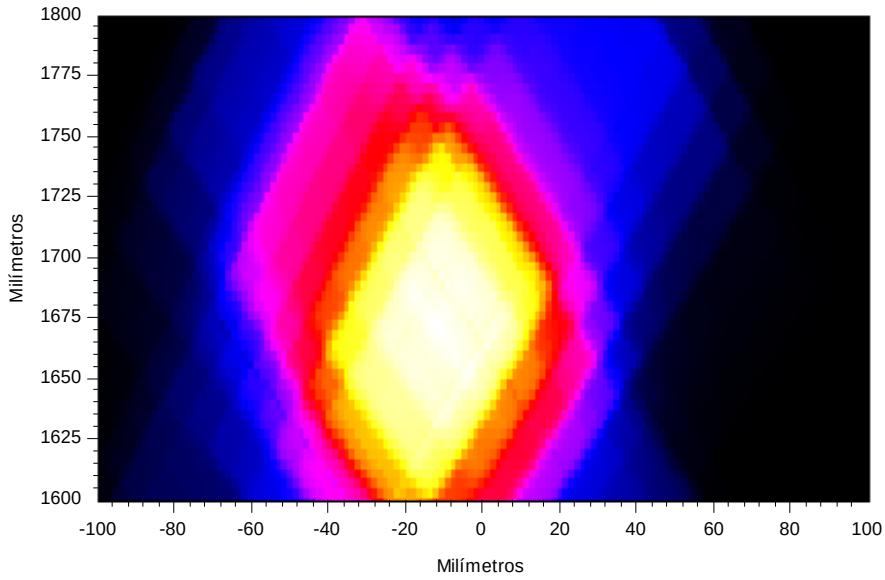


Figura 6.20: Detección de la posición del foco láser en el vídeo de ejemplo 1.

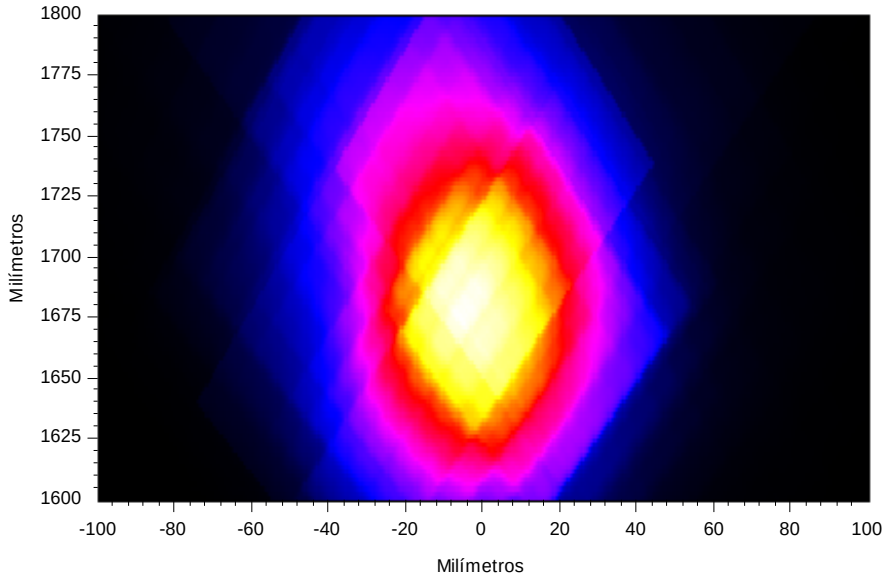


Figura 6.21: Detección de la posición del foco láser en el vídeo de ejemplo 2.

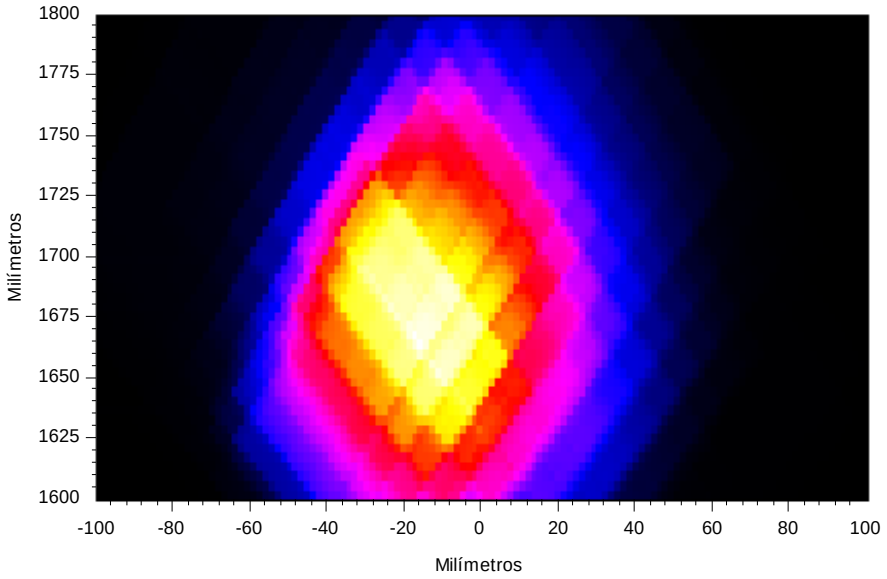


Figura 6.22: Detección de la posición del foco láser en el vídeo de ejemplo 3.

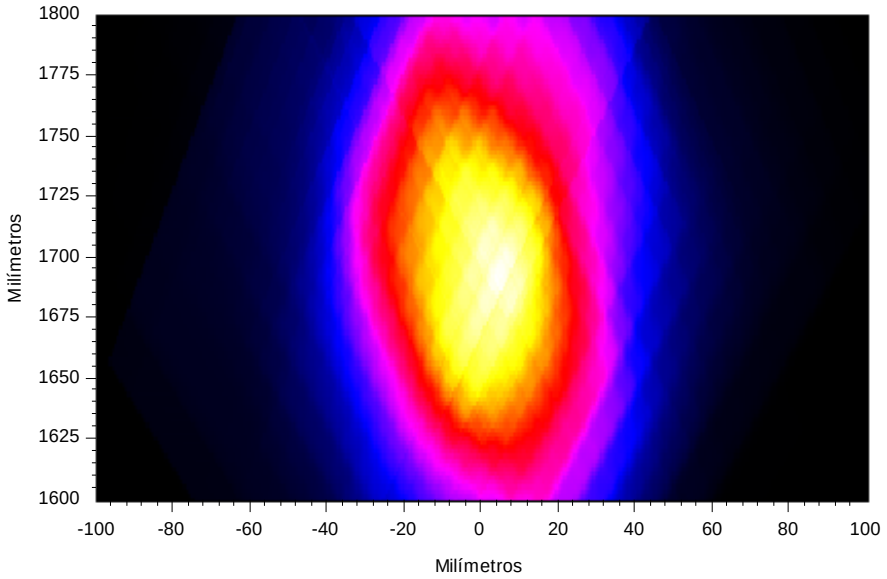


Figura 6.23: Detección de la posición del foco láser en el vídeo de ejemplo 4.

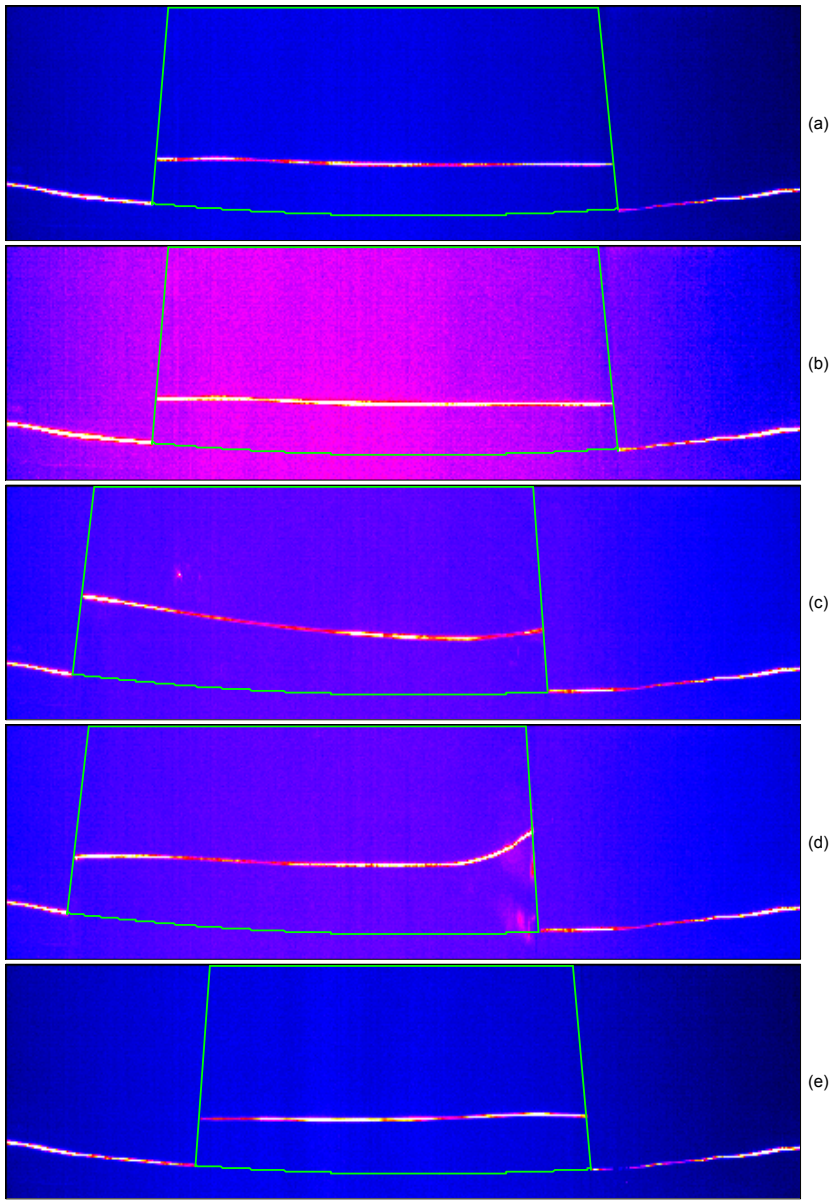


Figura 6.24: Región de búsqueda de la línea láser sobre la banda: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

6.3.4. Extracción del láser sobre la banda

Una vez que se ha determinado la región de búsqueda se procederá a la extracción de la línea láser en su interior siguiendo los pasos que se describen a continuación.

6.3.4.1. Detección de la línea láser para cada columna

En primer lugar se aplica el procedimiento de detección del láser propuesto en la sección 6.3.1 dentro de la región de búsqueda. Este tipo de detección considera a las columnas de la imagen como señales independientes y, por tanto, es sensible al ruido. Los resultados de aplicar este procedimiento a las imágenes de ejemplo de la figura 6.1 se pueden observar en la figura 6.25.

6.3.4.2. Ajuste en segmentos

El resultado producido por la detección del láser es una secuencia de puntos que indica la posición donde se ha detectado el láser para cada columna. Esta detección no tiene en cuenta que la línea láser debe ser continua dentro de la región de búsqueda. Por tanto, es habitual que el resultado de la detección contenga espurios o agujeros (zonas donde el láser no se ha detectado). Para evitar estos problemas se propone realizar una búsqueda global dentro del conjunto de puntos que indican la posición del láser.

Para comenzar con la búsqueda global se va a definir la línea láser como una función $f(x, y)$ en el plano de la imagen. En el caso de que la línea láser apareciese en la imagen como una línea recta sería definida mediante la función $y = bx + c$. De forma más general, la línea láser se podrá definir mediante varias funciones $f(x, y)$ correspondientes a los diversos segmentos de la línea.

Para ajustar la linea láser a un conjunto de segmentos es necesario definir el tipo de función que se utiliza para definir cada segmento de línea. En este trabajo se ha optado por utilizar tres tipos: lineal, ecuación (6.3), cuadrático ecuación (6.4) y *splines akima*.

$$y = bx + c \tag{6.3}$$

$$y = ax^2 + bx + c \tag{6.4}$$

A continuación se describe el proceso ajuste de segmentos propuesto basado en la división y en la unión.

División de segmentos. Para realizar el ajuste de la línea láser mediante segmentos se utiliza un algoritmo basado en el método denominado *iterative end-point fit* [Duda y Hart, 1973]. En primer lugar se calcula una aproximación de

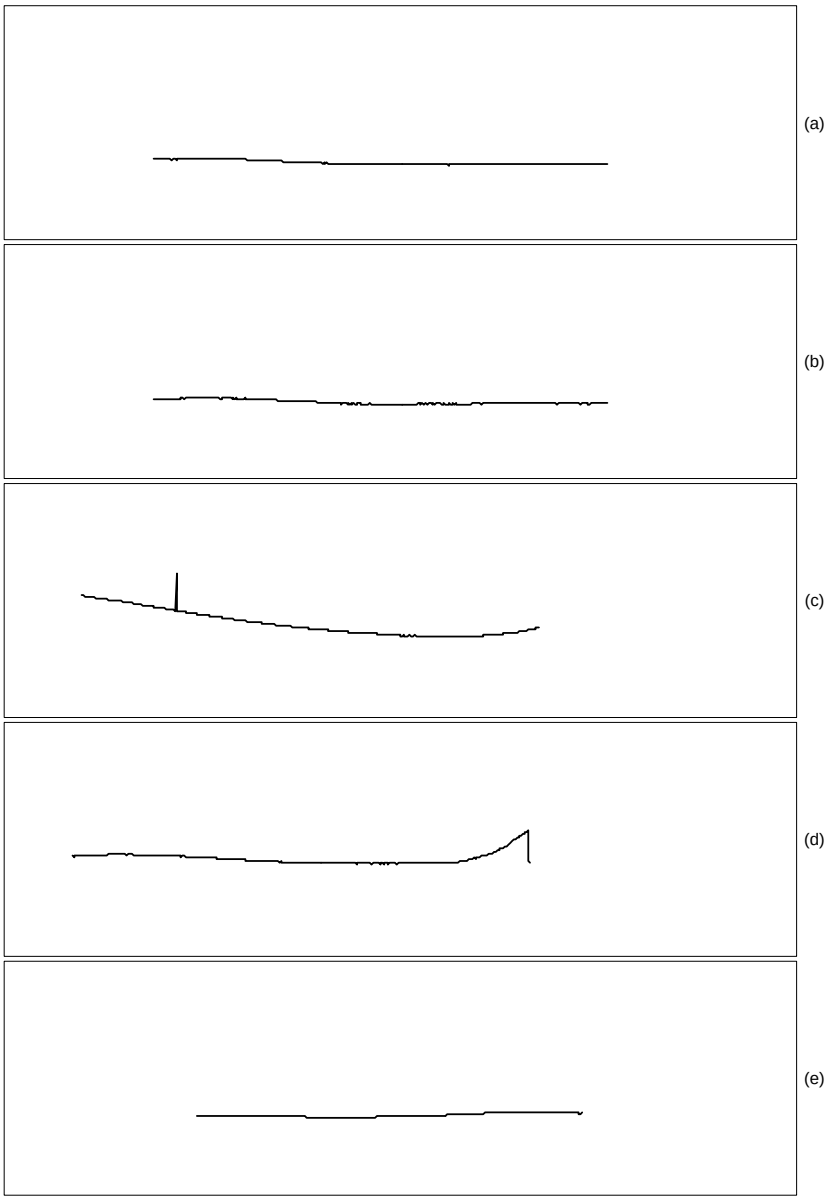


Figura 6.25: Detección de la línea láser en la región de búsqueda: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

toda la línea láser en un sólo segmento. En el caso del ajuste mediante segmentos lineales se utilizan los puntos de los extremos para calcular los coeficientes que definen el segmento lineal. En el caso del ajuste mediante segmentos cuadráticos se utilizan los puntos de los extremos y el punto central. A continuación, se calcula el error máximo, $\epsilon_{\text{máx}}$, que se produce al aproximar la línea láser por el segmento. Este error define la máxima diferencia entre la posición del láser detectado y la posición, para ese punto, de la aproximación por el segmento. Si $\epsilon_{\text{máx}}$ es mayor que un umbral determinado, ϵ, el segmento se divide en dos partes en la posición donde se ha obtenido el error de aproximación máximo, $\epsilon_{\text{máx}}$. El algoritmo continúa dividiendo recursivamente los segmentos hasta que el error $\epsilon_{\text{máx}}$ no exceda el umbral ϵ.

Los *splines akima* [Akima, 1978] son un tipo especial de *splines* estables ante espurios. Esta característica los diferencia de otro tipo de *splines*, como los *splines* cúbicos, que oscilan en el entorno de espurios. Los *splines akima* utilizan cinco puntos para crear cuatro funciones cúbicas que ajustan cada segmento entre los cinco puntos. El procedimiento para realizar el ajuste utilizando segmentos basados en *splines akima* es similar al lineal o al cuadrático, con la única diferencia de que es necesario utilizar más puntos para su ajuste. Los cinco puntos necesarios se obtendrán de intervalos equiespaciados en el rango del segmento a ajustar. Para implementar el ajuste con *splines akima* se ha utilizado la librería científica de GNU [Galassi y Davies, 2005].

Para ilustrar el ajuste por segmentos se muestra el ajuste en segmentos de la función seno en distintos niveles de división. La figura 6.26 muestra el ajuste utilizando segmentos lineales, la figura 6.27 muestra el ajuste utilizando segmentos cuadráticos y, finalmente, la figura 6.28 muestra el ajuste utilizando segmentos basados en *splines akima*. Cada segmento se muestra con un color distinto para poder diferenciarlos. El cálculo de los ajustes se ha realizado con un valor de ϵ igual a 0,02.

En el ajuste mediante segmentos lineales se puede observar cómo inicialmente toda la curva se ajusta mediante una única línea (ver figura 6.26(a)) calculada a partir de los dos puntos de los extremos. El punto con el mayor error de ajuste divide al segmento en dos partes (ver figura 6.26(b)). A continuación, la división de cada parte continúa, llegando a cuatro segmentos (ver figura 6.26(c)). Cuatro divisiones posteriores producen, finalmente, un total de 15 segmentos (ver figuras 6.26(d), 6.26(e), 6.26(f) y 6.26(g)).

El ajuste mediante segmentos cuadráticos tiene un funcionamiento similar al ajuste mediante segmentos lineales. En este caso, el primer segmento también resulta ser una línea recta (ver figura 6.27(a)) ya que los tres puntos que se usan para hacer el ajuste inicial forman una línea recta. En los siguientes pasos el procedimiento de división va ajustando la función en segmentos de menor tamaño hasta que el error deja de exceder el umbral. Finalmente, la función seno se ajusta mediante 7 segmentos cuadráticos (ver figura 6.27(f)). El número de

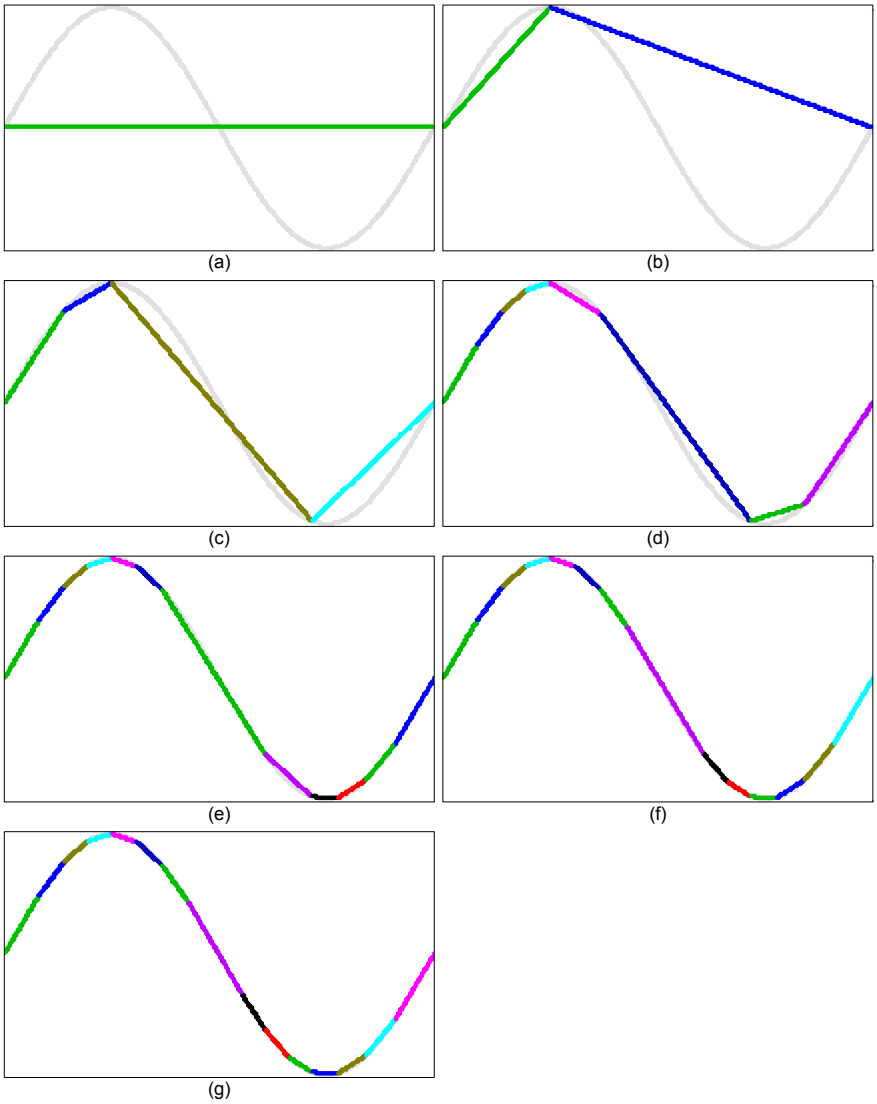


Figura 6.26: Ajuste de la función seno mediante segmentos lineales en distintos niveles de división: (a) Ajuste inicial. (b) División 1. (c) División 2. (d) División 3. (e) División 4. (f) División 5. (g) División 6.

