



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Estudi i desenvolupament de sensors òptics ultra-ràpids per a metrologia tridimensional de superfícies

Pol Martínez Marín

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

SENSOFAR

Tesi Doctoral

ESTUDI I DESENVOLUPAMENT DE SENSORS ÒPTICS ULTRA-RÀPIDS PER A METROLOGIA TRIDIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES

Doctorand: Pol Martínez Marin

Codirector: Roger Artigas Pursals (UPC)

Codirector: Carlos Bermudez Porras (Sensofar)

Programa de Doctorat en Enginyeria Òptica

Facultat d'Òptica i Optometria de Terrassa

Terrassa, 12 de desembre de 2022

Tesi presentada per obtenir el títol de Doctor per la

Universitat Politècnica de Catalunya

RESUM

La metrologia tridimensional de superfícies proporciona informació crucial en alguns processos de qualitat. Per aquest motiu, la indústria requereix mesures més ràpides amb sensors més petits. S'ha dissenyat i fabricat un perfilòmetre òptic ultra-ràpid que permet mesurar amb interferometria de llum blanca (CSI), confocal (ICM) i variació de focus (FV). Per tal de reduir costos i dimensions del sistema, s'ha substituït el *microdisplay*, un dels components crítics, per un patró de crom en vidre que ha comportat adaptar els algorismes i tècniques de mesura. D'altra banda, s'ha dissenyat un altre prototip basat en *Complementary Kernel Matching* (CKM), una tècnica *single shot* en la que només es requereix l'adquisició d'una sola imatge. S'ha desenvolupat un nou sistema de calibració i un algoritme més robust per a la detecció de les alçades.

Paraules clau: microscòpia, metrologia òptica, processat d'imatges

ABSTRACT

Three-dimensional surface metrology provides crucial information in industrial quality processes. Due to this reason, industry requires faster measurements with smaller sensors. An ultra-fast optical profiler that allows to measure with white light interferometry (CSI), confocal (ICM) and focus variation (FV) has been designed and manufactured. To reduce costs and the spatial dimensions of the system, the microdisplay has been replaced by a chrome-on-glass pattern. This led to an adaptation of algorithms and measuring techniques. Additionally, another prototype has been designed, based on Complementary Kernel Matching (CKM), a single shot technique. The new system includes a new calibration method and a more robust algorithm for 3D surface metrology.

Keywords: microscopy, optical metrology, image processing

AGRAÏMENTS

M'agradaria poder agrair a totes les persones que han fet possible el desenvolupament, i sobretot, finalització d'aquesta Tesi Doctoral. Sense la seva ajuda, suport i/o ànims hagués estat gairebé impossible acabar.

Vull començar per la meva família, la Núria, el Toni i l'Aleix. Gràcies per fer créixer en mi l'interès per aprendre ja des de ben petit, per creure en mi incondicionalment i per animar-me a esdevenir la millor versió de mi mateix.

Als meus amics Dani, Laura, Paula i Andrea, per ser un refugi on desconnectar, on sempre trobar unes rialles que pugin els ànims en moments d'estrès. A la Laia i Gemma, per aquesta amistat tan fàcil i gratificant.

Als meus companys de R+D de Sensofar. Amb vosaltres és fàcil entendre la definició de treball en equip. A la Lena i Narcís, per tots els ànims rebuts.

Al Guillem Carles, per la col·laboració que ha permès engegar una part fonamental d'aquesta tesi.

Agraeixo enormement al meu codirector de tesi Carlos Bermúdez, per tots els consells compartits i per la predisposició que sempre has mostrat per ajudar, amb paciència i dedicació.

Vull acabar els meus agraïments amb el director de tesi Roger Artigas, el responsable, sense cap mena de dubte, que presenti aquesta tesi en Enginyeria Òptica. T'agraeixo de tot cor tota la formació rebuda en aquests últims 6 anys, la motivació, il·lusió i passió que transmits quan parles sobre òptica. Aprecio immensament la teva valoració optimista sobre els resultats obtinguts. És motivador veure com sempre creus en les portes que s'obren enlloc de frenar-te per totes les limitacions que existeixen.

ÍNDEX

LLISTAT DE FIGURES	vii
LLISTAT DE TAULES	xiii
1. Introducció	1
1.1. Metrologia superficial en entorns industrials	1
1.2. Objectius	3
2. Estat de l'art	5
2.1. Tècniques clàssiques	5
2.1.1. Interferometria de llum blanca	6
2.1.2. Confocal.....	8
2.1.3. Projectió de franges	10
2.2. Tècniques d'una sola imatge.....	14
2.2.1. Confocal cromàtic.....	14
2.2.2. Codificació del front d'ona	15
2.2.3. Holografia	17
2.3. Sistemes d'escombrada sense components amb moviment mecànic	21
2.3.1. Microscòpia de fase quantitativa	21
2.3.2. Escaneig espectral de llum blanca.....	22
3. Sensor ultra-ràpid basat en tècniques clàssiques	25
3.1. Disseny opto-mecànic	25
3.1.1. Disseny òptic	26
3.1.2. Disseny mecànic.....	37
3.1.3. Accionament	43
3.2. Interferometria de llum blanca	59
3.2.1. Perfils de moviment	64
3.3. Il·luminació estructurada	82
3.3.1. Texturització artificial.....	82
3.3.2. AiFV en un microscopi confocal	85
3.3.3. Seccionat òptic	91
3.3.4. Recuperació de les altes freqüències	98
3.3.5. HiLo en el prototip.....	106
4. Tècnica de mesura single-shot	111
4.1. Complementary Kernel Matching	115
4.2. Disseny i prototip	120

4.3.	Calibració.....	127
4.3.1.	Caracterització de les PSFs	127
4.3.2.	Calibració geomètrica.....	127
4.3.3.	Checkerboard	128
4.3.4.	Matriu de <i>pinholes</i>	132
4.4.	Reconstrucció topogràfica.....	138
4.4.1.	Algoritme “coarse to fine”	139
4.5.	Resultats.....	142
4.6.	Optimització computacional	146
4.7.	Futur treball.....	148
5.	Conclusions	149
5.1.	Conclusions	149
5.2.	Propostes futures	151
5.3.	Publicacions.....	152
5.3.1.	Publicacions en revistes científiques.....	152
5.3.2.	Presentacions orals en congressos.....	152
5.3.3.	Pòsters.....	152
5.3.4.	Publicacions fora de l'àmbit de la tesi doctoral	153
6.	Referències.....	155

LLISTAT DE FIGURES

Figura 2.1. Diagrama de les tècniques de metrologia òptiques analitzades. i	5
Figura 2.2. Configuració bàsica d'un interferòmetre de llum blanca. En aquest cas el divisor de feix està dins de l'objectiu, que també inclou el mirall de referència (objectiu tipus Mirau) [2].	6
Figura 2.3. Senyal interferomètric [1]. La suma de les franges per a longituds d'ona individuals ocasiona unes franges de llum blanca modulades en amplitud.	7
Figura 2.4. Configuració bàsica d'un microscopi confocal [6]. Una font de llum il·lumina la mostra a través del pinhole d'il·luminació, que reflecteix la llum cap al detector, on ha de travessar el pinhole de detecció. Si la mostra està en focus (esquerra) el detector rebrà molta intensitat, mentre que si la mostra està fora de focus (dreta) la intensitat de llum que es detectarà serà mínima.	9
Figura 2.5. Imatges confocals resultants de l'escaneig en l'eix òptic [6].	9
Figura 2.6. Resposta axial confocal per a un píxel qualsevol (a). Reconstrucció tridimensional de la superfície a partir les imatges confocals de la Figura 2.5 (b).	10
Figura 2.7. Diferents seqüències de patrons utilitzats per a projecció de franges: Codi binari (a), codi Gray (b), patrons de nivells de gris (c) i phase shift (d).	12
Figura 2.8. Esquema d'un objectiu cromàtic. Les diferents longituds d'ona s'enfoquen a diferents punts. 1 i 2 marquen les distàncies mínimes i màximes de treball, mentre que 3 indica el rang que es podrà enfocar.	14
Figura 2.9. Projecció d'una escena a través d'una lent en diferents plans. Sobre de cada imatge es mostra la PSF corresponent al pla en què s'avalua la imatge.	16
Figura 2.10. Projecció d'una escena en diferents plans a través d'un sistema òptic que incorpora una placa de fase bicúbica. Sobre de cada imatge es mostra la PSF corresponent al pla en què s'avalua la imatge.	16
Figura 2.11. Configuracions bàsiques de DHM [10] en mode de reflexió (a) i de transmissió (b). BS, divisor de feix; M1 i M2 miralls; OPR, retardador de camí òptic; C, lent col·limadora; MO, objectiu de microscopi; R, ona de referència i O ona de l'objecte.	18
Figura 2.12. Enfocament digital de l'objecte a través de la direcció de propagació [10].	19
Figura 2.13. Placa de fase polaritzant amb el detector de la càmera [11].	21
Figura 2.14. Configuració bàsica d'un interferòmetre espectral amb escaneig de longitud d'ona amb una font de llum ajustable.	22
Figura 3.1. Disseny òptic de: lent de Petzval (a), lent Tessar (b) i un doble Gauss (c). Font:www.pencilofrays.com.	26
Figura 3.2. Disseny òptic de la branca d'observació. Com a objectiu s'ha simulat una lent paraxial. Els diferents raigs representen diferents punts de la imatge: blau: punt central; verd: 1.5 mm, vermell: 3.93 mm (límit físic de la càmera), groc: 4.5 mm.	28
Figura 3.3. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts de la imatge. Tots estan limitats per difracció.	29
Figura 3.4. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts de camp i diverses longituds d'ona. Les longituds d'ona corresponents al blau, verd i vermell són 486 nm, 525 nm i 656 nm, respectivament.	30
Figura 3.5. Diagrama de Seidel per al sistema de branca d'observació.	31
Figura 3.6. Curvatura de camp i distorsió de la branca d'observació.	32
Figura 3.7. Graella de distorsió del sistema. Està amplificada 20 vegades per una visualització més intuïtiva.	33

Figura 3.8. MTF del sistema òptic.	33
Figura 3.9. Branca d'il·luminació cap a la mostra.....	35
Figura 3.10. Vinyetatge del sistema òptic.	36
Figura 3.11. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts del camp per a una longitud d'ona de 525 nm.	36
Figura 3.12. MTF de la branca de projecció.	37
Figura 3.13. Esquema dels components òptics necessaris en el prototip en la branca d'il·luminació estructurada i la branca d'observació (esquerra) i la seva secció frontal (dreta).38	
Figura 3.14. Vista 3D de les branques d'il·luminació (esquerra) i secció vista des de dalt (dreta).	38
Figura 3.15. Vista 3D de la banyera dels cubs BS, miralls i patró CB (esquerra) i la seva secció vista des de dalt (dreta).	39
Figura 3.16. Vista 3D (des de baix) de les peces que subjecten els LEDs (sense transparència) i les lents col·limadores (amb transparència). S'ha afegit la càmera per a tenir una idea de la seva posició.	40
Figura 3.17. Vista 3D de la lent de camp (esquerra) i una secció frontal (dreta).	40
Figura 3.18. Vista 3D de l'assemblatge final.....	41
Figura 3.19. Secció frontal (esquerra) i lateral (dreta) de la Figura 3.18.	42
Figura 3.20. Dimensions físiques (en mm) del sensor complet.	42
Figura 3.21. Esquema bàsic del funcionament dels motors basats en la força de Lorentz. Si les bobines estan activades, generaran una força magnètica, i per tant, un camp magnètic, que dependrà de la polaritat del corrent aplicat a la bobina. L'imant fixe intentarà alinear-se amb el camp magnètic exterior, produint un moviment. Font: www.renesas.com	43
Figura 3.22. Funcionament simplificat d'un motor de passos. Font: www.amci.com	44
Figura 3.23. Esquema d'un sistema piezowalk. En el primer pas hi ha part del transductor piezoelèctric que fa contacte amb la guia, mentre que en el segon pas es flexiona per tal de produir un desplaçament lateral. Posteriorment s'intercanviarien les parts que s'adhereixen a la guia per repetir el pas 1 i 2 consecutivament. Font: www.physikinstrumente.com	45
Figura 3.24. Rodets creuats. Font: www.ikont.co.jp	46
Figura 3.25. Guia amb patí de boles recirculants. Font: www.nskbearingcatalogue.com	46
Figura 3.26. Codificador òptic sinusoidal. Font: www.renishaw.com	47
Figura 3.27. Suruga Seiki (esquerra), DoverMotion (centre) i NanoMotion (dreta).....	48
Figura 3.28. Muntatge experimental del làser interferomètric per a la caracterització dels motors.	49
Figura 3.29. Error de linealitat per a (a) Suruga Seiki (motor de passos), (b) Dover Motion (motor lineal), (c) Nano Motion (actuador piezoelèctric)	50
Figura 3.30. Comparativa d'errors de linealitat a velocitats alta i baixa. (a) Suruga Seiki, (b) Dover Motion, (c) Nano Motion.	52
Figura 3.31. Suruga Seiki. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error.....	53
Figura 3.32. DoverMotion. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error.....	54
Figura 3.33. NanoMotion. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error.....	54
Figura 3.34. Repetibilitat del motor Suruga Seiki a l'hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 µm, (c) 10 µm i (d) 100 µm.	55
Figura 3.35. Repetibilitat del motor DoverMotion a l'hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 µm, (c) 10 µm i (d) 100 µm.	56

Figura 3.36. Repetibilitat del motor NanoMotion a l'hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 μm , (c) 10 μm i (d) 100 μm	56
Figura 3.37. Temps de resposta d'un graó.....	57
Figura 3.38. Parts superiors dels graons. (a) Suruga Seiki; (b) DoverMotion; (c) NanoMotion ...	58
Figura 3.39. Parts inferiors dels graons. (a) Suruga Seiki; (b) DoverMotion; (c) NanoMotion ...	58
Figura 3.40. La longitud de coherència d'un interferograma depèn de l'espectre de la font de llum. Esquerra: Espectres de diferents fonts de llum: llum blanca, un LED, un filtre interferencial i un làser. Els interferogrames que generen a la dreta.....	65
Figura 3.41. Correlogrames obtinguts segons la font de llum utilitzada. S'ha representat també l'interferograma que s'obtindria si el sistema s'hagués mogut a 15 vegades la seva velocitat òptima.....	66
Figura 3.42. Perfils de moviment estudiats (a). Els correlogrames obtinguts (b) si la mostra està situada a l'inici de l'escombrat (5 μm) o a la part central (500 μm) del recorregut complet. ...	68
Figura 3.43. Esquema d'un objectiu interferomètric de tipus Mirau. El divisor de feix és una làmina i el mirall de referència està situat al centre de l'eix òptic.....	69
Figura 3.44. Interferències a través de focus per a diverses longituds d'ona, corresponents al blau (450 nm), verd (550 nm) i vermell (650 nm), segons si es negligeix la dispersió cromàtica (a) o no (b).....	70
Figura 3.45. Imatges simulades d'un mirall inclinat segons com s'ha generat l'interferograma: (a) interferència monocromàtica modulada per una gaussiana, (b) interferència espectral negligint dispersió cromàtica i (c) interferència espectral incloent dispersió cromàtica.....	71
Figura 3.46. Interferograma (negre) i envoltant calculada (vermell) de la simulació de la Figura 3.45.....	72
Figura 3.47. Diferències topogràfiques d'un mirall inclinat entre simular mitjançant la modulació exponencial i la suma multiespectral sense dispersió cromàtica (a) i modulació gaussiana i suma multiespectral sense dispersió (b).....	74
Figura 3.48. Comparació entre l'interferograma simulat i l'obtingut experimentalment.....	75
Figura 3.49. Simulació d'un mirall inclinat. Es mostra l'error de precisió de la mostra en funció de la posició de la mostra en el rang de mesura segons si es fa servir un perfil de moviment lineal (a) o bé sinusoidal (b).....	76
Figura 3.50. Error de precisió en simular la mesura de l'alçada d'un graó segons la posició de la mostra en un escombrat d'1 mm, amb un perfil de moviment lineal (superior) o sinusoidal (inferior).....	78
Figura 3.51. Error en la mesura experimental d'un graó en funció de la posició de la mostra dins del rang d'escombrat.....	79
Figura 3.52. Error de precisió en la mesura de l'alçada d'un graó en diferents posicions d'un perfil de moviment sinusoidal. L'amplitud de la sinusoide és de 250 μm	80
Figura 3.53. Error RMS de l'error de precisió en la mesura de l'alçada d'un graó, mesurant el graó a diferents posicions del moviment sinusoidal.....	81
Figura 3.54. Imatge de camp clar en l'espècimen de rugositat AIR-B40 del NPL (esquerra), imatge de seccionat òptic per a un pla mitjançant l'operador SML amb una finestra de 5x5 píxels (centre) i la topografia 3D resultant de tota la mesura (dreta).....	84
Figura 3.55. Mateixa mostra i condicions de mesura que en la FIGX, però amb una textura artificial sobre-imposada.....	84
Figura 3.56. Esquema òptic d'un microscopi confocal de microdisplay compatible amb AiFV..	85

Figura 3.57. Seccionat òptic utilitzant AiFV (esquerra) i confocal (dreta) obtinguda amb un objectiu 20X 0.45 NA. Per a cada tècnica també es mostra la topografia 3D de la mesura.....	86
Figura 3.58. Perfil 2D de l'espècimen de rugositat PRN-3 de Mahr mesurat amb confocal (superior) i AiFV (inferior). Mesures fetes amb un objectiu 20X 0.45NA.	87
Figura 3.59. Topografia de l'espècimen ARS-c3 amb confocal (a) i AiFV (b).....	88
Figura 3.60. Rugositat (Sa) i longitud d'autocorrelació (Sal) per a diferents magnificacions. En negre els valors de les mesures confocals i en vermell els valors de les mesures AiFV.	88
Figura 3.61. Siemens Star mesurat amb un 20X 0.45NA amb confocal (a) i AiFV (b), i amb un 50X 0.8NA amb confocal (c) i AiFV (d).....	89
Figura 3.62. Resolució lateral per a diferents magnificacions. Negre: confocal; vermell: AiFV; blau: la meitat del límit de difracció.	90
Figura 3.63. MEMS mesura amb l'objectiu 20X 0.45NA amb confocal (a), AiFV (b) i FV convencional (c).	90
Figura 3.64. MEMS mesurat amb l'objectiu 50X 0.8NA amb confocal (esquerra) i AiFV (dreta).	91
Figura 3.65. Funció de fase espiral pura en l'espai de freqüències espacials: part real (a) i part imaginària (b). L'escala és de -1 a 1.....	93
Figura 3.66. Diagrama del mètode de dues imatges per al seccionat òptic.	94
Figura 3.67. Diagrama del mètode d'una imatge per al seccionat òptic.	94
Figura 3.68. Imatge de seccionat òptic sobre l'espècimen AIR-B40, amb el mètode de dues imatges (a), una imatge (b) i AiFV (c).	95
Figura 3.69. Topografia de l'AIR-B40 mesurat amb el mètode de dues imatges (a), una imatge (b) i AiFV (c).....	96
Figura 3.70. Imatge de seccionat òptic del Siemens Star obtinguda amb confocal (a), amb el mètode de dues imatges (b) i el mètode una imatge (c).	96
Figura 3.71. Topografia del Siemens Star mesurada amb confocal (a), el mètode de dues imatges (b) i el mètode d'una imatge (c).....	97
Figura 3.72. Perfil del Siemens Star. De vall a vall (esquerra) i de pic a pic (dreta).	97
Figura 3.73. Imatges de l'AIR-B40: uniforme (a), estructurada (b) i sostracció de les anteriors (c).	99
Figura 3.74. Imatge de contrast: DQ (a), FV (b) i SPQT (c).	99
Figura 3.75. Imatge de contrast amb l'algoritme FV (a) i amb l'aplicació del blur (b).	100
Figura 3.76. Reconstrucció HiLo (a) i mètode de multiplicació (b).	100
Figura 3.77. (a) Imatge uniforme, (b) imatge estructurada, (c) imatge sostracció, (d) imatge de contrast (FV), (e) mètode de multiplicació, (f) mètode HiLo.	101
Figura 3.78. Diagrama per recuperar la imatge de seccionat òptic amb altes freqüències.....	101
Figura 3.79. Soroll per a un objectiu 10X 0.3NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.....	102
Figura 3.80 Soroll per a un objectiu 20X 0.45NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.....	102
Figura 3.81. Soroll per a un objectiu 50X 0.8NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.....	103
Figura 3.82. Zoom de 300 µm x 300 µm de l'AIR-B40 mesurat amb HiLo amb FV (a), confocal (b) i AiFV (c).....	104
Figura 3.83. Sq mesurat en l'AIR-B40. La línia discontinua representa el confocal de referència, mentre que el la línia de punts representa AiFV.....	104

Figura 3.84. Àrea central del Siemens Star mesurat amb confocal (esquerra) i FV (dreta) amb diferents <i>blurs</i> d'esquerra a dreta $\sigma = 3, 6, 12, 24$ pixels.	105
Figura 3.85. Resolució lateral en el Siemens Star. La línia discontinua representa el valor confocal.	105
Figura 3.86. Resolució lateral en el Siemens Star ponderant amb diferents pesos la imatge de contrast i la imatge de seccionat òptic.	106
Figura 3.87. Imatge amb un microdisplay. Imatge estructurada (a), uniforme (b) i sostracció entre elles(c).	107
Figura 3.88. Imatge amb un sistema de doble branca d'il·luminació. Imatge estructurada (a), uniforme (b) i sostracció entre elles(c).	107
Figura 3.89. Mostra de texturitzat laser.	108
Figura 3.90. Filtre òptic.	108
Figura 3.91. Disc de polir.	109
Figura 4.1. Imatges de la PSF a través de focus amb diferents sistemes òptics. (a) PSF convencional (discs d'Airy), (b) PSF doble hèlix, (c) PSF tetràpode, (d) paral·laxi.	114
Figura 4.2. Imatges simulades de PSF per a un sistema de 0.3NA, sense placa de fase amb un desenfocament de (a) $z = 30 \mu\text{m}$ i (b) $z = 0 \mu\text{m}$, i amb placa de fase bicúbica de $\alpha = 4$ i desenfocaments equivalents a (c) $z = 30 \mu\text{m}$ i (d) $z = 0 \mu\text{m}$	115
Figura 4.3. (a) PSF mesurada experimentalment. (b) Superposició de la PSF del sistema en diferents plans axials.	116
Figura 4.4. Desplaçament lateral de la PSF a través de focus per una càmera i per una altra.	117
Figura 4.5. Desplaçament relatiu entre les dues imatges en funció de la posició axial.	117
Figura 4.6. Diagrama de la tècnica CKM.	118
Figura 4.7. Superposició de la imatge d'una càmera (color verd) amb l'altra càmera (magenta) deconvolucionades per la PSF corresponent a $z = -50 \mu\text{m}$ (a), $z = -11 \mu\text{m}$ (b), $z = 9 \mu\text{m}$ (c) i $z = 37 \mu\text{m}$. Quan el nucli deconvolucionador correspon al pla en què es troba el píxel (o regió), la superposició de verd i magenta resulta en blanc. En el cas contrari hi ha un desplaçament lateral relatiu entre les dues imatges i es diferencien els colors de la regió.	119
Figura 4.8. PSF simulada a una posició de l'objecte de $+50 \mu\text{m}$ respecte a la posició de focus amb cada una de les càmeres respecte quan l'objectiu té una apertura numèrica de 0.3. Les intensitats estan normalitzades per a cada imatge.	121
Figura 4.9. PSF simulada a una posició de l'objecte de $+50 \mu\text{m}$ respecte a la posició de focus amb cada càmera quan l'objectiu té una apertura numèrica de 0.45. Les intensitats estan normalitzades.	121
Figura 4.10. PSF a la posició $+50 \mu\text{m}$ amb una potència de la placa de fase de $\alpha = 3$ (a), $\alpha = 4$ (b) i $\alpha = 7$ (c), respectivament.	122
Figura 4.11. Exemple de projecció de raigs en un sistema telecèntric a l'objecte (esquerra) i un sistema convencional (dreta). Font: www.opto-e.com	123
Figura 4.12. Diagrama d'un sistema telecèntric a l'objecte. Es pot veure que els raigs principals de cada punt de l'objecte són paral·lels a l'eix òtic fins que arriben a la primera lent. Font: www.edmundoptics.com	123
Figura 4.13. Diagrama d'un sistema telecèntric a la imatge. Els diferents punts de l'objecte tindran la mateixa alçada en el pla de la imatge, independentment de la posició axial del sensor. Font: www.edmundoptics.com	124
Figura 4.14. Esquema dels elements del prototip i muntatge experimental del prototip.	125

Figura 4.15. Imatge amb un SEM d'un <i>pinhole</i> fabricat amb FIB. Com es pot apreciar en els perfils, el diàmetre del <i>pinhole</i> és inferior a 1 μm	126
Figura 4.16. Sèrie de PSFs adquirides a través de focus per a una càmera.	128
Figura 4.17. Imatges de CB adquirides a través de focus per a una càmera.	129
Figura 4.18. Deconvolució de la imatge del CB per la PSF corresponent al mateix pla de desenfocament.	129
Figura 4.19. Detecció de les cantonades per la càmera A (esquerra) i per la càmera B (dreta). Els punts verds i vermells representen les cantonades detectades de les càmeres A i B, respectivament.	129
Figura 4.20. Diferència mitja entre el punt de la imatge i el punt corregit.....	130
Figura 4.21. Detecció de la posició (x) d'una cantonada en funció del pla axial. Les diferents línies representen diferents punts.	131
Figura 4.22. Diferència entre la posició (coordenada x) de la cantonada i la posició amb la distorsió corregida.	131
Figura 4.23. Imatge de la matriu de <i>pinholes</i> per a un pla, i el zoom de la PSF del centre de la imatge. La imatge està corregida amb un factor gamma per a efectes de visualització.	132
Figura 4.24. Imatge de la matriu de <i>pinholes</i> obtinguda amb un SEM.	133
Figura 4.25. Zoom de la matriu de <i>pinholes</i>	134
Figura 4.26. Matriu de <i>pinholes</i> amb placa de fase deconvolucionats per la PSF.	135
Figura 4.27. Posició de cada <i>pinhole</i> a través de focus. Per a representar la posició de cada <i>pinhole</i> s'ha restat la posició absoluta del <i>pinhole</i> en qüestió en el pla $z = 0$. Cada <i>pinhole</i> és representat per una recta diferent, on cada punt de la recta representa la posició relativa del <i>pinhole</i> en cada pla respecte al pla $z = 0$	137
Figura 4.28. Imatge de focus infinit de la mostra (a). Zoom de la regió marcada amb (b) i sense (c) correcció del desplaçament lateral degut a la no-telecentricitat del sistema.....	137
Figura 4.29. Mostra rugosa inclinada (a), on l'alçada de cada píxel és el mínim de la resposta axial (b). La mateixa mostra mesurada amb confocal (c).....	139
Figura 4.30. Respostes axials per a diversos píxels per a diferents valors de σ . Les línies verticals representen diferents criteris a l'hora d'estimar l'alçada del píxels segons els mínims corresponents a la resposta axial de cada σ : el mínim dels mínims, la mitjana dels mínims, a la mediana dels mínims o l'algoritme coarse-to-fine.	140
Figura 4.31. Reconstrucció topogràfica d'una mostra rugosa utilitzant (a) $\sigma = 3$, (b) $\sigma = 15$, (c) l'algoritme coarse-to-fine.	141
Figura 4.32. Imatge capturada de la mostra per una de les dues càmeres (a), imatge de la reflexió interna de la placa de fase (b), i sostracció de les dues (c).	141
Figura 4.33. (a) Esquema d'una moneda de 10 cèntims d'euro. En vermell estan marcades les regions mesurades: (b, e) Escòcia, (c, f) una estrella i (d, g) Itàlia mitjançant les tècniques de CKM i confocal, respectivament. NMP = punts no mesurats (non-measured points).	142
Figura 4.34. Mesura d'un 0 del revers de la moneda amb confocal (a) i CKM (b). La mesura de (b) s'ha repetit desplaçant la mostra en z 10 μm (c), 20 μm (d) i 30 μm (e). La línia vermella de les topografies marca el perfil central del promig de 49 perfils de cada topografia, representats en (f).	144

LLISTAT DE TAULES

Taula 3.1. Característiques tècniques de dues càmeres candidates.....	26
Taula 3.2. Informació tècnica de les òptiques que conformen la lent de camp. El número de superfície correspon amb el disseny òptic de la Figura 3.2.	28
Taula 3.3. Característiques tècniques dels diferents motors.....	48
Taula 3.4. Recull dels algorismes de PSI més utilitzats. B = Bé. MB = Molt bé. Les caselles buides indiquen que l'algoritme és força sensible a l'efecte de la columna.	60
Taula 3.5. Paràmetres de rugositat de l'espècimen del NPL AIR-B40.....	86
Taula 3.6. Taula comparativa entre diferents magnificacions del període del patró projectat, la mida de la finestra d'avaluació en el pla de l'objecte i el límit de difracció segons el criteri de Rayleigh	87
Taula 3.7. Soroll mesurat en un mirall pla.	95
Taula 3.8. Paràmetres de rugositat segons la ISO-25178 de l'espècimen AIR-B40.....	96
Taula 3.9. Llista de paràmetres i valors estudiats.	102

1. INTRODUCCIÓ

Aquesta tesi doctoral està enfocada en l'estudi d'un conjunt de mètodes de mesura tridimensional de superfícies basats en tècniques òptiques . Aquestes tècniques s'han aplicat a prototips desenvolupats en el transcurs d'aquesta tesi, amb la intenció que acabin evolucionant a productes comercials a curt i mig termini.