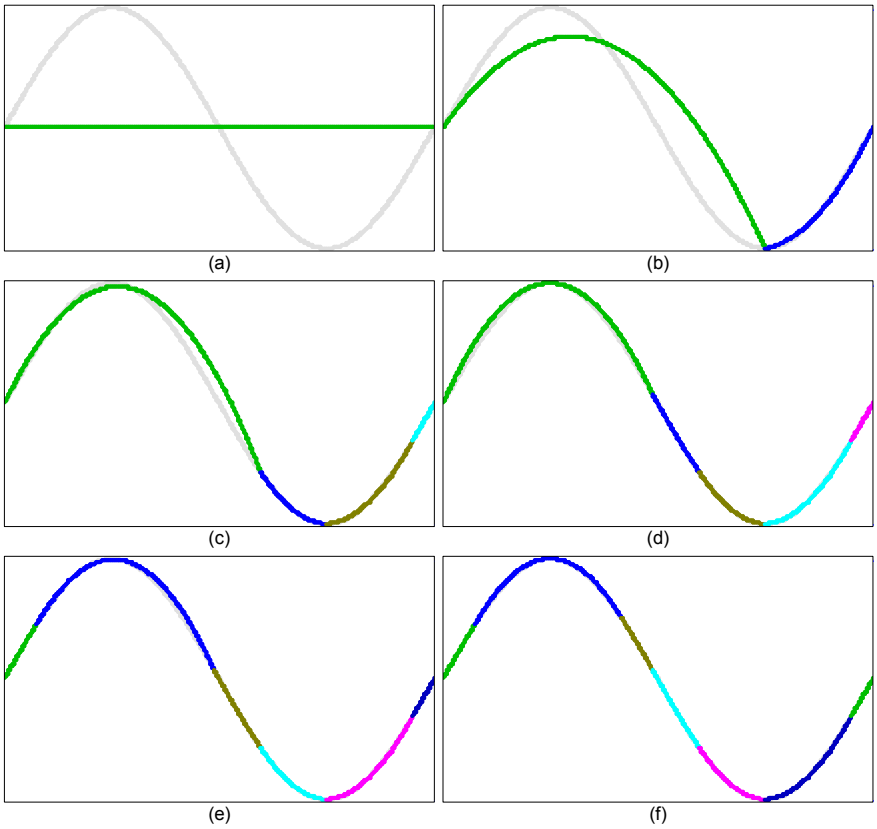


Figura 6.27: Ajuste de la función seno mediante segmentos cuadráticos en distintos niveles de división: (a) Ajuste inicial. (b) División 1. (c) División 2. (d) División 3. (e) División 4. (f) División 5.

segmentos necesarios es significativamente inferior al ajuste mediante segmentos lineales debido a que los cuadráticos ajustan mejor este tipo de funciones.

El ajuste mediante segmentos basados en *splines akima* tiene un funcionamiento ligeramente distinto al lineal y al cuadrático. En este caso se están utilizando cinco puntos para realizar el ajuste de cada segmento, de ahí que incluso en el ajuste inicial ya se obtenga un segmento más aproximado a la función seno. Las siguientes divisiones mejoran el ajuste inicial hasta llegar a un conjunto de 5 segmentos que ajustan la función original con un error inferior al umbral.

Para comprobar la robustez del procedimiento de ajuste frente al ruido se añaden dos puntos espurios sobre la curva de la función seno. La figura 6.29

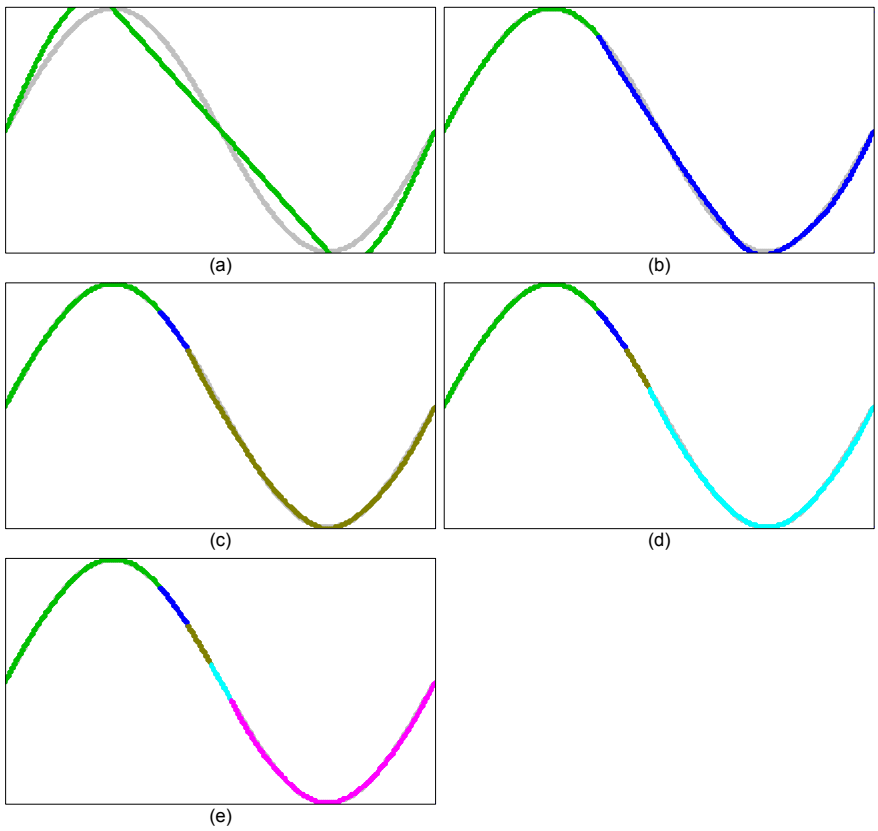


Figura 6.28: Ajuste de la función seno mediante segmentos basados en *splines akima* en distintos niveles de división: (a) Ajuste inicial. (b) División 1. (c) División 2. (d) División 3. (e) División 4.

muestra que el ajuste mediante segmentos es un procedimiento robusto ante el ruido ya que el proceso de división crea pequeños segmentos para ajustar los espurios. Este tipo de segmentos pueden ser fácilmente detectados y corregidos.

A continuación se evalúa el comportamiento del ajuste de segmentos sobre la secuencia de puntos que indican la posición del láser sobre la banda. Las figuras 6.30 y 6.31 muestran el ajuste de la imagen obtenida de una banda con óxido (ver figura 6.25(d)) utilizando segmentos lineales y un error máximo de un píxel ($\epsilon = 1$). Cada imagen muestra un paso en la división de los segmentos. En la esquina superior izquierda de cada imagen se muestra la leyenda, donde los segmentos se etiquetan con una secuencia de números que indican su origen.

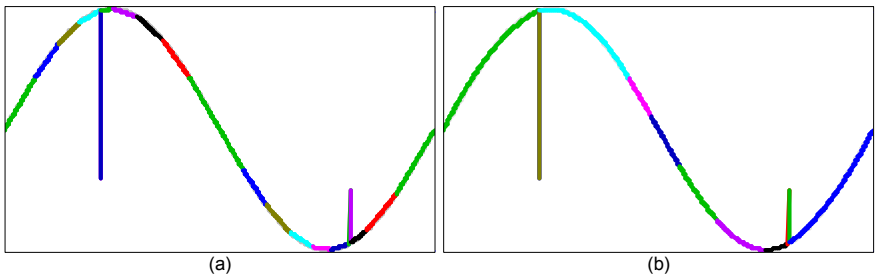


Figura 6.29: Ajuste de la función seno con dos espurios utilizando segmentos: (a) Segmentos lineales. (b) Segmentos cuadráticos.

El dígito 0 identifica al segmento de ajuste inicial, el 1 significa que se ha creado a partir de la división izquierda y el 2 a partir de la división derecha.

Por ejemplo, el segmento 0.1.2 significa que ese segmento se ha originado en la división derecha del segmento 0.1, que a su vez se originó a partir de la división izquierda del segmento 0, en este caso el segmento inicial. El rango entre corchetes que aparece en la leyenda de las figuras tras la etiqueta del segmento indica el rango en el eje X que es ajustado por ese segmento.

En el ajuste con segmentos lineales se puede observar cómo inicialmente se realiza un ajuste con la línea calculada a partir de la posición de los extremos (ver figura 6.30(a)). El segundo paso divide el segmento inicial en dos, encontrando el punto de división en la zona donde se encuentra el ruido (ver figura 6.30(b)). A continuación, se repite la división de los segmentos (ver figura 6.30(c)). Se puede observar cómo el procedimiento de ajuste necesita utilizar muchos segmentos para ajustar la zona con ruido. Los siguientes pasos (ver figuras 6.31(a), 6.31(b) y 6.31(c)) continúan la división de los segmentos hasta alcanzar una situación donde no se supere el umbral de error en el ajuste, que en este caso era de un píxel.

Las figura 6.32 muestra el ajuste para la misma imagen de la proyección de la línea láser sobre una banda con óxido mostrada en la figura 6.25(d) pero, en este caso, usando segmentos cuadráticos y también un error máximo de un píxel ($\epsilon = 1$). Nuevamente, la primera división se realiza por el punto donde se encuentra el ruido, que evidentemente es sobre el que mayor error de ajuste se comete en ambos casos. A continuación, se continúa la división hasta conseguir una situación donde el error no supere el umbral. En el ajuste con segmentos cuadráticos se necesitan menos pasos en la división de segmentos para llegar al ajuste final. Además, el número de segmentos es inferior (dos menos utilizando segmentos cuadráticos).

La figura 6.33 muestra el ajuste para la imagen de la proyección de la línea

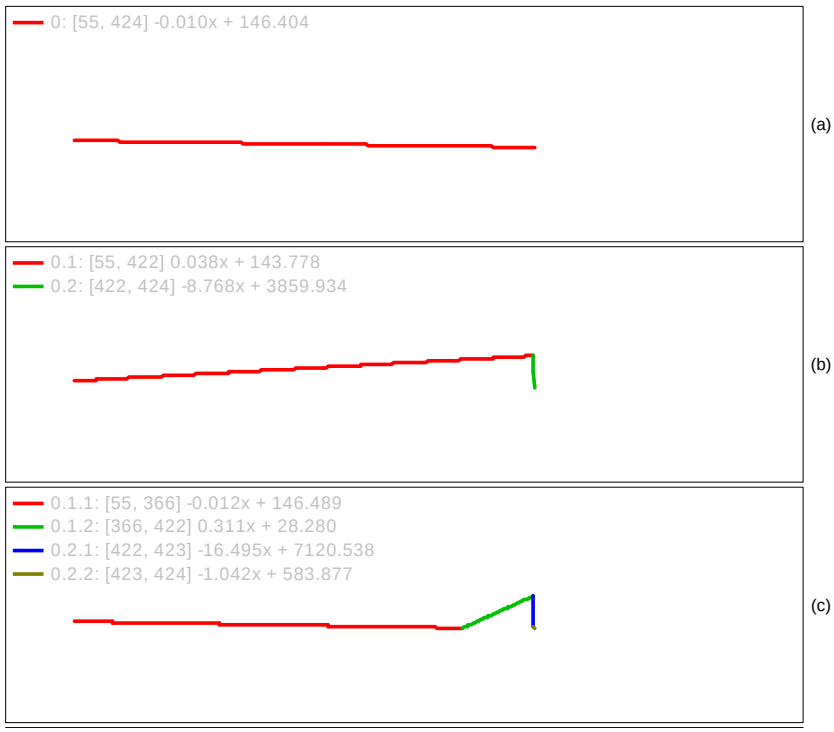


Figura 6.30: Ajuste de la línea láser proyectada sobre una banda con óxido utilizando segmentos lineales en distintos niveles de división: (a) Paso 1. (b) Paso 2. (c) Paso 3. (Continúa en la figura 6.31).

láser sobre una banda con óxido mostrada en la figura 6.25(d), en este caso utilizando segmentos basados en *splines akima* y un error máximo de un píxel ($\epsilon = 1$). Debido a que este tipo de ajuste requiere más puntos por segmento (cinco frente a los tres y dos de los segmentos cuadráticos y lineales, respectivamente), el ajuste se realiza en menos pasos y con muchos menos segmentos.

Las figuras 6.34, 6.35 y 6.36 muestran el ajuste realizado sobre las imágenes de ejemplo mostradas en la figura 6.1 utilizando segmentos lineales, segmentos cuadráticos y segmentos basados en *splines akima*, respectivamente. Como era de esperar el ajuste lineal es el que necesita más segmentos para llegar al ajuste final, siendo el ajuste con *splines akima* el que necesita menos, en algunos casos solamente uno.

La figura 6.37 muestra una comparación entre el ajuste realizado con segmentos lineales, con segmentos cuadráticos y con segmentos basados en *splines*

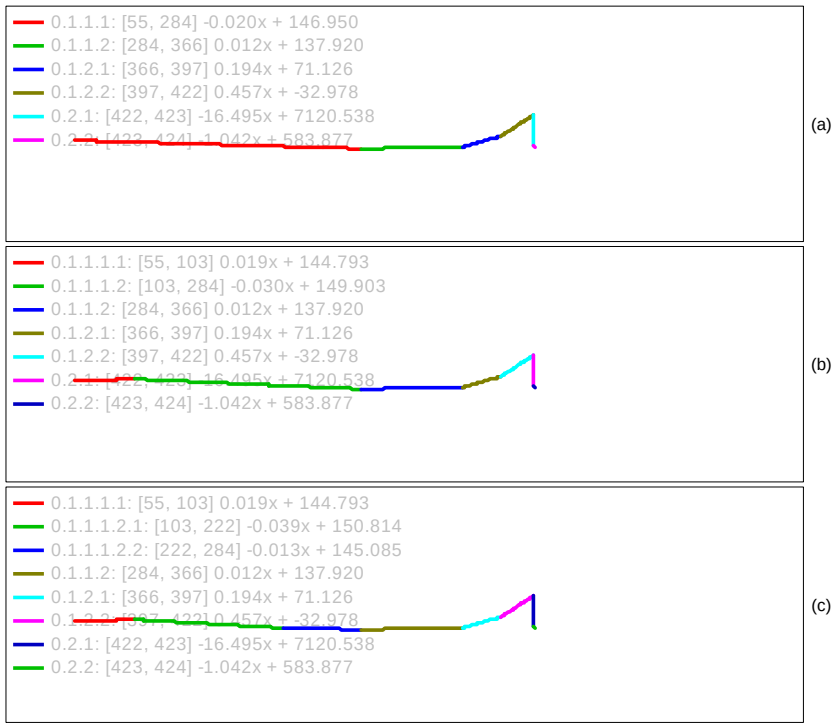


Figura 6.31: (Continuación de la figura 6.30) Ajuste de la línea láser proyectada sobre una banda con óxido utilizando segmentos lineales en distintos niveles de división: (a) Paso 4. (b) Paso 5. (c) Paso 6.

akima. La imagen sobre la que se ha realizado el ajuste es la imagen con reflejos mostrada en la figura 6.1(c). Sólo se muestra una zona maximizada para poder observar con más detalle las diferencias. En primer lugar se puede observar la gran diferencia que existe entre la posición de la línea láser obtenida con el procedimiento propuesto basado en el centro de masas (ver figura 6.37(a)) y la línea láser detectada con el ajuste por segmentos (ver figuras 6.37(b), 6.37(c) y 6.37(d)). El ajuste por segmentos permite realizar un suavizado de la posición de la línea evitando los problemas originados por la digitalización de la imagen y proporcionando una línea continua sin saltos abruptos. Comparando el ajuste utilizado con los diversos tipos de segmentos, el ajuste utilizando *splines akima* proporciona la posición de la línea láser con mayor suavidad y continuidad. En la comparación de estos resultados no tiene sentido hablar del error de ajuste ya que, en todos los casos, con un número de segmentos igual al número de puntos

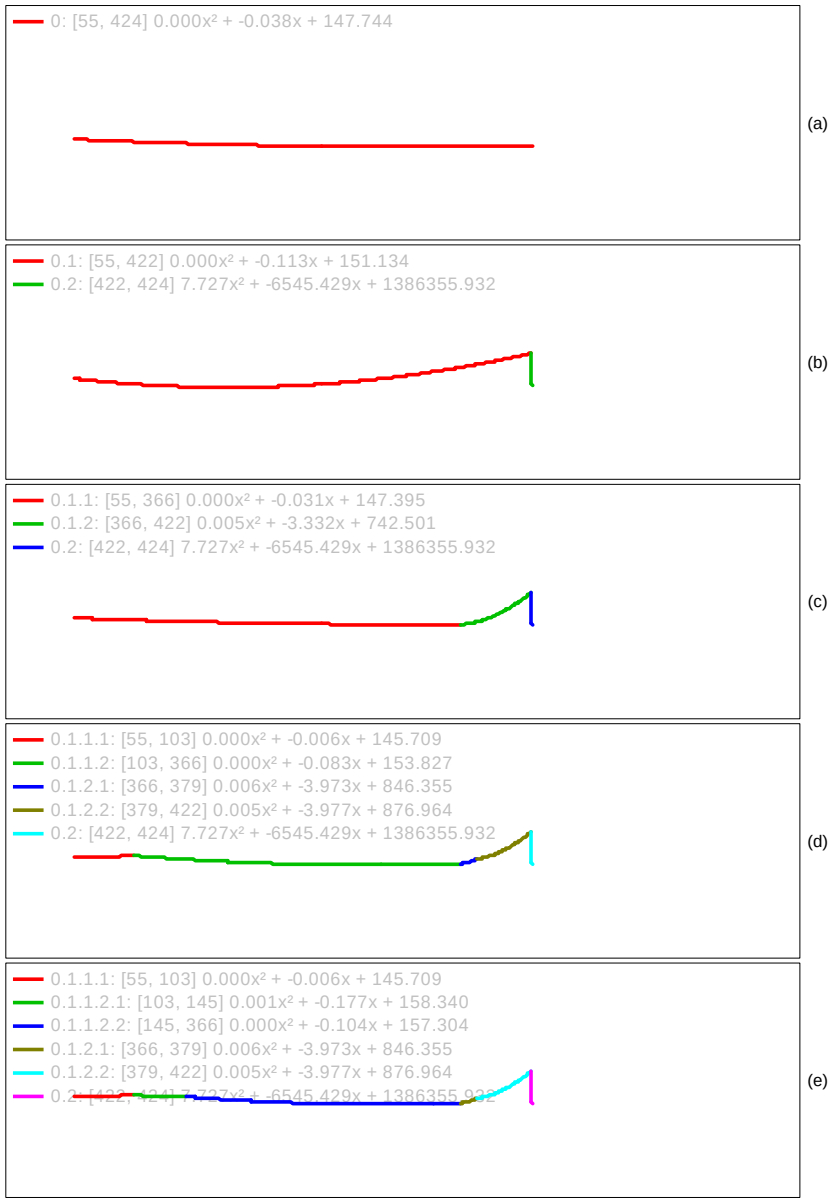


Figura 6.32: Ajuste de la línea láser proyectada sobre una banda con óxido utilizando segmentos cuadráticos en distintos niveles de división: (a) Paso 1. (b) Paso 2. (c) Paso 3. (d) Paso 4. (e) Paso 5.

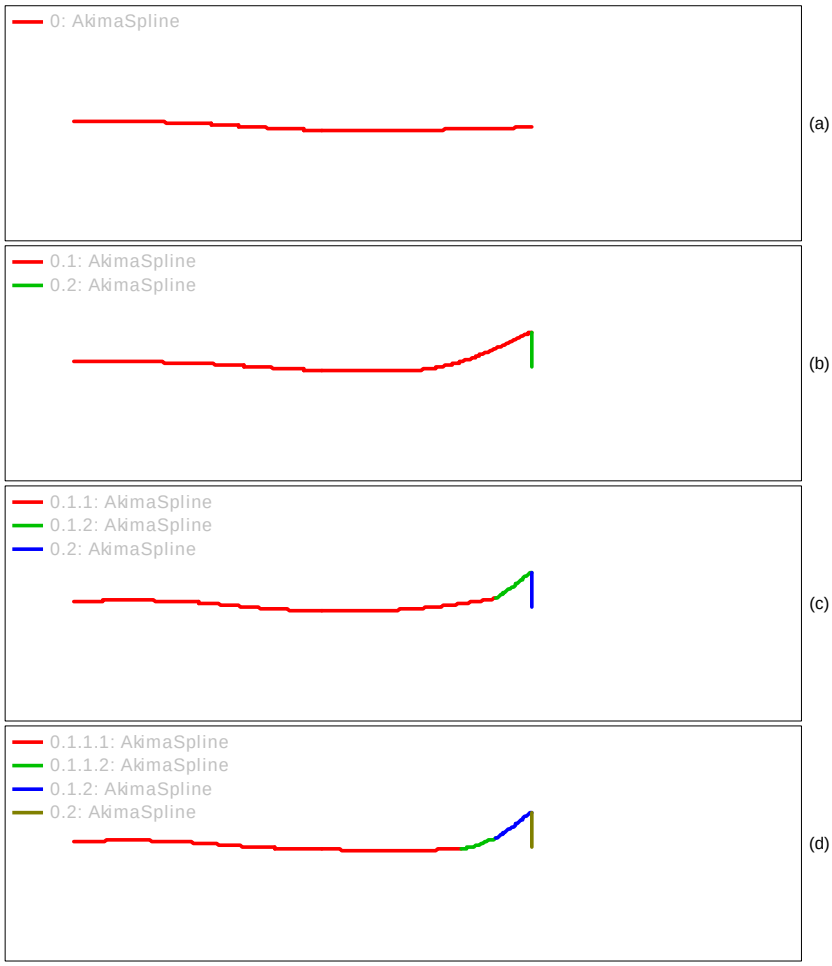


Figura 6.33: Ajuste de la línea láser proyectada sobre una banda con óxido utilizando segmentos basados en *splines akima* en distintos niveles de división: (a) Paso 1. (b) Paso 2. (c) Paso 3. (d) Paso 4.

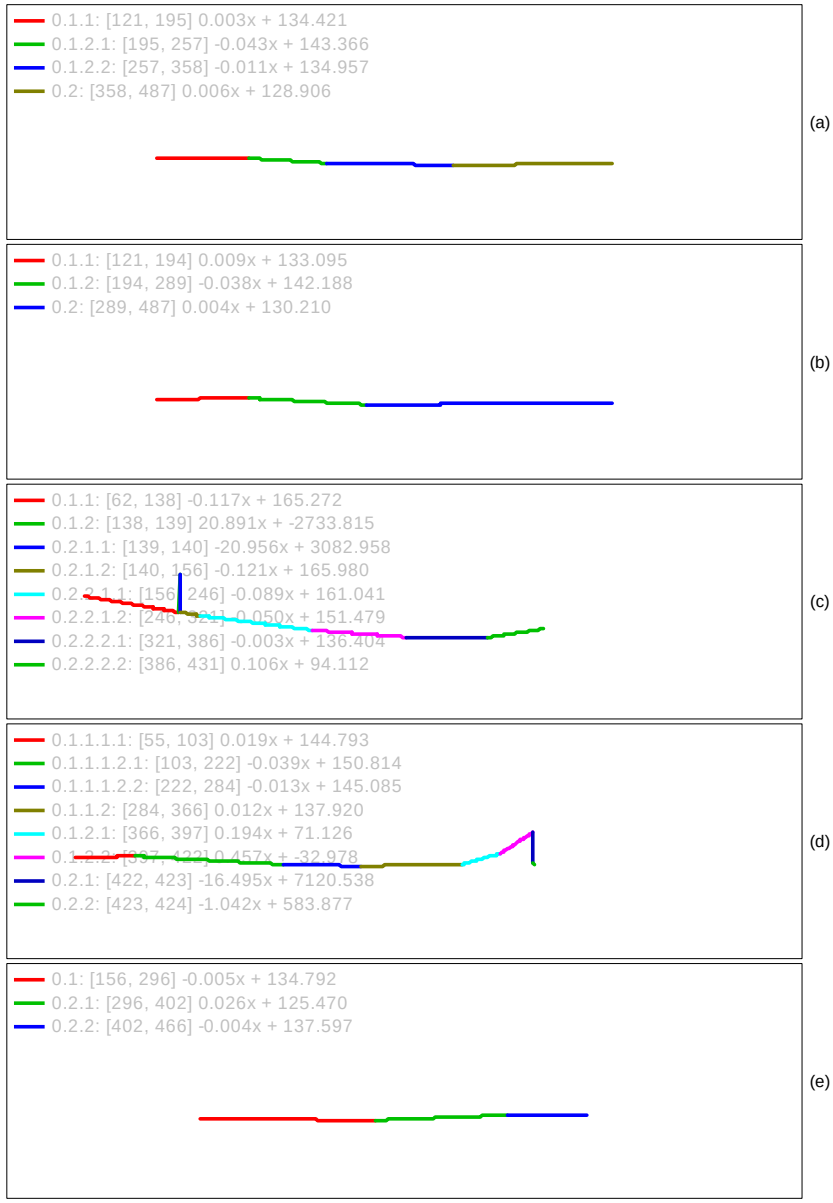


Figura 6.34: Ajuste de las imágenes de ejemplo utilizando segmentos lineales: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

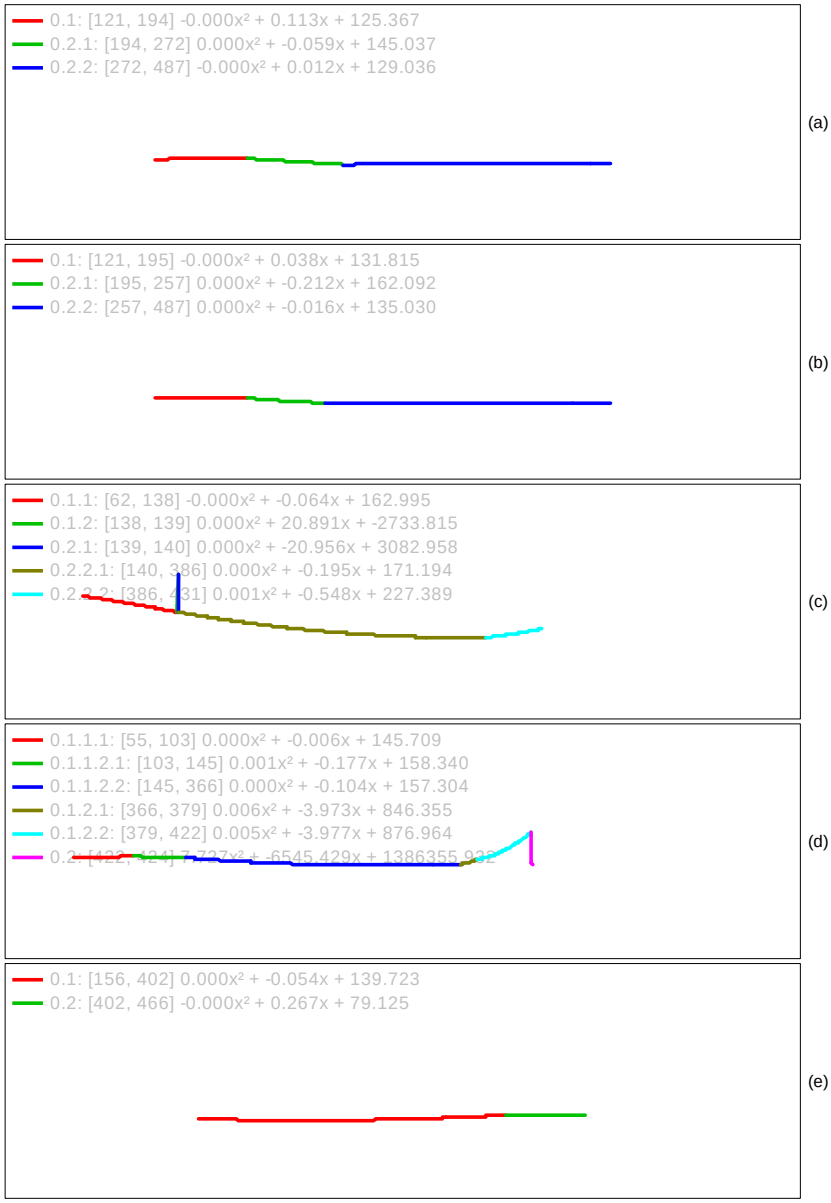


Figura 6.35: Ajuste de las imágenes de ejemplo utilizando segmentos cuadráticos: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

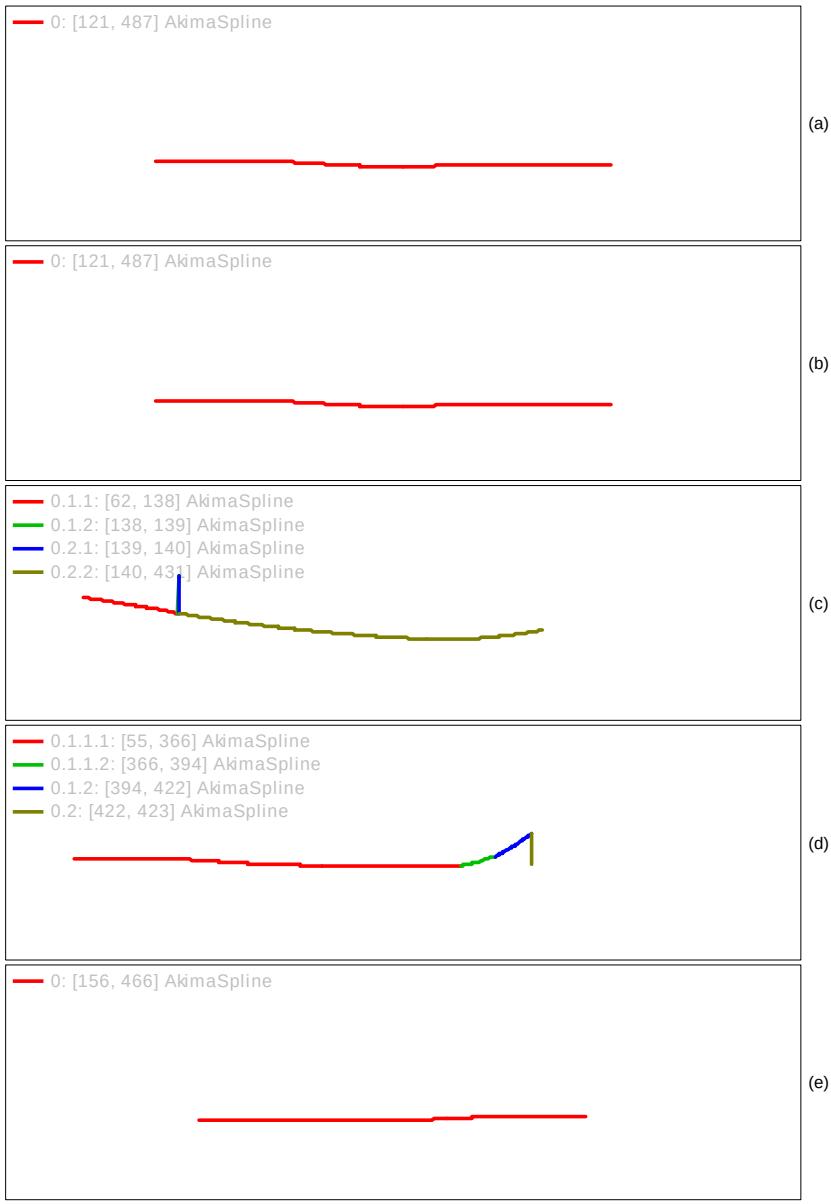


Figura 6.36: Ajuste de las imágenes de ejemplo utilizando *splines akima*: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

se llegaría a un error nulo. Sin embargo, los segmentos basados en *splines akima* se adaptan mejor a la forma de la proyección de la línea láser sobre la banda que los otros tipos de segmentos. Además, el uso de segmentos basados en *splines akima* supone un coste computacional similar respecto a los otros tipos de segmentos. Por todo ello, se propone el uso de segmentos basados en *splines akima* para ajustar la línea láser sobre la banda.

Unión de segmentos. El ajuste de la línea láser sobre la banda utilizando segmentos es capaz de indicar la posición de la línea láser para toda la región de búsqueda a pesar de que haya pequeños agujeros causados por una proyección débil del láser. Además, en caso de que aparezca ruido el procedimiento de ajuste llega a un resultado donde se utilizan pequeños segmentos para ajustar la región con ruido. Para eliminar el ruido del ajuste por segmentos se propone realizar un proceso de unión de segmentos posterior a la división. El procedimiento de unión se aplicará después de que la división haya terminado y consistirá en la eliminación de aquellos segmentos que hayan sido creados a causa del ruido. Los huecos dejados por los segmentos eliminados serán rellenados utilizando información de los segmentos adyacentes.

Para rellenar los huecos dejados por los segmentos eliminados se pueden utilizar diversas estrategias. Las más sencilla consistiría en hacer crecer los segmentos adyacentes hasta conseguir rellenar el hueco. Ese crecimiento se puede realizar equitativamente entre los segmentos adyacentes (la mitad del hueco para cada uno) o en función de su tamaño (por ejemplo, el segmento mayor crece y rellena todo el hueco). Sin embargo, en ocasiones estas estrategias no producen buenos resultados debido a que el crecimiento de los segmentos adyacentes puede perjudicar al suavizado de la línea láser. Para evitar este problema se propone otra solución: los segmentos eliminados serán reemplazados por otros segmentos. Los nuevos segmentos serán ajustados utilizando los puntos que, dentro del segmento eliminado, son compatibles (el error de ajuste es mejor que ϵ) con alguno de los segmentos adyacentes. En el peor caso, sólo los puntos de los extremos serán compatibles, dando lugar a una línea recta y por tanto manteniendo una continuidad en la línea láser. Cuantos más puntos sean compatibles dentro del segmento eliminado más suavizado será el segmento de ajuste.

El criterio para determinar qué segmentos deben ser eliminados y unidos a los adyacentes se puede establecer utilizando distintas variables. El criterio más simple consiste en unir aquellos segmentos menores de un tamaño umbral, aunque se podrían adoptar otros más sofisticados en función de los coeficientes de las funciones que ajustan cada segmento. El criterio de unión basado en el tamaño se fundamenta en el hecho de que el ruido siempre es ajustado con segmentos pequeños.

La figura 6.38 muestra el resultado de la unión de segmentos aplicada al

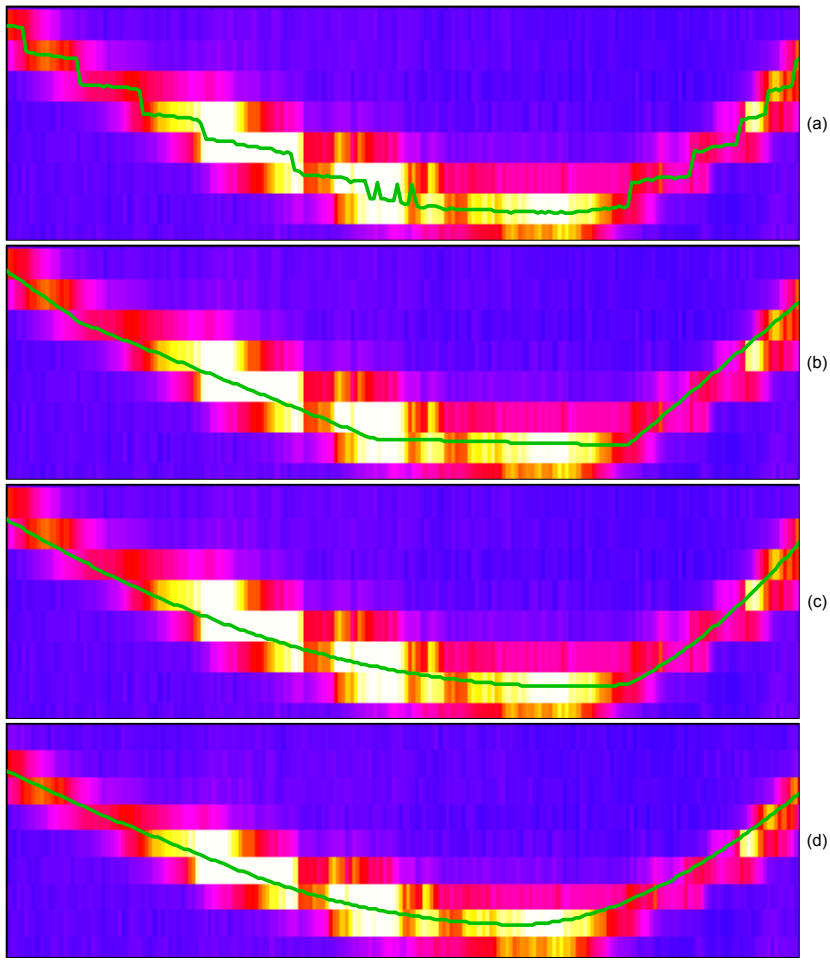


Figura 6.37: Comparación entre los métodos de ajuste de la línea láser (a) Detección de la línea láser utilizando el método propuesto basado en el centro de masas. (b) Ajuste mediante segmentos lineales. (c) Ajuste mediante segmentos cuadráticos. (d) Ajuste mediante segmentos basados en *splines akima*.

resultado de la división mostrado en la figura 6.35 utilizando un criterio de unión basado en un tamaño mínimo de segmento de 10 píxeles. El resultado de la unión contiene la información sobre la posición del láser y, por tanto, se puede comparar con los resultados obtenidos al aplicar el método propuesto en [Haug y Pritschow, 1998] mostrados en la figura 6.6. Las ventajas del método propuesto en esta tesis son claras. En primer lugar, se eliminan los reflejos que aparecen como espurios en la línea láser, por tanto se elimina uno de los problemas a los que se enfrenta el procedimiento de extracción del láser en un entorno industrial. Además, en caso de que el láser no se detecte debido a la degradación originada por su uso el procedimiento de ajuste de segmentos es capaz de determinar la posición de la línea en esa región, ya que se tiene en cuenta la continuidad de la línea láser. Otra ventaja del procedimiento propuesto en esta tesis es que, en caso de que el láser no se detecte en el borde de la región de búsqueda, el segmento más cercano a ese borde se extrapola hasta hacerlo coincidir con el borde de la región de búsqueda, solucionando un problema que difícilmente podría ser solucionado con otra técnica.

Para evaluar la robustez del procedimiento de unión de segmentos se ha aplicado sobre una imagen con un ruido artificial añadido. Los resultados se muestran en La figura 6.39.La figura 6.39(a) muestra los picos detectados dentro de la región de búsqueda, la figura 6.39(b) muestra el resultado del proceso de división y la figura 6.39(c) muestra el resultado del proceso de unión. La imagen presenta un caso extremo, que difícilmente puede aparecer en la realidad, sin embargo, permite determinar el comportamiento del procedimiento propuesto. Los resultados permiten concluir que el resultado producido por la división y unión de segmentos es correcto incluso antes situaciones muy desfavorables.

La imagen con ruido permite además demostrar que el procedimiento de unión propuesto, basado en la creación de nuevo segmento, produce una línea láser continua y suavizada. La figura 6.40 muestra un detalle de los resultados producidos por este procedimiento para la unión, así como los resultados producidos utilizando una unión con crecimiento de segmentos adyacentes. Los resultados son una clara evidencia de que el procedimiento propuesto es claramente superior.

Parámetros. Los parámetros necesarios para realizar el ajuste de la línea láser sobre la banda mediante la división y unión de segmentos son los siguientes:

1. Umbral de error en el ajuste. Este parámetro se utiliza para el criterio de parada de la división de los segmentos.

2. Umbral del tamaño mínimo de los segmentos. Este parámetro se utiliza para el criterio que determina cuándo se deben unir segmentos consecutivos.

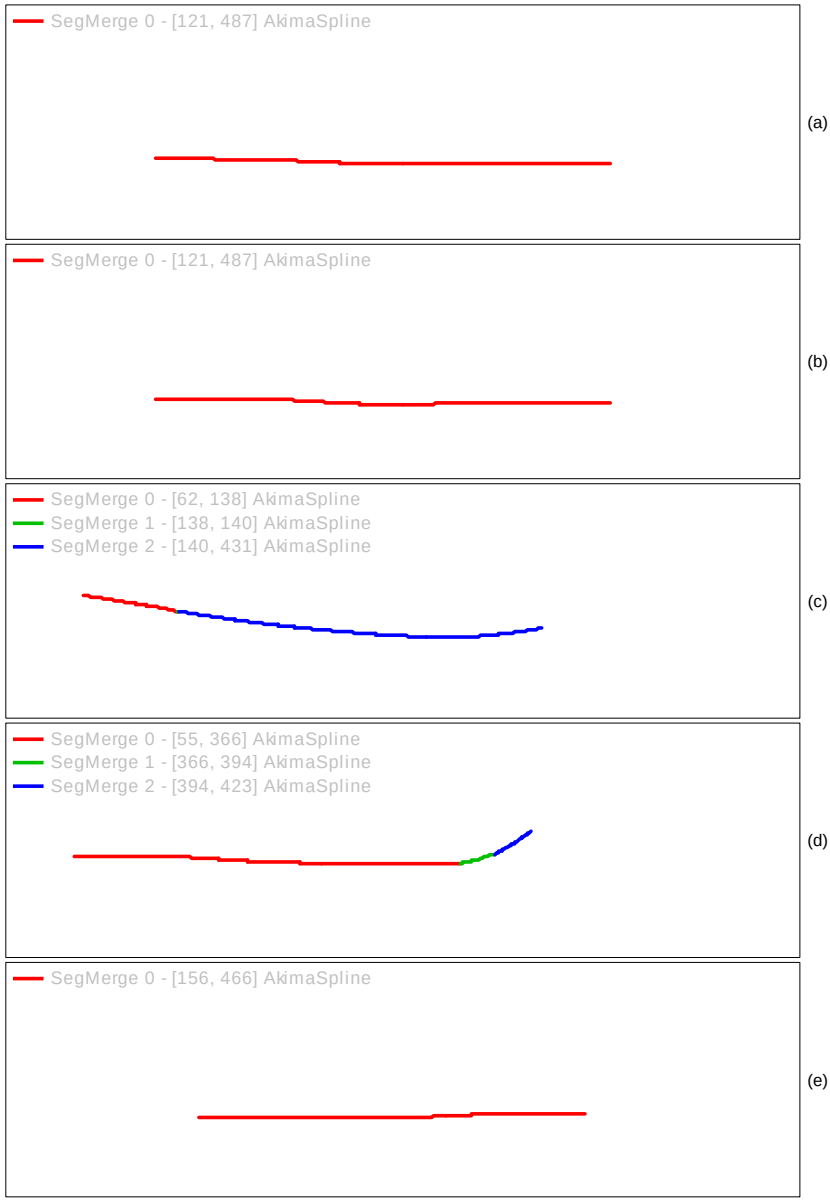


Figura 6.38: Ajuste mediante *splines akima* tras el proceso de unión: (a) Iluminación baja. (b) Iluminación alta. (c) Reflejos superficiales. (d) Ruido debido a una banda con óxido. (e) Láser débil.

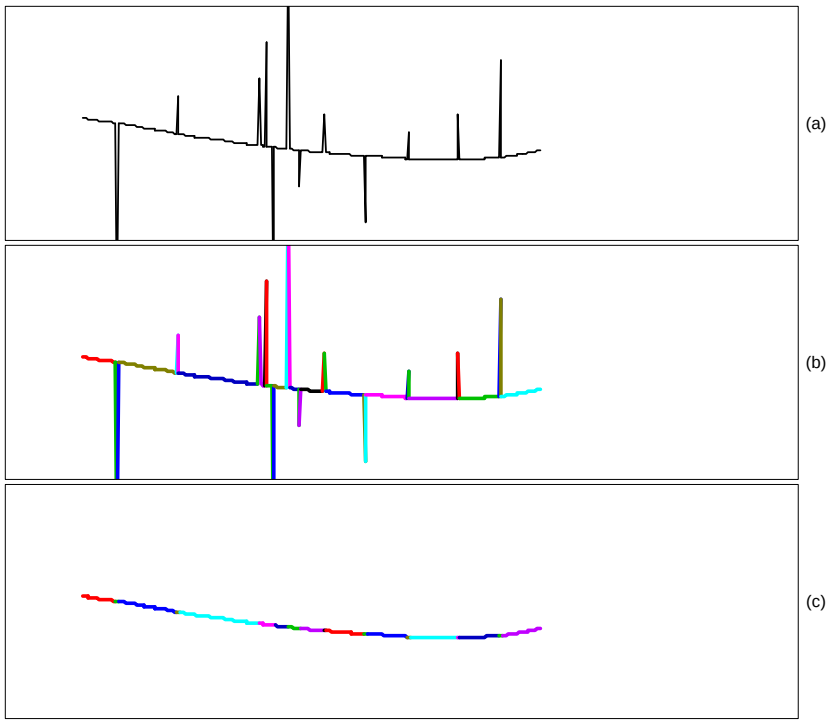


Figura 6.39: Ajuste de una línea láser con ruido artificial extremo: (a) Láser detectado dentro de la región de búsqueda. (b) Resultado del proceso de división. (c) Resultado del proceso de unión.

6.4. Pruebas

El procedimiento propuesto para la extracción de la línea láser se divide en dos etapas claramente diferenciadas. En primer lugar se realiza una búsqueda local de la línea láser sobre el fondo con el objetivo de determinar la región de búsqueda de la línea láser sobre la banda. A continuación, se aplica un proceso de detección del láser sobre la región de búsqueda seguido de un ajuste de segmentos basado en la división y en la unión. Este procedimiento se ha aplicado a una serie de vídeos, generados por el componente de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real del sistema de medición de planitud durante el procesamiento de varias bobinas en la línea de producción industrial, para evaluar su comportamiento, tanto funcional como temporal.