El projecte s'emmarca en l'entorn de Doctorat Industrial, amb una col·laboració entre el centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes (CD6) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i l'empresa Sensofar-Tech, S.L, una *spin-off* del CD6 de l'any 2001.

1.1. Metrologia superficial en entorns industrials

La mesura tridimensional de forma i rugositat de textura d'una superfície permet proporcionar informació sobre les propietats d'un objecte a partir d'un conjunt de paràmetres de superfície. Aquests paràmetres estan definits per normatives internacionals i poden descriure directament el comportament de la funcionalitat de la seva superfície. Alguns exemples poden ser desgast de la peça, permeabilitat, fricció, conductivitat elèctrica, adherència del material, etc. D'aquesta manera, la inspecció dels objectes fabricats proporciona indicadors crucials en una gran varietat de processos de control de qualitat.

El principal benefici d'utilitzar tècniques de mesura òptiques és que la mostra sota inspecció no pateix danys ni desperfectes a l'hora de ser mesurada, tal i com sí pot succeir en els mètodes de contacte. Així, no s'ha de descartar cap de les mostres analitzades i poden ser utilitzades per al fi per al que han estat fabricades. Addicionalment, es poden inspeccionar totes les peces fabricades, enlloc de seleccionar-ne algunes amb aleatorietat i establir models estadístics i probabilístics. Això ocasiona que el procés de fabricació sigui molt més robust i controlat.

En el procés actual d'evolució cap a la indústria 4.0, es necessita mesurar més ràpid amb sensors més petits, per tal de tenir un circuit tancat de fabricació-control de qualitat. El procés de fabricació permet tancar el llaç en "temps real" entre el procés de mesura i el de manufactura. El nombre de peces defectuoses es pot minimitzar, i en última instància, el cost unitari de cadascuna d'elles.

Actualment, a nivell micromètric i nanomètric, les tecnologies més utilitzades són interferometria de llum blanca (CSI, *Coherence Scanning Interferometry*), la microscòpia confocal (ICM, *Imaging Confocal Microscopy*) i variació de focus (FV, *Focus Variation*). Totes aquestes tècniques permeten obtenir una resolució vertical nanomètrica a l'hora de mesurar mostres amb dimensions de desenes o centenars de micres. No obstant, les tres tècniques

requereixen un escombrat a través de l'eix òptic i no són òptimes per a tot tipus de mostres: mentre FV és una tècnica òptima per mesurar mostres molt rugoses fàcilment, no aconsegueix mesurar satisfactòriament mostres òpticament polides. CSI en canvi permet mesurar amb molta precisió mostres polides (amb resolucions sub-nanomètriques), però obté poc senyal al mesurar mostres rugoses. ICM és un bon compromís entre les dues tècniques ja que permet mesurar correctament mostres polides i rugoses, amb l'inconvenient d'haver de realitzar un escombrat lateral, incrementant el temps d'adquisició.

No hi ha una tècnica òptica universal que sigui robusta per a tot tipus de mostres, mantingui bons nivells de resolució vertical alhora que tingui uns temps de mesura relativament curts. Per tant, per a diverses tipologies de mostres calen diferents tecnologies, i per extensió, diferents microscopis, amb el cost i la necessitat d'un espai físic addicional que comporten.

1.2. Objectius

L'objectiu general d'aquesta tesi és desenvolupar sistemes òptics ultra-ràpids de metrologia tridimensional de superfícies. Els sistemes desenvolupats han de ser fàcilment integrables en entorns industrials, on aspectes com les dimensions del sensor òptic o el seu pes poden arribar a ser crítics.

Aquesta tesi s'han desenvolupat en dues fases ben diferenciades. La primera correspon a evolucionar un equip comercial ja existent amb tècniques de mesura convencionals (CSI i confocal). Els objectius d'aquesta primera fase són:

- Reducció de les dimensions: el disseny opto-mecànic del sensor ha de ser més petit que l'actual. Aquesta reducció de dimensions disminuirà el pes del sistema, i millorarà les seves dinàmiques.
- Reducció de costos: el disseny ha de ser més econòmic per ser més competitiu. Això implicarà substituir components crítics per d'altres amb un cost menor que puguin realitzar una funció equivalent.
- Noves tècniques de mesura: l'eliminació de certs components crítics implica que les tècniques de mesura s'hauran d'adaptar als nous components. S'estudiarà com modificar les tècniques de mesura per tal que els resultats siguin, com a mínim, equivalents als actuals.
- Nous perfils de moviments: fins ara els capçals òptics basats en escombrats mecànics segueixen els mateixos perfils de moviment (perfils lineals). Emprar altres estratègies de desplaçament vertical pot reduir el temps de posicionat del sensor, augmentant la productivitat de la línia de producció. S'estudiarà com l'aplicació de perfils no-lineals afecten metrològicament a les mesures de les superfícies.

L'objectiu final d'aquesta etapa és desenvolupar un prototip que pugui esdevenir producte comercial amb viabilitat econòmica.

La segona fase consisteix en desenvolupar una tècnica *single-shot* de manera que la mesura només requereixi de l'adquisició d'una única imatge. L'objectiu final d'aquesta fase és demostrar la viabilitat de la tècnica a nivell de prova de concepte en què el prototip que s'haurà muntat, haurà de ser capaç de mesurar mostres amb textura de superfície.

2. ESTAT DE L'ART

Per a la metrologia òptica de peces petites en camps de visió inferiors a 1 mm, es poden utilitzar diferents tècniques de mesura basades en la microscòpia. Classificarem les tècniques en tres categories: tècniques clàssiques, tècniques d'una sola imatge i sistemes d'escombrada que no utilitzen components amb moviment mecànic.

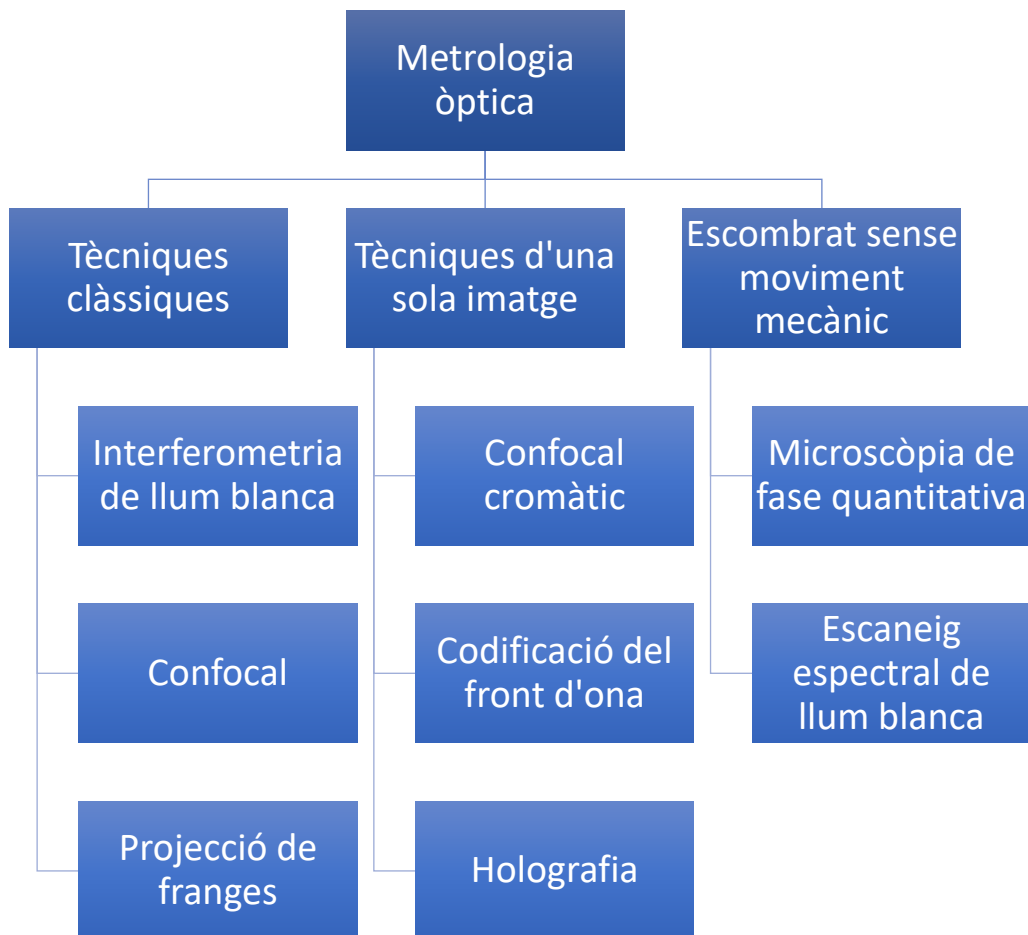


Figura 2.1. Diagrama de les tècniques de metrologia òptiques analitzades.

2.1. Tècniques clàssiques

En aquesta categoria hi ha un gran ventall de diferents tecnologies que s'han anat desenvolupant en les darreres dècades. En aquest projecte de tesi només revisarem tres

tècniques que s'han consolidat àmpliament en molts sectors, des d'implementacions per recerca en entorns acadèmics, com en indústria. Les tecnologies que aquí revisem són interferometria de llum blanca, microscòpia confocal i projecció de franges. D'altres tècniques que val la pena mencionar són variació de focus, interferometria de desplaçament de fase, deflectometria i sistemes d'autofocus.

2.1.1. Interferometria de llum blanca

La interferometria de llum blanca (WLI, *White Light Interferometry*), també té altres nomenclatures equivalents, com CSI (*Coherence Scanning Interferometry*) o bé VSI (*Vertical Scanning Interferometry*), entre d'altres.

La Figura 2.2 mostra la configuració bàsica d'un interferòmetre [1], [2]: consta d'un sistema d'il·luminació, una lent que col·lima la llum a l'infinit fins que arriba a un divisor de feix, que separa la llum en dos feixos: un que anirà cap a la mostra per tornar cap al divisor de feix, mentre que l'altre feix viatjarà fins a reflectir-se a un mirall que actua com a referència i torna al divisor de feix. En el camí de tornada al divisor de feix la lent de camp enfoca els dos feixos fins a la càmera, que actua com a detector. La càmera detecta una interferència deguda a la superposició dels dos feixos. Aquesta configuració fa que cada punt de la mostra es comporti independent dels altres, i com que el sistema de detecció és una càmera no cal un escaneig lateral com amb d'altres sistemes interferomètrics basats en un sol punt de mesura.

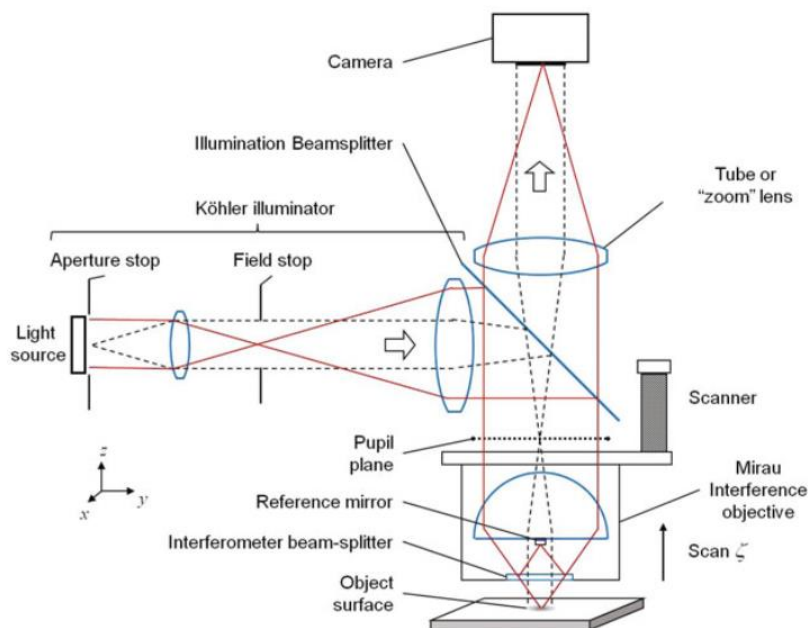


Figura 2.2. Configuració bàsica d'un interferòmetre de llum blanca. En aquest cas el divisor de feix està dins de l'objectiu, que també inclou el mirall de referència (objectiu tipus Mirau) [2].

Per a cada píxel de la càmera, es detecta una intensitat que ve determinada per la interferència dels dos feixos de llum. Si considerem que el feix de referència té un front d'ona determinat per $W_r(x) = e^{i(\frac{2\pi}{\lambda}X_r)}$ i que el feix que es reflecteix en la mostra $W_m(x) = e^{i(\frac{2\pi}{\lambda}X_m)}$, on λ és la longitud d'ona, X_r és la distància del mirall al divisor de feix i X_m és la distància de la mostra al divisor de feix. Llavors la intensitat que detecta la càmera és:

$$I = |W_r + W_m|^2 = A + B \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}X + \phi\right) \quad (2.1)$$

on A és el senyal de fons, B el contrast de les franges d'interferència i ϕ és la fase degut a la diferència de camí òptic (OPD, *Optical Path Difference*) entre el feix de referència i el feix de la mostra. Aquesta fase és precisament dues vegades la diferència de recorregut entre els dos camins, h .

$$\phi = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} h \quad (2.2)$$

D'aquesta manera, doncs, hi ha una relació entre la fase i l'alçada. Si mantenim la distància del mirall de referència fixada i variem la distància del feix divisor a la mostra, obtindrem una variació en la interferència. Si fem un escaneig en la direcció de l'eix òptic, que és perpendicular a la mostra, obtindrem per a cada píxel un senyal sinusoidal en el cas que tinguem una font de llum monocromàtica. Aquest senyal periòdic ens impedirà reconèixer en quin punt al llarg de la direcció d'escaneig s'ha produït que la OPD sigui nul·la. En canvi, si la font de llum té un ample de banda gran (llum blanca), per a cada longitud d'ona es produirà aquest senyal sinusoidal amb una freqüència diferent. Com que la càmera només detecta una intensitat integrada de totes les longituds d'ona, el senyal resultant de totes interferències de diferent freqüència causa una modulació en el senyal, degut a que quan la OPD és nul·la, totes les freqüències estan en fase, però a mesura que ens allunyem, no coincideixen els estats de l'oscil·lació, cosa que causa una atenuació del senyal, com mostra la Figura 2.3:

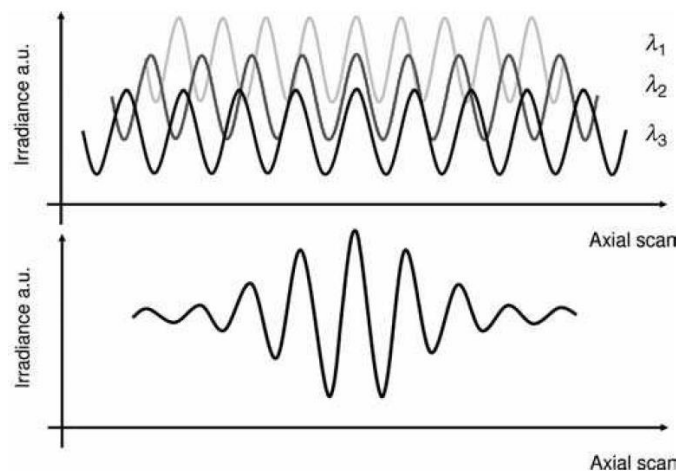


Figura 2.3. Senyal interferomètric [1]. La suma de les franges per a longituds d'ona individuals ocasiona unes franges de llum blanca modulades en amplitud.

Com més ample sigui l'espectre de la font de llum, major serà la modulació de les franges resultants, i per tant, major diferència de contrast en les franges hi haurà entre la zona que té OPD nul·la i la que no. En última instància l'objectiu de la interferometria de llum blanca és buscar la posició axial del màxim de la modulació de les franges o funció envoltent, que correspon a la posició de millor enfoc i diferència de camí òptic nul·la.

Principalment hi ha tres possibles mètodes per obtenir l'envoltent: per l'anàlisi de la fase, mitjançant la transformada de Hilbert o bé a partir de la transformada de Fourier.

En el cas de l'anàlisi de la fase és necessari una discretització concreta en l'escaneig de l'eix òptic, per a poder aplicar un algoritme de *phase shift* [3], [4]. Sovint es requereix un pas (en fase) entre imatge i imatge de $\pi/2$, tot i que hi ha algoritmes amb altres passos. La modulació de la interferència es calcularà mitjançant el algoritme de *phase shift* utilitzat segons la fórmula:

$$\gamma(z) = \frac{\sqrt{N^2 + D^2}}{\text{normalització}} \quad (2.3)$$

on N i D són el numerador i denominador corresponents a un algoritme de desplaçament de fase.

Cada algoritme té els seus avantatges i deficiències [5] tenint en compte vibracions, no linealitats del motor, etc. Computacionalment és el mètode més eficient ja que es pot anar calculant simultàniament a l'escaneig.

El segon mètode utilitza la propietat de la transformada de Hilbert sobre un senyal unidimensional que desplaça la fase $\pi/2$ respecte el teu senyal original i és independent del senyal de fons.

Per últim, l'envolvent es pot calcular amb tractament del senyal en l'espai de Fourier. En aquest mètode es busca la freqüència dominant, excloent el component DC i es desplaça l'espectre cap al centre per tal que la freqüència dominant ara sigui el component DC. Finalment, s'aplica la transformada de Fourier inversa i el resultat ja és la modulació.

2.1.2. Confocal

La microscòpia confocal [6] és una tècnica que es basa en l'obtenció de seccionat òptic mitjançant la utilització d'elements de filtratge tant en la il·luminació com en la detecció. Aquests elements de filtratge, anomenats *pinhole* (uns forats de dimensions molt petites), estan situats a la sortida de la font de llum i a l'entrada del detector, en plans conjugats. Les posicions i dimensions dels *pinholes* fan que només la llum que està en focus arriba al detector, incrementant la capacitat de seccionat òptic del microscopi.

A la Figura 2.4 es mostra la configuració bàsica d'un microscopi confocal quan està enfocat sobre el pla de la mostra i quan no. Quan la mostra està fora de focus la llum que es concentra al detector es redueix dràsticament, de manera que la intensitat del senyal és baix.

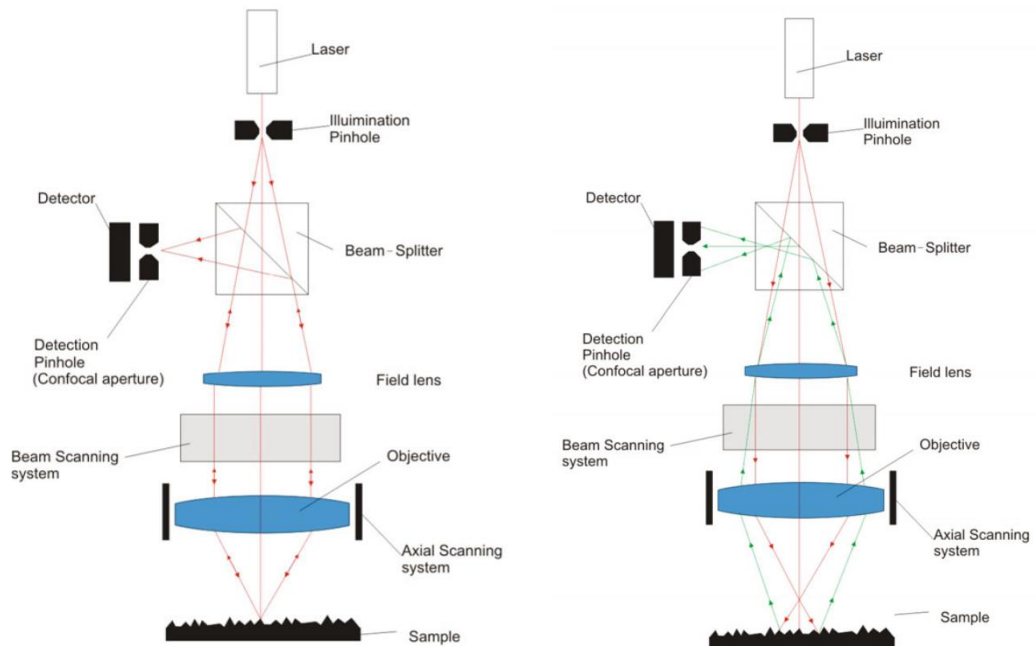


Figura 2.4. Configuració bàsica d'un microscopi confocal [6]. Una font de llum il·lumina la mostra a través del pinhole d'il·luminació, que reflecteix la llum cap al detector, on ha de travessar el pinhole de detecció. Si la mostra està en focus (esquerra) el detector rebrà molta intensitat, mentre que si la mostra està fora de focus (dreta) la intensitat de llum que es detectarà serà mínima.

La presència de *pinholes* converteix aquesta tècnica en puntual, per tant, si es vol obtenir informació d'una superfície s'ha de fer un escaneig lateral per a obtenir el que s'anomena imatge confocal, és a dir, la imatge que conté el seccionat òptic. Aquestes imatges mostren quines zones de la pròpia superfície estan enfocades perquè tenen major intensitat i quines no perquè es veuen fosques.

Per obtenir la informació tridimensional de la superfície cal fer un escaneig a través de l'eix òptic, que ens proporcionarà per a cada píxel una distribució d'intensitat en funció de la distància. Aquesta distribució s'anomena resposta axial i el seu màxim correspon a la zona de millor enfoc.

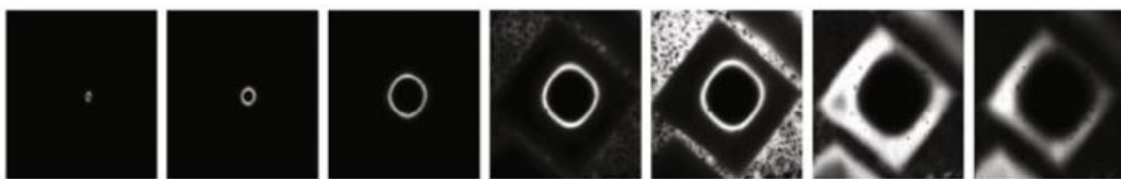


Figura 2.5. Imatges confocals resultants de l'escaneig en l'eix òptic [6].

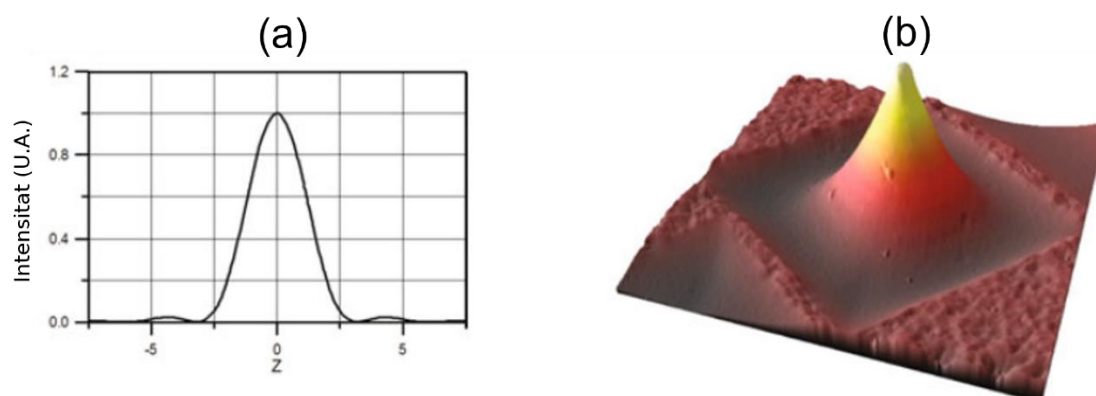


Figura 2.6. Resposta axial confocal per a un píxel qualsevol (a). Reconstrucció tridimensional de la superfície a partir les imatges confocals de la Figura 2.5 (b).

Hi ha tres configuracions diferents per realitzar l'escaneig del pla per a obtenir la imatge confocal:

- **Escombrat làser:** el sistema de detecció de la informació confocal en el pla és un conjunt de miralls que van movent la il·luminació provinent del *pinhole* en les direccions X i Y respectivament. Presenta l'inconvenient que els miralls han de rotar a una freqüència força elevada i provoca un desgast del sistema de moviment dels miralls. Addicionalment, aquest sistema és críticament sensible a l'alineació dels miralls i la sincronització entre ells. El temps per obtenir una imatge confocal pot ser des de 10 segons fins a 0.1 segons en el millor dels casos.
- **Escombrat amb disc rotatori:** per reduir el temps d'escanejat, enlloc de desplaçar la il·luminació d'un sol *pinhole* per tot el pla, aquesta configuració proposa tenir-ne uns quants distribuïts per tot el pla amb un disc (la configuració més habitual és el disc Nipkow) que rota a velocitat constant per evitar problemes afegits d'inèrcia. Presenta una reducció del temps per obtenir la imatge confocal, però l'eficiència lumínica també baixa, ja que s'ha d'il·luminar tot el disc. Només la fracció corresponent de *pinholes* respecte a tota la superfície és la llum que arriba a la mostra. Per compensar aquest inconvenient l'empresa *Yokogawa* (Musashino, Japó) proposa un segon disc que contingui microlents per a concentrar la llum cap als *pinholes* i no tenir tantes pèrdues energètiques. L'inconvenient de les microlents és l'augment significatiu del cost del sistema.
- **Escombrat amb *microdisplay*:** l'element central d'aquesta configuració és el *microdisplay*. La llum de la font emissora es dirigeix cap als píxels del *microdisplay*. En cas que els píxels estiguin activats, la llum es reflecteix i viatja cap a la mostra, en canvi si estan desactivats la llum no es reflecteix. Com que es pot programar l'activació/desactivació dels diferents píxels del *microdisplay*, permet projectar un patró binari sobre la mostra. Aquest patró pot estar format per elements individuals imitant un disc de Nipkow, o bé poden ser esclatxes que malgrat no tenen el mateix seccionat òptic, permeten un escanejat molt més ràpid.