Las pruebas se han realizado sobre el mismo equipo PC en el que se han

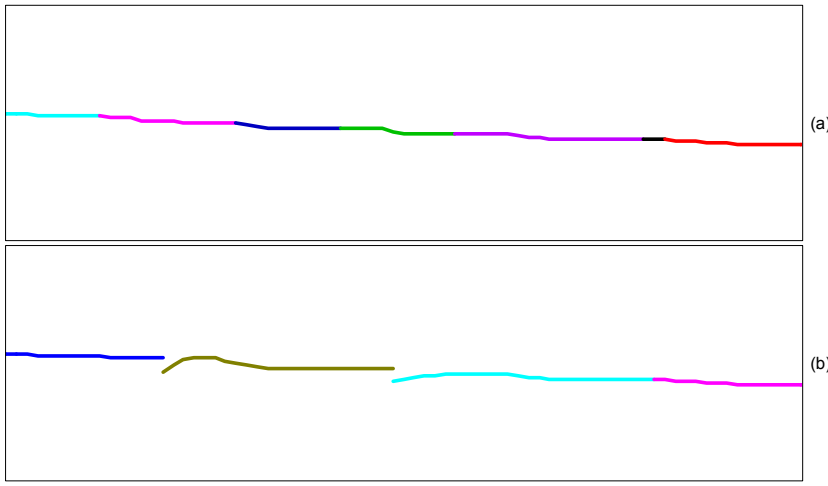


Figura 6.40: Comparación de dos estrategias para el proceso de unión: (a) Unión con creación de nuevo segmento. (b) Unión con crecimiento equitativo de segmentos adyacentes.

desarrollado todas las pruebas a lo largo de esta tesis. Las características de esta plataforma de experimentación se muestran en la tabla 5.1.

En la tabla 6.2 se muestran los valores que se han utilizado para los parámetros del procedimiento de extracción de la línea láser durante las pruebas.

La figura 6.41 muestra un mapa de alturas calculado usando el procedimiento propuesto de extracción de la línea láser. Este mapa se ha obtenido tras procesar las primeras 4000 imágenes de un vídeo de una banda. La coordenada (x, y) de un píxel en el mapa indica el número de imagen (x) y el número de columna de la imagen donde se detectó la línea láser (y). El color del píxel indica la altura según la leyenda que aparece en la parte derecha de la figura. El procedimiento propuesto produce buenos resultados evitando la posible aparición de ruido en la extracción del láser y adaptándose a las condiciones en las que son adquiridas las imágenes.

La figura 6.42 muestra el tiempo que ha necesitado el procedimiento de extracción del láser para procesar cada imagen del vídeo que ha dado lugar al mapa de alturas mostrado en la figura 6.41. El tiempo es bastante estable con una media de 5,77 milisegundos y una desviación estándar de 0,10 milisegundos. Con objeto de analizar el coste computacional de cada una de las partes del proceso de extracción se ha realizado una medición particular de cada una de ellas. El resultado de este análisis ha determinado que una de las partes más costosas computacionalmente es el proceso de detección de la línea láser por columnas.

Parámetro	Valor
Área de influencia del láser	3 píxeles
Factor de cobertura para la creación del intervalo sobre el fondo	2
Diferencia de iluminación necesaria para considerar que existe láser	10
Altura del lado paralelo corto del trapecio de la ventana de búsqueda	20 píxeles
Altura del lado paralelo largo del trapecio de la ventana de búsqueda	30 píxeles
Anchura del trapecio de la ventana de búsqueda	10 píxeles
Coeficiente de segundo grado de la curva que ajusta el fondo (A)	0,00014902
Coeficiente de primer grado de la curva que ajusta el fondo (B)	$-0{,}099034$
Coeficiente independiente de la curva que ajusta el fondo (C)	120,21
Diferencia máxima para la validación de la intensidad luminosa del fondo	10
Posición en el eje de ordenadas del foco láser	1759,75 milímetros
Posición en el eje de abscisas del foco láser	6,22 milímetros
Umbral de error en la división de segmentos (ϵ)	1 píxel
Umbral del tamaño mínimo en la unión de segmentos	10 píxeles

Tabla 6.2: Parámetros utilizados en las pruebas.

En concreto la tarea en la que se realiza una caracterización de la intensidad luminosa del fondo mediante un intervalo. Para realizar esta caracterización es necesario determinar la media y la desviación típica de la intensidad luminosa de todos los píxeles que no pertenezcan al área de influencia del láser. Para las imágenes sobre las que se ha aplicado el procedimiento de extracción, eso supone el cálculo de la media y la desviación de unos 130 puntos repetido para las 400 columnas que existen de forma aproximada dentro de la región de búsqueda. Un estudio sobre la influencia del número de puntos con el que se caracteriza el fondo ha demostrado que el proceso de extracción es igual de eficiente si en lugar de utilizar todos los píxeles que no pertenecen al área de influencia del láser se utiliza sólo un subconjunto mucho menor.

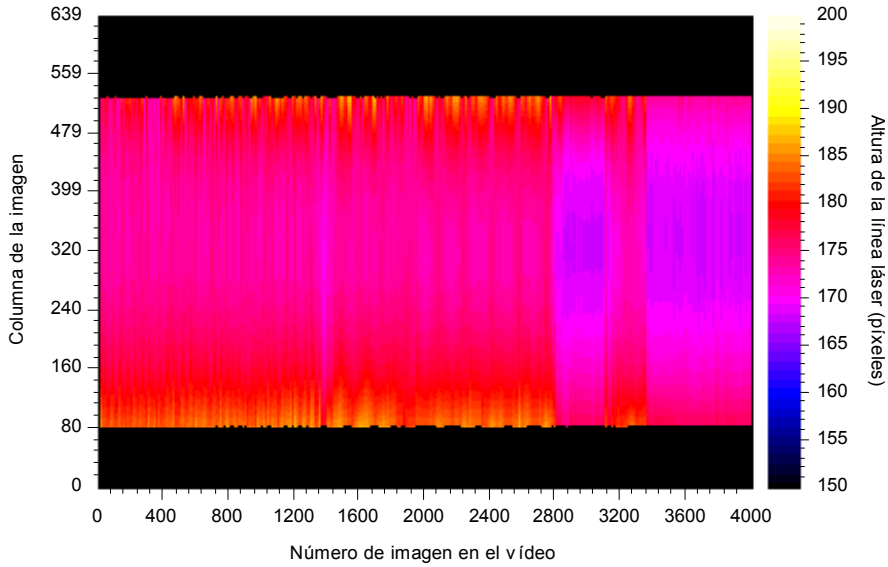


Figura 6.41: Mapa de alturas calculado para un vídeo de ejemplo.

Cuando se reduce el número de píxeles con los que se caracteriza la intensidad luminosa del fondo el tiempo de extracción de la línea láser se reduce drásticamente. La figura 6.43 muestra el tiempo que ha necesitado el procedimiento de extracción del láser en procesar cada imagen del vídeo que ha dado lugar al mapa de alturas mostrado en la figura 6.41, en este caso, utilizando únicamente 6 píxeles para caracterizar la intensidad luminosa del fondo.

Con esta modificación se consigue una reducción en el tiempo medio de extracción del 60 %, de 5,77 a 2,32 milisegundos, con una desviación estándar de 0,03 milisegundos y un tiempo máximo de 2,67 milisegundos. Dado que esta modificación no afecta a los resultados producidos por el algoritmo de extracción, finalmente se propone caracterizar la intensidad luminosa del fondo utilizando dos ventanas del tamaño del área de influencia del láser, una a cada lado del láser.

La figura 6.44 muestra un mapa de alturas calculado sobre las imágenes adquiridas por el subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud en un segundo vídeo. En este caso, las alturas cambian a lo largo de vídeo debido a los movimientos horizontales de la banda y, por tanto, de la línea láser. Los resultados producidos siguen siguiendo correctos, evitando la aparición de ruido en la extracción del láser.

La figura 6.45 muestra el tiempo que ha necesitado el procedimiento de ex-

tracción del láser en producir este mapa. Como se puede apreciar se repiten los tiempos observados en la figura 6.43.

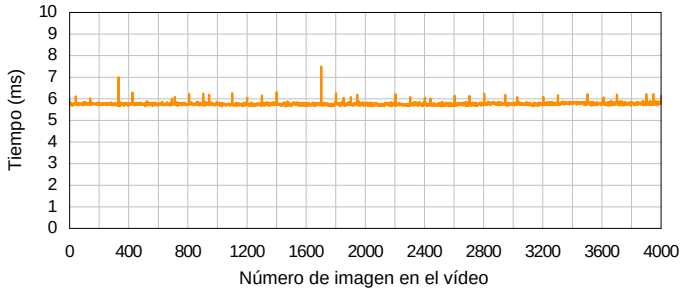


Figura 6.42: Tiempo necesario para extraer la línea láser para las imágenes de un vídeo de ejemplo.

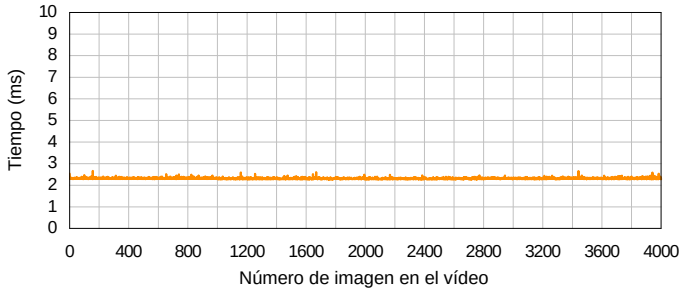


Figura 6.43: Tiempo necesario para extraer la línea láser para las imágenes de un vídeo reduciendo el número de píxeles usado para caracterizar la intensidad luminosa del fondo.

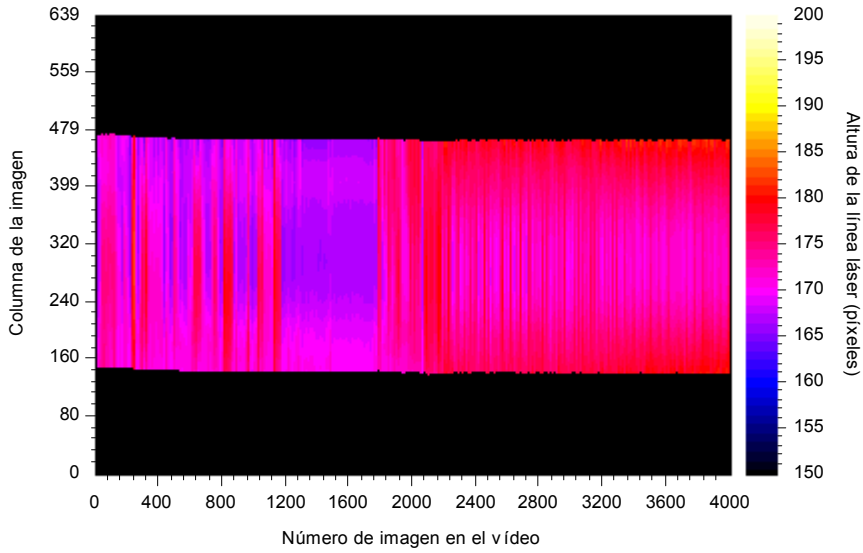


Figura 6.44: Mapa de alturas calculado para un segundo vídeo de ejemplo.

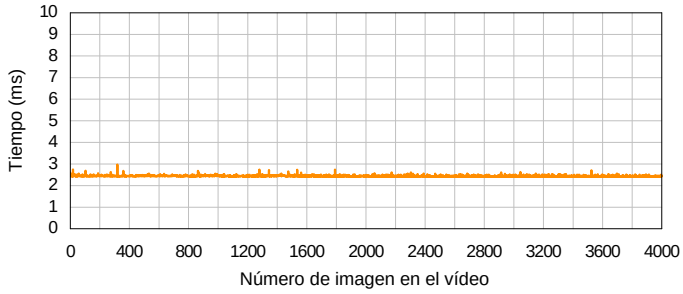


Figura 6.45: Tiempo necesario para extraer la línea láser para las imágenes de un segundo vídeo de ejemplo.

Capítulo 7

Validación de la medición

En este capítulo se presenta el diseño de un conjunto de experimentos orientados a validar el proceso de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados. Este proceso de validación se realiza a partir de la medición de la altura y de la longitud de un conjunto de objetos de los cuales se conocen sus dimensiones. Además, se muestran algunos ejemplos de la información final que el sistema de medición de planitud proporciona a los operadores de la instalación obtenida a partir del proceso de reconstrucción de los productos laminados.

7.1. El sistema de reconstrucción de la forma 3D de productos laminados en la instalación industrial

La técnica de visión por computador para la reconstrucción de la forma 3D de productos laminados descrita en esta tesis ha sido implementada en un sistema industrial de inspección de calidad. El objetivo de este sistema es la reconstrucción de la forma tridimensional de bandas de acero, a partir de la cual se puede calcular su planitud.

La implementación de este sistema se realiza según el diseño descrito en el capítulo 4. Como se indica en la sección 4.1, este sistema se ha instalado en una línea de producción industrial en una planta siderúrgica.

La figura 7.1 muestra una fotografía del sistema tomada en la línea de producción en la que ha sido instalado.[1] Sobre esta fotografía se han identificado los componentes principales que definen la geometría del subsistema de visión por computador, es decir, los elementos que forman el sistema de triangulación óptico por láser (ver sección 4.3).

Como se ha descrito en la sección 2.4, y se puede observar en las ecuaciones (7.1) y (7.2), la información de planitud que proporciona el sistema depende

[1] La fotografía ha sido tomada desde el lado contrario de la línea de producción al utilizado como referencia en el resto de figuras de la documentación, como por ejemplo en la figura 4.13.

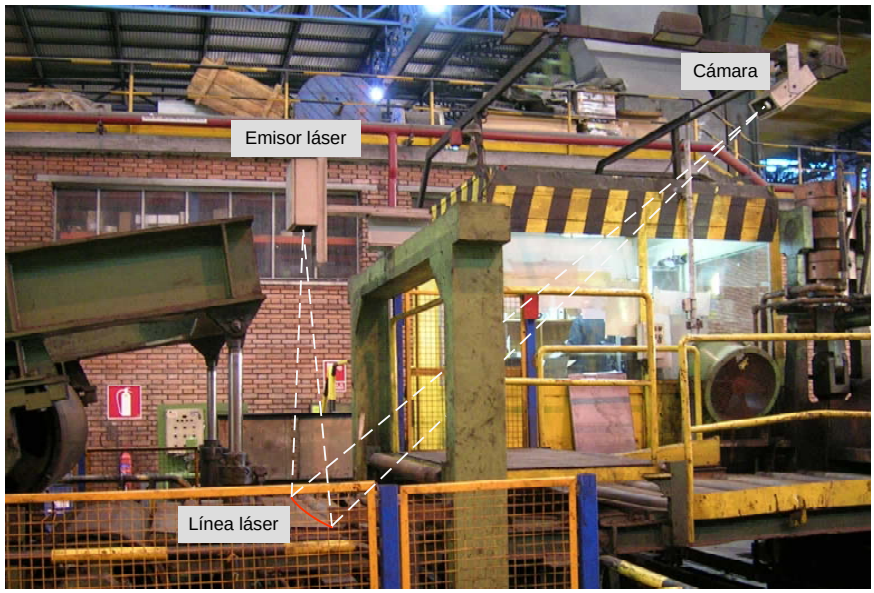


Figura 7.1: Detalle de los componentes del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud en la instalación industrial.

de la exactitud y la precisión de la medición de la diferencia de alturas entre dos muestras consecutivas de cada una de las fibras de la superficie de la banda de acero así como de la exactitud y la precisión con la que se mide su velocidad de avance.

$$L = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(h_i - h_{i-1})^2 + v_i^2 (t_i - t_{i-1})^2} \tag{7.1}$$

$$I_{I-Unit} = \frac{\Delta_L}{L_{referencia}} \times 10^5 = \frac{L_{fibra} - L_{referencia}}{L_{referencia}} \times 10^5 \tag{7.2}$$

Por tanto, para validar el proceso de reconstrucción 3D realizado por el sistema se debe validar corrección de la medición de cada una de estas variables.

7.2. Validación de la medición de altura

Con el objetivo de obtener la exactitud con la que el sistema mide la altura de la proyección de la línea láser sobre la superficie de una banda de acero se ha diseñado un conjunto de experimentos. De cada uno de estos experimentos se han realizado 500 réplicas.

Para la realización de los experimentos de validación de la medición de alturas se ha utilizado un conjunto de tres probetas con alturas conocidas, construidas a partir de un bloque de aluminio cortado en forma de prismas rectangulares. Cada una de estas probetas está cortada con un error máximo de 0,2 milímetros. En la tabla 7.1 se muestran las dimensiones de las tres probetas utilizadas en los experimentos, expresadas en milímetros.

Probeta	Alto	Ancho	Largo
1	59, 92	14, 92	144, 01
2	29, 72	19, 62	144, 00
3	80, 02	29, 62	143, 97

Tabla 7.1: Dimensiones de las probetas de validación de alturas.

7.2.1. Incertidumbre de las probetas de validación

A partir del error máximo proporcionado por el fabricante de las probetas se puede calcular la incertidumbre estándar de dichas probetas. Dado que no se dispone de un conjunto elevado de medidas de las probetas, el único modo de estimar su incertidumbre es a través de un proceso de evaluación de la incertidumbre de tipo B [Bell, 2001]. Suponiendo que la distribución del error de fabricación de las probetas sigue una distribución normal, su incertidumbre, u, se puede calcular según la ecuación (7.3), donde a es el valor del error máximo.

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \tag{7.3}$$

En el caso de que se utilice más de una probeta de forma simultánea en un experimento se debe tener en cuenta la combinación de la incertidumbre de cada una de ellas. En este caso, la incertidumbre combinada, u_c, de un conjunto de n probetas se calcula según la ecuación (7.4), donde u_i es la incertidumbre estándar de la probeta i-ésima.

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_i^2} \tag{7.4}$$

7.2.2. Procedimiento de validación de la medición de alturas

Para validar la medición de alturas realizada por el sistema con respecto a una línea de referencia fija se ha diseñado una batería de 21 experimentos. Estos experimentos se dividen en tres grupos, orientados a la medición de alturas en la parte izquierda, en el centro y en la parte derecha del área de interés de la escena.

En cada uno de estos tres grupos se mide la altura de siete puntos diferentes. La distribución de estos puntos trata de cubrir todo el rango vertical del área de interés de la escena (la distribución no es equidistante debido a las dimensiones de las probetas de validación de las que se dispone).

En cada uno de estos grupos, el proceso realizado tiene la siguiente secuencia de pasos:

1. En cada una de las tres zonas a medir se coloca una plancha de acero sobre el camino de rodillos de la línea de producción. Una vez colocada esta plancha se genera una secuencia de vídeo con 500 imágenes capturadas por la cámara del área de interés de la escena. Esta secuencia se genera utilizando el mecanismo de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real del sistema (ver capítulo 5).

   En la figura 7.2 se muestra una imagen de una de las secuencias de vídeo generadas. Como se puede observar, corresponde con la colocación de la plancha de acero en el centro del área de interés de la escena.

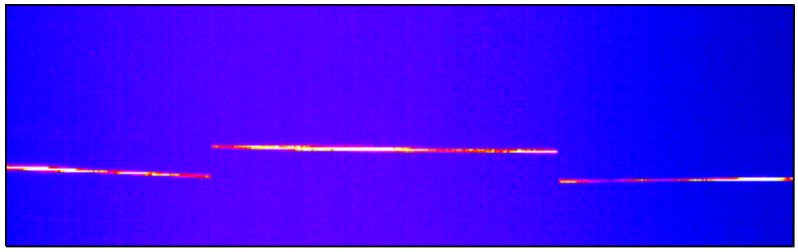


Figura 7.2: Proyección de la línea láser sobre la plancha de acero que indica la línea de referencia para la validación de la medición de alturas.

2. De cada una de las 500 imágenes de la secuencia de vídeo se calculan 30 medidas de la altura de la proyección de la línea láser sobre la plancha de acero, utilizando el método propuesto en el capítulo 6 para extraer la línea láser.

   Estas medidas se obtienen de un intervalo de 30 píxeles centrado en la posición marcada por el eje vertical para la medida de alturas.

3. Para cada imagen de la secuencia de vídeo se calcula el valor medio de las 30 medidas de altura obtenidas en el paso anterior, obteniendo 500 valores de altura de la plancha de acero. Estos valores representan el conjunto de medidas de la línea de referencia para el conjunto de pruebas de validación de alturas absolutas.

4. Una vez que se dispone de las 500 muestras de altura de la línea de referencia se coloca una probeta sobre la plancha de acero de tal forma que la línea láser se proyecte sobre ella. A continuación, se genera una secuencia de vídeo con 500 imágenes capturadas por la cámara del sistema del área de interés de la escena.

   En la figura 7.3 se muestra una imagen de una de las secuencias de vídeo generadas para una medición de altura concreta.

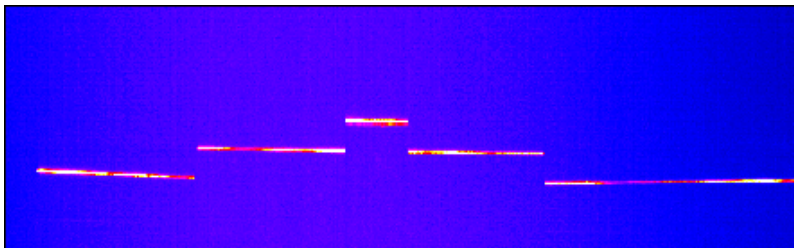


Figura 7.3: Proyección de la línea láser sobre la plancha de acero y sobre una probeta de validación de la medición de alturas.

5. Se repiten los pasos 2 y 3 con la secuencia de vídeo obtenida con la probeta de calibración colocada sobre la plancha de acero, utilizando como intervalo de medida el mismo que se ha utilizado para la medición de la altura de referencia. De esta forma se obtienen 500 medidas de la altura de la probeta.

   En la figura 7.4 se muestra el mapa de alturas generado por el sistema para la secuencia de imágenes del vídeo. En este mapa de alturas se pueden apreciar tres niveles de alturas claramente diferenciados: el nivel más bajo se corresponde con la proyección de la línea láser sobre el camino de rodillos de la instalación (rangos de píxeles 0 a 157 y 438 a 639). El nivel intermedio se corresponde con la proyección de la línea láser sobre la plancha de acero, es decir, la línea de referencia para las medidas (rangos de píxeles 158 a 276 y 327 a 437). Finalmente, el nivel más alto se corresponde con la proyección de la línea láser sobre la probeta de validación (rango central, píxeles 277 a 326).

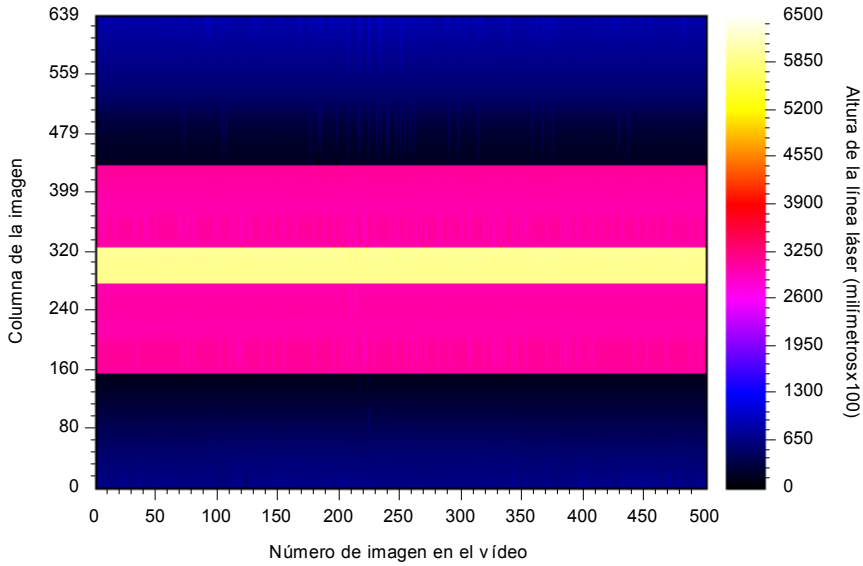


Figura 7.4: Mapa de alturas generado por el sistema con una probeta de calibración colocada en el plano de proyección de la línea láser.

En la figura 7.5 se muestran las medidas de la altura de la probeta obtenidas en este paso para el mapa de alturas mostrado en la figura 7.4.

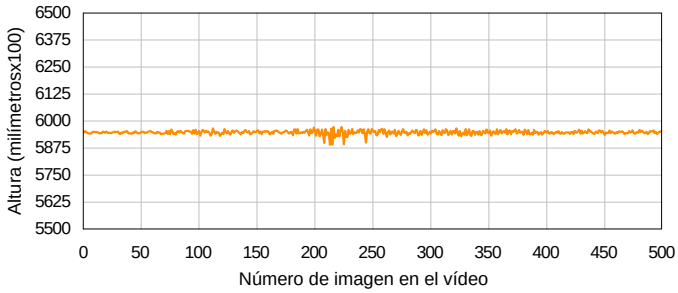


Figura 7.5: Alturas medidas por el sistema de una probeta de calibración.

6. En este punto se dispone de 500 medidas de altura de la línea de referencia y de 500 medidas de altura de la probeta de validación. La acción llevada a cabo en este paso es emparejar las muestras de forma aleatoria, una

muestra de altura de la probeta con una muestra de altura de la línea de referencia. De esta forma se simula el funcionamiento del sistema de reconstrucción tridimensional en el que, para calcular la longitud de una fibra, debe medir la diferencia de alturas a la que se encuentra dicha fibra entre dos imágenes consecutivas que procese el sistema. Esta operación de emparejamiento simula la posición de una fibra en la imagen n y en la imagen $n+1$ que utiliza el sistema para el cálculo de la longitud de dicha fibra.

7. Para cada pareja de muestras obtenidas en el paso anterior se calcula su diferencia. A continuación se calcula el valor medio de todas las diferencias obtenidas. Este valor se interpreta como la medida real obtenida por el sistema para el valor de una de las siete alturas que se pretenden medir en el eje vertical.

Una vez obtenida esta medida se repiten los pasos 4, 5, 6 y 7 para cada una de las alturas del conjunto de experimentos.

En la figura 7.6 se muestra una fotografía en un instante de la realización de uno de los experimentos. Se puede observar la plancha de acero utilizada como línea de referencia colocada en un extremo del área de interés de la escena, así como dos probetas de validación colocadas de tal forma que la línea láser se proyecte sobre la superficie de una de ellas.

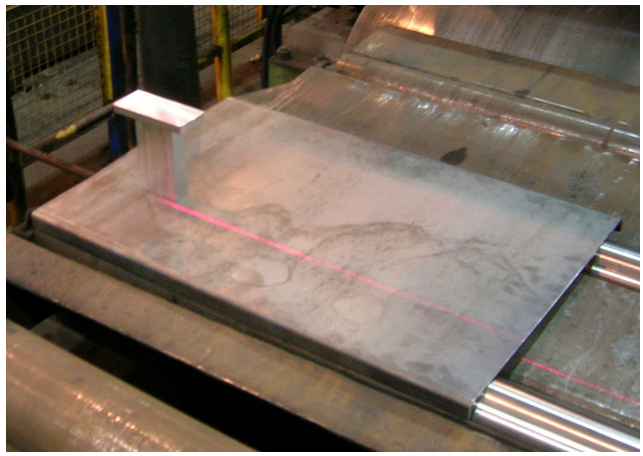


Figura 7.6: Ejemplo de experimento de validación de alturas.

Los resultados de la batería de 21 experimentos realizados para validar la medición de alturas realizada por el sistema se pueden observar en la tabla 7.2.

Posición	Altura real	$u_{probeta}$	Altura medida	u_{medida}	Error
Izquierda	14,92	0,11	15,10	$2{,}82 \times 10^{-3}$	0,18
Izquierda	29,72	0,11	30,46	$5{,}22 \times 10^{-3}$	0,74
Izquierda	44,54	0,16	45,08	$4{,}11 \times 10^{-3}$	0,54
Izquierda	59,92	0,11	59,91	$4{,}28 \times 10^{-3}$	−0,11
Izquierda	74,16	0,20	74,14	$4{,}51 \times 10^{-3}$	−0,02
Izquierda	109,74	0,16	109,75	$6{,}31 \times 10^{-3}$	0,01
Izquierda	124,66	0,20	124,16	$4{,}15 \times 10^{-3}$	−0,50
Centro	14,92	0,11	14,69	$2{,}86 \times 10^{-3}$	−0,23
Centro	29,72	0,11	29,01	$4{,}98 \times 10^{-3}$	−0,71
Centro	44,54	0,16	43,52	$7{,}20 \times 10^{-3}$	−1,01
Centro	59,92	0,11	58,96	$6{,}41 \times 10^{-3}$	−0,96
Centro	74,16	0,20	73,02	$10{,}55 \times 10^{-3}$	−1,14
Centro	109,74	0,23	108,68	$7{,}05 \times 10^{-3}$	−1,06
Centro	124,66	0,20	123,21	$5{,}30 \times 10^{-3}$	−1,45
Derecha	14,92	0,11	15,21	$15{,}61 \times 10^{-3}$	0,29
Derecha	29,72	0,11	29,78	$16{,}75 \times 10^{-3}$	0,06
Derecha	44,54	0,16	44,42	$16{,}69 \times 10^{-3}$	−0,12
Derecha	59,92	0,11	59,86	$22{,}03 \times 10^{-3}$	−0,06
Derecha	74,16	0,20	73,68	$24{,}50 \times 10^{-3}$	−0,48
Derecha	109,74	0,16	109,24	$17{,}02 \times 10^{-3}$	−0,50
Derecha	124,66	0,20	123,56	$16{,}73 \times 10^{-3}$	−1,10

Tabla 7.2: Resultados del conjunto de experimentos para la validación de la medición de alturas, expresados en milímetros.

En la primera columna de esta tabla se muestra la posición dentro del área de interés de la escena en la que se ha realizado el experimento. En la segunda columna se muestra la altura real de la probeta de validación utilizada en cada experimento, o de la combinación de varias probetas. En la tercera columna se muestra la incertidumbre de la probeta o probetas de calibración utilizadas, $u_{probeta}$. Esta incertidumbre se calcula a partir de las ecuaciones (7.3) y (7.4). En la cuarta columna se muestra el valor de altura obtenido en el paso 7 de cada experimento. En la quinta columna se muestra el valor de la incertidumbre asociada a cada medida de altura. Esta incertidumbre, u_{medida}, se calcula utilizando un proceso de evaluación de la incertidumbre de tipo A [Bell, 2001], a partir de la ecuación (7.5), donde s es la desviación típica muestral y n el núme-

ro de réplicas del experimento, en este caso 500. Finalmente, la sexta columna muestra el error cometido en la medición. Este error representa la diferencia entre la medida obtenida por el sistema y la medida real de la probeta o conjunto de probetas.

$$u_{medida} = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{7.5}$$

En la figura 7.7 se muestra gráficamente el resultado de los 21 experimentos realizados, expresados en milímetros$\times$100. La figura 7.7(a) muestra el área sobre la que se han realizado los diferentes experimentos de validación de la medición de alturas. A la izquierda de la imagen se muestran las alturas reales de cada experimento. Dentro del área sombreada, para cada zona de medición (izquierda, centro y derecha) se muestra un conjunto de siete valores que corresponden con las medidas proporcionadas por el sistema. Además, estas medidas están marcadas con una cruz. Los rectángulos en las intersecciones de las líneas auxiliares horizontales y verticales representan la incertidumbre estándar de la probeta o probetas de calibración utilizadas en cada experimento. Tanto el intervalo de incertidumbre como la distancia a la medida obtenida por el sistema están en la misma escala. Entre las diferentes medidas objetivo, la distancia no está representada a escala. La figura 7.7(b) muestra la localización del área sobre la que se han realizado los experimentos en el área de interés de la escena.

De las 10500 réplicas realizadas se obtiene un error medio de $-0{,}32$ milímetros, que se puede utilizar como un estimador de la exactitud con la que mide el sistema. Esta exactitud se considera elevada en comparación con la relación píxel por milímetro que se obtiene con la geometría del sistema de visión utilizada. El valor de exactitud es del orden de una a tres veces la incertidumbre de las probetas de validación utilizadas.

Además, el intervalo que contiene al 90 % de los errores que se han cometido en las 10500 mediciones es $[-1{,}14, 0{,}75]$, intervalo que se puede utilizar como un estimador de la precisión del sistema. Este rango, expresado en dimensiones de la imagen, supone que la precisión del sistema es de $\pm 0{,}34$ píxeles. Este valor de precisión, teniendo en cuenta las características del láser utilizado y del rango vertical de píxeles de la cámara en el que incide el área de interés de la escena, se considera satisfactorio.

7.3. Validación de la medición de velocidad

Con el objetivo de obtener la exactitud con la que el sistema mide la velocidad de desplazamiento de una banda de acero por la línea de producción se ha diseñado un conjunto de experimentos. Este conjunto de experimentos trata de validar la medición de la velocidad de forma indirecta a partir de la medición de

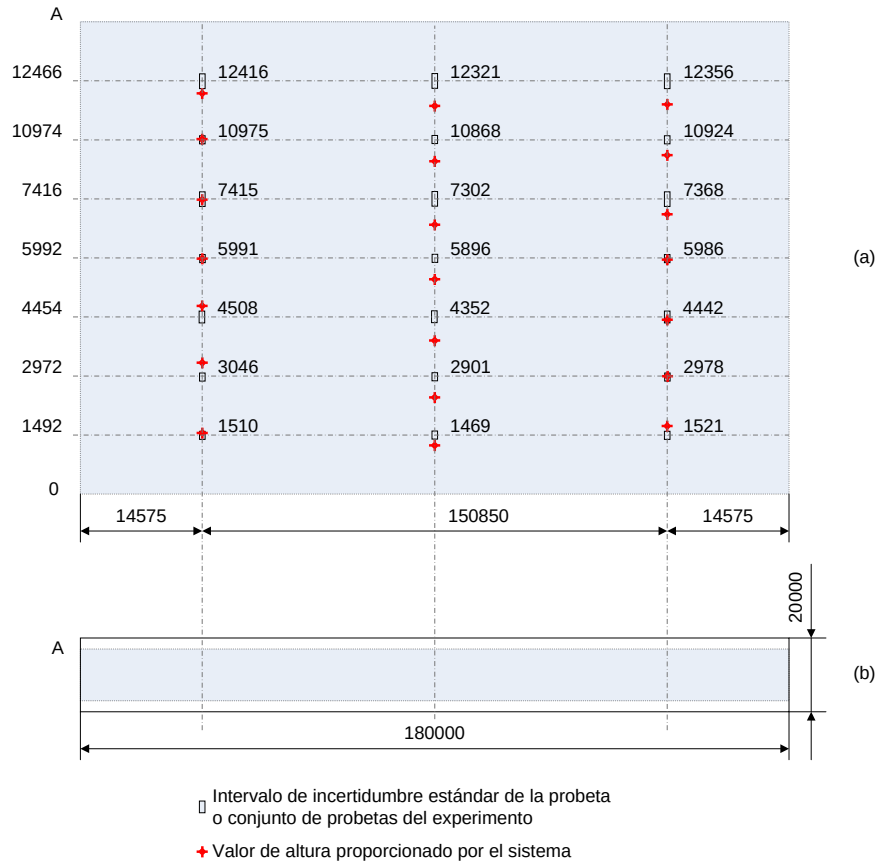


Figura 7.7: Resultados de la medición de alturas (unidades en milímetros×100): (a) Intervalo de incertidumbre estándar de cada probeta y medidas proporcionadas por el sistema. (b) Área de interés de la escena cubierto por las pruebas de validación de la medición de alturas.

la longitud de varias bobinas de acero que se procesan en la línea y de las que se conoce su longitud real.

Una primera validación de la medición de la velocidad de desplazamiento de las bandas de acero por la línea se realiza en la segunda fase del procedimiento de calibración del sensor de velocidad (ver apéndice C). En esta fase del procedimiento de calibración se ha obtenido, a través del sistema de medición de planitud, la longitud de un conjunto de bobinas de prueba que han sido proce-

sadas en la instalación. Esta longitud se ha comparado con la longitud real de las bobinas y, aplicando la técnica de optimización de mínimos cuadrados, se ha definido una constante que permite corregir la desviación entre el valor real y el valor medido de la longitud de dichas bobinas.

El resto de experimentos realizados en esta etapa de validación sigue el mismo enfoque. Se ha medido la longitud de 45 bobinas procesadas en la instalación y se ha comparado con la longitud real de las mismas. Dado que el reloj utilizado por el sistema para obtener el instante de captura de cada imagen tiene una resolución de 20 nanosegundos,[2] la variación entre la longitud medida y la longitud real de cada bobina se explica por el valor de velocidad muestreado por el sistema.

A partir de este conjunto de experimentos se determina que la precisión con la que el sistema obtiene la velocidad de desplazamiento de las bandas de acero por la línea de producción es de ± 3 metros por minuto.

7.4. Información proporcionada al usuario final

A partir de la medición de alturas de varios puntos significativos de la línea láser proyectada sobre la superficie de un producto laminado y de su velocidad de desplazamiento por la línea de producción, el sistema tiene toda la información necesaria para calcular la planitud del producto.

Como se ha indicado en la sección 4.4.3.1, el sistema debe proporcionar, para cada banda que se procesa en la instalación, un mapa bidimensional que represente las alturas relativas de cada fibra de su superficie (mapa que constituye la reconstrucción tridimensional de la superficie del producto laminado) y un mapa bidimensional que represente la planitud de la banda, en este caso utilizando la métrica *I-Units*.

En las figuras 6.41 y 6.44 se han mostrado dos ejemplos de mapas de alturas generados por el sistema.

A continuación se muestran dos ejemplos de mapas de planitud que representan la información de salida del sistema que los operadores de la instalación manejan habitualmente para comprobar la calidad de los productos laminados.

El mapa de la figura 7.8 muestra la planitud de una banda de acero que presenta un defecto de planitud muy pronunciado de bordes ondulados. Se puede observar que la sección central de la banda (-300 a 300 milímetros en el eje de ordenadas) es bastante plana, excepto en los 100 últimos metros de su extensión.

El mapa de la figura 7.9 muestra la planitud de una banda de acero en la que se combinan varios defectos. Se puede observar que posee los bordes ligeramente ondulados (principalmente en los últimos 500 metros de la banda y en la sección

[2] Utilizando el reloj proporcionado por la tarjeta capturadora *Matrox Meteor II CL* (ver sección 4.2.1.6.

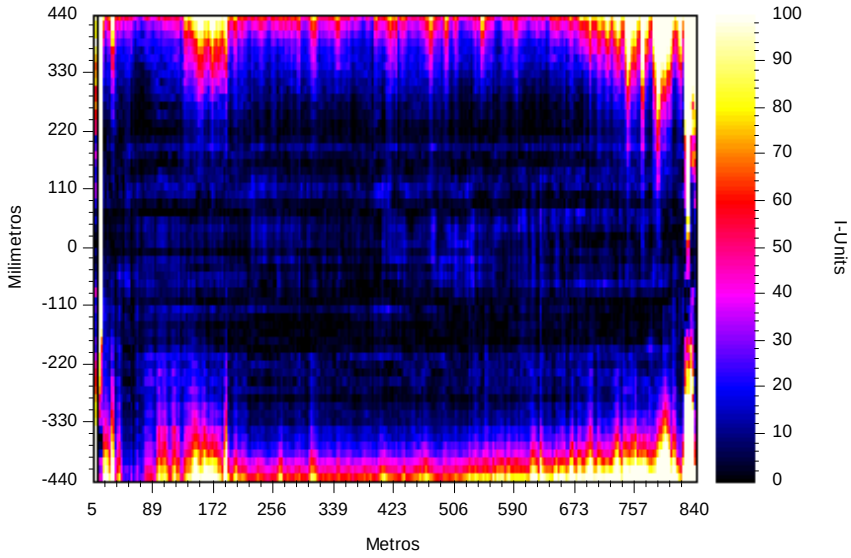


Figura 7.8: Ejemplo de un mapa de planitud expresado en *I-Units* (i).

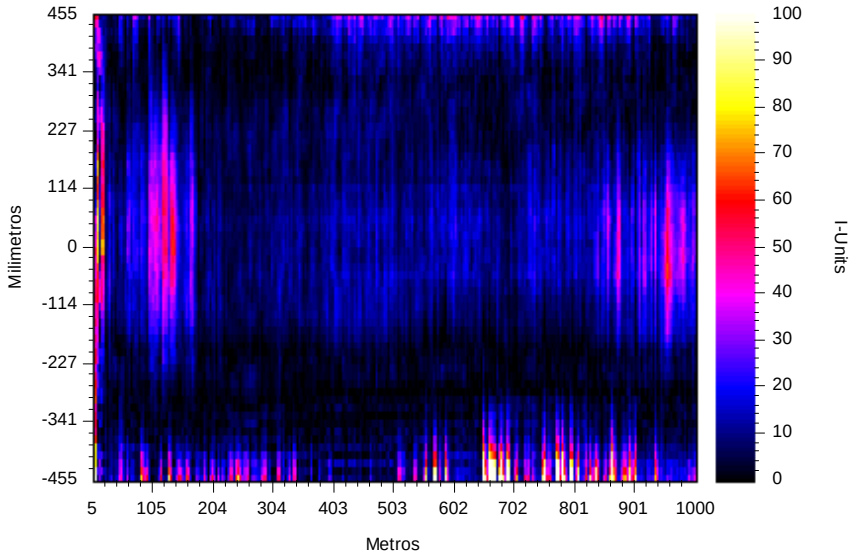


Figura 7.9: Ejemplo de un mapa de planitud expresado en *I-Units* (ii).

de −350 a −455 milímetros de su ancho). También se puede observar que presenta un defecto de bucle central prácticamente en toda su extensión, aunque bastante pronunciado en los primeros 200 metros y más ligero en los últimos 200 metros.

Capítulo 8

Conclusiones, aportaciones y trabajo futuro

En este capítulo se recogen las conclusiones más relevantes a las que se ha llegado durante el desarrollo del presente trabajo, se resumen las principales aportaciones y se indican las líneas de trabajo futuras que se derivan de la realización de esta tesis.

8.1. Objetivos alcanzados y aportaciones

En esta tesis se ha presentado la aplicación de técnicas de visión por computador en el análisis, diseño e implementación de un sistema para la reconstrucción tridimensional de la superficie de objetos con restricciones de tiempo real.

El sistema se ha diseñado con el objetivo de realizar tareas de inspección automática de la calidad de productos laminados, utilizando la reconstrucción tridimensional para obtener medidas de su planitud.

El proceso de análisis ha sido un proceso extremadamente complejo en el que se han identificado las principales limitaciones con las que se encuentra un sistema de visión por computador en un entorno de funcionamiento con condiciones hostiles, inherentes a un entorno industrial real.

El proceso de diseño ha tenido en cuenta estas limitaciones para, posteriormente, implementar un sistema de reconstrucción 3D robusto y eficiente que posibilite un funcionamiento correcto en una instalación industrial.

El prototipo implementado realiza la reconstrucción tridimensional de la superficie de productos laminados en una línea de producción en la industria del acero obteniendo, como resultado final, la planitud de las bandas de acero que se procesan en la citada línea.

El trabajo realizado se ha dividido en varias fases, haciendo especial hincapié en aquellas menos exploradas en la literatura.

En el capítulo 2 se ha presentado un estudio acerca de la planitud de productos laminados y las formas que existen para medirla. Se define qué se conoce por

planitud en bandas de acero en el ámbito industrial y se identifican los principales factores que le afectan. A continuación, se describen los defectos de planitud que puede presentar un producto laminado así como las métricas e índices de planitud existentes para medirlos. Finalmente, se introducen los principios de funcionamiento y se especifican los requisitos que han de satisfacer los sistemas de medición de planitud industriales, además de describir los sistemas más relevantes que se utilizan en la actualidad. La recopilación realizada en este capítulo es completamente original ya que no hay otro estudio con la misma profundidad ni otro análisis comparativo de este tipo en la literatura técnica especializada.

En el capítulo 3 se ha presentado una recopilación de las diferentes técnicas que pueden ser utilizadas para la reconstrucción 3D de un objeto, centrándose en las técnicas de visión por computador que permiten obtener información tridimensional a partir de imágenes bidimensionales de una escena. Dentro de estas técnicas se hace especial hincapié en las técnicas ópticas activas, ya que son las que mejores resultados proporcionan en entornos industriales. Tras analizar los diferentes modelos matemáticos que describen el comportamiento físico y óptico del conjunto de la cámara y la óptica se han descrito los principales métodos de calibración de la cámara de un sistema de visión propuestos en la literatura.

En el capítulo 4 se ha analizado el entorno de funcionamiento de este tipo de sistemas en una línea de producción de bandas de acero, determinando los factores que pudieran limitar el funcionamiento de un prototipo industrial de reconstrucción tridimensional. Además, se ha diseñado, para una instalación industrial, la geometría de un sistema de visión por computador basado en la técnica de la triangulación mediante un dispositivo emisor de luz láser como fuente de luz activa. Finalmente, se han realizado las tareas de diseño de los diferentes componentes *software* del sistema.

Una de las principales limitaciones encontradas tras la implementación del prototipo industrial es la enorme dificultad para validar el sistema. La validación en el laboratorio con un prototipo a escala reducida no es útil al cien por cien. El proceso de simulación en el laboratorio de los productos que debe inspeccionar el sistema, del movimiento de los mismos por la instalación industrial y de las condiciones ambientales de trabajo en un entorno real es una tarea muy compleja. Aún realizando este proceso en el laboratorio, la validación no se puede considerar correcta hasta que no se realiza un proceso de validación en planta.