2.1.3. Projectió de franges

La tècnica de projectió de franges es basa en l'ús de llum estructurada [7], nom amb què també es coneix aquesta tècnica. La llum estructurada és un tipus d'il·luminació activa d'uns patrons

bidimensionals sobre la mostra que s'aconsegueix mitjançant un projector o bé estructurant una font de llum convencional amb un modulador espacial de llum.

Com que la càmera observa l'escena amb un angle diferent que el d'il·luminació, si la superfície no és totalment plana, la forma de la superfície origina distorsions en la imatge detectada per la càmera respecte al patró projectat pel sistema d'il·luminació activa, les quals porten informació de les alçades de la peça.

El principi de triangulació permet establir una relació geomètrica entre la il·luminació i l'observació. Per tant, si es calibra el sistema per conèixer els angles d'observació i d'il·luminació, es pot recuperar la informació tridimensional de la superfície comparant els patrons projectats i detectats.

El disseny del patró bidimensional projectat té una afectació molt significativa en la resolució del sistema. Les diferents projeccions de patrons es poden classificar segons si només necessiten un patró per a recuperar la informació tridimensional o bé si es necessita projectar una seqüència.

Les projeccions seqüencials fan servir una sèrie de patrons per a una mateixa mesura, de manera que aquest tipus de projecció no és adequat per a mostres en moviment, ja que el canvi d'informació tridimensional entre un patró i el següent introduirà errors en la mesura. Dins d'aquesta categoria hi ha diferents algorismes:

- *Codi binari*: Projecta una sèrie de patrons de ratlles blanques o negres de mode en què cada regió de la imatge té una única codificació binària. Al tractar-se d'informació binària el sistema és robust a diferents tipus de mostres. La resolució vertical depèn del nombre de codificacions diferents que té l'algorisme. Conseqüentment, N patrons originen 2^N codificacions diferents, però està limitat per la resolució lateral del projector. Al projectar-se diferents patrons, si es desitja una bona resolució vertical, el sistema necessita un número alt de patrons diferents, que incrementa el temps de mesura i el converteix en invàlid per a algunes aplicacions.
- *Codi Gray*: És equivalent al codi binari, però intercala la posició de les fronteres per tal que els mateixos píxels no estiguin sempre a les fronteres de canvi de nivell, ja que en aquests píxels el sistema pot tenir problemes per assignar correctament la binarització degut a la difracció, entre d'altres causes.
- *Patrons de nivells de gris*: Aquest algorisme és equivalent al codi binari, però fa ús de diferents nivells de gris per reduir el nombre de projeccions necessàries per a una mesura. En aquest cas N patrons amb M nivells de gris generen M^N codificacions úniques. Hi ha un compromís entre els nivells de gris a utilitzar i la robustesa, ja que si hi ha massa poca diferència d'intensitat entre els diferents nivells de gris, el soroll pot introduir canvis en la detecció del nivell de gris i afegir soroll en la mesura.
- *Phase shift*: L'algorisme de *phase shift*, conegut àmpliament en el món d'interferometria, es basa en projectar senyals sinusoidals amb un canvi de fase constant entre els diferents patrons, per recuperar la fase que després es tradueix en alçada. L'algorisme per a tres patrons amb un canvi de fase de $2\pi/3$ és:

$$\phi = \arctan \left[\sqrt{3} \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (2.4)$$

on I_i indica la intensitat detectada per la càmera per a cada patró successiu. La presència de la funció de l'arctangent en la recuperació de la fase causa unes discontinuïtats del mòdul 2π que originen ambigüitats si la superfície no és contínua.

- *Codi Gray + phase shift*: Combinar aquests dos algoritmes soluciona per una banda els problemes d'ambigüitats de 2π gràcies a la informació poc precisa del codi Gray, i alhora manté la resolució del phase shift.

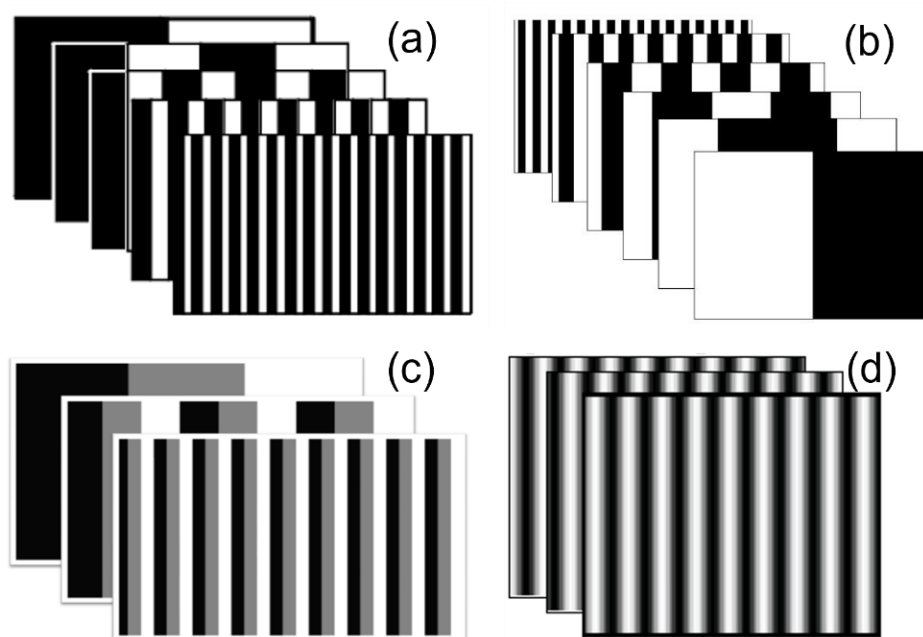


Figura 2.7. Diferents seqüències de patrons utilitzats per a projecció de franges: Codi binari (a), codi Gray (b), patrons de nivells de gris (c) i phase shift (d).

En les projeccions d'una sola imatge hi ha diversos tipus de patrons, entre els quals s'utilitzen codificacions unidimensionals, és a dir, que la informació del patró és línia a línia, o bé bidimensionals, on la informació està codificada en ambdues direccions. El principal desavantatge de les projeccions d'un sol patró és que tenen pitjor resolució vertical per guanyar velocitat. Addicionalment, poden presentar errors en la mesura degut a les ambigüitats en alçada que poden sorgir per la falta de discretització.

En les codificacions unidimensionals se sol utilitzar la projecció de patrons de colors per tal que la longitud d'ona detectada proporcioni informació sobre l'alçada, com en la *codificació arc iris*, o bé que cada canal RGB proporcioni informació independent dels altres canals. També cal destacar les *seqüències de De Bruijn*, uns patrons codificats en línies. Aquestes seqüències tenen la característica que no es repeteix una mateixa sub-seqüència cap vegada en la seqüència sencera.

Per les codificacions bidimensionals s'utilitza el mateix concepte que en les seqüències de De Bruijn: aconseguir que el patró consti de finestres que no es repeteixin en tot el patró. En la *codificació per quadrícula* es codifica cada finestra de manera única mitjançant unes formes i la distribució repetitiva d'aquestes. En la *quadrícula de colors* es projecten unes línies sobre la mostra per tal que cada finestra tingui una superposició única de les línies dels diferents colors. En la *codificació per punts en color* es projecta un patró de colors bidimensional mantenint el principi que cada finestra tingui codificació única. Sovint no es pot garantir que cada finestra

tingui codificació única en els patrons d'una sola imatge, i així no sorgeixen ambigüitats. Tanmateix, per la majoria d'aplicacions, la forma de la superfície permet una recuperació fidedigna de la mostra.

2.2. Tècniques d'una sola imatge

En aquesta categoria inclourem les tècniques d'una sola imatge, és a dir, que només necessiten d'una imatge per a recuperar la informació de tridimensional de la superfície.

2.2.1. Confocal cromàtic

La tècnica de confocal cromàtic [8], com el confocal tradicional, és una tècnica que es basa en el seccionat òptic per treure la informació tridimensional d'una superfície. La principal diferència és que el confocal cromàtic no necessita realitzar un escombrat en l'eix òptic per a obtenir la resposta axial de cada punt perquè aprofita la dispersió cromàtica substituint l'objectiu convencional de microscopi per un objectiu cromàtic o bé afegint un element dispersiu en el camí òptic (DOE). La dispersió cromàtica és una propietat física de gairebé tots els elements òptics i que té el seu origen en què la llum viatja amb diferents camins òptics segons la longitud d'ona degut a la dependència de l'índex de refracció dels materials amb la longitud d'ona. Aquesta diferència de trajectòria genera diferents punts focals per a diferents longitud d'ona, ja sigui en l'eix o fora d'eix en el pla de focus, tal com mostra la Figura 2.8.

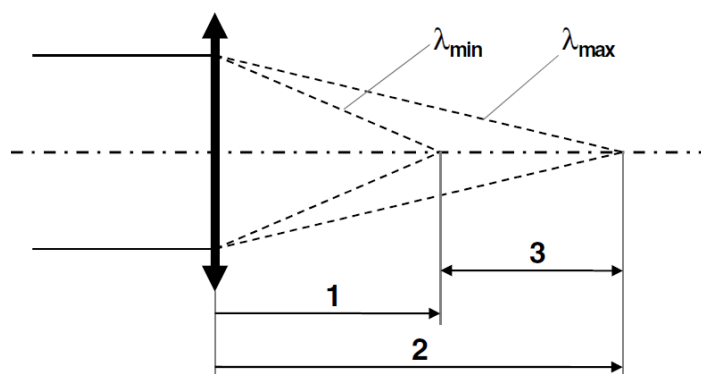


Figura 2.8. Esquema d'un objectiu cromàtic. Les diferents longituds d'ona s'enfoquen a diferents punts. 1 i 2 marquen les distàncies mínimes i màximes de treball, mentre que 3 indica el rang que es podrà enfocar.

En el cas del confocal cromàtic es fa ús únicament del cromatisme axial, que es fa servir com a mètode de codificació espacial, on cada longitud d'ona correspon a un pla focal concret. La presència del seccionat òptic generat pel *pinhole* de la configuració confocal fa que només la llum que està en el pla focal es concentra en el detector. Així doncs, el soroll provinent de llum d'una determina longitud d'ona però fora del pla focal és menyspreable en la codificació espacial.

La resposta axial del confocal cromàtic és, per tant, una funció d'intensitat respecte a longitud d'ona, on el màxim d'intensitat correspondrà a la longitud d'ona que enfoca la llum en el punt de la superfície concret, així que sabent la longitud d'ona posteriorment es pot traduir a alçada.

Per a fer aquesta correlació entre longitud d'ona i intensitat és necessari posar una xarxa de difracció entre el *pinhole* d'observació i el detector formant un espectròmetre. Llavors la llum que arriba a la xarxa de difracció i és dispersada, tindrà un senyal més elevat per aquelles longituds d'ona properes al focus de la superfície.

Originalment el confocal cromàtic era un sistema de mesura puntual, ja que es va pensar utilitzant un espectròmetre connectat a una fibra òptica. Posteriorment es va millorar el disseny

per a fer-lo un sistema de línia on els *pinholes* tant d'observació com de detecció eren línies, i la dispersió era en la direcció perpendicular a la línia del *pinhole*. Amb aquesta millora s'utilitza tota l'àrea del detector per a obtenir informació: dins d'una mateixa línia de píxels de la càmera, cada píxel detecta la intensitat per a una longitud d'ona diferent, de manera que cada línia de píxels proporciona la resposta axial d'un punt de la mostra. Si es vol obtenir una imatge topogràfica d'àrea, el confocal cromàtic es pot dissenyar amb una distribució de *pinholes* formant una quadrícula, separats entre ells per tal que no hi hagi *crossstalk* entre els diferents *pinholes*. Actualment això causa que la matriu màxima de *pinholes* és de 30x30, cosa que implica una resolució lateral molt baixa. Tot i així, s'obté aquesta informació d'àrea a velocitats tant ràpides com el frame rate de la càmera. També es pot obtenir informació tridimensional amb confocal cromàtic de línia i amb un escaneig lateral en la direcció perpendicular, però es perd la propietat d'adquisició amb una sola imatge.

En el confocal cromàtic la font de llum ha de tenir un ample d'espectre el més gran possible per tal de codificar el major rang de mesura. L'espectre de llum ha de ser també el més continu possible per permetre una bona linearitat, tot i que s'haurà de calibrar l'espectre de llum, si és continu serà menys sensible al soroll en aquelles longituds d'ona on la font de llum emeti amb poca intensitat.

2.2.2. Codificació del front d'ona

La codificació del front d'ona s'utilitza habitualment per a estendre la profunditat de focus d'un sistema òptic gràcies a un modulador de fase i mitjançant la desconvolució de les imatges adquirides. Ara bé, en els últims anys s'ha començat a aprofitar les propietats de la codificació del front d'ona per a obtenir la posició de millor enfoc. Aquesta tècnica rep el nom de *Complementary Kernel Matching* (CKM) [9].

Qualsevol sistema òptic conté aberracions, que causen que la imatge de l'objecte no correspongui fidelment a l'objecte. Per tal de caracteritzar com són aquestes aberracions se sol fer ús de la resposta impulsional (PSF, *Point Spread Function*). Aquesta funció et descriu com és la imatge d'un punt en un pla concret tenint en compte tots els elements òptics que travessa. Per obtenir la imatge d'un objecte només cal convolucionar l'objecte per la PSF del pla en què s'obindrà la imatge. En la Figura 2.9 es representa un sistema òptic convencional, on l'aberració predominant és el desenfocament, que és l'aberració causada quan el pla de l'objecte no coincideix amb el pla de la imatge i normalment es tradueix en què la imatge és borrosa.

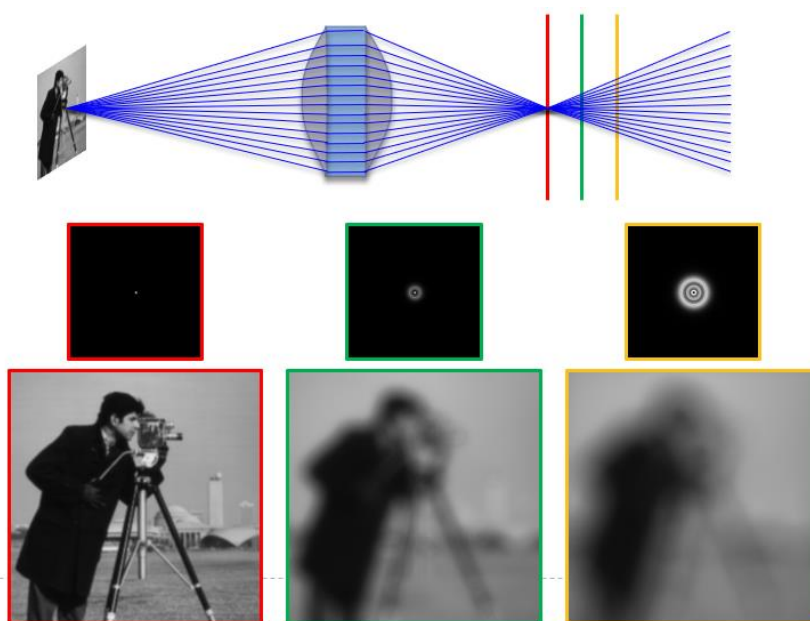


Figura 2.9. Projecció d'una escena a través d'una lent en diferents plans. Sobre de cada imatge es mostra la PSF corresponent al pla en què s'avalua la imatge.

La utilitat d'inserir un modulador de fase és que es pot controlar la PSF del sistema d'observació. Per exemple, la presència d'una placa de fase bicúbica modifica la PSF de manera que tingui la mateixa forma a través de focus, amb petites variacions de translació, segons la potència de la placa. El fet que la PSF sigui pràcticament constant fa que la imatge tindrà unes aberracions (ja que la PSF no és puntual) però seran constants en tots els plans, i la imatge de l'objecte restarà pràcticament invariant sense importar el pla d'observació, tal i com es representa en la Figura 2.10.

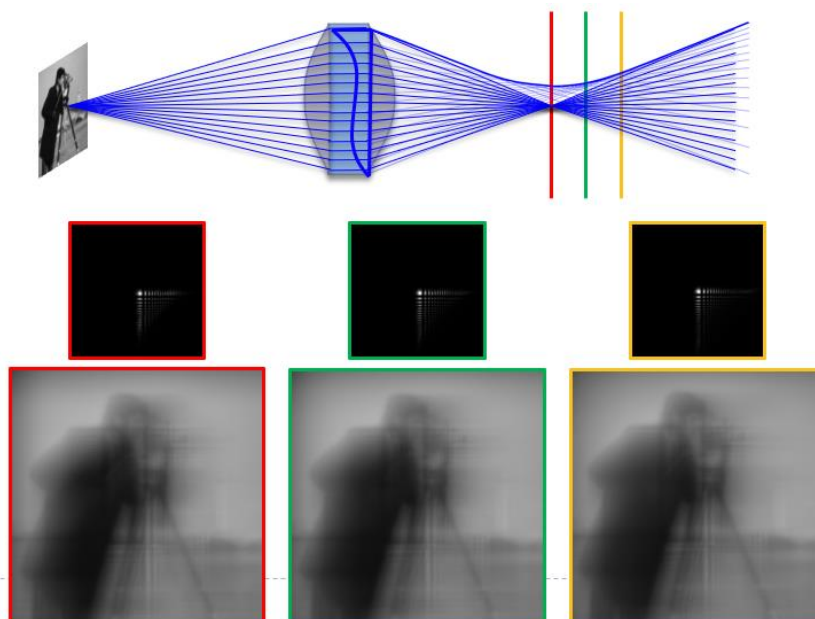


Figura 2.10. Projecció d'una escena en diferents plans a través d'un sistema òptic que incorpora una placa de fase bicúbica. Sobre de cada imatge es mostra la PSF corresponent al pla en què s'avalua la imatge.

Si es desconvoluciona la imatge detectada per la càmera per una PSF mesurada amb un desenfocament qualsevol, la imatge recuperada tindrà artefactes excepte si el desenfocament correspon al desenfocament real. La tècnica de CKM fa ús d'aquestes propietats per obtenir informació sobre les alçades de l'escena amb una sola adquisició de l'escena.

Aquesta tècnica utilitza dues càmeres situades amb un desenfocament simètric respecte del pla d'imatge. Degut a la presència de la placa de fase, les imatges de les dues càmeres tenen petites variacions de translació. Si les imatges es deconvolucionen per una sèrie de PSF a diferents plans de desenfoc, es podrà obtenir un mapa de disparitat de les dues imatges segons el desenfocament desconvolucionat. Això es pot fer simplement sostraint les dues imatges i comparant en un entorn per a cada píxel, generant un mapa de disparitat. Un cop es tenen els mapes de disparitat segons el desenfocament, per a cada píxel es busca el que conté menys disparitat, que correspondrà al pla focal d'aquell punt ja que les PSF de les dues càmeres seran equivalents i per tant sense desplaçament.

2.2.3. Holografia

La microscòpia hologràfica digital (DHM, *Digital Holographic Microscopy*) és una tècnica interferomètrica que mesura una superfície tridimensional amb una sola imatge, fet molt rellevant respecte a les altres tècniques interferomètriques al no necessitar cap tipus d'escaneig. La principal avantatge de DHM és la insensibilitat a vibracions [10] i l'elevada velocitat de mesura.

En DHM hi ha dos modes d'adquisició: per reflexió o per transmissió. Depenent de les característiques de la mostra i l'aplicació es tria un mode o un altre. En ambdós modes la configuració bàsica està basada en un interferòmetre tipus Mach-Zender, com mostra la Figura 2.11. El feix emès és estès fins a un cub divisor de feix, que separa l'ona de l'objecte O i l'ona de referència R en dos camins diferents. L'ona de l'objecte és reflectida, o bé transmesa per l'objecte i magnificada per l'objectiu de microscopi per formar una imatge darrere o enfront de la càmera. Finalment, l'ona de l'objecte es combina amb l'ona de referència emprant un segon divisor de feix per produir una interferència en el pla de la càmera. També hi ha un retardador de camí òptic per a què les longituds dels dos camins òptics coincideixin en el cas que la font de llum tingui una longitud de coherència baixa.

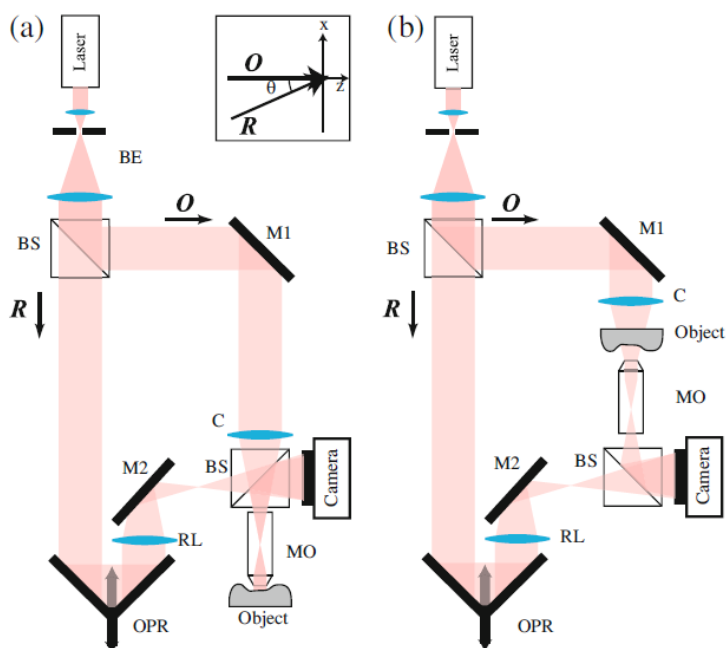


Figura 2.11. Configuracions bàsiques de DHM [10] en mode de reflexió (a) i de transmissió (b). BS, divisor de feix; M1 i M2 miralls; OPR, retardador de camí òptic; C, lent col·limadora; MO, objectiu de microscopi; R, ona de referència i O ona de l'objecte.

L'holograma resultant es pot escriure de la següent forma:

$$I_H = R^2 + O^2 + R^*O + O^*R \tag{2.5}$$

on * indica el complex conjugat. Els primers dos termes són d'ordre zero i el tercer i el quart són les imatges real i virtual respectivament.

Un cop l'holograma s'ha adquirit, hi ha el procés de reconstrucció, que consta de dos passos: la reconstrucció de l'ona complexa en el pla hologràfic i la seva propagació numèrica al pla on està enfocat l'objecte.

Primer s'ha d'extreure la imatge real o virtual de l'equació anterior. Si les ones de referència i de l'objecte són coaxials, es necessita aplicar un procés de *phase shift*, però si no ho són llavors es poden separar els ordres de difracció en l'espai de freqüències. En l'espai de Fourier cal filtrar la imatge per extreure les freqüències d'ordre zero mitjançant una finestra.

Després s'ha d'il·luminar l'holograma on ja s'han filtrat les freqüències amb una ona de referència digital que és una còpia numèrica de l'ona real. Aquesta ona resultant es propagarà mitjançant l'aproximació de Fresnel, que se sol generalitzar introduint dues lents numèriques en el pla de l'holograma Γ_H i en el pla de la imatge Γ_I . Una forma de definir aquestes lents numèriques és utilitzar un holograma físic adquirit en una superfície plana en el mode de reflexió o bé en aire en el mode de transmissió. La DHM es pot configurar computant la lent numèrica del pla de l'holograma com la fase inversa d'un holograma de referència adquirit amb la ona de referència de l'objecte. La lent numèrica del pla de la imatge es fa servir per compensar numèricament la inclinació de l'objecte o per compensar el desenfocament de la mostra.

La distància de reconstrucció defineix la posició del pla reconstruït, de manera que amb una sola imatge hologràfica es poden enfocar diferents plans de l'objecte, incrementant la profunditat d'enfocament.

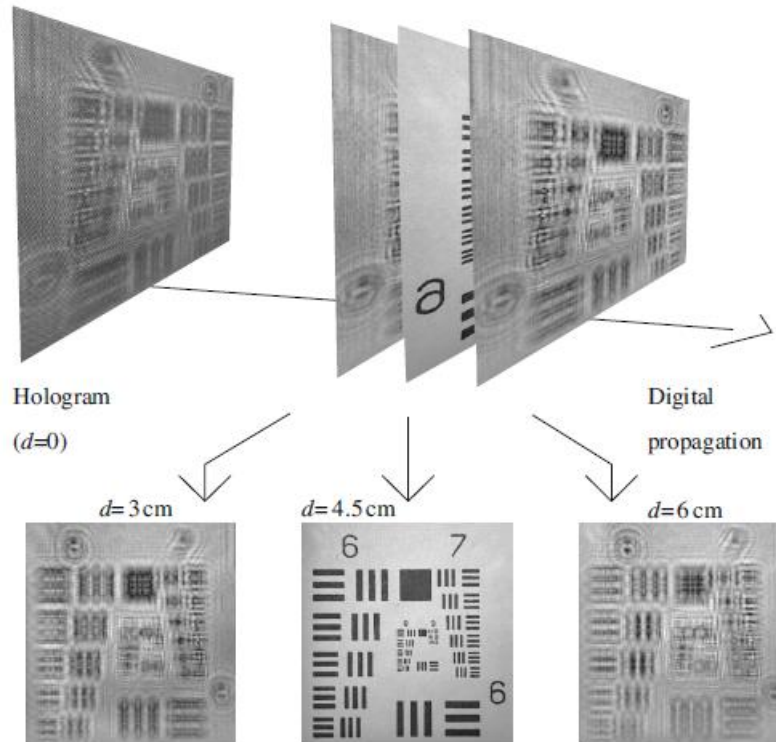


Figura 2.12. Enfocament digital de l'objecte a través de la direcció de propagació [10].

Per últim, la imatge reconstruïda de contrast de fase es converteix en una topografia tridimensional seguint les relacions o bé pel mode de reflexió o bé pel mode de transmissió:

$$h_{\text{reflexió}} = \frac{\varphi_0}{4\pi n_m} \lambda \quad (2.6)$$

$$h_{\text{transmissió}} = \frac{\varphi_0}{2\pi(n_s - n_m)} \lambda \quad (2.7)$$

on λ és la longitud d'ona, n_s és l'índex de refracció de la mostra i n_m és l'índex de refracció del medi que envolta el sistema, sovint aire.

En general l'holografia proporciona resolucions verticals sub-nanomètriques, però té l'inconvenient que al recuperar la informació de les alçades a partir de la fase, hi ha ambigüitats de mòdul 2π , o sigui que hi ha limitacions en el rang màxim de mesura, que depenen de la longitud d'ona utilitzada. Per a superar aquesta limitació en el mode de reflexió és possible utilitzar una font de llum amb doble longitud d'ona, aconseguint una longitud d'ona efectiva de

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2.8)$$

Així doncs, s'incrementa el rang màxim de mesura mantenint la mateixa resolució vertical. Per segons quines aplicacions, però, no és suficient aquest increment, ja que a efectes pràctics no es pot aconseguir que dos làsers tinguin longituds d'ona tant similars que la seva diferència sigui

tant petita per a augmentar la longitud d'ona efectiva que permeti un rang de mesura proper a 1 mil·límetre.

2.3. Sistemes d'escombrada sense components amb moviment mecànic

En aquest apartat s'enumeren tècniques de mesura que incorporen escaneig, o sigui que no són adquisicions instantànies, però no mouen mecànicament cap part del sistema.

2.3.1. Microscòpia de fase quantitativa

La microscòpia de fase quantitativa, o QPM per les sigles en anglès, que engloba totes les tècniques que quantifiquen el canvi de fase que es produeix en el procés de mesura.

Un dels mètodes per generar un canvi de fase és mitjançant la polarització de la llum [11]. Es basa en una configuració d'objectiu interferomètric tipus Linnik. En aquesta configuració s'utilitza un cub divisor de feix polaritzant per tal que les ones de referència i de l'objecte tenen polaritzacions lineals ortogonals. També hi ha una làmina d'un quart d'ona que fa que les ones de referència i de l'objecte adoptin polaritzacions circulars levògira i dextrògira. Posteriorment aquestes ones es combinen produint una interferència en una placa de fase pixel·lada, just abans de la càmera.

Aquesta placa de fase pixel·lada consta d'una distribució periòdica de micropolaritzadors lineals en què cada quadrícula de 2x2 píxels té 4 polaritzadors, cada un amb una direcció de polarització diferent. Aquests polaritzadors lineals causaran un canvi de fase de 90° degut a que hi ha un angle entre el polaritzador lineal i l'eix horitzontal de la càmera. El detector en cada cel·la de 2x2 píxels tindrà informació sobre una regió de la mostra molt pròxima en què cada píxel té un desfasament de fase de 90° respecte a l'altre, de manera que agrupant la informació d'aquesta cel·la, es pot extraure la informació tridimensional de la regió aplicant els algorismes de phase shift. Això implica que la tècnica adquireix amb una sola imatge, ja que no requereix un escaneig de cap element, però per contrapartida la resolució lateral empitjora en un factor 2 perquè s'utilitza la informació d'una cel·la de 2x2 píxels per a recuperar la informació tridimensional de la regió de la mostra.

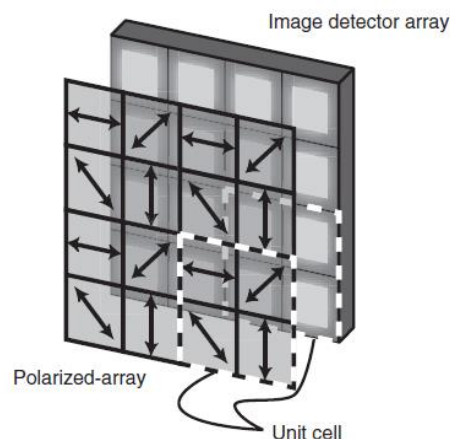


Figura 2.13. Placa de fase polaritzant amb el detector de la càmera [11].

Un dels altres mètodes coneguts consisteix en introduir phase shift a un microscopi de contrast de interferència diferencial (DIC per les sigles en anglès) [12]. El funcionament del DIC es basa en un prisma Nomarski, un prisma d'un material birefringent que separa la llum prèviament polaritzada per un polaritzador, en dos feixos amb polaritzacions ortogonals. L'angle de polarització entre els dos feixos ocasiona que tinguin camins òptics diferents, i per tant, quan

tornen a interferir hi ha una diferència de fase entre ells, generant una interferència que es detecta per la càmera gràcies a la presència d'un analitzador que està situat anterior a la càmera.

Per si sola la tècnica DIC només és qualitativa indicant el gradient de la mostra dependent de la il·luminació però, si s'hi introdueix un phase shift, es pot recuperar la informació tridimensional de la superfície. Aquesta diferència de fase es pot aconseguir de diverses maneres, ja sigui desplaçant el prisma Nomarski, rotant el prisma, desplaçant la mostra, o rotant l'analitzador o el polaritzador d'entrada al prisma. Per tal que aquesta tècnica no utilitzi components mòbils es pot aconseguir un efecte equivalent a rotar l'analitzador o el polaritzador inicial substituint-los per un cristall líquid, un material que té la propietat que segons el camp elèctric en què es trobin les molècules canvien l'orientació i, en conseqüència, canvia la direcció del polaritzador. Amb aquesta solució no es requereix un moviment mecànic i només cal controlar el voltatge que s'aplica al cristall líquid.

2.3.2. Escaneig espectral de llum blanca

Aquesta tècnica es basa en interferometria espectral per a un rang ampli de longituds d'ona. Les franges d'interferència espectrals s'obtenen a través d'un escaneig de la longitud d'ona de la font de llum o bé dispersant les franges d'interferència de llum blanca mitjançant un espectròmetre.

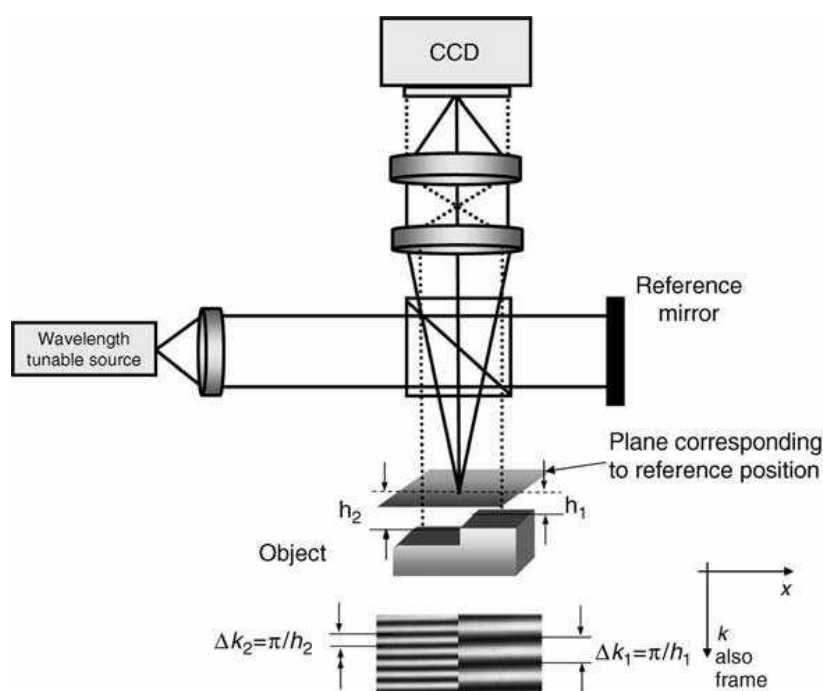


Figura 2.14. Configuració bàsica d'un interferòmetre espectral amb escaneig de longitud d'ona amb una font de llum ajustable.

En la interferometria d'escaneig de longitud d'ona [1], com en qualsevol interferometria, la magnitud que està relacionada amb l'alçada de la mostra és la fase. En aquesta tècnica per variar la fase, que depèn de $2kh$, enlloc de variar l'alçada mitjançant un moviment mecànic gràcies a un motor, es varia el nombre d'ona k . La variació en la diferència de camí òptic degut a la forma de la superfície de la mostra crea franges de diferent freqüència pels punts de la superfície durant l'escaneig de la longitud d'ona. Al contrari que en la interferometria convencional, que

dos punts en plans de diferent alçada creen franges de la mateixa freqüència però amb diferent fase inicial, en aquesta tècnica les franges dels diferents punts tenen freqüències diferents.

El període de les franges en cada punt es pot expressar en termes de desplaçament de longitud d'ona pel qual un canvi de fase és igual a 2π . L'alçada de cada punt de la superfície de la mostra ve determinat per la freqüència de les franges detectades segons:

$$h = \frac{\pi}{\Delta k} = \frac{\Delta \varphi}{2\Delta k} \quad (2.9)$$

Aquesta tècnica permet aconseguir una resolució vertical sub-micromètrica i l'alçada màxima mesurable ve determinada pel mínim canvi de longitud d'ona de la font de llum:

$$\Delta h_{max} = \frac{\pi}{\delta k} \frac{\lambda^2}{2\delta \lambda} \quad (2.10)$$

3. SENSOR ULTRA-RÀPID BASAT EN TÈCNIQUES CLÀSSIQUES

3.1. Disseny opto-mecànic

Aquesta secció descriu el disseny òptic que s'ha desenvolupat, el seu rendiment, així com el disseny mecànic que el suporta.

El sistema ha de ser dual, és a dir, que permeti mesurar amb diverses tècniques, en aquest cas interferometria, confocal i AiFV (veure secció 3.3). Per a això el sistema ha de comptar amb un doble canal d'il·luminació: un d'ells d'il·luminació estructurada per a confocal i AiFV, i un altre d'il·luminació de camp clar, que permeti il·luminar la mostra uniformement i mesurar amb interferometria.

En un sistema òptic el major limitant en la velocitat d'adquisició és la càmera i el màxim *frame rate* a què pot operar. Per a disminuir els temps d'adquisició, es busca una càmera industrial molt ràpida que tingui un *frame rate* superior als 800 frames per segon (fps) a una resolució mínima VGA (640 x 480) o similar.

D'altra banda per a poder mesurar correctament amb AiFV és necessària una quantitat mínima de píxels a la càmera (més de 1MPx), ja que la informació topogràfica s'extreu mitjançant el contrast de cada píxel respecte dels seus píxels veïns.

Adicionalment, el sensor de la càmera ha de complir altres requisits tècnics com que sigui *global shutter*, ja que sinó la informació de la mateixa imatge no correspon al mateix pla en una escombrada a velocitat constant; monocromàtic, per tal de poder maximitzar la resolució lateral i, finalment, que la interfície de comunicació amb l'ordinador de la pròpia càmera pugui suportar la quantitat d'informació que es generi però a la vegada que la distància màxima dels cables que toleri no sigui massa curta de cara a integracions industrials.

Fent una recerca de les càmeres industrials que hi ha en el moment del desenvolupament de la tesi l'únic sensor de càmeres que compleix els requisits és el de ON Semi, model Python 1300. També cal mencionar el xip Sony IMX273, que malgrat no compleix tots els requisits, és el que es queda més proper i pot resultar una alternativa. Les especificacions tècniques de dues càmeres que incorporen els sensors estan detallades a la Taula 3.1.

Taula 3.1. Característiques tècniques de dues càmeres candidates.

Càmera	VCXU-13M	BFS-U3-1652M
Fabricant	Baumer	Flir
Sensor	Python 1300	IMX273
Resolució (px)	1280x1024	1440x1080
Dimensions del píxel (μm)	4.8x4.8	3.45x3.45
Frame rate a màxima resolució (fps)	222	226
Frame rate a resolució VGA (fps)	894	486
Mètode readout	<i>Global shutter</i>	<i>Global shutter</i>
Interfície de comunicació	USB 3.0	USB 3.1

3.1.1. Disseny òptic

Un cop triat el model de la càmera s’ha de procedir a fer el disseny òptic, ja que la mida del sensor, així com la mida de píxels són paràmetres determinants en el propi disseny i rendiment. En microscòpia, és habitual que les aberracions òptiques de tot el sistema es corregeixin conjuntament per tots dos grups de lents (objectiu de microscopi i lent de camp), però això limita, per exemple, la possibilitat d’utilitzar objectius de diferents fabricants.

En el nostre cas hem treballat amb correcció d’aberracions de cada grup de forma independent, ja que l’instrument serà un sistema multi-objectiu, i per tant, les òptiques són intercanviables. Si el sistema estigués dissenyat per tal que les aberracions es compensessin entre lent de camp i objectiu, a l’hora de canviar de magnificació el sistema tindria un comportament sub-òptim. Addicionalment, els objectius de microscopi utilitzats són elements comercials que estan corregits a l’infinít, del tipus fluorita, semi-apocromàtics o apocromàtics, facilitant que el disseny de la lent de camp únicament hagi de corregir les seves pròpies aberracions.

Tradicionalment els microscopis de correcció a l’infinít tenen una lent de camp de 200 mm, però com que en el nostre cas volem tenir més camp de visió, necessitem una focal f més curta per disminuir la magnificació. D’acord amb l’àrea del sensor de la càmera escollida ($6,14 \times 4,91 \text{ mm}^2$) volem una magnificació de la lent de camp de 0.25X ($f = 50 \text{ mm}$). Així doncs, amb un objectiu 20X l’àrea mesurada de la mostra serà $1,228 \times 0,982 \text{ mm}^2$.

Els objectius de microscopi utilitzats són del tipus TU Plan Fluor de Nikon, que estan corregits a l’infinít, de manera que la lent de camp ha de fer imatge de l’infinít sobre el pla de la càmera. Aquest és precisament el funcionament d’un objectiu fotogràfic, o sigui que un disseny d’aquest tipus d’òptiques serveix com a primera aproximació de la nostra lent de camp. Hi ha molts tipus de dissenys que es poden utilitzar com a objectiu fotogràfic: lent de Petzval, lent Tessar i un doble Gauss (Figura 3.1), entre d’altres.

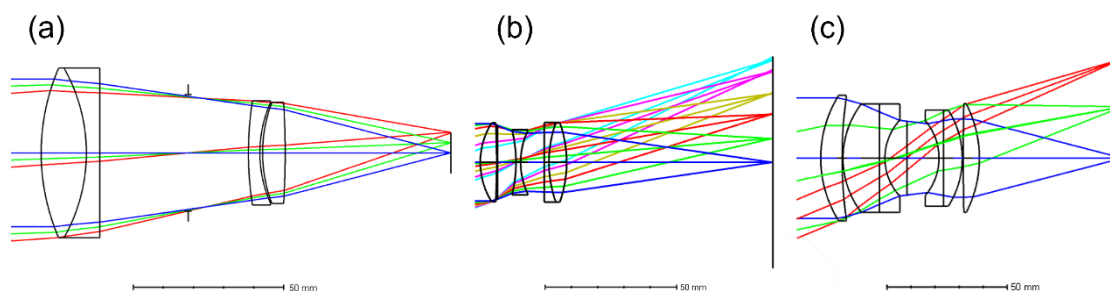


Figura 3.1. Disseny òptic de: lent de Petzval (a), lent Tessar (b) i un doble Gauss (c). Font:www.pencilofrays.com.

La lent de Petzval és el disseny més antic d'un objectiu fotogràfic, i malgrat llavors va permetre grans avanços en l'òptica, presenta una curvatura de camp elevada. La gran simetria de les lents del disseny Tessar permet gairebé suprimir distorsió, coma i l'aberració cromàtica, amb l'inconvenient que tendeix a tenir aberració esfèrica, sense arribar a solucionar el problema de la curvatura de camp. L'estructura de doble Gauss és la més utilitzada actualment en els objectius fotogràfics, ja que permet obtenir focals molt curtes i permet reduir les aberracions òptiques del sistema. Això és degut a que aquest disseny separa la potència òptica en diversos elements, permetent que cada element o superfície corregeixi aberracions diferents i a nivells globals es puguin compensar. El principal inconvenient és que pateix d'aberracions òptiques d'ordres superiors, com poden ser l'aberració esfèrica obliqua i l'astigmatisme. Com a primera aproximació hem escollit el doble Gauss per al disseny de la lent de camp que volem dissenyar, que s'acabarà d'optimitzar tenint en compte diversos aspectes:

1. Aquest sistema microscòpic funciona per reflexió. Això implica que cal posar un cub *beam splitter* (BS) per a poder separar el canal d'il·luminació del d'observació. Per tal de simplificar el disseny i el muntatge experimental, el BS es situa entre la càmera i la lent de camp, causant que tant la il·luminació com l'observació utilitzen la mateixa lent de camp.
2. La càmera té una carcassa amb una rosca que ocupa unes dimensions que cal tenir en compte. La *flange distance* de la càmera és de 17.5 mm, i considerant que les mecàniques tenen un gruix mínim de 1 mm i s'han de muntar, hem fixat entre el BS i la càmera una distància mínima de 21.5 mm.
3. El sistema ha de ser telecèntric a l'espai objecte. Com que l'objectiu de microscopi ja té un diafragma a la distància focal del mateix, l'ús d'un objectiu comercial ens assegura la telecentricitat en objecte. Idealment el sistema també ha de ser telecèntric en l'espai imatge, tot i que no és crític ja que serà el fet que la càmera es troba en una posició fixa, la magnificació és constant i calibrable.
4. El conjunt de lents ha de ser el més simple possible de fabricar. Això implica:
 - a. Utilitzar vidres relativament comuns
 - b. Muntatge de lents mecànic ha de ser senzill: si totes les lents tenen el mateix diàmetre, llavors és un disseny tubular, fet que simplifica notablement el muntatge i alineat de cada component de la lent de camp

Tenint presents aquestes consideracions, s'ha arribat al següent disseny de la lent de camp, il·lustrat en la Figura 3.2. Aquesta figura representa la branca d'observació de la mostra fins a la càmera amb diversos punts de camp. L'objectiu de microscopi (20X) està simulat com una lent paraxial perquè al ser un disseny comercial hi ha secret industrial i no es disposa del disseny real. S'ha situat el diafragma d'obertura del sistema (diàmetre = 9 mm) a la distància focal de l'objectiu per aconseguir la telecentricitat en objecte. La Taula 3.2 mostra les dimensions i materials de les diferents superfícies òptiques que constitueixen la lent de camp.

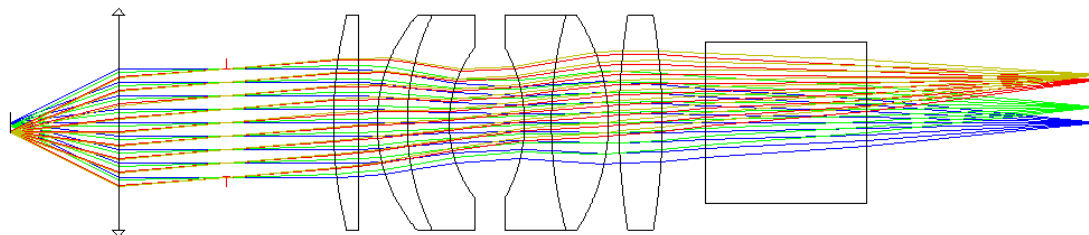


Figura 3.2. Disseny òptic de la branca d'observació. Com a objectiu s'ha simulat una lent paraxial. Els diferents raigs representen diferents punts de la imatge: blau: punt central; verd: 1.5 mm, vermell: 3.93 mm (límit físic de la càmera), groc: 4.5 mm.

Taula 3.2. Informació tècnica de les òptiques que conformen la lent de camp. El número de superfície correspon amb el disseny òptic de la Figura 3.2.

Lent	Superfície	Radi de curvatura (mm)	Distància a la següent superfície (mm)	Material	Diàmetre (mm)
1	3	41.480	2.350	BK7	20.000
	4	Infinit	1.700	Aire	20.000
2	5	15.200	2.800	H-ZBAF50	20.000
	6	22.400	3.900	H-ZF2	20.000
	7	11.400	7.000	Aire	14.000
3	8	-14.300	2.500	BAF8	14.000
	9	36.700	5.300	H-ZK11	20.000
	10	-18.600	1.000	Aire	20.000
4	11	61.330	4.000	BK7	20.000
	12	-61.330	4.000	Aire	20.000

Per tal d'optimitzar els costos de les òptiques, tant la lent 1 com la lent 4 són comercials del catàleg d'Edmund Optics (Nova Jersey, EEUU), en concret les lents amb número de sèrie 45440 i 63585, respectivament. Les lents 2 i 3 s'han de fer fabricar perquè no s'han trobat lents similars en els catàlegs de lents de diversos fabricants (Thorlabs, Newport, etc.).

El disseny final de la lent de camp fa que estigui limitat per difracció en tot el camp de la càmera, tal i com es pot apreciar en la Figura 3.3.

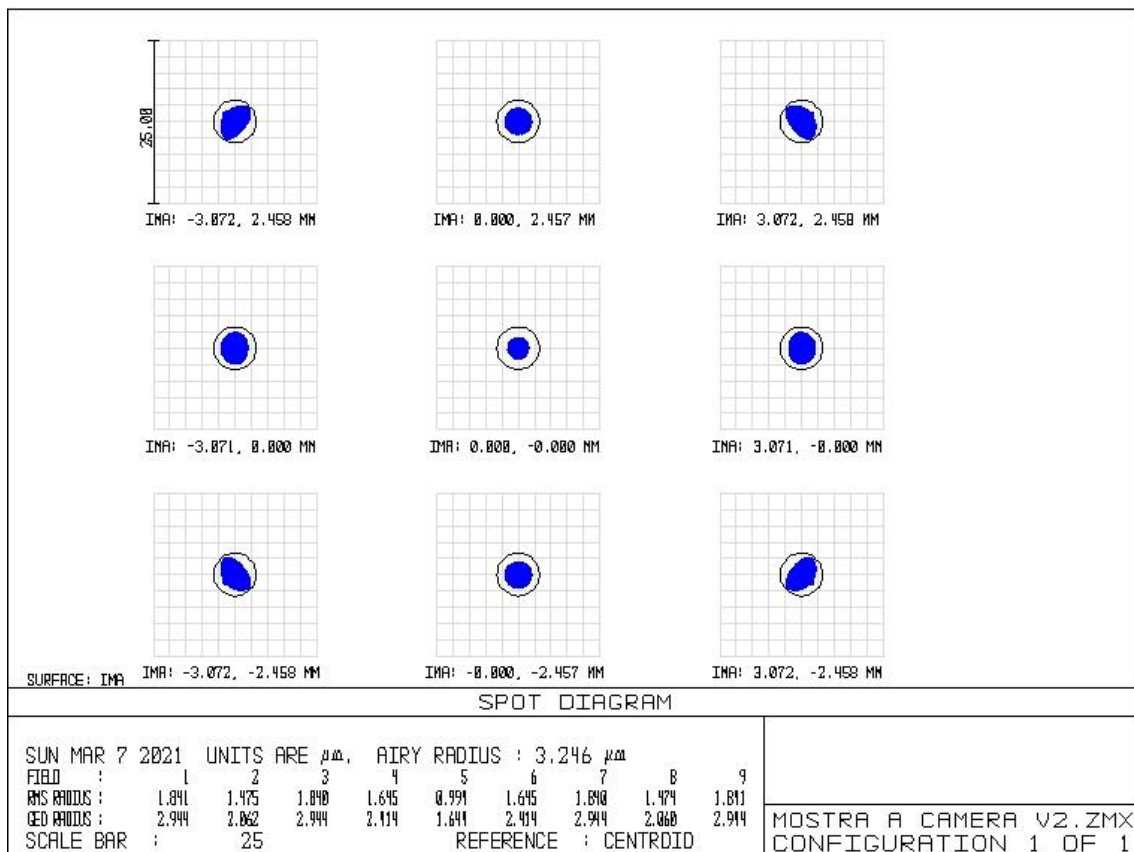


Figura 3.3. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts de la imatge. Tots estan limitats per difracció.

Aquesta configuració està optimitzada per una longitud d'ona de 525 nm, que correspon a la longitud d'ona dominant d'un LED verd. La idea inicial del sensor és que treballi amb CSI amb un LED verd i no haver de posar un LED addicional per a llum blanca, però no descartem que en un futur el sensor requereixi la incorporació d'un LED blanc per a certes aplicacions, de manera que també s'acaba d'optimitzar el disseny del conjunt d'òptiques per a que treballi prou bé per a longituds d'ona de l'espectre visible. En la Figura 3.4 es mostra el diagrama de resposta impulsional per a les diferents longituds d'ona, on es veu que el comportament del sistema manté bones prestacions per a longituds d'ona del blau ($\lambda = 486 \text{ nm}$) i del vermell ($\lambda = 656 \text{ nm}$).

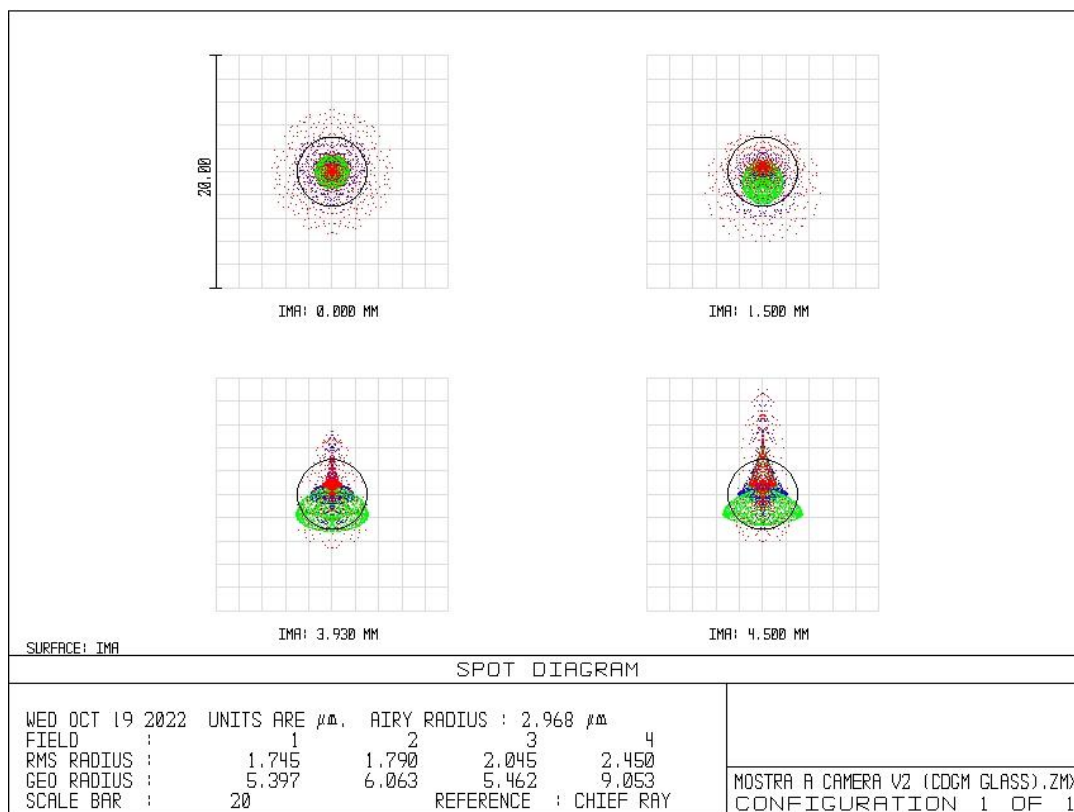


Figura 3.4. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts de camp i diverses longituds d'ona. Les longituds d'ona corresponents al blau, verd i vermell són 486 nm, 525 nm i 656 nm, respectivament.

Com es pot apreciar, en tots els punts del camp el radi RMS és inferior al radi d'Airy, corresponent al límit de difracció. Llavors podem considerar que la gran major part de l'energia estarà dins dels límits de difracció, per molt que hi hagi una part residual de l'energia que estigui fora del límit. Això ens indica que el sistema tolera bé l'espectre d'ona del visible.