Con el objetivo de facilitar el proceso de validación en un entorno real del prototipo desarrollado, y dada la imposibilidad de repetición del proceso de producción industrial, en el capítulo 5 se ha diseñado un componente *software* de grabación y reproducción de vídeo en tiempo real que almacena, de forma comprimida, todas las imágenes capturadas por la cámara del sistema así como la información complementaria necesaria para su procesamiento. Las secuencias de

vídeo generadas pueden ser procesadas en el laboratorio para repetir de forma fidedigna las condiciones en las que trabaja el sistema en el entorno industrial. Para desarrollar este componente se han analizado los principales contenedores multimedia existentes en la actualidad con el objetivo de seleccionar el más adecuado para almacenar las secuencias de vídeo generadas por el sistema. Además, se ha realizado un proceso de evaluación del rendimiento de un conjunto preseleccionado de algoritmos de compresión y descompresión de imágenes sin pérdida, *lossless codecs*, sobre el tipo de imágenes generadas por la cámara del sistema con el objetivo de seleccionar el más eficiente y aquel que permita al sistema cumplir con sus restricciones de tiempo real.

Mediante este componente de grabación se ha ido generando una base de datos de secuencias de vídeo con el procesamiento de bandas de acero en una línea de producción industrial que representa un amplio rango de condiciones, tanto del producto como del entorno, con las que ha de trabajar el sistema.

Una de las tareas más críticas del sistema de reconstrucción tridimensional es la extracción de la proyección del láser sobre la superficie de los productos laminados de los que se desea obtener su reconstrucción tridimensional. En esta tesis se ha propuesto un método robusto y eficiente para la extracción de una línea láser de las imágenes generadas por la cámara del sistema de visión. El método presentado es un método robusto ya que no se ve afectado por las condiciones de iluminación hostiles inherentes a un entorno industrial. Y es eficiente, dado que todas las operaciones necesarias en este proceso de extracción han sido optimizadas para permitir cumplir las restricciones de tiempo real al sistema en el cual se integra. En el capítulo 6 se ha presentado el método propuesto en esta tesis, así como una revisión de los métodos propuestos en la literatura y un análisis de la adecuación de estos métodos para un entorno de trabajo industrial.

El método propuesto se divide en dos etapas. En primer lugar se realiza un proceso de búsqueda local de la línea sobre el fondo de la imagen con el objetivo de determinar la proyección de la línea láser sobre la superficie del producto laminado. En segundo lugar se aplica un proceso de detección del láser sobre la región de búsqueda seguido de un ajuste de segmentos basado en la división y en la unión.

En el capítulo 7 se han mostrado los resultados del proceso de validación del prototipo en un entorno industrial. De estos resultados las principales conclusiones que se pueden extraer son:

- El método propuesto en esta tesis para la extracción de la línea láser es muy robusto, dado que permite extraer de forma correcta la línea de las imágenes generadas en un entorno industrial, aún existiendo condiciones de iluminación adversas y degradación en la proyección de la propia línea láser.

- La exactitud con la que el sistema es capaz de reconstruir la forma tridime-

naional de la superficie de un producto laminado en un entorno industrial es elevada en comparación con la relación píxel por milímetro que se obtiene con la geometría utilizada. Esta exactitud es del orden de una a tres veces mayor que la incertidumbre de los objetos de validación utilizados.

- La precisión alcanzada por el sistema, expresada en dimensiones de la imagen, es de $\pm 0{,}34$ píxeles. Este valor de precisión, teniendo en cuenta las características del láser utilizado y del rango vertical de píxeles de la cámara en el que incide el área de interés de la escena, se considera satisfactorio.

Aunque satisfactorias, la exactitud y la precisión alcanzadas por el sistema pueden ser mejoradas si se aumenta la relación píxel por milímetro del área de interés de la escena que incide en el sensor de la cámara. De este modo, el láser incidiría en un mayor rango vertical de píxeles y su extracción podría ser más precisa. Como se ha indicado a lo largo del trabajo, el aumento de esta relación se puede realizar de dos formas: utilizando lentes anamórficas o aumentando la resolución del sensor de la cámara. Ésta, junto a otras tareas propuestas, forma parte de las líneas de trabajo futuro que se presentan más adelante en este mismo capítulo.

8.2. Difusión de las aportaciones

Durante la realización del trabajo que ha dado como fruto esta tesis se han difundido aportaciones del mismo con el objetivo de darles publicidad así como de obtener revisiones de otros investigadores.

El análisis de las dificultades existentes en los procesos de validación en instalaciones industriales de sistemas de visión por computador, la solución propuesta al problema en esta tesis y la evaluación del rendimiento de algoritmos de compresión sin pérdida sobre imágenes generadas por la cámara del sistema de reconstrucción 3D fueron presentados en la 4^{th} *International Conference on Computer Science and Engineering* [Garcia *et al.*, 2007].

El método propuesto en esta tesis para la extracción de la línea láser de las imágenes generadas por el sistema de reconstrucción 3D ha sido aceptado como un capítulo del libro *Pattern Recognition: Techniques, Technology and Applications*, cuya publicación está prevista para octubre de 2008. Este capítulo se titula *Robust laser stripe extraction in industrial environments* [Usamentiaga *et al.*, 2008].

Además, la experiencia adquirida durante la realización de esta tesis acerca de la planitud en bandas de acero ha sido un referente para el trabajo realizado en [Usamentiaga *et al.*, 2006*a*].

8.3. Trabajo futuro

El trabajo realizado en esta tesis, apoyado en otros trabajos realizados por el grupo de investigación sobre procesamiento de imágenes del área de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Oviedo, permite disponer de un prototipo industrial de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados. Este prototipo es la base para un conjunto de tareas de investigación que se realizarán como continuación de este trabajo.

Una de las líneas de investigación fundamentales, y probablemente la más compleja, es el análisis de la influencia del ruido introducido en la reconstrucción 3D y cómo éste afecta a la medición de la planitud de productos laminados. Actualmente, la investigación en este aspecto es prácticamente nula, y la que se realiza no es pública. El objetivo de esta línea de investigación es caracterizar el ruido aparecido en la reconstrucción 3D de un producto, inherente a sus características físicas o a las condiciones de su procesamiento, para estimar y corregir los errores que produce en las métricas de planitud proporcionadas.

Otra de las líneas de investigación hace referencia al aumento de las prestaciones del prototipo industrial, especialmente las referidas a la tasa de muestreo de imágenes del área de interés de la escena. En los requisitos iniciales del prototipo una frecuencia de muestreo de 1 a 40 imágenes por segundo se consideraba más que suficiente para detectar los defectos de planitud que presentan las bandas de acero en una línea de producción en una planta siderúrgica. Sin embargo, se han detectado recientemente defectos de planitud con una longitud de onda del defecto relativamente baja debido a problemas muy concretos en el proceso de laminación. Estos defectos de planitud de alta frecuencia pueden no ser detectados por el sistema cuando la velocidad de procesamiento de la banda en la línea de producción es elevada, ya que se puede producir un efecto de *aliasing*. El aumento de la frecuencia de muestreo del prototipo requiere la utilización de una cámara de alta sensibilidad y alta velocidad que permita capturar la imagen reduciendo aún más el período de exposición.

Relacionada con la línea anterior, una tarea de investigación de gran interés es el análisis frecuencial de los mapas de reconstrucción tridimensional generados por el prototipo. El objetivo de este análisis es determinar defectos de planitud de diferente longitud de onda para clasificarlos posteriormente y tratar de localizar la fuente o fuentes del error en los procesos de laminación.

Además, el trabajo realizado en esta tesis, así como los datos de reconstrucción de la forma tridimensional de productos laminados, están sirviendo como base para la realización de otras tesis ya iniciadas por otros componentes del grupo de investigación anteriormente mencionado. El objetivo de estas tesis es la explotación de los mapas de alturas y de planitud generados por el prototipo industrial desarrollado en este trabajo. La finalidad de esta explotación es resumir la planitud de bandas de acero de varios miles de metros de longitud en un

conjunto reducido de parámetros para realizar análisis posteriores que incluyan largos períodos de producción.

Apéndices

Apéndice A

Consistencia de índices de defectos de planitud

Los índices de defectos de planitud descritos en la sección 2.4.4 se pueden relacionar entre sí de tal forma que los índices de flexión y los índices de nivelación se pueden expresar en función de los índices de alargamiento, y viceversa.

Para definir la consistencia entre índices se supone la superficie de una banda formada por n fibras, 1, 2, ..., c, ..., n, de longitud L_1, L_2, ..., L_c, ..., L_n, respectivamente, donde c es la fibra central y 1 y n las fibras de los extremos de la banda.

A.1. Índices de flexión en función de índices de alargamiento

Los índices de alargamiento se calculan a partir de las ecuaciones (A.1) y (A.2).

$$I_{1-c} = \frac{L_1 - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{A.1}$$

$$I_{n-c} = \frac{L_n - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{A.2}$$

A partir de estas dos ecuaciones se puede extraer la longitud de las fibras de los extremos de la banda, L_1 y L_n, tal como se puede observar en las ecuaciones (A.3) y (A.4).

$$L_c \times \frac{I_{1-c}}{10^5} = L_1 - L_c$$

$$L_1 = L_c \times \left(1 + \frac{I_{1-c}}{10^5}\right) \tag{A.3}$$

$$L_c \times \frac{I_{n-c}}{10^5} = L_n - L_c$$

$$L_n = L_c \times \left(1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}\right) \tag{A.4}$$

Sustituyendo L_1 y L_n en la la ecuación (A.5), índice de defectos de flexión, se obtiene la ecuación (A.6), en la que se tiene que el índice de defectos de flexión se puede calcular como la elongación media de las fibras de los extremos de la superficie de la banda.

$$I_{1+n-c} = \frac{\frac{L_1 + L_n}{2} - L_c}{L_c} \times 10^5 \tag{A.5}$$

$$\begin{aligned}
I_{1+n-c} &= \frac{\frac{L_1 + L_n}{2} - L_c}{L_c} \times 10^5 \\
&= \frac{\frac{L_c \times \left(1 + \frac{I_{1-c}}{10^5}\right) + L_c \times \left(1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}\right)}{2} - L_c}{L_c} \times 10^5 \\
&= \frac{\left(1 + \frac{I_{1-c}}{10^5}\right) + \left(1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}\right) - 1}{2} \times 10^5 \\
&= \frac{2 + \frac{I_{1-c}}{10^5} + \frac{I_{n-c}}{10^5}}{2} - 1 \\
&= \frac{1}{2} \times \frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{10^5} \times 10^5 \\
&= \frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{2}
\end{aligned} \tag{A.6}$$

A.2. Índices de nivelación en función de índices de alargamiento

Los índices de defectos de nivelación se calculan a partir de la ecuación (A.7).

$$I_{1-n} = \frac{L_1 - L_n}{\frac{L_1 + L_n}{2}} \times 10^5 \tag{A.7}$$

Al igual que en la sección anterior, se puede extraer la longitud de las fibras de los extremos de la banda a partir de las ecuaciones (A.1) y (A.2) obtieniéndose L_1 y L_n, (A.3) y (A.4), respectivamente.

Sustituyendo L_1 y L_n en la la ecuación (A.7), índice de defectos de nivelación, se obtiene la ecuación (A.8).

$$\begin{aligned}
I_{1-n} &= \frac{L_c \times \left(1 + \frac{I_{1-c}}{10^5}\right) - L_c \times \left(1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}\right)}{\frac{L_c \times \left(1 + \frac{I_{1-c}}{10^5}\right) + L_c \times \left(1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}\right)}{2}} \times 10^5 \\
&= \frac{1 + \frac{I_{1-c}}{10^5} - 1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}}{\frac{1 + \frac{I_{1-c}}{10^5} + 1 + \frac{I_{n-c}}{10^5}}{2}} \times 10^5 \\
&= \frac{\frac{I_{1-c} - I_{n-c}}{10^5}}{\frac{2 + \frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{10^5}}{2}} \times 10^5 \\
&= \frac{I_{1-c} - I_{n-c}}{\frac{2 \times 10^5 + I_{1-c} + I_{n-c}}{2}} \times 10^5 \\
&= \frac{I_{1-c} - I_{n-c}}{\frac{2 + \frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{10^5}}{2}}
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Si los coeficientes I_{1-c} e I_{n-c} son del orden de 500 *I-Units*, nivel de defecto de planitud muy elevado, el término

$$\frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{10^5}$$

de la ecuación (A.8) es igual a 0,01. Considerando 2,01 $\approx$ 2, se puede obtener el índice de defectos de nivelación de forma simplificada según la ecuación (A.9), en la que se tiene que el índice de defectos de nivelación se puede calcular, con un nivel de aproximación elevado, como la diferencia de las elongaciones de las fibras de los extremos de la superficie de la banda.

$$I_{1-n} = I_{1-c} - I_{n-c} \tag{A.9}$$

A.3. Índices de alargamiento en función de índices de flexión y de nivelación

En la sección A.1 se concluye que el índice de defectos de flexión se puede calcular, en función de los índices de alargamiento, según la ecuación (A.10).

$$I_{1+n-c} = \frac{I_{1-c} + I_{n-c}}{2} \tag{A.10}$$

La ecuación (A.10) se puede expresar de la forma mostrada en la ecuación (A.11).

$$2 \times I_{1+n-c} = I_{1-c} + I_{n-c} \tag{A.11}$$

Además, en la sección A.2 se concluye que el índice de defectos de nivelación se puede calcular, en función de los índices de alargamiento, según la ecuación (A.12).

$$I_{1-n} = I_{1-c} - I_{n-c} \tag{A.12}$$

Si se suman las ecuaciones (A.11) y (A.12) se obtiene la ecuación (A.13) y, si se restan, se obtiene la ecuación (A.14), permitiendo calcular los índices de elongación a partir de los índices de defectos de flexión y de nivelación.

$$I_{1-c} = I_{1+n-c} + \frac{1}{2} \times I_{1-n} \tag{A.13}$$

$$I_{n-c} = I_{1+n-c} - \frac{1}{2} \times I_{1-n} \tag{A.14}$$

Apéndice B

Calibración de la cámara de un sistema de visión por computador para la reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser

En este apéndice se describe el proceso de calibración de la cámara del subsistema de visión por computador de un sistema de reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser. En concreto, la calibración se realiza sobre el sistema diseñado en el capítulo 4. Este proceso permite determinar los parámetros de la transformación que se realiza entre puntos de la escena y puntos de la imagen, es decir, de la transformación perspectiva (ver sección 3.6.3). Además, el proceso de calibración permite estimar el error que cometerá el sistema de medición de planitud al determinar la posición en el espacio de un punto del área de interés de la escena.

B.1. Procedimiento de calibración

La calibración de un sistema de medición consiste en establecer una relación entre las mediciones obtenidas por el sistema y el valor real de la propiedad medida. En el caso del sistema de reconstrucción 3D diseñado en el capítulo 4, una de las propiedades que se mide es la posición de la proyección de la línea láser sobre la superficie de la banda. La otra propiedad medida es la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción.

La calibración de la cámara del subsistema de visión consiste en hallar la correspondencia entre el plano de proyección de la línea láser, en la escena, y el plano de proyección de la imagen, en la cámara.

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de calibración permite determinar los parámetros de la transformación perspectiva. Esta transformación está definida por dos tipos de parámetros: intrínsecos y extrínsecos (ver sección 3.8).

B.2. Calibración de los parámetros intrínsecos

En esta sección se describe el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos de la cámara del subsistema de visión por computador un sistema de reconstrucción 3D.

El proceso de calibración de parámetros intrínsecos se realiza utilizando el método de Heikkila [Heikkila y Silven, 1997] (ver sección 3.8.2.7) mediante la herramienta *Camera Calibration Toolbox* en su versión para *Matlab* [CCT, 2007] incluida en la librería *OpenCV* [OpenCV, 2007]. Esta herramienta permite calcular la distancia focal, el punto principal, el coeficiente de oblicuidad y las distorsiones radial y tangencial hasta orden cinco de la óptica. Además, dispone de métodos para analizar la precisión de la calibración realizada.

B.2.1. Plantilla de calibración

Para realizar este proceso se utiliza una plantilla con un patrón de cuadrados (12 filas por 17 columnas) de 15 milímetros de lado, alternados en color blanco y negro (ver figura B.1). Las características de la plantilla que se utiliza en el proceso de calibración son los vértices de los cuadrados. A estos puntos se les denomina puntos de control.

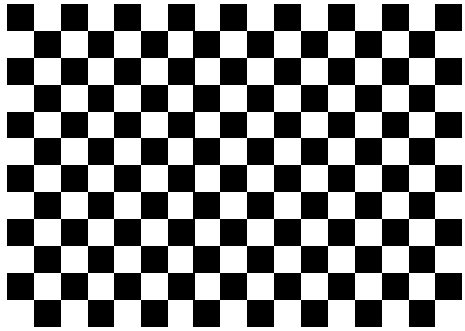


Figura B.1: Plantilla utilizada en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos.

B.2.2. Errores en la plantilla de calibración

El error con el que se ha construido la plantilla de calibración afecta al cálculo del error que se produce al utilizar el sistema para obtener, en coordenadas de la escena, un punto en el plano de proyección de la línea láser.

El error de esta plantilla se ha estimado midiendo la distancia relativa a la que se encuentran dos puntos de control con una regla cuya precisión es de 1 milímetro. Por tanto, se estima que el error máximo que se comete en el proceso de medida es de ±0,5 milímetros.

B.2.3. Procedimiento de calibración de los parámetros intrínsecos

La primera fase de la calibración consiste en obtener los parámetros intrínsecos de la cámara con objeto de compensar las distorsiones introducidas por la óptica.

La herramienta con la que se realiza este proceso de calibración utiliza una serie de imágenes de la plantilla de calibración generadas por la cámara, desde diferentes ángulos y distancias, para extraer los puntos de control que se utilizan en la resolución del modelo matemático. En la figura B.2 se puede observar el conjunto de imágenes utilizadas en este proceso.

La herramienta de calibración calcula los parámetros intrínsecos de la cámara así como una estimación del error que se comete en cada uno de ellos. La figura B.3 muestra un ejemplo de la extracción de los puntos de control de una imagen de la plantilla de calibración generada por la cámara.

Los resultados del proceso de calibración generados por la herramienta se muestran en la tabla B.1. Las distancias están expresadas en píxeles, salvo los parámetros que modelan las distorsiones, que son coeficientes adimensionales.

Calibration results (with uncertainties)	
Focal Length	fc = [3054,48745 3045,77118] ± [12,28252 12,11156]
Principal point	cc = [470,43360 539,56203] ± [16,24695 21,86330]
Skew	alpha-c = [0,00000] ± [0,00000] angle of pixel axes = 90,00000 ± 0,00000 degrees
Distortion	kc = [−0,08698 −0,03670 0,00468 −0,00884 0,00000] ± [0,06470 2,90796 0,00197 0,00172 0,00000]
Pixel error	err = [0,33479 0,20847]
Note	The numerical errors are approximately three times the standard deviations (for reference).

Tabla B.1: Resultados de la calibración de los parámetros intrínsecos.

Las dimensiones horizontal y vertical de los píxeles del sensor pueden ser, en ocasiones, diferentes, por lo que la distancia focal se expresa mediante un par de valores: 3054,48745 y 3045,77118. El primero es la distancia en píxeles horizontales y el segundo es la distancia en píxeles verticales. La distancia focal

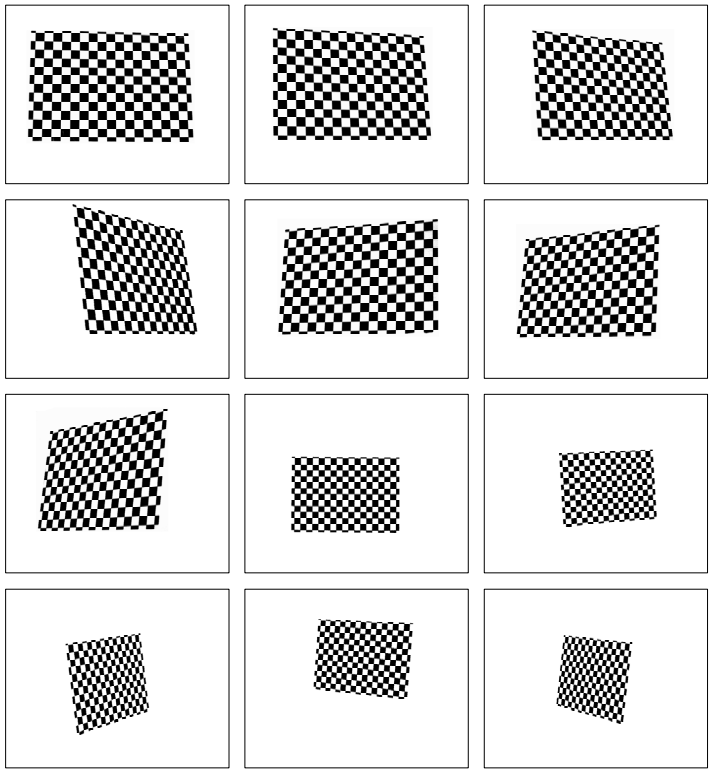


Figura B.2: Conjunto de imágenes utilizadas en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos.

que resulta del modelo matemático, obtenida a partir de la distancia focal promedio, 3050,129315 píxeles, y del tamaño de cada píxel, 0,012 milímetros (ver tabla 4.2), es de 36,6 milímetros. Esta distancia se ajusta correctamente a la distancia focal nominal de la óptica, 35 milímetros (ver tabla 4.3).

Además, los resultados del proceso de calibración de los parámetros intrínsecos muestran que el eje de proyección de la óptica no está centrado con respecto al sensor de la cámara, ya que el punto principal no se corresponde con el centro de la imagen.

La figura B.4 muestra el impacto de las componentes radial y tangencial del modelo de distorsión obtenido en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos de la cámara (ver sección 3.5.4). La figura B.4(a) muestra el impacto de la componente radial, en la que se puede observar que el desplazamiento

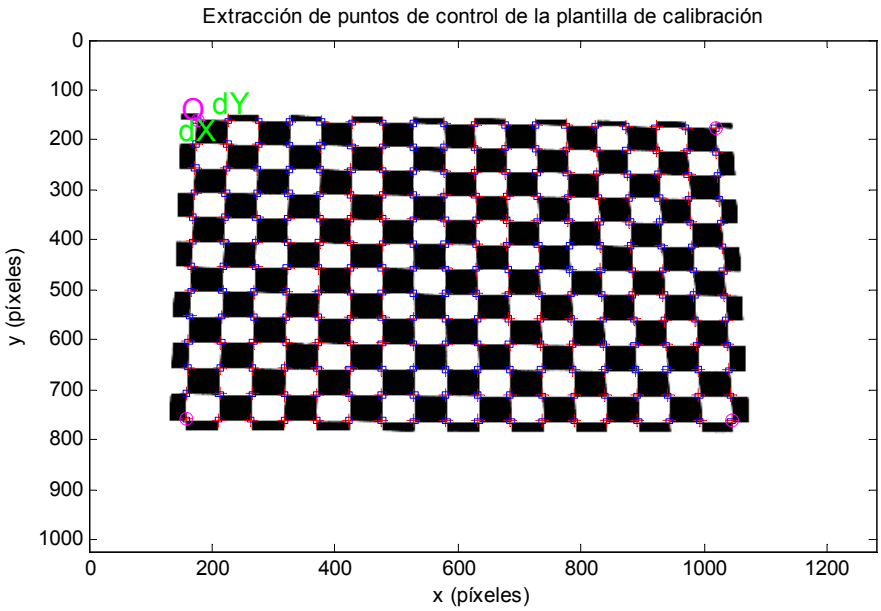


Figura B.3: Extracción de los puntos de control de la plantilla de calibración de los parámetros intrínsecos.

máximo inducido es de 7 píxeles (en el extremo superior derecho de la imagen). La figura B.4(b) muestra el impacto de la componente tangencial, en la que se puede observar un desplazamiento similar a la anterior.