En concret, si fem l'anàlisi de la contribució a les aberracions de cada superfície del tren d'observació, tal i com es representa a la Figura 3.5, veiem que les superfícies més crítiques són les exteriors dels dos doblats (superfícies 5, 7, 8 i 10), però amb el benefici que la suma de les contribucions de totes les lents acaba en unes aberracions resultants mínimes. Per això la importància de dissenyar amb detall els doblats presents en el doble Gauss i poder-los fabricar a mida, ja que són els principals causants d'aberracions del sistema, mentre que els singlets comercials no generen gairebé aberracions en comparació.

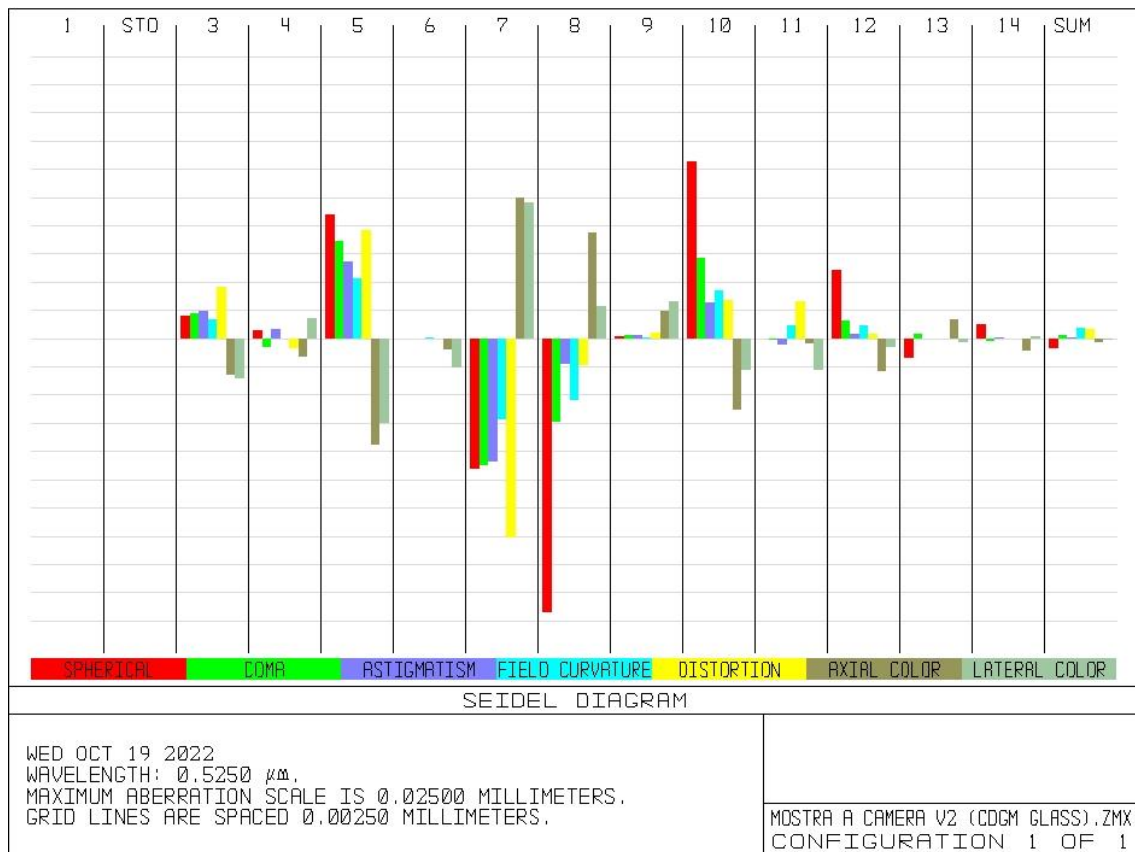


Figura 3.5. Diagrama de Seidel per al sistema de branca d'observació.

Tot i haver optimitzat els dobles per tal que les aberracions del sistema siguin mínimes, sempre en queden de residuals. Algunes de les aberracions restants s'analitzen en les següents figures. La Figura 3.6 mostra la curvatura de camp tangencial (T) i sagital (S), on hi ha un màxim de gairebé 40 μm entre el mínim i màxim de la curvatura per a una mateixa longitud d'ona, tot i que si considerem tot l'espectre visible aquesta curvatura de camp pot arribar a tenir un pic-vall de 80 μm .

Tot i que la curvatura de camp no afecta gaire en mesures interferomètriques (predomina la informació de l'estat interferencial sobre la curvatura), aquest tipus d'aberració és crític en mesures confocals i d'AiFV, on la curvatura de camp es traslladarà directament a un error en la mesura tridimensional, també conegut com a *flatness error*. Aquest error és calibrable ja que és força constant en les diferents mesures, tot i que s'ha demostrat que si la calibració es fa amb un mirall pla perpendicular a l'eix òptic i la mostra és un pla inclinat, o té inclinacions locals (per exemple, una lent o una esfera) hi ha un error associat [13] molt complex de calibrar i de modelitzar.

Adicionalment, de la gràfica de curvatura de camp es pot treure la conclusió que el nostre conjunt d'òptiques pateix d'una lleugera distorsió cromàtica, en què cada longitud d'ona té una posició axial de millor enfoc diferent. Aquest és l'efecte aprofitat per la tècnica de confocal cromàtic en la secció 2.2.1. A efectes pràctics causa que l'usuari hagi de reenfocar la mostra si canvia de longitud d'ona de la font de llum. Adicionalment, també té un efecte no desitjat en la interferometria de llum blanca, on la posició de $\text{OPD} = 0$ ja no és la mateixa per a totes les

longituds d'ona, i per tant l'envolvent de l'interferograma patirà un canvi de forma, i en última instància, una petita diferència entre el màxim de l'envolvent i la posició real de la mostra.

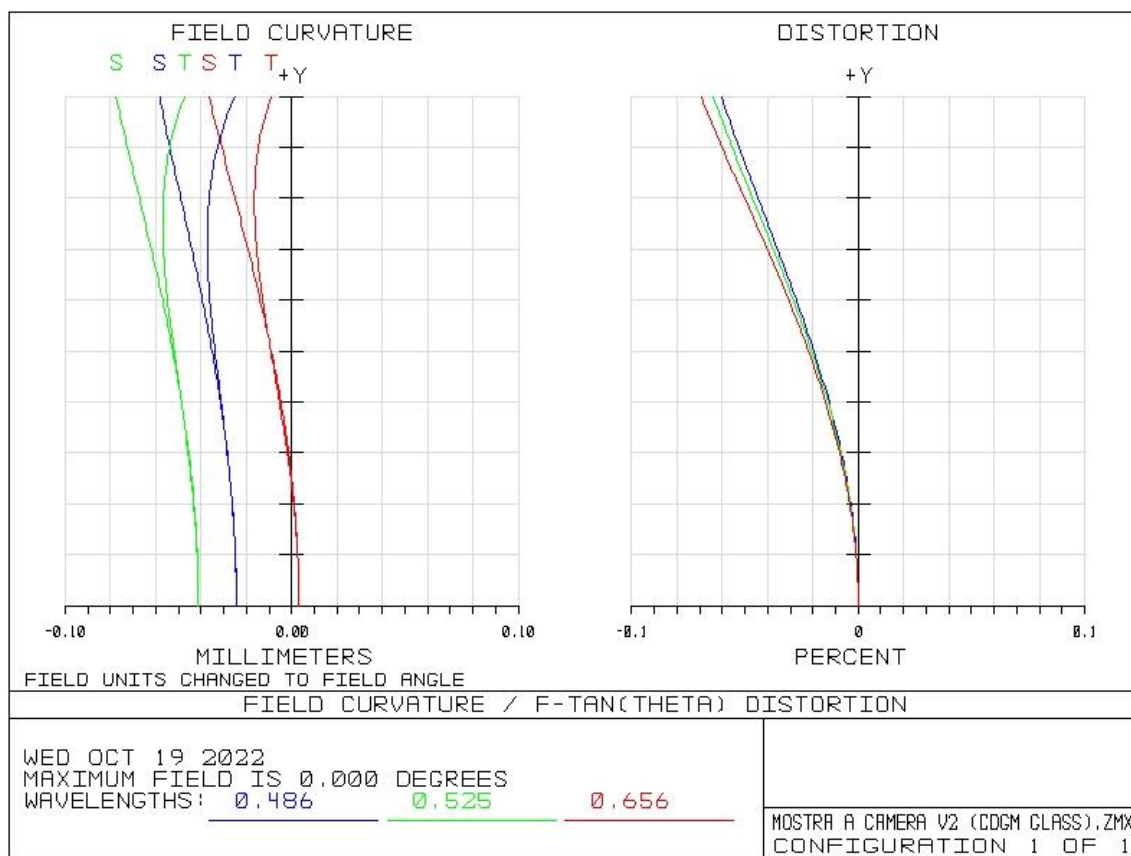


Figura 3.6. Curvatura de camp i distorsió de la branca d'observació.

En aquesta figura també està representada la distorsió lateral que arriba a uns valors màxims de 0.06%. Aquest percentatge, considerant que la càmera té 640 píxels de costat, equival a menys d'un píxel, de manera que el nostre sistema té un comportament òptim. Per a una imatge de camp clar bidimensional, la Figura 3.7 mostra la distorsió en un pla, on es pot apreciar que la diferència de posició entre les creus coincideixen i la quadrícula és molt petita, especialment si tenim en compte que la distorsió està magnificada 20 vegades en la figura. Per tant, podem concloure que la distorsió del sistema és menyspreable.

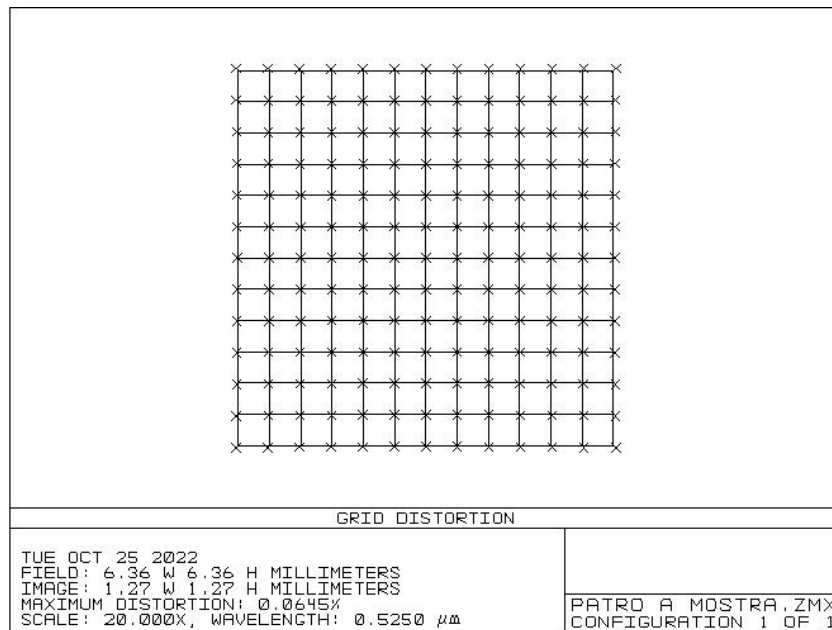


Figura 3.7. Graella de distorsió del sistema. Està amplificada 20 vegades per una visualització més intuïtiva.

Finalment, s'ha avaluat la funció de modulació de contrast (MTF, *Modulus Transfer Function*). En la Figura 3.8, s'ha representat precisament aquesta resposta en funció de la freqüència espacial. Només s'ha representat fins a la freqüència de Nyquist, ja que en última instància, és la freqüència més alta que la càmera serà capaç de resoldre, i en el nostre sistema equival a 105 mm^{-1} .

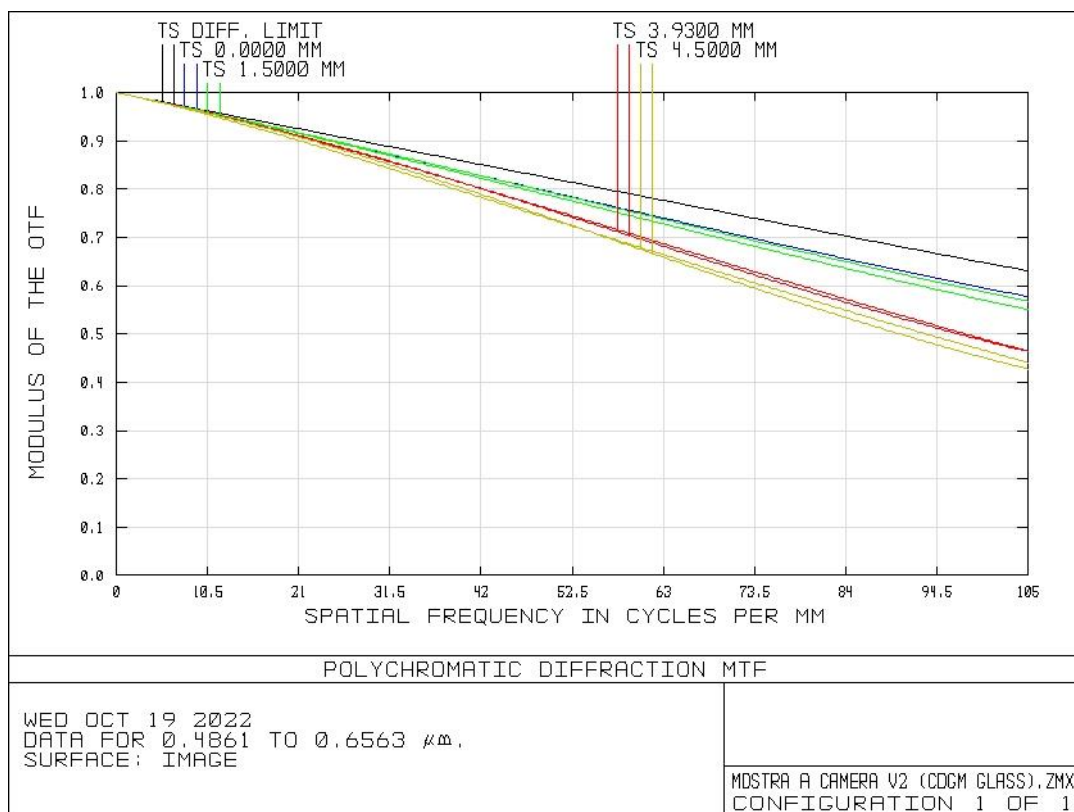


Figura 3.8. MTF del sistema òptic.

En general es considera que un sistema és bo si a la freqüència de Nyquist la MTF té un contrast del 50%. En el centre de la imatge el sistema arriba al 50%, i a mesura que s'allunya del centre òptic baixa fins al 40%, que continua sent acceptable.

Finalment, cal mencionar que idealment la distància des de la superfície 3 (primera òptica de la lent de camp) fins al diafragma d'obertura hauria de ser de 31.5 mm per tal que sigui telecèntric en l'espai imatge. En canvi, nosaltres hem reduït aquesta distància fins a 20 mm per tal de disminuir les dimensions físiques del sistema. El canvi de magnificació degut a aquesta no telecentricitat obtinguda causa que en tot el camp de visió hi hagi un canvi de dimensions de l'ordre de 1 μm , que és força menor que la mida del píxel de la càmera (4.8 μm), per tant, totalment menyspreable.

Amb aquesta informació sobre les aberracions podem concloure que la lent de camp és suficientment bona per al tren d'observació. Ara cal comprovar que la lent de camp també és vàlida per la branca d'il·luminació. Per a dissenyar aquesta branca cal tenir en compte les següents consideracions:

1. Necessitem il·luminar la mostra uniformement, i. e., el sistema ha de ser Köhler.
2. Com que el *frame rate* de la càmera és molt alt, cal augmentar l'eficiència energètica del LED, sense augmentar massa la seva corrent i, per tant, la dissipació tèrmica. Posant una lent de focal curta a prop de la font de llum es recollirà major quantitat de llum.
3. Per a l'aplicació de les tècniques desenvolupades en la 0, cal il·luminació estructurada cap a la mostra, a més a més de la il·luminació de camp clar.

Aquesta il·luminació es pot fer amb un *microdisplay* que et permet projectar el patró que es desitja, alhora que permet il·luminar amb camp clar. No obstant, aquest component té un cost força elevat, habitualment a partir de 2.000€, a la vegada que té unes dimensions físiques gens menyspreables. Una alternativa molt més econòmica (poques desenes d'euros) és col·locar un patró de crom sobre vidre al pla conjugat de la mostra (Figura 3.9). Llavors es fa imatge del patró sobre la mostra i, consecutivament, la imatge que captura la càmera és la superposició de la mostra amb el patró. El principal desavantatge, però, és que es perd versatilitat, ja que un patró de vidre té un disseny fixat que no es pot canviar, de manera que sempre es projecta la mateixa imatge estructurada sobre la mostra.

El principal objectiu de la il·luminació estructurada és proporcionar textura artificial òpticament a la superfície de la mostra. La reflexió de la imatge del patró estructurat sobre la mostra és, per una gran varietat de mostres, incoherent. Per tant hi pot haver pèrdues de contrast en la imatge del patró en el pla de la càmera, però com que el principal és detectar textura en les mostres, si hi ha una pèrdua de contrast no és crític.

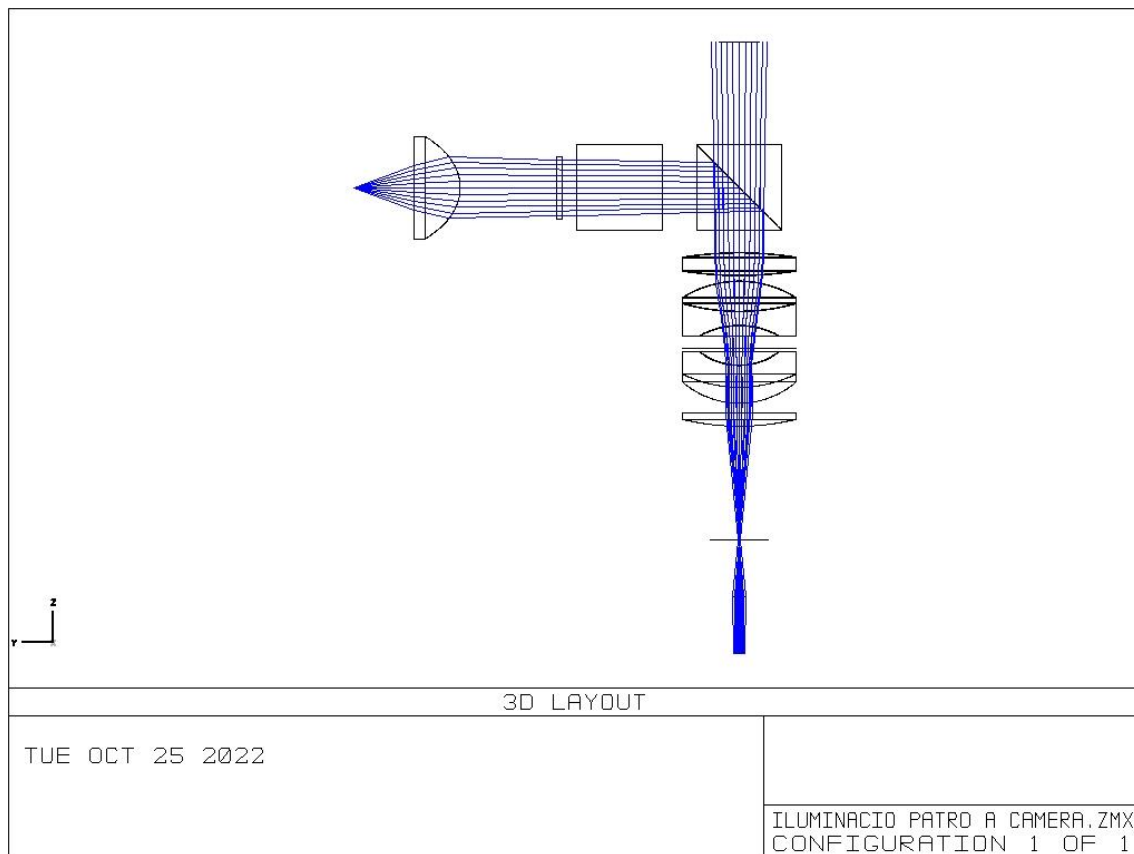


Figura 3.9. Branca d'il·luminació cap a la mostra.

En aquest sistema s'ha utilitzat una lent col·limadora amb una focal de 15 mm (model ACL1815U de Thorlabs, Nova Jersey, EEUU) , per maximitzar l'energia emesa per la font de llum. Per tal de minimitzar aberracions en lents de focal tant curtes se solen utilitzar lents asfèriques, com és el cas d'aquesta lent. Com a font de llum hem fet servir un LED verd pla (model PT-54G-MPK de Luminus, California, EEUU), que té una longitud d'ona dominant de 525 nm. Per avaluar la il·luminació del nostre sistema hem analitzat el vinyetatge en el pla de la mostra i tal i com es pot apreciar en la Figura 3.10, aquest és totalment imperceptible. Per tant, el sistema d'il·luminació proporciona uniformitat de llum sobre el pla de la mostra.

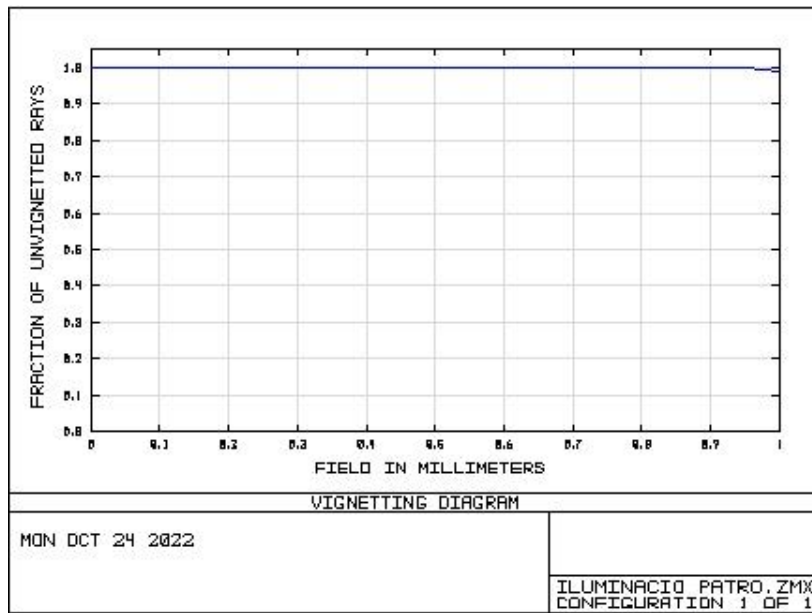


Figura 3.10. Vinyetatge del sistema òptic.

Per a poder fer imatge del patró a la càmera, cal que el patró estigui situat al pla conjugat de la mostra. Aquest s’ha considerat per a tenir les dimensions corresponents a la càmera, amb un 25% de tolerància. Així evitem que zones de la mostra no tinguin la imatge del patró degut a desalineaments de les òptiques.

Per comprovar com es comporta el sistema hem analitzat el diagrama de resposta impulsional amb aquesta configuració en la Figura 3.11. Es pot apreciar, que anàlogament a la branca d’observació, la branca de projecció també està gairebé limitada per difracció.

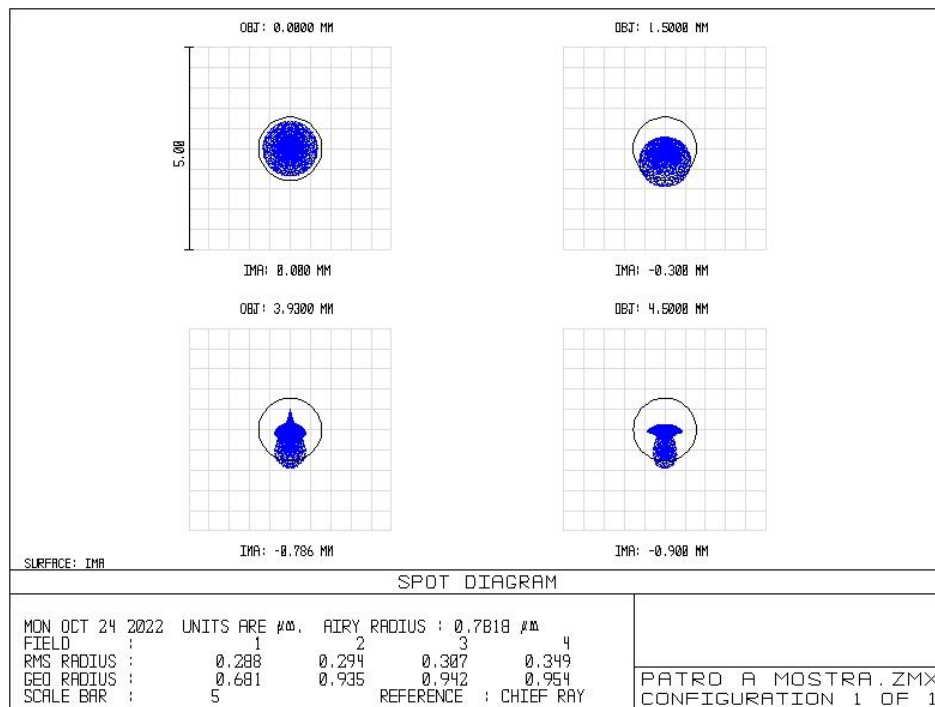


Figura 3.11. Diagrama de resposta impulsional per a diferents punts del camp per a una longitud d’ona de 525 nm..

També hem analitzat la MTF de la branca d'imatge del patró sobre la mostra. Els resultats es mostren en la Figura 3.12, i mostren un comportament molt proper al límit de difracció en els punts de camp dins del camp de visió observat per la càmera. No obstant, els resultats són lleugerament inferiors al criteri del 50% de contrast si afegim un 25% de tolerància per al posicionat mecànic de la càmera (color groc). Tanmateix, com hem comentat anteriorment, la texturització de la mostra funciona si hi ha presència d'un patró artificial projectat sobre la mostra, de manera que si té un contrast menor que l'òptim, igualment és detectat per la càmera, i en última instància, l'algoritme que s'apliqui funcionarà correctament.

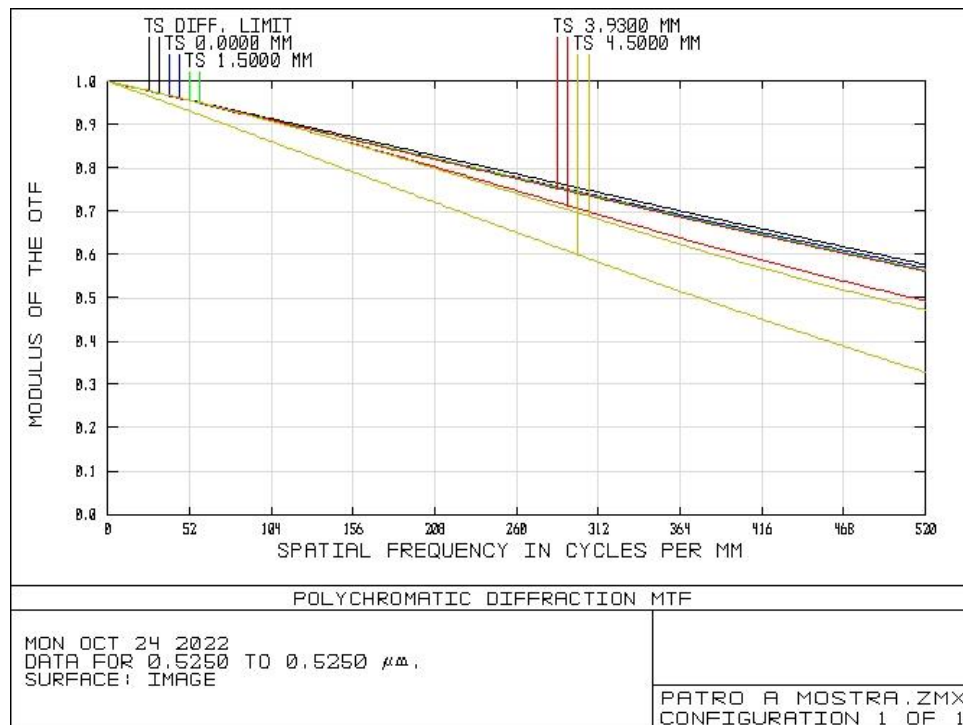


Figura 3.12. MTF de la branca de projecció.