En la figura B.5 se puede visualizar el efecto de las distorsiones introducidas por la óptica en la imagen generada por el sensor de la cámara. Esta figura muestra el impacto del modelo de distorsión completo, radial más tangencial, en cada píxel de la imagen. Cada flecha representa el desplazamiento efectivo de un píxel introducido por la distorsión de la óptica. Se puede observar cómo el desplazamiento máximo se produce en la esquina superior derecha de la imagen, siendo este desplazamiento de 14 píxeles.

Una vez obtenidos los parámetros intrínsecos se debe comprobar la calidad del ajuste realizado. Para ello se analiza el error de reproyección. Este error indica la distancia entre la posición real de los puntos de control de la plantilla y la posición que ocuparían según el modelo definido en el proceso de calibración. La figura B.6 muestra la distribución de los errores de reproyección de cada uno de los puntos de control de la plantilla de calibración. El error de reproyección se obtiene midiendo la distancia entre el punto observado en la imagen y la

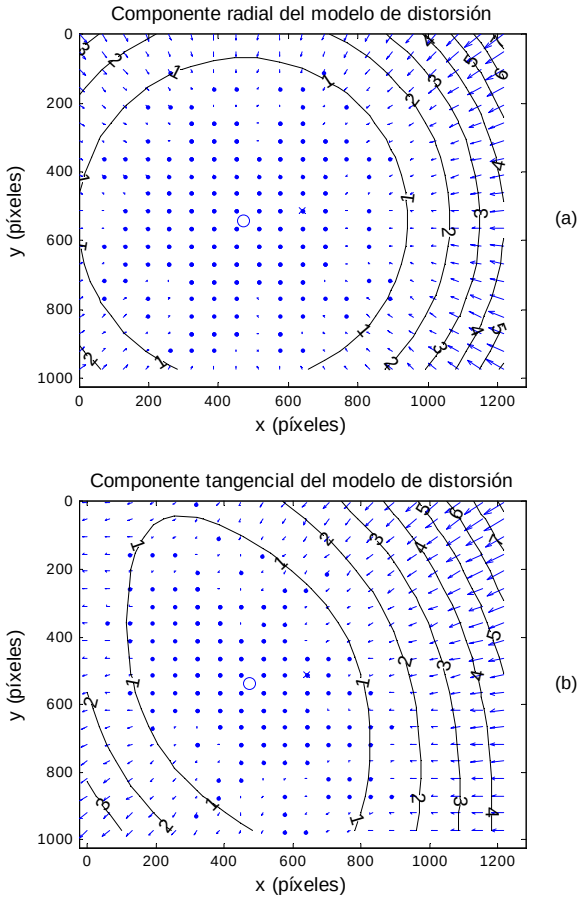


Figura B.4: Componentes radial y tangencial del modelo de distorsión obtenido en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos: (a) Componente radial. (b) Componente tangencial.

posición calculada mediante el modelo matemático. El error tiene una dispersión de 0,7 píxeles tanto en la dirección horizontal como en la dirección vertical.

Los parámetros intrínsecos de la cámara se obtienen aplicando un mecanismo de minimización de errores por lo que el error medio que se obtiene es cero.

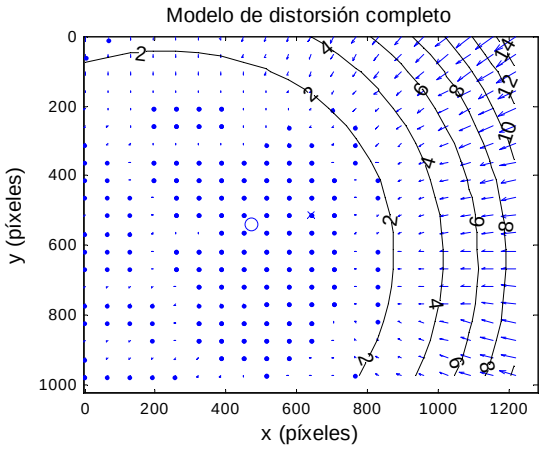


Figura B.5: Modelo de distorsión completo obtenido en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos.

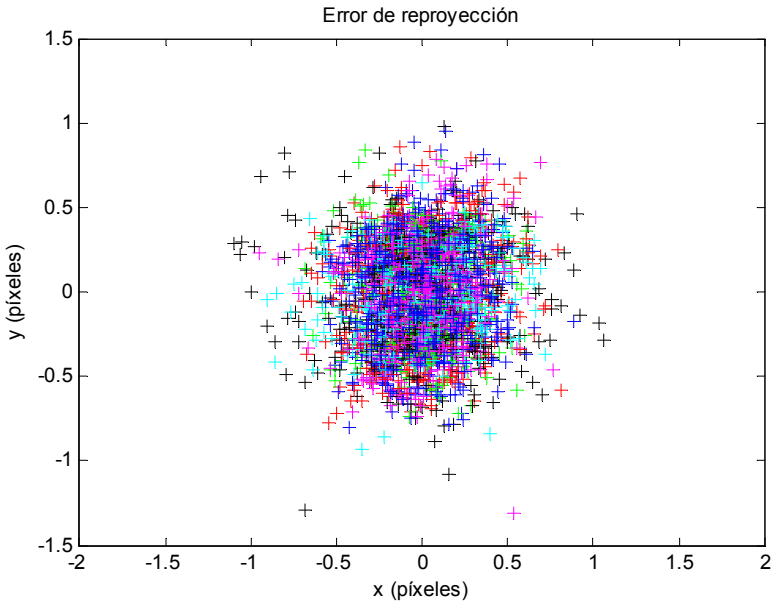


Figura B.6: Error de reproyección en el proceso de calibración de los parámetros intrínsecos.

B.3. Calibración de los parámetros extrínsecos

En esta sección se describe el proceso de calibración de los parámetros extrínsecos de la cámara del subsistema de visión por computador del sistema de medición de planitud.

En primer lugar se describe la plantilla de calibración utilizada en el proceso y seguidamente el error estimado en su construcción. A continuación se define qué se conoce por homografía entre dos planos, ya que será el concepto principal en el que se basará el procedimiento de calibración de los parámetros extrínsecos.

B.3.1. Plantilla de calibración

Para realizar este proceso se utiliza una plantilla con un patrón de cuadrados (4 filas por 13 columnas) de 30 milímetros de diagonal, girados 45º de forma que los vértices de dos cuadrados adyacentes están enfrentados (ver figura B.7). La distancia del centro de cada cuadrado al centro de los cuadrados adyacentes es de 45 milímetros.

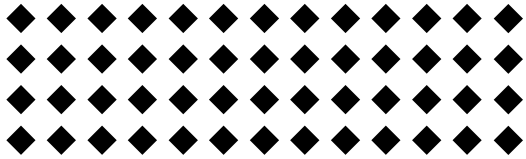


Figura B.7: Plantilla utilizada en el proceso de calibración de los parámetros extrínsecos.

A diferencia de lo que sucede en el proceso de calibración de parámetros intrínsecos, los puntos de control que se utilizan en el proceso de calibración de parámetros extrínsecos son el centro de masas de cada uno de los cuadrados del patrón. El motivo principal de utilizar como puntos de control el centro de masas de los objetos del patrón de la plantilla de calibración y no sus vértices se debe a que las imágenes utilizadas en el proceso de calibración de parámetros extrínsecos han de ser generadas en la instalación definitiva del sistema de reconstrucción 3D. Es decir, han de ser generadas en el entorno industrial de funcionamiento del sistema en condiciones de iluminación adversas, por lo que la extracción de los puntos de control se debe basar en un procedimiento más robusto. Por el contrario, las imágenes necesarias para realizar el proceso de calibración de parámetros intrínsecos pueden ser obtenidas en un entorno con iluminación controlada, por lo que la extracción de los puntos de control se ha podido basar en un procedimiento más preciso aunque menos robusto.

B.3.2. Errores en la plantilla de calibración

El error en la construcción de esta plantilla de calibración, que afecta al cálculo del error que se produce al utilizar el sistema, se ha estimado midiendo la distancia relativa a la que se encuentran dos puntos de control con una regla cuya precisión es de 1 milímetro. Por tanto, se estima que el error máximo es de ±0,5 milímetros.

B.3.3. Homografía entre dos planos

En geometría, una homografía establece una transformación de proyección entre dos planos diferentes.

Sean p_a y p_b dos puntos pertenecientes a un plano A y a un plano B, respectivamente, de la siguiente forma:

$$p_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix}, p_b = \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

Una homografía se define matemáticamente como una matriz de dimensiones 3×3, H_{ab}:

$$\mathrm{H}_{ab} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}$$

Esta matriz permite transformar un punto p_a del plano A a un punto p_b en el plano B, ecuación (B.1), y un punto p_b del plano B a un punto en el plano A, ecuación (B.2), donde $\mathrm{H}_{ba} = \mathrm{H}_{ab}^{-1}$.

$$p_b = \mathrm{H}_{ab} \times p_a \tag{B.1}$$

$$p_a = \mathrm{H}_{ba} \times p_b \tag{B.2}$$

B.3.4. Procedimiento de calibración de los parámetros extrínsecos

La segunda fase de la calibración consiste en obtener los parámetros extrínsecos de la cámara con la finalidad de establecer la correspondencia entre puntos del plano de la imagen y puntos del plano de la escena (plano de proyección de la línea láser). Para establecer esta correspondencia se ha implementado un conjunto de herramientas que calculan la homografía entre ambos planos.

Los pasos a realizar para llevar a cabo esta fase son los siguientes:

1. Adquirir un conjunto de imágenes de la plantilla de calibración colocada en el plano de proyección de la línea láser. El conjunto de imágenes utilizado en este proceso se puede observar en la figura B.8. La colocación de la plantilla en el plano de proyección de la línea láser varía en el eje horizontal de una imagen a otra. Para un conjunto de n imágenes se desplaza la plantilla de una imagen a la siguiente $\frac{d}{n}$ milímetros, siendo d la distancia entre dos puntos de control de la plantilla. El objetivo es logar un número elevado de puntos de control a partir de varias imágenes, pero sin estar superpuestos.

2. Calcular la posición en la imagen (en píxeles) de los puntos de control de la plantilla mediante un algoritmo de segmentación de regiones y extracción de características [Sonka *et al.*, 1993]. Las regiones que se consideran son los cuadrados de la plantilla y la característica que se utiliza para determinar el punto de control es el centroide de la región, permitiendo que el método sea muy robusto. La figura B.9 muestra la extracción de los puntos de control de cada una de las imágenes utilizadas en el proceso de calibración de los parámetros extrínsecos, así como su reproyección en el sistema de coordenadas de la imagen.

3. Calcular la posición en el plano de la escena (en metros) de los puntos de control, teniendo en cuenta la distancia de separación de los cuadrados en la plantilla. El algoritmo que se aplica en este caso toma como origen de coordenadas el punto de control más próximo al centro de la imagen y calcula, con respecto a éste, la posición del resto de puntos de control. De esta forma se obtienen pares de puntos de calibración en coordenadas de la imagen y espaciales. La figura B.10 muestra la reproyección en el sistema de coordenadas de la escena de los puntos de control extraídos en el conjunto de imágenes de calibración de los parámetros extrínsecos. En esta figura los círculos de color azul representan la incertidumbre con la que se ha construido la plantilla de calibración ($\pm$0,5 milímetros, ver sección B.3.2) y las cruces de color rojo representan la posición en la que se encuentran cada uno de los puntos de control observados con respecto a su posición teórica. Se puede observar que todos los puntos se encuentran dentro del intervalo de incertidumbre.

4. Aplicar el modelo matemático de la cámara resultante del proceso de calibración de los parámetros intrínsecos (ver sección B.2) a los puntos de control en la imagen distorsionada. El resultado de esta operación es el conjunto de puntos de control sobre un plano imagen sin distorsión y que, por tanto, se puede utilizar para calcular la homografía.

5. Obtener la homografía entre el plano de la imagen sin distorsión y el plano de proyección de la línea láser en la escena. En este caso se aplica un algoritmo que utiliza los pares de puntos obtenidos anteriormente y que ajusta, por mínimos cuadrados aplicando el método de la pseudoinversa, el conjunto de nueve parámetros que define la homografía. La matriz de transformación, H, obtenida es la siguiente:

$$\mathrm{H} = \begin{bmatrix} 0{,}0272 & 0{,}0006 & -17{,}6468 \\ 0{,}0002 & -0342 & 18{,}1711 \\ 0{,}0000 & -0{,}0002 & 1{,}0000 \end{bmatrix}$$

   Esta matriz representa la homografía entre los puntos del plano de proyección de la línea láser y los puntos del plano de la imagen, una vez compensada la distorsión introducida por la óptica de la cámara.

El error medio de reproyección que introduce la homografía obtenida en el conjunto de puntos de control extraídos durante el proceso de calibración, expresado en coordenadas de la imagen, es de 0,1595 píxeles. En la tabla B.2 se puede observar este error, así como el error máximo cometido, tanto en coordenadas de la imagen como en coordenadas de la escena. Se puede observar que el error de reproyección es siempre menor que la incertidumbre con la que se ha construido la plantilla de calibración.

Sistema de coordenadas	Promedio	Máximo
Imagen	0,16 píxeles	0,36 píxeles
Escena	0,24 milímetros	0,47 milímetros

Tabla B.2: Error de reproyección de la calibración extrínseca.

Una vez obtenida la homografía entre el plano de la imagen y el plano de proyección de la línea láser, la posición en el espacio que corresponde a un punto cualquiera de la imagen se calcula en dos fases:

1. Se corrige la distorsión introducida por la óptica de la cámara para obtener la posición en píxeles del punto en el plano de la imagen sin distorsión.

2. Se aplica la homografía para obtener la posición en el plano de proyección de la línea láser de dicho punto.

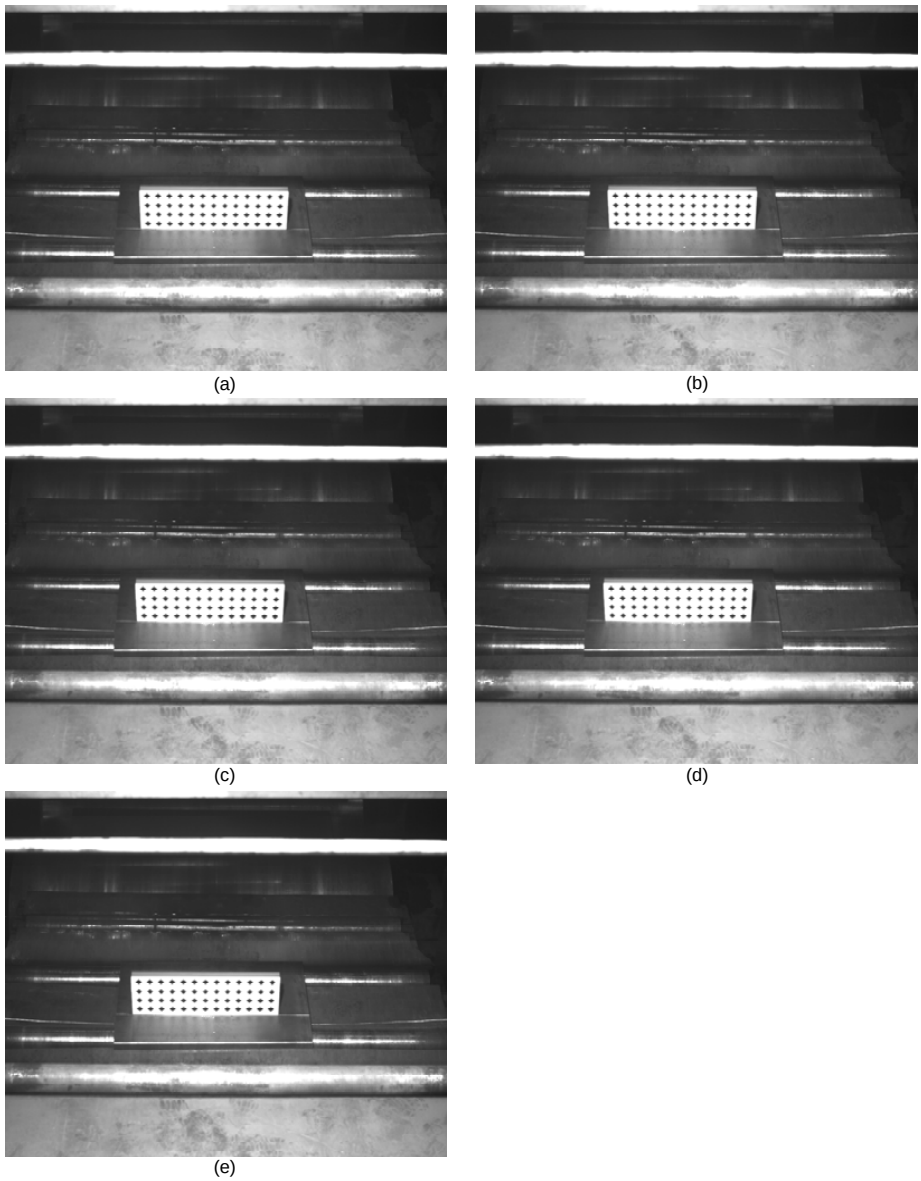


Figura B.8: Conjunto de imágenes utilizadas en el proceso de calibración de los parámetros extrínsecos: (a) imagen01. (b) imagen02. (c) imagen03. (d) imagen04. (e) imagen05.

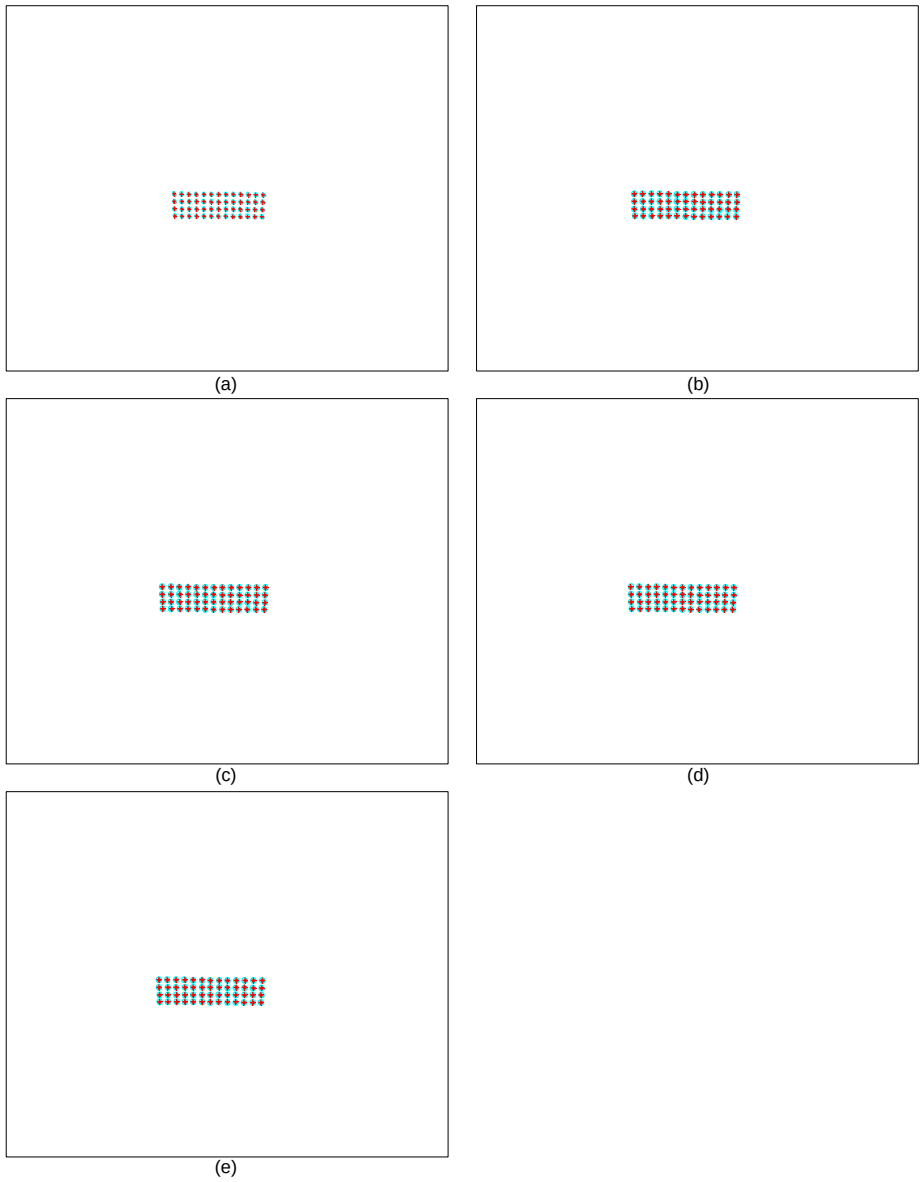


Figura B.9: Extracción de los puntos de control de la plantilla de calibración de los parámetros extrínsecos: (a) imagen01. (b) imagen02. (c) imagen03. (d) imagen04. (e) imagen05.

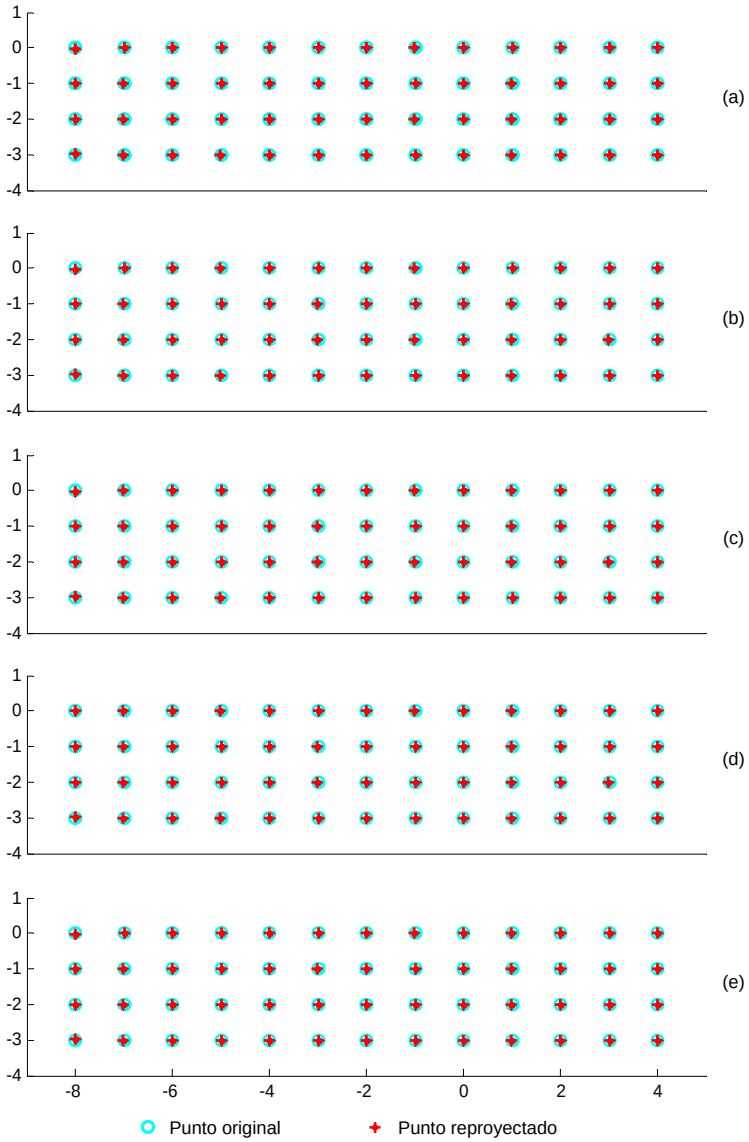


Figura B.10: Reproyección de los puntos de control de la plantilla de calibración extrínseca en coordenadas de la escena: (a) imagen01. (b) imagen02. (c) imagen03. (d) imagen04. (e) imagen05.

Apéndice C

Calibración del sensor de velocidad de un sistema para la reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser

En este apéndice se describe el proceso de calibración del sensor de velocidad de un sistema de reconstrucción 3D basado en triangulación óptica por láser. En concreto la calibración se realiza sobre el sistema diseñado en el capítulo 4. Este proceso permite determinar los parámetros necesarios para realizar la traducción entre el nivel de tensión obtenido por la tarjeta de adquisición de datos del sistema y la velocidad de desplazamiento de la banda de acero por la línea de producción.

C.1. Procedimiento de calibración

En la sección 4.2.2 se indica que la velocidad de desplazamiento de las bandas de acero por la línea de producción se obtiene de un tacómetro conectado a un rodillo de la línea. En realidad, la señal de tensión generada por este dispositivo no está cableada directamente hasta el sistema de medición de planitud. La tarjeta de adquisición recibe una señal de tensión proporcional a la velocidad de desplazamiento de la banda. Esta tensión es proporcionada por un autómata de la instalación industrial que se encarga, además, de filtrarla y acondicionarla. De este modo, la construcción de un modelo que explique el comportamiento del sensor de velocidad es un proceso complejo. Por tanto, la calibración de este sensor se realiza mediante un procedimiento empírico.

El procedimiento de calibración del sensor de velocidad se divide en las dos siguientes fases:

1. Adquirir un conjunto de muestras de tensión generadas por el sensor para diferentes velocidades conocidas de desplazamiento de las bandas de acero

por la línea.

A partir de este conjunto de muestras se pueden obtener los parámetros que definen la ecuación de la recta, $y = ax + b$, del comportamiento del sensor, donde x es el valor de tensión obtenido del sensor, expresado en voltios, e y el valor de velocidad, expresado en metros por minuto. Esta recta se calcula aplicando un método de regresión o ajuste lineal.

2. Una vez obtenida la recta que define el comportamiento del sensor se mide la longitud de un conjunto de bandas procesadas en la línea de producción. Cada una de estas longitudes, calculada según la ecuación (C.1) para cada muestra de altura h_i, se compara con la longitud real de la banda.

$$L = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(h_i - h_{i-1})^2 + v_i^2 (t_i - t_{i-1})^2} \tag{C.1}$$

A partir de esta comparación se obtiene, aplicando la técnica de optimización de mínimos cuadrados, un valor constante k_v que relaciona la longitud medida y la longitud real de cada banda.

En este punto sería deseable que el valor de k_v fuese igual a 1. En caso contrario, la constante k_v se aplicará como un factor de corrección para calcular cada incremento de longitud de las bandas por parte del sistema de medición de planitud de acuerdo a la ecuación (C.2).

$$L = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(h_i - h_{i-1})^2 + k_v v_i^2 (t_i - t_{i-1})^2} \tag{C.2}$$

Este factor de corrección modifica la pendiente de la recta de ajuste obtenida en la fase 1 de este procedimiento de calibración, tratando de minimizar el error cometido por el sistema en el cálculo de la longitud de las bandas de acero que se procesan en la línea.

La figura C.1 muestra el comportamiento del sensor que se encarga de medir la velocidad de desplazamiento de la banda por la línea de producción. Se muestra el ajuste lineal obtenido en la fase 1 del procedimiento de calibración así como el intervalo de confianza al 95 % a partir de un conjunto de 50 muestras obtenidas en la línea de producción.

Finalmente, la tabla C.1 muestra los valores obtenidos en las dos fases del procedimiento de calibración.

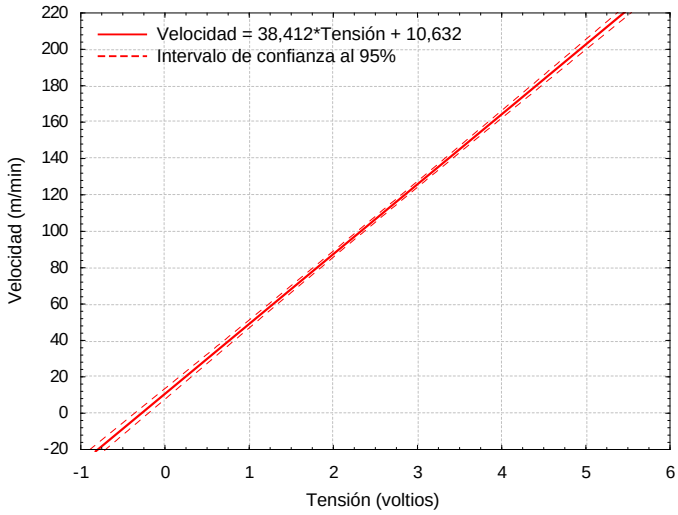


Figura C.1: Ajuste lineal del comportamiento del sensor de velocidad.

Parámetro	Valor
Coeficiente de primer grado de la recta que ajusta el comportamiento del sensor, a	38,412
Coeficiente independiente de la recta que ajusta el comportamiento del sensor, b	10,632
Factor de corrección, k_v	$0,987$

Tabla C.1: Resultados de la calibración del sensor de velocidad.

Apéndice D

Clasificación de dispositivos láser

Los dispositivos emisores de luz láser se clasifican de acuerdo a su potencia nominal de salida y a la longitud de onda del haz láser generado.

Las diferentes clasificaciones existentes tratan de catalogar un dispositivo láser de acuerdo a su capacidad para producir daño a una persona expuesta al haz de luz generado.

La clasificación realizada por la Comisión Electrotécnica Internacional se recoge dentro de la norma IEC 60825-1 [IEC, 2007] aplicable a la seguridad de productos láser. Esta norma tiene como objeto proteger a las personas frente a la radiación en el rango de longitudes de onda entre 180 nanómetros y 1 milímetro. Para ello indica las medidas de seguridad exigidas a cada nivel de radiación y define el sistema de clasificación de láseres según el grado de peligro potencial del dispositivo.

El sistema de clasificación definido por esta norma es el siguiente:

Clase 1. Productos láser que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.

Clase 1M. Láseres que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda entre 302,5 y 4000 nanómetros son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa.

Clase 2. Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nanómetros. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo palpebral. Esta reacción puede proporcionar la protección adecuada aunque se usen instrumentos ópticos.

Clase 2M. Láseres que emiten radiación visible. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo palpebral, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usan instrumentos ópticos.

Clase 3R. Láseres que emiten entre 106 y 302,5 nanómetros, cuya visión directa del haz es potencialmente peligrosa pero su riesgo es menor que para los láseres de clase 3B. Necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control del usuario que los aplicables a láseres de clase 3B.

Clase 3B. Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa. La visión de reflexiones difusas es normalmente segura.

Clase 4. Láseres que pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

Bibliografía

ABB (1997). *Stressometer, flatness measurement and control system.* ABB Industrial Systems.

M. Abramowitz y I. A. Stegun (1972). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables.* Dover Publications, Washington D.C.

AISE (1989). *Hot strip mill profile and flatness study, phase II.* Association of Iron and Steel Engineers.

H. Akima (1978). A Method of Bivariate Interpolation and Smooth Surface Fitting for Irregularly Distributed Data Points. *ACM Transactions on Mathematical Software*, **4**(2):págs. 148–159.

A. Alexandrescu (2001). *Modern C++ Design. Generic Programming and Design Patterns Applied.* Addison Wesley, Upper Saddle River, Nueva Jersey.

ANSI/ASME (1994). *ANSI/ASME Y14.5M, Release 2004: Dimensioning and tolerancing.* American National Standards Institute and American Society of Mechanical Engineers.

ASTM (2005). *ASTM A1030/1030M-05: Standard practice for measuring characteristics of steel sheet products.* American Society for Testing and Meterials.

L. Bachs, J. Cuesta y N. Carles (1988). *Aplicaciones Industriales del Láser.* Marcombo, Barcelona, España.

R. Bajcsy y L. Lieberman (1976). Texture gradient as a depth cue. *Computer Graphics and Image Processing*, **5**(1):págs. 52–67.

Basler (2007). *Basler A500k User's Manual.*

J. Battle, E. Mouaddib y J. Salvi (1998). Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey. *Pattern Recognition*, **31**(7):págs. 963–982.

B. Beal (2001). *Rolling mill metal shape.* The Art of Engineering. Pfeiffer Engineering.

S. Bell (2001). A beginner's guide to uncertainity of measurement. Measurement Good Practice Guide. National Physical Laboratory.

P. J. Besl (1988). Optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications*, **1**(2):págs. 127–152.

F. Blais (2004). Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, **13**:págs. 231–243.

F. Blais y J. A. Beraldin (1997). Calibration of an anamorphic laser based 3-D range sensor. En *Proc. of SPIE Videometrics V*, tomo 3174, págs. 113–122.

D. Blostein y N. Ahuja (1989). Shape from texture: Integrating texture-element extraction and surface estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**(12):págs. 1233–1251.

G. Bradshaw (1999). Non-contact surface geometry measurement techniques. Inf. téc., Image Synthesis Group, Trinity College, Dublin, Irlanda.

M. Brady y A. Yuille (1984). Extremun principle for shape from contour. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **6**(3):págs. 288–301.

J. Börchers (2002). *TopPlan, topmetric flatness measurement.* IMS Messysteme GmbH.

G. C. Buttazzo (1997). *Hard Real-Time Computing Systems. Predictable Scheduling Algorithms and Applications.* Kluwer Academic Pubilshers, Boston, Massachusetts.

S. K. Card, J. D. Mackinlay y B. Shneiderman (1999). *Readings in information visualization. Using vision to think.* Academic Press, San Diego, California.

K. Carr y P. Ferreira (1995). Verification of form tolerances. Part I: Basic issues, flatness and straightness. *Precicion Engineering*, **17**(2):págs. 131–143.

CCT (2007). *Camera Calibration Toolbox for Matlab®*. Jean-Yves Bouguet.

CSM (2005). *StripPLAN. Contactless optical system for strip flatness measurement.* Centro Sviluppo Materiali.

B. P. Douglass (1999). *Doing Hard Time. Developping Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks and Patterns.* Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

R. O. Duda y P. E. Hart (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM*, **15**(1):págs. 11–15.

R. O. Duda y P. E. Hart (1973). *Pattern Classification and Scene Analysis*. John Wiley and Sons, Nueva York.

J. G. Dunham (1986). Optimum uniform piecewise linear approximation of planar curves. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8**(1):págs. 67–75.

O. Faugeras y G. Toscani (1986). Calibration problem for stereo. En *Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, págs. 15–20.

R. B. Fisher y D. K. Naidu (1996). A comparison of algorithms for subpixel peak detection. *Image Technology: Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*.

J. Forest, J. Salvi, E. Cabruja y C. Pous (2004). Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach. En *Proc. of International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004*, págs. 646–649. Cambridge, Reino Unido.

D. A. Forsyth y J. Ponce (2002). *Computer Vision. A Modern Approach*. Prentice Hall, Upper Saddle River, Nueva Jersey.

FOURCC (2008). Video codec and pixel format definitions. Ver `http://www.fourcc.org/`.

M. Galassi y J. Davies (2005). *GNU Scientific Library: Reference Manual*. Network Theory, Bristol.

E. Gamma, R. Helm, R. Johnson y J. Vlissides (1994). *Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison Wesley, Upper Saddle River, Nueva Jersey.

D. F. García, M. García, F. Obeso y V. Fernández (1999). Real-time flatness inspection system for steel strip production lines. *Real-Time Imaging, Academic Press*, **5**:págs. 35–47.

D. F. García, R. Usamentiaga, I. Marín, J. A. González y N. de Abajo (2001*a*). Shape inspection system with real-time adaptation to the luminance of the objects. En *Proc. of SPIE Machine Vision Applications in Industrial Inspection*, págs. 207–218. San José, California.

D. F. García, R. Usamentiaga, I. Marín, J. A. González y F. Obeso (2001*b*). Real-time infrared imaging computer vision system for the steel industry. En *Proc. of IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, págs. 101–106. Marbella, España.

D. F. García, M. García, F. Obeso y V. Fernández (2002). Flatness measurement system based on a non-linear optical triangulation technique. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **51**:págs. 188–195.

D. F. García, C. López, D. González y R. Usamentiaga (2003). Visualization of the flatness of steel strips during and after their manufacturing. En *Proc. of 3rd IASTED International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*, págs. 843–848. Benalmádena, España.

D. F. Garcia, J. Molleda, F. Gonzalez y R. Usamentiaga (2007). Performance evaluation of compression algorithms for developing and testing industrial imaging systems. En *World Academy of Science, Engineering and Technology*, tomo 23, págs. 71–76.

V. B. Ginzburg (1990). *Geometry of flat rolled products*. Rolling Mill Technology Series, Vol. 2. International Rolling Mill Consultants, Pitsburg, Pensilvania.

R. C. Gonzalez y R. E. Woods (1987). *Digital Image Processing*. Addison Wesley.

K. D. Gremban y C. E. Thorpe (1988). Geometric camera calibration using systems of linear equations. En *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, tomo 1, págs. 562–567.

R. D. Guenther (1990). *Modern Optics*. John Willey and Sons, Nueva York.

S. Gutiérrez y J. L. Marroquín (2004). Robust approach for disparity estimation in stereo vision. *Image and Vision Computing*, **22**(3):págs. 183–195.

E. L. Hall, J. B. K. Tio, C. A. McPherson y F. A. Sadjadi (1982). Measuring curved surfaces for robot vision. *Computer*, **15**(12):págs. 42–54.

R. Hartley y S. B. Kang (2007). Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **29**(8):págs. 1309–1321.

R. I. Hartley y P. Sturm (1997). Triangulation. *Computer Vision and Image Understanding*, **68**(2):págs. 146–157.

K. Haug y G. Pritschow (1998). Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam-tracking in the shipbuilding industry. En *Proc. of IEEE Industrial Electronic Conference*, págs. 1236–1241.

M. E. Heaven (1988). *Ideal flatness sensor requirements*. Hot Strip Mill Profile and Flatness Seminar. Association of Iron and Steel Engineers, Pitsburg, Pensilvania.

J. Heikkila y O. Silven (1997). Four-step camera calibration procedure with implicit image correction. En *Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, págs. 1102–1112.

B. K. P. Horn y M. J. Brooks (1989). *Shape from shading*. MIT Press, Cambridge, Reino Unido.

S. Hoyer (1989). *Precision Optics*. Spindler & Hoyer, Gotinga, Alemania.

IEC (2007). *Safety for Laser Products, Ed. 2.0. International Standard*. International Electrotechnical Commission.

J. Illingworth y J. Kittler (1988). A survey of the Hough transform. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, **44**(1):págs. 87–116.

IRM (1996). *Rometer. Manual de instrucciones*. IRM Group.

ISO (2004). *ISO 1101:2004: Geometrical Product Specification*. International Organizaion for Standarization.

R. Jain (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling*. John Willey and Sons, Nueva York.

R. Jarvis (1993). Range sensing for computer vision. *Advances in Image Communications*, **1**:págs. 17–56.

M. Jelali, U. Müller, A. Wolff y W. Ungerer (2002). Advanced measurement and flatness control for hot strip mills. *La Reveu de Métallurgie*, **6**:págs. 517–523.

J. G. Jiménez (1999). *Visión por computador*. Paraninfo, Madrid, España.

E. Krotkov (1989). *Active computer vision by cooperative focus and stereo*. Springer Verlag, Secaucus, Nueva Jersey.

E. Krotkov, K. Henriksen y R. Kories (1990). Stereo ranging with verging cameras. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **12**(12):págs. 1200–1205.

LEAD (2008). Lead Codecs. Ver `http://www.leadcodecs.com/`.

C. López (2004). *Medición en tiempo real de la forma 3D de bandas de acero con técnicas de visión artificial*. Programa de doctorado Avances en Informática. Departamento de Informática, Universidad de Oviedo, Gijón, España.

J. M. López-Vallés, A. Fernández-Caballero y M. A. Fernández (2006). Conceptos y técnicas de estereovisión por computador. *Inteligencia artificial*, **9**(27):págs. 35–62.

B. Mairy, P. Balthasart y J. Lückers (1988). *Review of the five last applications of the rometer flatness gage and perspectives.* AISE Hot Strip Mill Profile and Flatness Seminar, Pitsburg, Pensilvania.

H. A. Martins, J. R. Birk y R. B. Kelley (1981). Camera models based on data from two calibration planes. *Computer Graphics and Image Processing*, **17**(2):págs. 173–180.

Matrox (2002). *Matrox Meteor-II/Camera Link. Installation and Hardware Reference.*

T. Mattson, B. Sanders y B. Massingill (2004). *Patterns for Parallel Programming.* Addison Wesley Professional.

U. Mueller (2002). *Structure and function. BFI Topometrical Flatness Meter (TopPlan).* BFI Betriebsforschungsinstitut.

R. Nevatia (1982). *Machine perception.* Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey.

OpenCV (2007). *Open Source Computer Vision Library.* Intel.

J. Paakkari (1998). *On-line measurement of large steel plates using moiré topography.* Tesis Doctoral, Universidad de Oulu, Oulu, Finlandia.

T. Pavlidis y S. L. Horowitz (1974). Segmentation of plane curves. *Transactions on Computers*, **100**(23):págs. 860–870.

PEGASUS (2008). Pegasus Imaging Corporation. Ver `http://www.pegasusimaging.com/`.

PULNiX (2000). *Camera Link. Specifications of the Camera Link Interface Standard for Digital Cameras and Frame Grabbers.* PULNiX America, Inc.

U. Ramer (1972). An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. Inf. téc., Department of Electrical Engineering and Computer Science of New York University Bronx.

T. W. Ridler y S. Calvard (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **8**(8):págs. 630–632.

L. G. Roberts (1963). Machine perception of three-dimensional solids. Inf. téc., Lincoln Laboratory of Massachusetts Institute of Technology.

C. Rocchini, P. Cignomi, C. Montani, P. Pingi y R. Scopigno (2001). A low cost 3D scanner based on structured light. *Eurographics*, **20**(3):págs. 299–308.

J. Salvi, X. Armangué y J. Batlle (2002). A comparative review of camera calibration methods with accuracy evaluation. *Pattern Recognition*, **35**(7):págs. 1617–1635.

J. Salvi, J. Pagès y J. Battle (2003). Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*, **37**(4):págs. 827–849.

SHAPELINE (2001). *Shapeflex. Customized non-contact flatness measurement.*

M. Sonka, V. Hlavac y R. Boyle (1993). *Image processing, analysis and machine vision.* Chapman & Hall, Londres, Reino Unido.

G. Spreitzhofer, A. Duemmler, M. Riess y M. Tomasic (2005). SI-FLAT contactless flatness measurement for cold rolling mills and processing lines. *La Reveu de Métallurgie*, **9**:págs. 589–595, vii–xi.

StockerYale (2005). *Lasiris Magnum Laser Instruction Manual.* StockerYale.

R. Y. Tsai (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, **3**(4):págs. 323–344.

UNILUX (2008). Q-EYE video inspection system for mills. Ver `http://www.unilux.com/`.

R. Usamentiaga (2005). *Adquisición, mejora y segmentación de imágenes termográficas en tiempo real.* Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Gijón, España.

R. Usamentiaga, D. F. García, C. López y J. A. González (2005). Algorithms for real-time acquisition and segmentation of a stream of thermographic line scans in industrial environments. *Journal of Imaging Science and Technology*, **49**:págs. 138–153.

R. Usamentiaga, D. F. García, D. González y J. Molleda (2006*a*). Compensation for uneven temperature in flatness control systems for steel strips. En *Proc. of IEEE Industry Applications Society*, págs. 521–527.

R. Usamentiaga, D. F. García, D. González y J. Molleda (2006*b*). Pattern recognition for infrared profiles of steel strips based on fuzzy knowledge. En *Proc. of IEEE Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications.*

R. Usamentiaga, D. F. García, C. López y D. González (2006*c*). A method for assessment of segmentation success considering uncertainty in the edge positions. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, **Article ID 21746**:págs. 1–12.

R. Usamentiaga, J. Molleda y D. F. García (2008). *Pattern Recognition: Techniques, Technology and Applications*, cap. Robust laser stripe extraction in industrial environments, pág. (impresión prevista para octubre de 2008). I-Tech Education and Publishing, Viena, Austria.

D. Vatolin, I. Seleznev y M. Smirnov (2007). Lossless video codecs comparison 2007. Inf. téc., Graphics & Media Lab (Video Group) of Moscow State University.

B. Vodanovic (1996). Structured light tracks seams. *Sensor Review*, **16**(1):págs. 3–3.

J. Weng, T. S. Huang y N. Ahuja (1991). *Motion and structure from image sequences*. Springer-Verlag, Nueva York.

J. Weng, P. Cohen y M. Hemiou (1992). Camera calibration with distortion and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **14**(10):págs. 965–980.

R. White y D. A. Forsyth (2006). Combinig cues: shape from shading and texture. En *Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, págs. 1809–1816.

T. Y. Young y K. S. Fu (1986). *Handbook of pattern recognition and image analysis*. Academic Press, Nueva York.

R. Zhang, P. S. Tsai, J. E. Cryer y M. Shah (1999). Shape from shading: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **21**(8):págs. 690–706.

Z. Zhang (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **22**(11):págs. 1330–1334.