3.1.2. Disseny mecànic

Un cop conegut el disseny òptic i decidit quin model dels motors analitzats utilitzarà el sistema (veure secció 3.1.3), cal dissenyar peces mecàniques per fer l'assemblatge del prototip. En la Figura 3.13 es poden veure tots els components òptics que incorpora el nostre perfilòmetre, exceptuant la branca d'il·luminació de camp clar. Cal notar que s'ha afegit un mirall a 45° respecte al disseny òptic per tal de comprimir el sistema i reduir les dimensions físiques del mateix un cop tingui la carcassa. L'única diferència òptica respecte al disseny simulat és que s'ha hagut d'augmentar lleugerament la distància entre la lent col·limadora i el patró de vidre estructurat, però com que està en una regió de gairebé infinit, les implicacions són irrellevants. El con verd de llum indica els raigs d'il·luminació, mentre que les línies blaves representen els raigs que formen imatge del patró cap al sensor de la càmera.

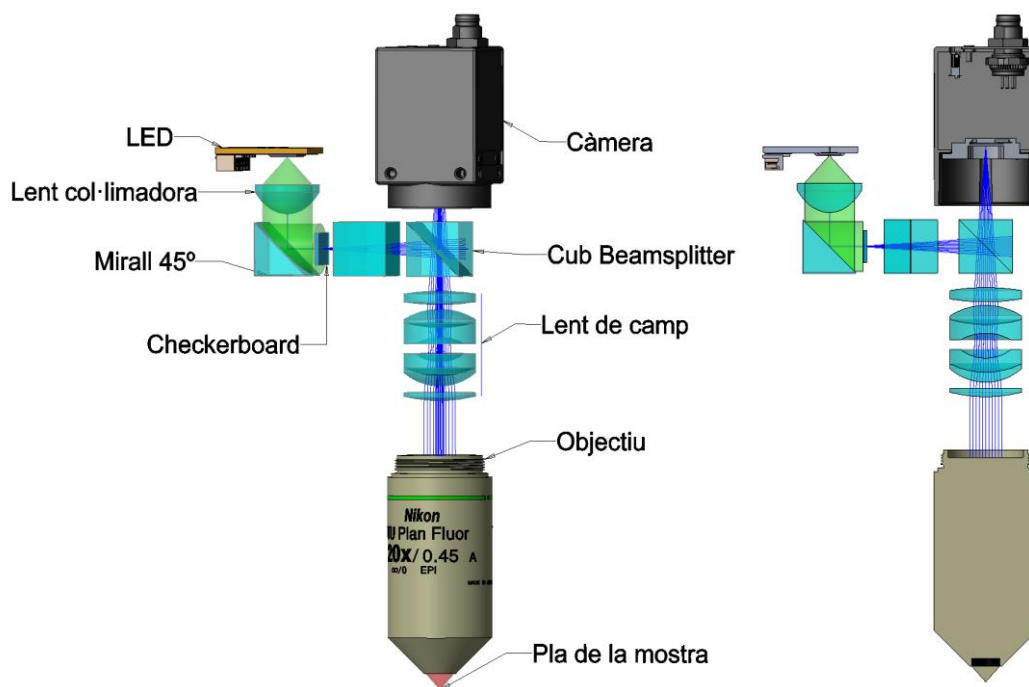


Figura 3.13. Esquema dels components òptics necessaris en el prototip en la branca d’il·luminació estructurada i la branca d’observació (esquerra) i la seva secció frontal (dreta).

Com s’ha mencionat en l’apartat anterior, el nostre sistema té doble branca d’il·luminació, una per il·luminació estructurada, i l’altra de camp clar, tal i com s’aprecia en la Figura 3.14.

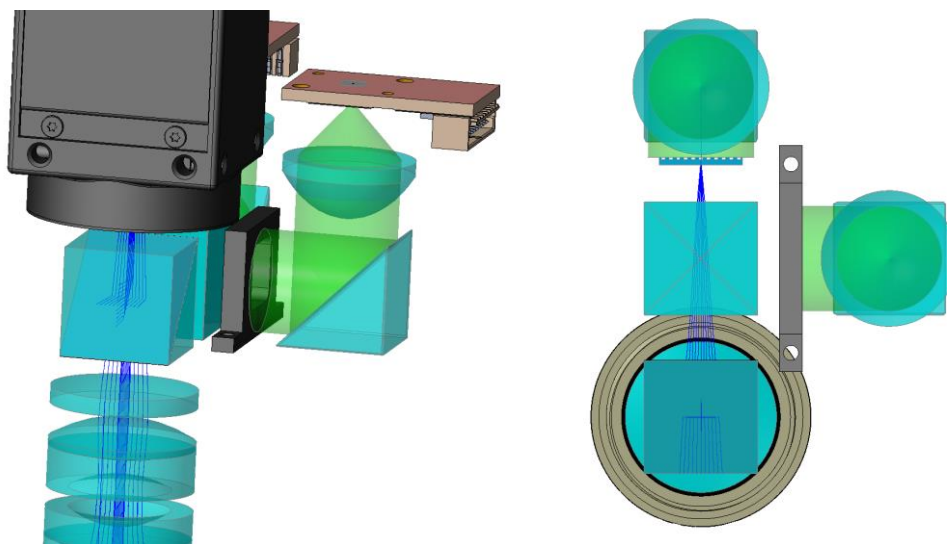


Figura 3.14. Vista 3D de les branques d’il·luminació (esquerra) i secció vista des de dalt (dreta).

Tots els elements de les branques d’il·luminació s’han de subjectar mecànicament. Hem dissenyat un conjunt de peces de manera que tots els components òptics estiguin fixats. S’ha dissenyat una mecànica que suporta la majoria d’elements òptics, de manera que a l’hora de fabricar és més senzill que fer-ne varies i connectar-les mecànicament, amb la cadena de toleràncies que implica. Addicionalment, es controla molt millor els alineats mecànics dels components òptics, alhora que facilita la neteja de la pols al no haver de desmuntar moltes peces

En la primera la peça es fixen els dos cubs BS, els dos miralls a 45° i el patró de vidre. La fabricació d'aquesta peça és per buidat, de manera que s'extreu el material desitjat. D'aquesta manera tots els components es munten des d'un sol costat. El patró és el component més crític a l'hora de posicionar-lo, ja que requereix estar conjugat amb la posició de la mostra (i en conseqüència amb la posició del sensor de la càmera). Al fer-se imatge del patró sobre la càmera, petits desplaçaments de la posició idònia causa un desenfocament de la imatge, que pot ser crític en els algorismes que s'expliquen en les seccions posteriors. Per tant, el CB s'ha desacoblat d'aquesta mecànica i es subjecta amb una peça que té un petit joc en la direcció de l'eix òptic gràcies a un cargol micromètric de precisió. Aquest cargol ha de ser accessible un cop estigui muntat el sistema per a poder ajustar la posició del patró per a fer imatge en la càmera. A la Figura 3.15 es pot veure la forma d'aquesta mecànica i de la peça que subjecta el patró (en groc) amb el cargol micromètric.

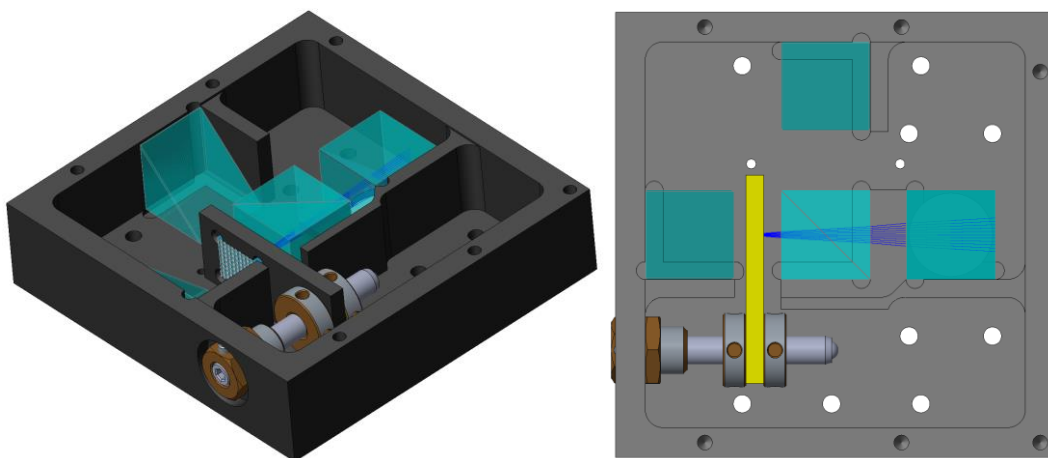


Figura 3.15. Vista 3D de la banyera dels cubs BS, miralls i patró CB (esquerra) i la seva secció vista des de dalt (dreta).

La segona peça serveix per subjectar els LEDs mentre que a la tercera només s'hi encolen les lents col·limadores. Ambdues peces estan representades en la Figura 3.16, on la part de les lents col·limadores té una transparència per tal de poder visualitzar correctament la part on es subjecten els LEDs. La vista 3D és amb perspectiva des d'avall cap amunt perquè els LEDs han d'il·luminar en direcció cap avall.

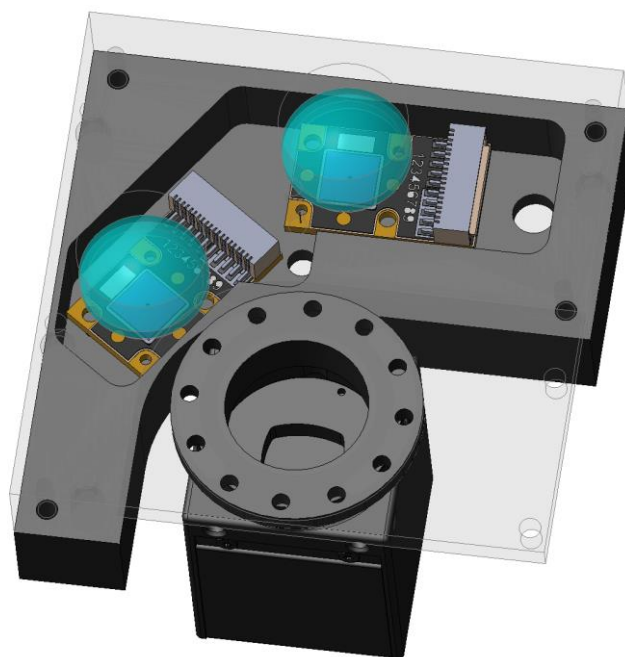


Figura 3.16. Vista 3D (des de baix) de les peces que subjecten els LEDs (sense transparència) i les lents col·limadores (amb transparència). S'ha afegit la càmera per a tenir una idea de la seva posició.

Un cop ja tenim definides les mecàniques de les branques d'il·luminació, cal fer el disseny de la mecànica de la lent de camp. Com que la lent de camp s'ha dissenyat per a que totes les lents tinguin el mateix diàmetre, aquesta mecànica pot ser tubular. Les distàncies entre les quatre lents que constitueixen la lent de camp estan molt ben definides i són molt crítiques en termes òptics. Per tal de garantir que aquestes distàncies siguin molt precises s'han posat uns anells separadors entre les lents fets a mida. Finalment, la imatge de la mostra a la càmera és molt sensible a la posició de la lent de camp respecte la càmera, per tant, la part exterior de la mecànica s'ha fet que tingui rosca de manera que es pugui ajustar axialment. En la Figura 3.17 està representat el tub de la lent de camp, conjuntament amb les lents que la componen.

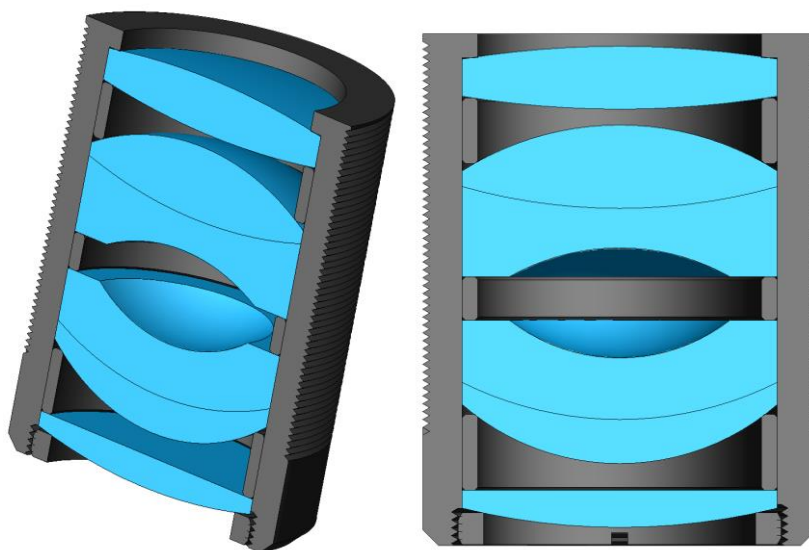


Figura 3.17. Vista 3D de la lent de camp (esquerra) i una secció frontal (dreta).

Finalment, només queda afegir el motor en el conjunt i ajuntar totes les peces. Hem aprofitat el disseny del motor, que té una rosca per a collar l'objectiu de microscopi. Les altres peces ja s'han dissenyat per a que encaixin amb la forma del motor. L'assemblatge final està representat en la Figura 3.18.

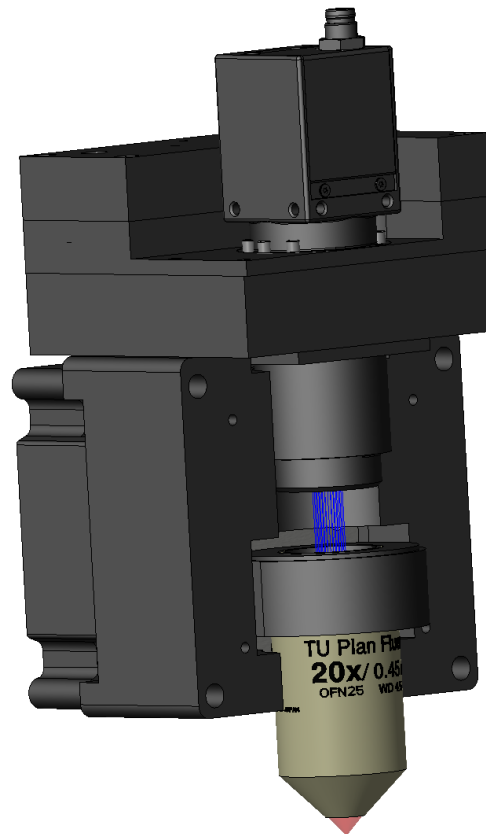


Figura 3.18. Vista 3D de l'assemblatge final.

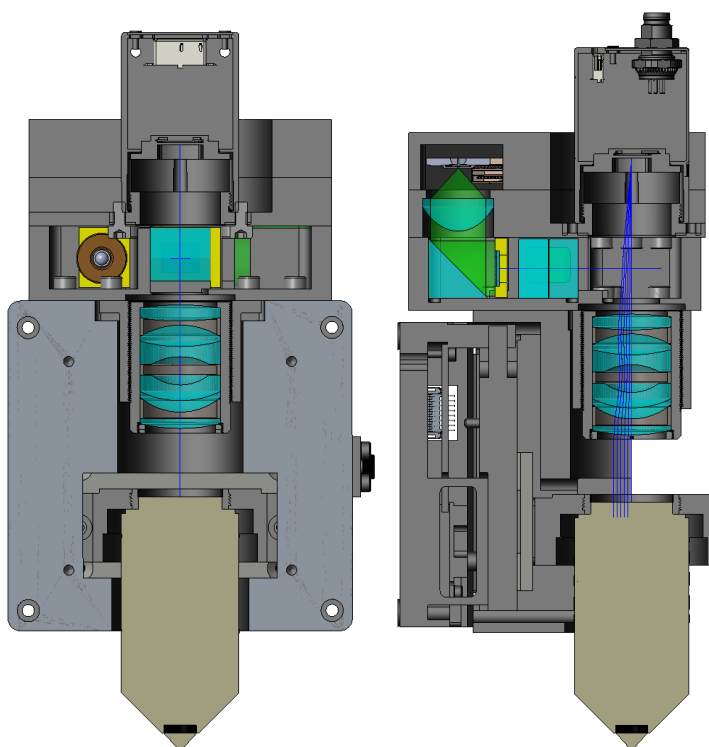


Figura 3.19. Secció frontal (esquerra) i lateral (dreta) de la Figura 3.18.

Finalment, la Figura 3.20 mostra dimensions del sensor complet. El sensor per si sol, incloent mecàniques, càmera i òptiques del sensor, però exclouent l'objectiu de microscopi, té unes dimensions de 147.9 mm (alçada) x 90.5 mm (amplada) x 83.5 mm (profunditat). Si comptem la distància fins al pla de la mostra, l'alçada passa a ser de 176.9 mm.

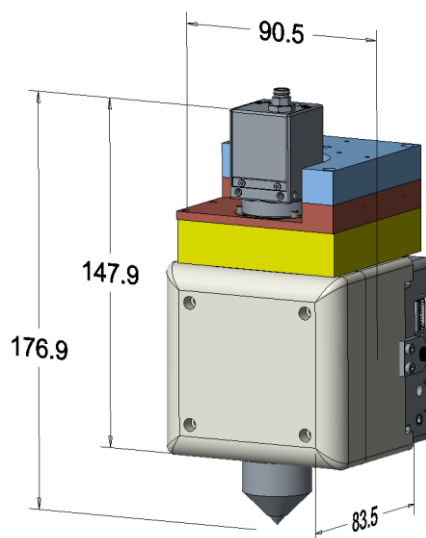


Figura 3.20. Dimensions físiques (en mm) del sensor complet.

3.1.3. Accionament

Un dels elements més determinants en el rendiment del sistema és l'accionament. Com que les tècniques òptiques en què està basat el sensor es basen en un escombrat mecànic a través de l'eix òptic, un error en el posicionat durant l'adquisició es pot traslladar en el resultat de la topografia.

Hi ha una gran varietat de sistemes per a desplaçar verticalment un sensor i una extensa literatura sobre el tema [referència??]. Com que l'estudi dels motors no és l'objecte principal d'aquesta tesi, explicarem breument els aspectes més rellevants de les tecnologies estudiades i testejades, que es distingeixen segons tres criteris diferents: tipus de tecnologia per a generar el moviment, tipus de guiatge i retro-alimentació (*feedback*).

3.1.3.1. Generació del moviment

En primer lloc, les tres tecnologies estudiades per a generar moviments amb precisió sub-micromètrica són les següents: motor de corrent continu sense escobretes (o motor *brushless* - *BLDC*), motor de passos i transductor piezoelèctric.

El principi en què es basen tots els motors és la llei de Lorentz, en què si hi ha corrent elèctric dins d'un circuit es generarà un camp magnètic. Addicionalment, un imant generarà un camp magnètic per definició, de manera que aquests dos camps intentaràn alinear-se, produint un moviment circular en el rotor.

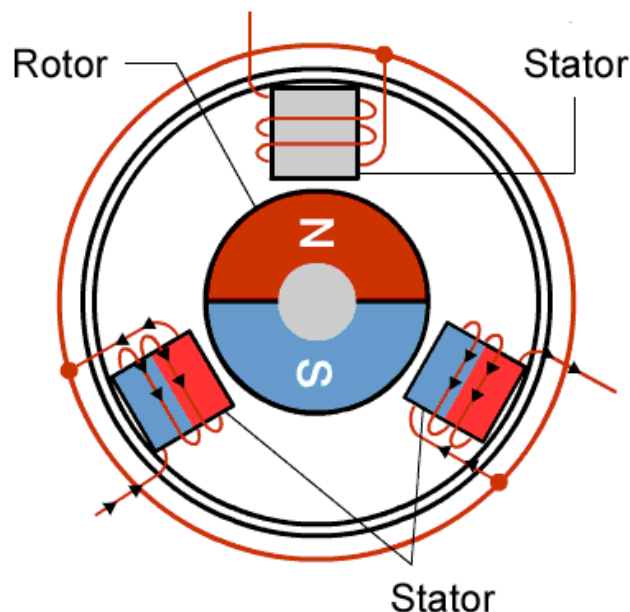


Figura 3.21. Esquema bàsic del funcionament dels motors basats en la força de Lorentz. Si les bobines estan activades, generaran una força magnètica, i per tant, un camp magnètic, que dependrà de la polaritat del corrent aplicat a la bobina. L'imant fixe intentarà alinear-se amb el camp magnètic exterior, produint un moviment. Font: www.renesas.com.

Per tal que els dos camps magnètics mai s'alineïn completament, cal activar i desactivar (o bé canviar la polaritat, segons la configuració del motor), de les diferents bobines.

En els motors de corrent contínua (DC), el rotor està format habitualment per una o diverses bobines i l'estator per un imant permanent. El sistema per canviar de polaritat és mecànic: unes

escobretes, habitualment de grafit, fan contacte amb el col·lector del rotor (commutador) de manera que pateix desgast al llarg del temps, reduint la seva vida útil i les seves prestacions.

El motor *brushless* (Figura 3.21), en canvi, és l'oposat al motor DC ja que l'imant permanent es troba habitualment en el rotor, mentre que un conjunt de bobines són l'estator. En aquest cas cal controlar l'activació de les bobines electrònicament, allargant el temps de vida útil del motor degut a la falta de desgast mecànic de les escobretes.

Els motors de passos es basen en el mateix efecte electromagnètic, però en aquest cas el rotor està format per una pila de làmines d'acer ferromagnètic (de vegades també amb un imant permanent) i un dentat exterior, habitualment de 50 o 100 dents, que conformen els pols. L'estator, per la seva banda, està també format per una pila de làmines d'acer ferromagnètic i unes bobines de coure (habitualment 4 o 8 bobines, però n'hi ha d'altres tipus) que acaben en un dentat interior que queda molt a prop del dentat del rotor. Les dents de cada bobina de l'estator tenen un desfasament entre elles, fent que activant diferents bobines puguem atraure les dents del rotor i fer-lo girar.

A la Figura 3.22 es mostra un esquema simplificat d'un motor de passos de dues bobines i una parella de pols al rotor. Activant la bobina A (a.) generem un camp magnètic tal que el rotor s'hi intenta alinear. Desactivant la A i activant la B (b.) el rotor es mourà 90°. A continuació s'activa la A amb polaritat inversa (c.) i finalment la B amb polaritat inversa (d.) per acabar un cicle complet (4 passos en aquest cas).

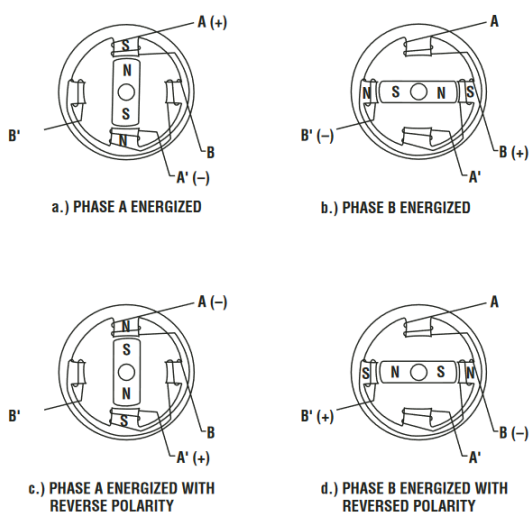


Figura 3.22. Funcionament simplificat d'un motor de passos. Font: www.amci.com.

Mentre major sigui el número de pols, major serà el número de passos per volta. En el nostre cas hem utilitzat un motor de 100 parelles de pols, per tant 400 passos per revolució. Això equival a 0,9° de rotació de l'eix per a cada pas.

El principal benefici dels motors de passos és que comptant el número de polsos que comanden la corrent de les bobines es pot conèixer la posició del rotor sense cap mena de retroalimentació, abaratint els costos addicionals que genera. Això és cert sempre i quan el rotor no "patini" (*stall*) que significa que el parell arrossegat és major que el parell aplicat, per tant el motor ha estat incapaç de seguir els passos comandats i la posició passa a ser desconeguda.

Els motors *brushless* es poden fabricar per a què treballin tant de manera rotacional com lineal. En canvi, els motors de passos i els motors DC necessiten d'un element que transformi el moviment circular en moviment lineal, com podria ser un fuset, introduint més errors en el moviment.

Per últim, l'accionament piezoelèctric es basa en la propietat física de certs materials ceràmics de contraure's o expandir-se en funció del voltatge aplicat i viceversa. Existeixen sistemes de posicionat lineal basats en accionament piezoelèctric i sistema de guiatge per flexió, els quals el recorregut màxim està limitat per la capacitat d'expansió i contracció del transductor; que és d'alguns centenars de micres i poden tenir resolucions de pocs nanòmetres.

Hi ha altres actuadors piezoelèctrics els quals el seu recorregut no està limitat per les propietats físiques del transductor. Sota una excitació elèctrica especial, la ceràmica es pot modificar no només en extensió longitudinal, sinó també en una flexió transversal, de manera que es pot aconseguir generar una trajectòria el·líptica de la ceràmica. Aquesta tecnologia, l'empresa PI (*Physik Instrumente*, Alemanya) la va registrar sota el nom PiezoWalk®, ja que emula aquest moviment humà. L'alta freqüència de la força motriu, molt superior a la ressonància mecànica del material, fa que el moviment sigui suau i per a un rang il·limitat.



Figura 3.23. Esquema d'un sistema piezowalk. En el primer pas hi ha part del transductor piezoelèctric que fa contacte amb la guia, mentre que en el segon pas es flexiona per tal de produir un desplaçament lateral. Posteriorment s'intercanviarien les parts que s'adhereixen a la guia per repetir el pas 1 i 2 consecutivament. Font: www.physikinstrumente.com.

En general els transductors piezoelèctrics són molt precisos però pateixen del procés d'histèresi, i.e., el procés d'expansió no recorre el mateix camí que el procés de contracció, de manera que per a un funcionament precís i repetitiu és necessari un sistema de retroalimentació, com es veurà a la secció 3.1.3.3.

3.1.3.2. Guiatge

El guiatge d'un motor és el sistema mecànic que garanteix que el moviment produït pel motor segueixi el camí desitjat. Els més habituals són el rodament de boles, el rodament de rodets i finalment les guies i patins.

El rodament de boles és dels guiatges més econòmics però que presenten errors més grans, mentre que el mateix sistema però amb rodets és un punt mig entre qualitat/preu en el sentit que ambdues magnituds es veuen incrementades.

En ambdós casos es precisa de lubricació per tal de garantir un bon rodament i per minimitzar el desgast. La lubricació és un element clau en el manteniment del guiatge per rodament.



Figura 3.24. Rodets creuats. Font: www.ikont.co.jp.

Per últim, les guies i patins són un sistema en què el patí és un mecanisme mòbil que circula per tota la guia i que té una longitud molt menor que la guia. El moviment entre el patí i la guia es pot aconseguir mitjançant boles, per a aplicacions de posicionat de precisió, de rodets, per a altes càrregues, o bé mitjançant un sistema de boles o rodets recirculants en què les boles o rodets es mouen per un circuit tancat. D'aquesta manera no hi ha limitació de rang del patí, sinó que el límit el marca la guia. Aquest és el sistema més utilitzat en aplicacions d'alta precisió, però també el més car.

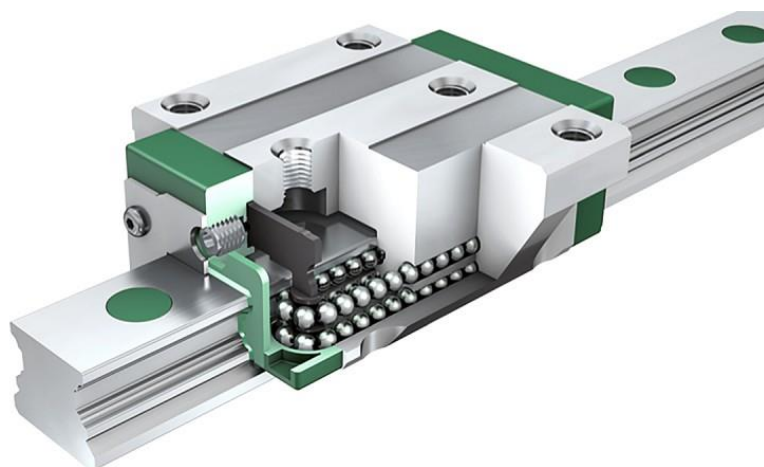


Figura 3.25. Guia amb patí de boles recirculants. Font: www.nskbearingcatalogue.com

3.1.3.3. Retroalimentació

Encara que la qualitat tant el motor com el guiatge sigui molt elevada, sempre hi ha imperfeccions en la fabricació o desgast al llarg del temps de vida del sistema que generen diferències entre el valor comandat i el moviment que realment s'executa. Per a solucionar-ho es doten els actuadors de sistemes de retroalimentació que detecten la posició real desplaçada, el sistema la incorpora per tal de compensar en temps real les desviacions del moviment desitjat. Els motors que consten de sistemes de retroalimentació també es coneixen amb el nom de servomotors.

En el cas dels sistemes piezoelèctrics de recorregut limitat pel propi transductor, habitualment s'utilitza un sensor capacitiu, que també té un rang de detecció limitat, per conèixer amb molta precisió la posició de l'actuador. Tenint en compte que l'actuador tipus *PiezoWalk*[®] que hem utilitzat, es necessita un sensor de posició lineal amb un rang de mesura superior a 1 mm.

Per a aquest últim cas i als altres tipus de motors és necessari, però, utilitzar altres tipus de sensors per a detectar la posició real del sistema. Per al nivell de precisió nanomètrica que necessitem, els codificadors òptics (*encoder*) són els més utilitzats. Aquests es basen en comptar línies mitjançant una font de llum, una regla òptica i un fotodetector. El període del regle òptic van des de 1 micra fins als centenars de micres, però la resolució es pot incrementar fins als nanòmetres mitjançant interpolació electrònica del senyal quan el codificador permet obtenir un senyal analògic, com és el cas dels codificadors sinusoidals. En principi no hi ha limitació de recorregut en els codificadors òptics lineals, però hi ha un compromís entre període del regle, les dimensions totals i l'error intrínsec del codificador.

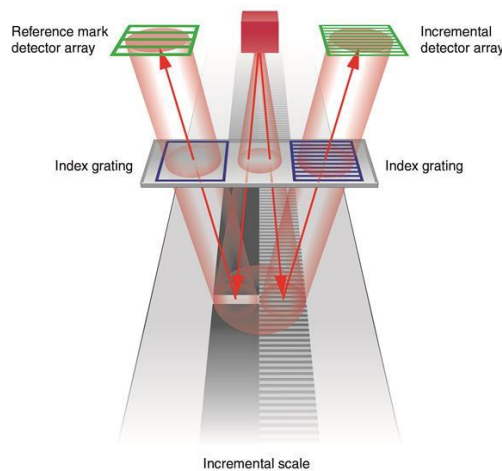


Figura 3.26. Codificador òptic sinusoidal. Font: www.renishaw.com.

3.1.3.4. Caracterització

Per tal d'escollir el motor més adient pel sistema, en aquesta secció n'analitzarem tres tipus basats en tècniques diferents.

Els models compresos dins de l'estudi són el sistema de guiatge KXG-06020V-P2B (Suruga Seiki, Japó) on se li ha afegit un reductor planetari 1:6 d'una etapa model GPL026-1 (Gysin, Suïssa) i un motor de passos ST2818S1006-B (Nanotec, Alemanya), l'actuador DOF-5 (Dover Motion, EEUU) i el FBS050020 (Nano Motion, EEUU).

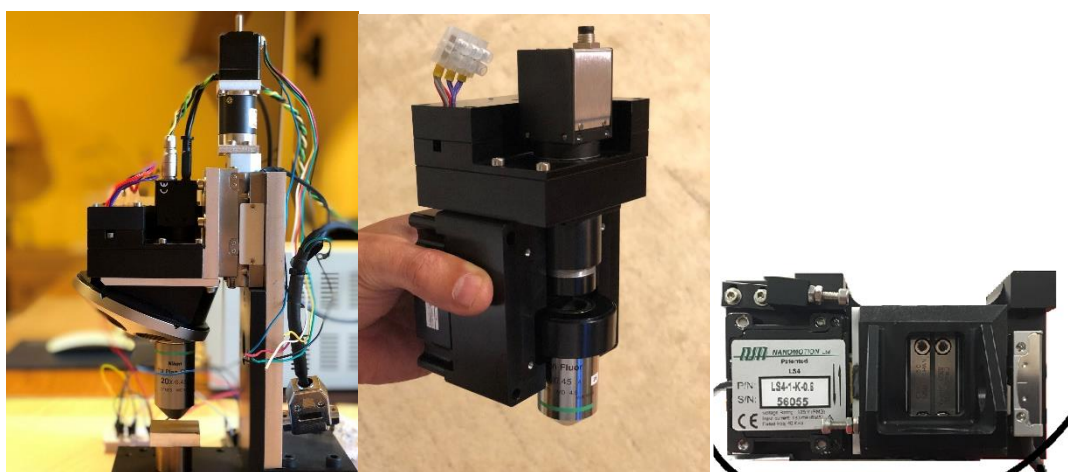


Figura 3.27. Suruga Seiki (esquerra), DoverMotion (centre) i NanoMotion (dreta).

Taula 3.3. Característiques tècniques dels diferents motors.

Marca	Suruga Seiki + Gysin + Nanotec	Dover Motion	Nano Motion
Tecnologia d'accionament	Motor de passos	Motor lineal sense escobretes (BLDC)	PiezoWalk®
Guiatge	Coixinet de rodets creuats		
Retroalimentació	No	Codificador òptic	Codificador òptic
Rang de moviment	20 mm	5 mm	20 mm
Massa suportada	5 kg	100-900 g	400 g
Resolució	5 nm	1.25 nm	10 nm
Velocitat màxima	20 mm/s	125 mm/s	200 mm/s

Per tal de caracteritzar el comportament dels diferents models analitzats, hem analitzat diferents característiques que poden afectar al resultat final quan es mesura una mostra amb un escombrat. L'error de linealitat en el rang de moviment es trasllada directament en un error en la mesura, ja que la posició comandada difereix de la posició real, de manera que les posicions que el sistema introdueix en el càlcul de la posició de la mostra són errònies. La resolució del moviment condiona i limita la resolució vertical que es pot aconseguir amb el sistema, de forma que per a què un sistema sigui capaç de detectar la posició axial amb precisió cal que el sistema de moviment tingui una bona resolució. Aquestes tres etapes de moviment lineal les hem caracteritzant tot estudiant-ne l'error de linealitat, la repetibilitat en la precisió del moviment quan es fan moviments de posicionat, i finalment el *backlash*.

Per a realitzar les caracteritzacions s'ha utilitzat un interferòmetre làser, en concret el model IDS3010 (Attocube, Alemanya). Aquest interferòmetre requereix que a la part mòbil hi hagi un mirall retroreflector per a poder mesurar el desplaçament lineal mitjançant l'anàlisi de la interferència que es produeix entre el feix de llum que va al retroreflector i el feix de llum que va al mirall de referència. La Figura 3.28 mostra el muntatge experimental, on s'ha substituït l'objectiu de microscopi pel retroreflector. La muntura cinemàtica serveix per orientar el làser i optimitzar el senyal recuperat. La presència del mirall a 45° és per a optimitzar les distàncies de treball i poder treballar amb l'interferòmetre en horitzontal, mentre que el motor es mogui en l'eix òptic (direcció vertical).

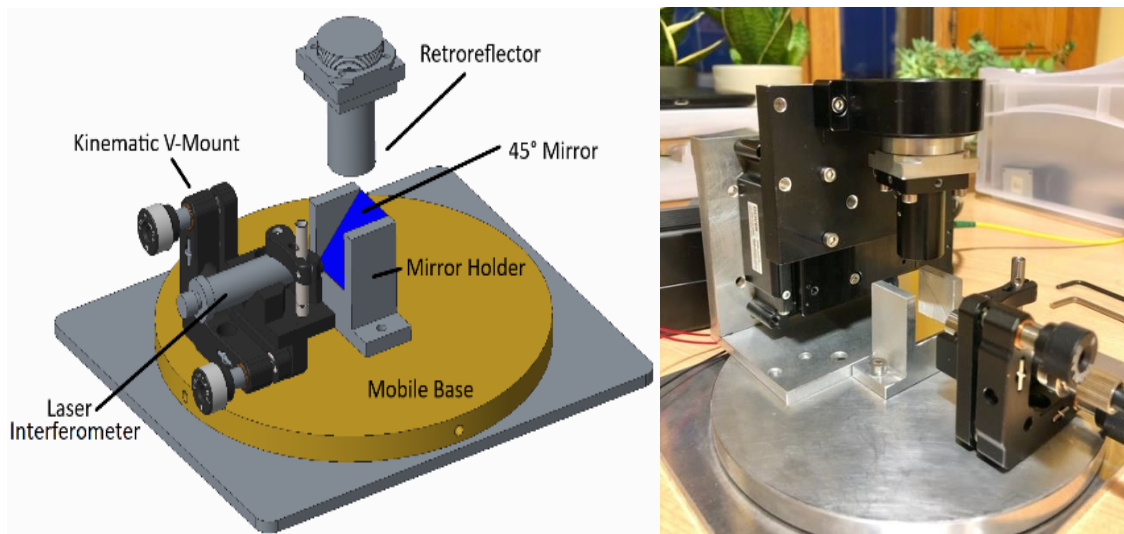


Figura 3.28. Muntatge experimental del làser interferomètric per a la caracterització dels motors.

Per tal de determinar les no-linealitats dels diferents motors s'han caracteritzat els 5 mm centrals de tots els motors en la Figura 3.29. S'han mogut a una velocitat de $100 \mu\text{m/s}$ i posteriorment s'ha sostret el pendent per a recuperar les no-linealitats.

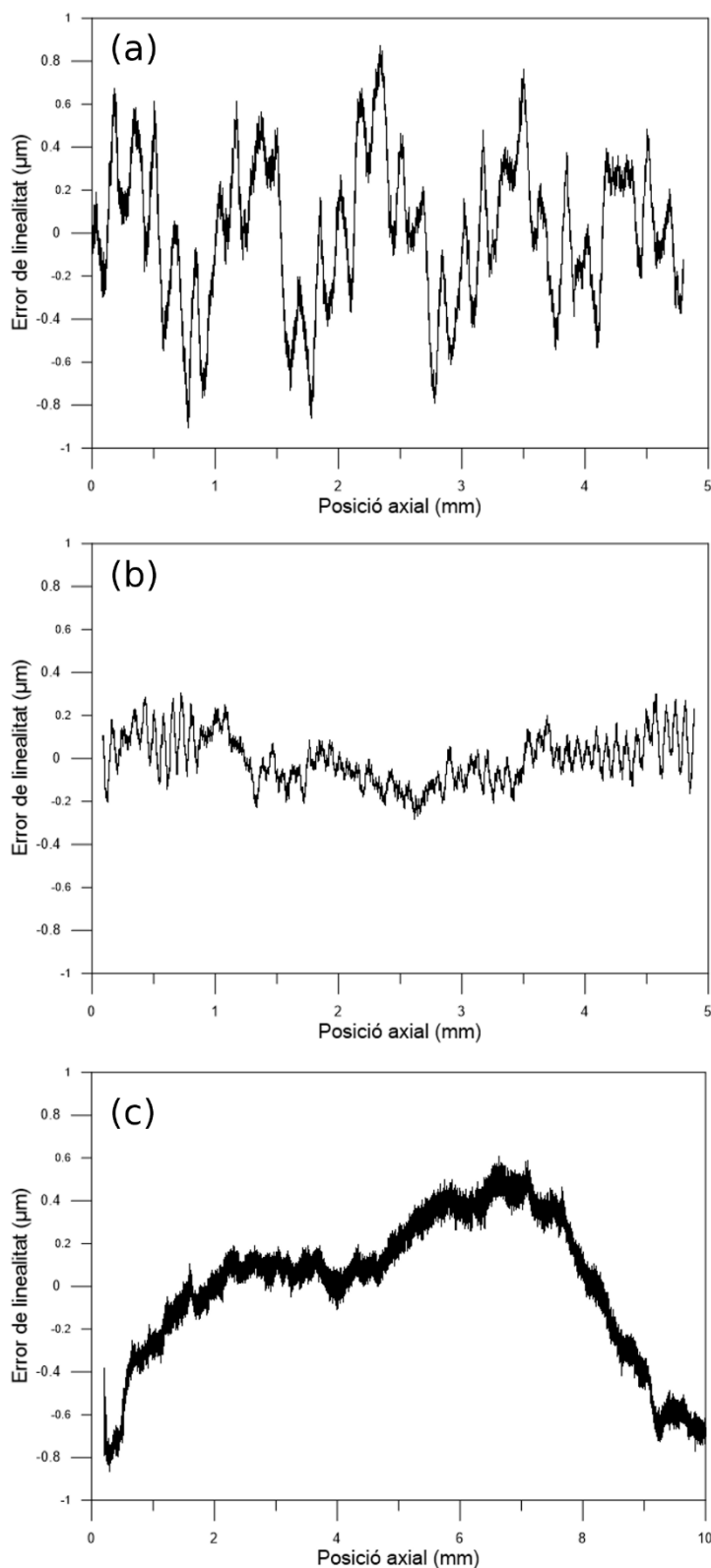


Figura 3.29. Error de linealitat per a (a) Suruga Seiki (motor de passos), (b) Dover Motion (motor lineal), (c) Nano Motion (actuador piezoelèctric)

En el cas de Suruga Seiki veiem que és el que té un pitjor comportament, ja que l'error de linealitat és periòdic, amb unes freqüències ben definides, i d'amplitud de gairebé 2 µm en pic-

a-vall (PV). El Dover Motion també té un error periòdic però està contingut en amplitud a $0.4 \mu\text{m}$ de PV. Aquest error periòdic, però, és de freqüència molt més elevada que en el cas de Suruga Seiki, i té el seu origen en el control electrònic degut a la generació del *chopping* de voltatge per la generació de micropassos. Per finalitzar, tenim que el Nano Motion presenta unes no-linealitats no periòdiques d'amplitud també de gairebé $2 \mu\text{m}$, però amb la diferència que és de molt baixa freqüència, i per tant no és tant crítica en la mesura tridimensional. No obstant, té una amplitud de soroll molt major als altres dos motors analitzats.

Aquests errors de linealitat es poden veure incrementats o minimitzats en funció de la velocitat. En la Figura 3.30 s'ha tornat a caracteritzar el moviment a una velocitat més lenta, $10 \mu\text{m/s}$ en el cas del motor Suruga Seiki i $5 \mu\text{m/s}$ per als altres dos. S'ha mantingut la velocitat de $100 \mu\text{m/s}$ com a referència i s'ha limitat el rang de mesura a $200 \mu\text{m}$.

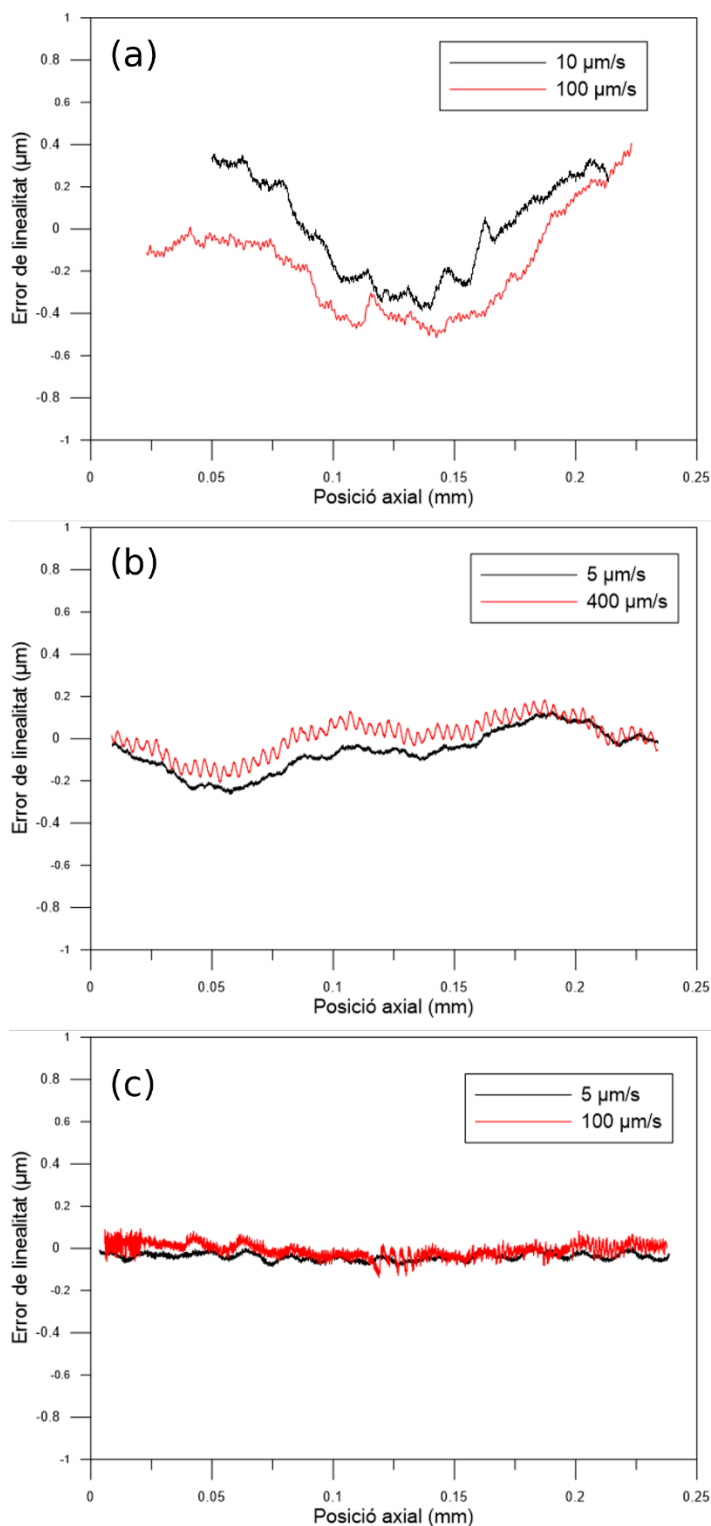


Figura 3.30. Comparativa d'errors de linealitat a velocitats alta i baixa. (a) Suruga Seiki, (b) Dover Motion, (c) Nano Motion.

Es pot apreciar com en els tres casos les no-linealitats segueixen la mateixa tendència de baixa freqüència independentment de la velocitat, la qual cosa ens indica que probablement és un error mecànic del guiatge. El pitjor dels casos és el de Suruga Seiki, que tot i mantenir la mateixa

tendència, no és tant semblant com els altres dos. En el DoverMotion i el NanoMotion apareix una oscil·lació de major freqüència però d'amplitud més baixa que es repeteix a tot el rang.

En el cas de DoverMotion a velocitat baixa desapareix l'oscil·lació d'alta freqüència. Això és degut a que a partir d'una certa velocitat hi ha un canvi de freqüència del control electrònic del sistema de retroalimentació i el servo no és capaç de corregir tant efectivament els errors de posició del motor.

Similarment, en el cas de NanoMotion, quan el sistema es mou a velocitat alta, el moviment és molt més sorollós que quan es mou a velocitat baixa, tot i que no pateix d'una oscil·lació tant definida com en el cas de DoverMotion, l'amplitud de l'error és del mateix ordre de magnitud. Cal mencionar que en aquest cas, NanoMotion no mostra un error de linealitat de baixes freqüències perquè al reduir el rang de moviment el motor s'ha trobat en una regió força lineal.

Degut a l'existència d'aquestes oscil·lacions tan ben definides cal caracteritzar-les tant en freqüència com en amplitud en un tram el més lineal possible i encara més limitat en rang. La velocitat escollida és de 10 $\mu\text{m/s}$.

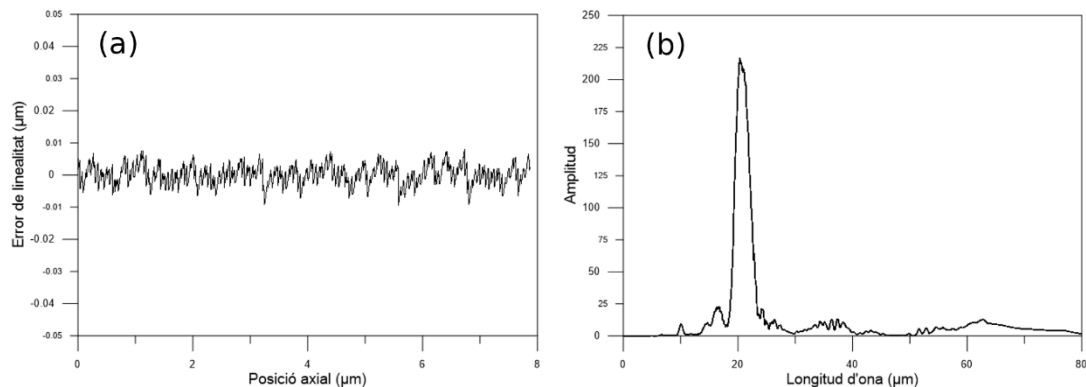


Figura 3.31. Suruga Seiki. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error

El motor de Suruga Seiki té una freqüència de 0.3 μm de període i 3.5 nm d'amplitud molt ben definida i una altra de període de 0.83 μm i 2 nm d'amplitud. La primera correspon al control electrònic i per això té un ample de banda molt reduït. L'altra, en canvi, correspon al pas complet del motor. El fuset d'aquest motor és de 1000 μm per volta, mentre que el motor és de 200 passos i considerant el reductor 1:6 que té incorporat, el pas sencer del motor és del 0.83 μm , però per a petites imperfeccions en la fabricació, no tots els passos seran exactament d'aquesta quantitat, i per això l'amplada d'aquest pic és major.

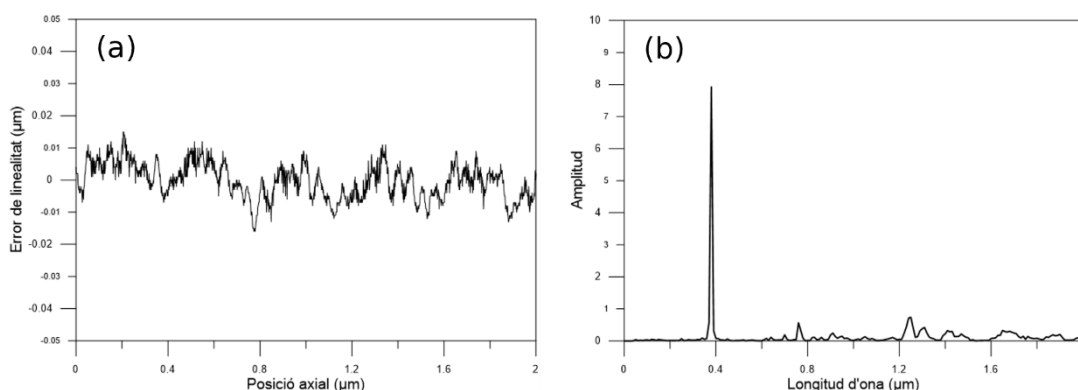


Figura 3.32. DoverMotion. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error

En el cas de DoverMotion es pot apreciar una única freqüència molt ben definida de 0.4 μm de període amb una amplitud de 8 nm. Aquesta freqüència correspon al control electrònic del motor.

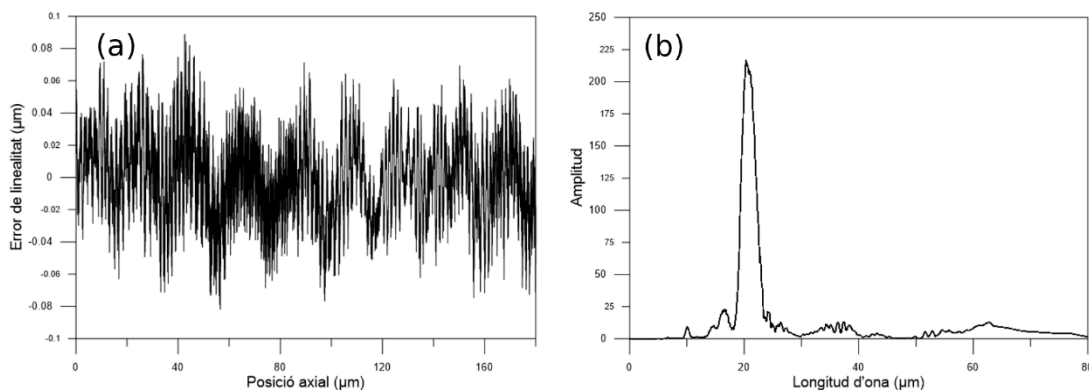


Figura 3.33. NanoMotion. (a) error de linealitat i (b) anàlisi espectral de l'error

Finalment, en el cas de NanoMotion, també apareixen altres freqüències, però n'hi ha una que domina tot l'espectre per la seva amplitud de 225 nm, amb un període de 20 μm. Aquest període correspon al les distàncies entre línies del regle òptic.

Fins ara la caracterització dels diferents motors ha consistit en els moviments a velocitats constants, però un sensor òptic també realitza moviments de posicionat (moviments grans i ràpids) o bé grans petits i constants en un escombrat confocal. És per això que hem caracteritzat la repetibilitat a l'hora de fer diferents grans discrets, amb valors de 0.1 μm, 1 μm, 10 μm i 100 μm.

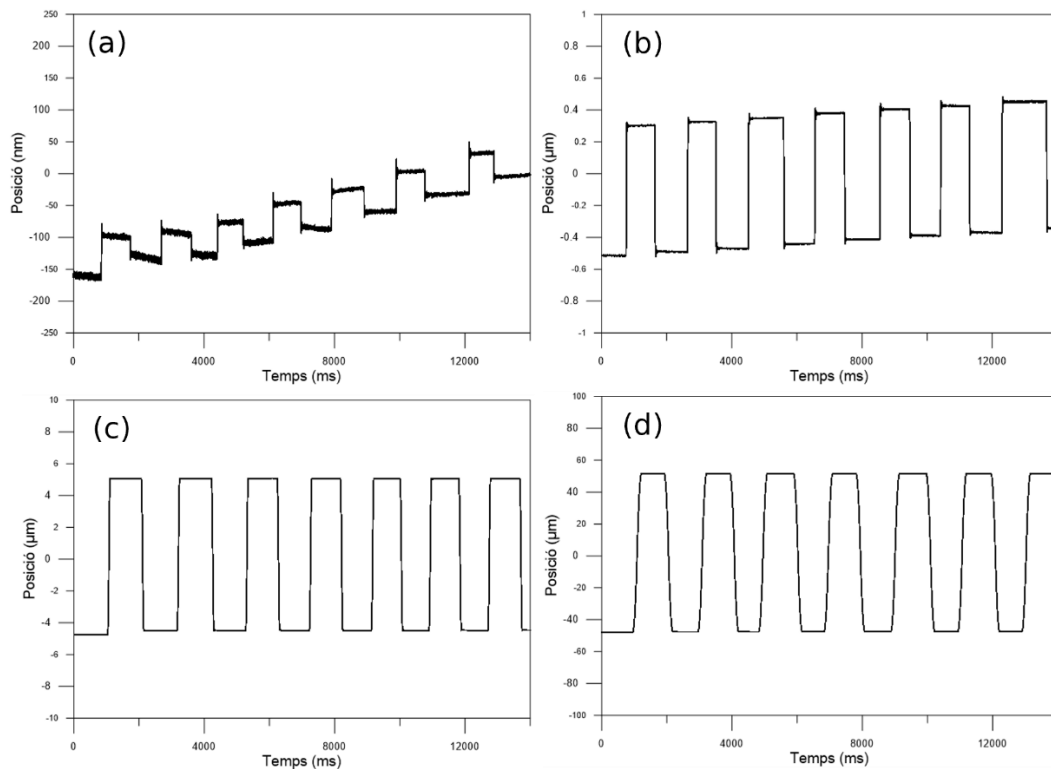


Figura 3.34. Repetibilitat del motor Suruga Seiki a l'hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 μm, (c) 10 μm i (d) 100 μm.

El motor Suruga Seiki té una deriva a l'hora de tornar al mateix lloc després de fer un graó, que s'aprecia amb els graons de 0.1 μm i 1 μm, mentre que ens els altres dos casos el valor del graó es tan gran que la deriva queda dissimulada. El que també es pot apreciar és que el valor del graó tampoc és correcte, ja que en el cas de 0.1 μm és força variable mentre que en el de 1 μm és de 0.8 μm. En el cas de 10 i 100 μm sí que arriba a fer el graó correctament. L'error en el valor del graó té el seu origen en el *backlash* del fuset i les guies i patins i a la falta de retroalimentació d'aquest motor. L'error de posicionat de *backlash* es pot minimitzar fent un moviment addicional dues vegades en direccions contràries d'entre 5 i 10 micres d'amplitud.

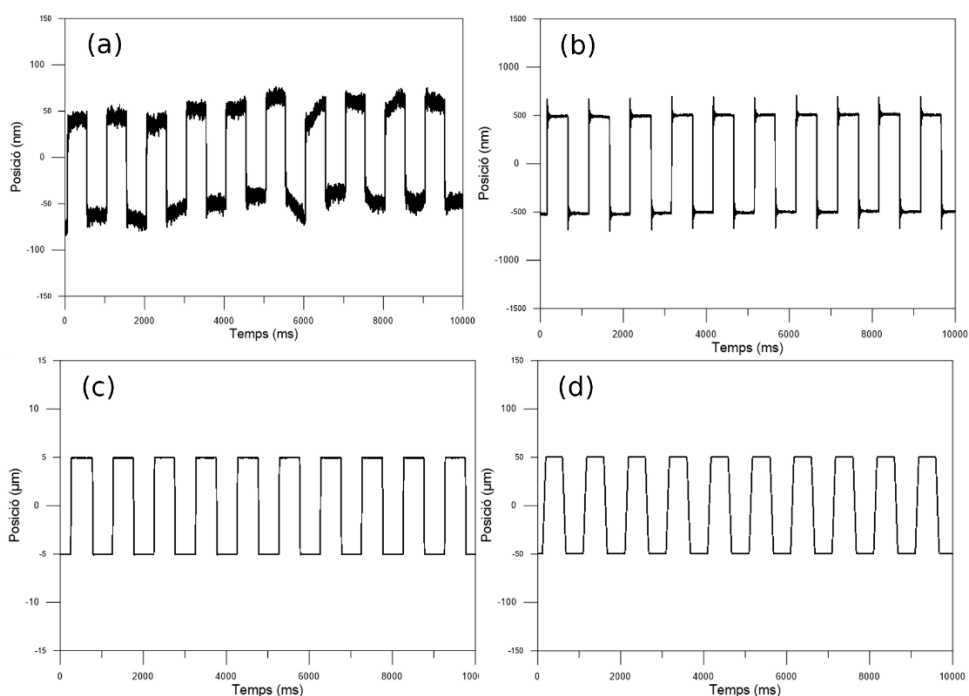


Figura 3.35. Repetibilitat del motor DoverMotion a l’hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 μm, (c) 10 μm i (d) 100 μm.

Es pot apreciar com el motor de DoverMotion és molt més estable, el valor del graó és molt precís en tots els casos, amb una mica de variabilitat en el graó més petit. Tampoc presenta deriva en les diferents repeticions dels graons. Únicament presenta una breu oscil·lació d’estabilització en el graó de 1 μm degut a la frenada, oscil·lació que no s’aprecia (per escala) en els graons més grans.

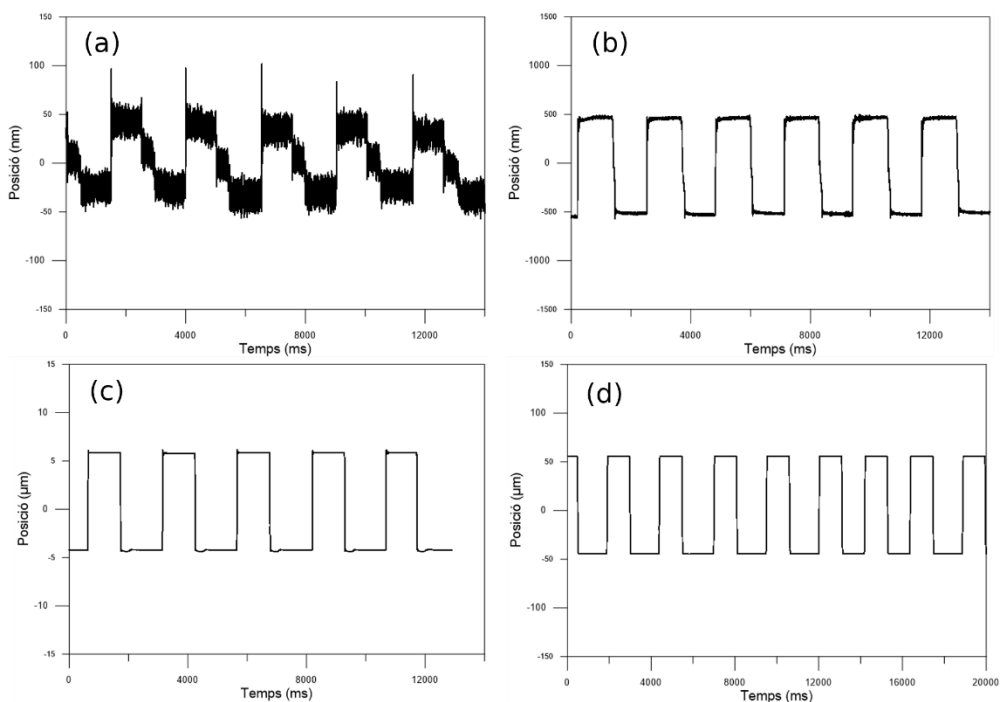


Figura 3.36. Repetibilitat del motor NanoMotion a l’hora de fer graons de (a) 100 nm, (b) 1 μm, (c) 10 μm i (d) 100 μm.

Per finalitzar, el NanoMotion presenta una precisió en el valor dels graons molt bona gràcies al sistema de retroalimentació, però presenta una parada intermitja en el moviment de baixada del graó, circumstància especialment evident en el graó més petit. Aquest efecte és una de les limitacions de la tecnologia, i és degut principalment a que la gravetat actua de forma oposada al moviment si el motor puja i accentua el moviment si el motor baixa. Per defecte el sistema actua en excés quan fa la baixada i per això requereix un temps de reposicionat.

A l'hora de caracteritzar un moviment ràpid i brusc, és important saber com és el temps de resposta, i.e. com de ràpid es mou i quin temps d'estabilització té. En la Figura 3.37 s'ha representat el moviment de cada motor quan se li ha comandat un graó de 10 μm .

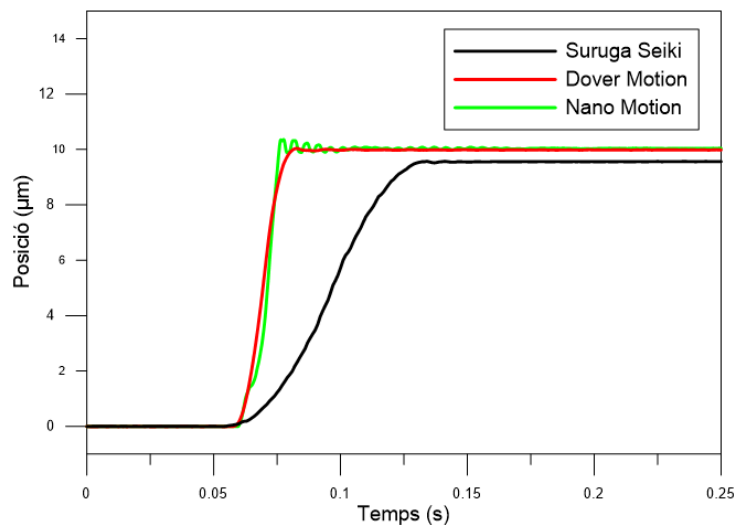


Figura 3.37. Temps de resposta d'un graó.

Com es pot apreciar, l'actuador més ràpid és el DoverMotion, que gairebé s'estabilitza instantàniament. En total té un temps de resposta de 0.025 s, mentre que el NanoMotion té un temps de resposta lleugerament superior, 0.04 s tot i que l'increment es deu bàsicament al temps que necessita el sistema per estabilitzar-se, ja que un cop arriba a la posició esperada pateix una oscil·lació que triga 0.015 s a desaparèixer. Per últim, el Suruga Seiki és el més lent per a arribar a la posició, 0.075 s, tot i que un cop arriba no oscil·la i no necessita estabilitzar-se. Per tal d'anar més ràpid es podrien optimitzar els paràmetres d'acceleració del motor, però hem decidit fer servir els valors per defecte perquè venen optimitzats pel fabricant per a un ús polivalent de l'actuador. Finalment també es pot apreciar la falta de retroalimentació en el Suruga Seiki ja que la posició final és diferent a la comandada. Aquest error es podria compensar amb un factor multiplicatiu.

Finalment hem fet un estudi de repetibilitat en la posició dels moviments de graons de 10 μm . Hem filtrat els graons per separar-los entre les parts superiors i les parts inferiors.

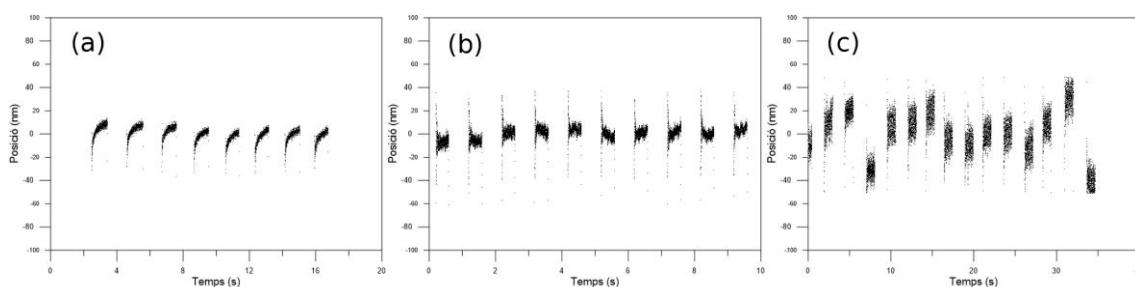


Figura 3.38. Parts superiors dels graons. (a) Suruga Seiki; (b) DoverMotion; (c) NanoMotion

Filtrant només les parts superiors podem observar que el sistema més estable és el DoverMotion, ja que malgrat té una amplitud de 80 nm, ràpidament s'estabilitza i passa a una amplitud de 20 nm, on addicionalment el motor torna aproximadament al mateix lloc en cada repetició de l'esglaó. El motor Suruga Seiki té un comportament força similar en termes de repetibilitat i amplitud final del soroll, però amb la diferència que és més lent en arribar a la posició estable i el graó no es veu pla sinó que presenta una corba significativa. En canvi, el NanoMotion presenta un soroll de 30 nm d'amplitud, i en termes de repetibilitat es veu a simple vista que hi ha 3 de les 8 repeticions que presenten desviacions respecte el valor promig.

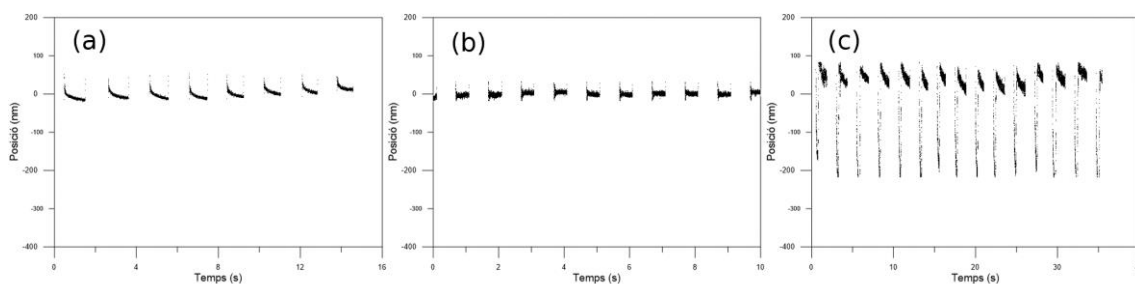


Figura 3.39. Parts inferiors dels graons. (a) Suruga Seiki; (b) DoverMotion; (c) NanoMotion

El comportament del sistema és molt similar quan analitzem els perfils inferiors dels graons en els actuadors SurugaSeiki i DoverMotion, mentre que en el cas de NanoMotion el fet d'estar el moviment en caiguda fa que hi hagi una deriva cap avall que no és capaç d'estabilitzar adequadament, amb l'afegit que hi ha un efecte similar al *backlash*, un rebot per a compensar un sobre excés de moviment.

Com a conclusió l'actuator que millors prestacions presenta és el DoverMotion, que com hem vist gairebé no pateix d'errors de linealitat, és el més ràpid en executar els graons amb uns resultats de precisió i repetibilitat excel·lents. L'únic inconvenient és que és un motor dissenyat per a un únic objectiu, i per tant no admet torreta amb múltiples objectius. Aquest fet és limitant de cara a aplicacions industrials on la mostra o mostres tenen diferents característiques a mesurar amb diferents magnificacions o tècniques. Aquesta limitació també la presenta el NanoMotion, mentre que el Suruga Seiki permet posar una torreta amb diversos objectius. Això és degut a que en lloc de desplaçar únicament l'objectiu de microscopi (amb les limitacions de pes i d'espai que comporta), mou tota la taula lineal, de manera que a efectes pràctics mou tot el sensor, deixant l'espai per a col·locar la torreta.

3.2. Interferometria de llum blanca

Com s'ha mencionat al capítol 2.1.1, l'estat interferencial es produeix quan interaccionen dos feixos de llum. En un interferòmetre aquests dos feixos provenen de la reflexió sobre la mostra i de la reflexió en el mirall de referència que està situat a una posició fixa dins del sistema. La intensitat detectada per la càmera és el valor absolut de la superposició coherent dels dos fronts d'ona, i en la majoria de casos es pot simplificar de la forma:

$$I(z) = I_0 + I_0\gamma(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}z + \phi\right) \quad (3.1)$$

on I_0 és el senyal de fons o *bias*, $\gamma(z)$ és la visibilitat de les franges o envoltent de coherència, λ_0 és la longitud d'ona dominant de l'espectre de la font de llum utilitzada i ϕ és la fase degut a la diferència de camí òptic (OPD, *Optical Path Difference*) entre el feix de referència i el feix de mesura. L'envoltent de coherència és proporcional a l'amplitud de la transformada de Fourier de l'espectre de llum utilitzat, de manera que si la llum emprada té un espectre gaussià, llavors $\gamma(z)$ també tindrà una forma gaussiana. La diferència de fase correspon a dues vegades la diferència de camí h entre els dos feixos:

$$\phi = 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_0} h \quad (3.2)$$

És fàcil veure com aquesta diferència de camí són les alçades relatives de la mostra. Per tant, hi ha una relació entre la intensitat detectada per la càmera i la fase de la interferència, que alhora està relacionada directament amb l'alçada de la mostra. Llavors, en el cas que es pugui obtenir la fase per a cada píxel, es podrà calcular l'alçada de la mostra per a aquell píxel. Hi ha una extensa literatura sobre diferents algoritmes per a recuperar la fase d'un interferograma utilitzant un desplaçament de fase relatiu entre el feix de mesura i el de referència. Els algoritmes però, assumeixen que aquest desplaçament, realitzat habitualment amb un sistema piezoelèctric o un motor, sigui el mateix al llarg de tota la mesura. A la Taula 3.4 es mostra el recull que va fer Malacara [14] dels algoritmes més utilitzats, on els classifica en funció del seu rendiment envers problemàtiques diverses.

Taula 3.4. Recull dels algorismes de PSI més utilitzats. B = Bé. MB = Molt bé. Les caselles buides indiquen que l'algorisme és força sensible a l'efecte de la columna.

Imatges	Algorisme	Comportament erràtic			
		Canvi de fase lineal	Vibració	Turbulència de vibració	Detector no lineal
3	Bruning, et al. 1974				
	Wyant, et al. 1984b				
4	Bruning, et al. 1974				B
	Schwider, 1993	B			
	Larkin and Oreb, 1992				
	Larkin, 1992, Surrel, 1993	B	B	B	B
5	Schwider, 1983, Hariharan, 1987				
	Schmit and Creath, 1995				
	Bi, 2004				
	Surrel, 1997b				
6	Schmit and Creath, 1995	B	B	B	
	Zhao, 1997, Surrel 1996	B			B
	Onodera, 2003				
7	Larkin and Oreb, 1993		B		B
	Larkin, 1992, Surrel, 1993		B		MB
	de Groot, 1994			B	
	Hibino, 1995			B	B
8	Schmit and Creath, 1996				
	Schmit and Creath, 1996	B			
	Schmit and Creath, 1996	B	B		
	Schmit and Creath, 1996	B	B	B	
	Schmit and Creath, 1996	MB	B		MB
10	Hibino, 1995		MB		MB
11	de Groot, 1994	B			MB

Un dels algorismes que presenta més beneficis és el de Hariharan, amb l'avantatge que només requereix 5 imatges:

$$\tan \phi = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \tag{3.3}$$

No obstant, recuperar l'alçada únicament a través de la fase té problemes d'incerteses de 2π pel fet que en algun moment s'ha d'aplicar la funció arctangent. Aquestes incerteses es poden solucionar parcialment amb algorismes de *unwrapping* [15], però no sempre funcionen i tenen certs requisits, com per exemple una mínima continuïtat de la superfície.

Una altra manera de trobar l'alçada de la mostra per a cada píxel és calcular l'envolvent de coherència $\gamma(z)$ que actua com a modulació d'una funció sinusoidal. El màxim d'aquesta envolvent correspon a la OPD = 0, que a la seva vegada correspon a la posició de millor enfoc de la mostra, i per tant, a la seva alçada. Aquest és el principi fonamental de CSI: determinar

l'envolvent d'un conjunt d'interferogrames enregistrats al llarg de l'eix òptic i detectar la posició axial del seu màxim.

Hi ha diversos mètodes per a calcular l'envolvent, però principalment se n'utilitzen 3: els algoritmes de canvi de fase (*Phase Shifting Algorithms*, PSA), via transformada de Fourier, o bé via transformada de Hilbert.

Si bé els algoritmes de fase serveixen per a recuperar la fase de la mostra amb l'inconvenient de les incerteses de 2π , també serveixen per a recuperar l'envolvent. Si en general els algoritmes tenen la forma:

$$\tan \phi = \frac{N}{D} \quad (3.4)$$

llavors l'envolvent es pot calcular mitjançant:

$$\gamma(z) = \frac{\sqrt{N^2 + D^2}}{\text{normalització}} \quad (3.5)$$

Harasaki[16], però, van desenvolupar un algoritme més robust a vibracions on es fan servir 5 imatges amb un desplaçament axial de $\pi/2$ entre elles, corresponent a $\lambda/8$:

$$\gamma(z) \propto (I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_3)(I_3 - I_5) \quad (3.6)$$

que és el que farem servir en el transcurs d'aquest estudi.

Una altra manera d'obtenir l'envolvent és mitjançant la transformada de Fourier, proposat per Chim i Kino [17]. L'equació (3.1) considera que la interferència pertany a una única longitud d'ona, però en realitat el correlograma és la suma de totes les interferències corresponents a totes les longituds d'ona presents en la font de llum utilitzada.

Si considerem que la interferència en l'espai real és la transformada de Fourier inversa de la funció en l'espai de freqüències, llavors:

$$I(z) = TF\{I(\omega)\} = \int_{-\infty}^{\infty} I(\omega)e^{-iz\omega} d\omega \quad (3.7)$$

on $i = \sqrt{-1}$. Llavors, realitzant un canvi de variable de la freqüència ω com

$$\omega = \omega_0 + \Omega \quad (3.8)$$

on ω_0 és la freqüència central i Ω representa les altres freqüències presents a l'espectre la font de llum present en el correlograma. Llavors:

$$I(z) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} I(\omega_0 + \Omega)e^{-iz\Omega} d\Omega \right] \cdot e^{-iz\omega_0} \quad (3.9)$$

Cal remarcar que la relació obtinguda és la intensitat de l'envolvent (primer terme) multiplicada per la variació ràpida de la freqüència central (segon terme).

Si generem un desplaçament de l'espectre de Fourier per a centrar-lo a la freqüència nul·la, significa que estem afegint un desplaçament de $\Omega' = \Omega - \omega_0$, de manera que l'equació (3.9) queda:

$$\begin{aligned} I'(z) &= \left[\int_{-\infty}^{\infty} I(\omega_0 + \Omega - \omega_0) e^{-iz\Omega} d\Omega \right] \cdot e^{iz\omega_0} \cdot e^{-iz\omega_0} = \\ &= \left[\int_{-\infty}^{\infty} I(\Omega) e^{-iz\Omega} d\Omega \right] = I_{env}(z) \end{aligned} \quad (3.10)$$

D'aquesta manera, es demostra que centrant a 0 les freqüències provinents de l'interferograma capturat en l'espai de Fourier es pot recuperar l'envolvent de l'interferograma. Cal remarcar que en aquest procés cal eliminar les freqüències nul·la i negatives per a un correcte funcionament. Aquest mètode, però, és relativament costós ja que es requereixen dues transformades de Fourier: una per anar a l'espai de freqüències i l'altra per tornar a l'espai real un cop ja s'ha aplicat els filtres corresponents.

No obstant, aquest mètode només és vàlid quan es fan servir espectres de llum gaussians o simètrics. La raó és que la transformada inversa de Fourier només retorna un senyal real si les freqüències negatives són idèntiques a les positives. D'aquesta manera, si l'espectre no és simètric, quan es centri l'espectre de freqüències respecte a la seva freqüència dominant, les freqüències negatives no seran idèntiques a les positives, i al fer la transformada inversa no serà un senyal real. Una manera de solucionar-ho és, un cop centrat l'espectre de freqüències a zero, retallar les freqüències negatives i duplicar l'espectre positiu emmirallat. L'espectre resultant, malgrat ser una bona aproximació, té un error degut a que s'ha perdut informació freqüencial en el procés.

L'últim dels principals mètodes per a recuperar l'envolvent es basa en utilitzar la transformada de Hilbert, mètode descrit per Chim i Kino[18]. En aquest mètode es fa ús del fet que si a l'equació (3.1) se li sostrau el terme I_0 o *bias*, només queda el terme que representa l'oscil·lació dependent del cosinus.

$$I'(z) = I_0 \gamma(z) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z + \phi\right) \quad (3.11)$$

La transformada de Hilbert permet afegir digitalment un desplaçament de $\pi/2$ a un senyal qualsevol, mitjançant l'expressió

$$I'^*(\omega) = -i \cdot \text{sgn}(\omega) \cdot I'(\omega) \quad (3.12)$$

on $I'(\omega)$ és el senyal de l'equació (3.11) en l'espai de Fourier i $\text{sgn}(\omega)$ és la funció signe, definida com:

$$\text{sgn}(\omega) = \begin{cases} -1, & \text{si } \omega < 0 \\ 1, & \text{si } \omega > 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

Finalment la imatge transformada tindrà la forma:

$$I'^*(z) = I_0 \gamma(z) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} z + \phi\right) \quad (3.14)$$

Amb aquestes transformacions es pot crear un nou senyal amb la forma

$$V(z) = I'(z) + iI'^*(z) \quad (3.15)$$

Aquest senyal, que rep el nom genèric de senyal analític, té la propietat que és un senyal complex però del qual el seu espectre de freqüències negatives sempre és nul, i com es pot observar, la seva part real és el senyal original $I'(z)$. Del senyal analític es pot demostrar que l'envolvent és l'amplitud del senyal analític:

$$\gamma(z) \propto |V(z)| = \sqrt{I'^2(z) + I'^{*2}(z)} \quad (3.16)$$

El principal benefici de recuperar l'envolvent a través de la transformada de Hilbert és que no es requereixen passos del motor de $\pi/2$, sinó que pot ser qualsevol. Addicionalment, aquest mètode és força insensible a vibracions que ocasionin que els passos no siguin tots iguals, generant petites diferències entre ells.

Aquests són els tres principals mètodes per a recuperar l'envolvent, però existeixen altres alternatives. Montgomery [19] per exemple proposa de fer servir l'operador d'energia Teager-Kaiser:

$$\Psi[I(z)] = \dot{I}^2(z) - I(z) \cdot \ddot{I}(z) \quad (3.17)$$

on \dot{I} és la derivada de la intensitat, \ddot{I} és la segona derivada de la intensitat. Llavors amb aquest operador l'envolvent queda:

$$\gamma(z) \propto \frac{\Psi[I(z)]}{\sqrt{\Psi[\dot{I}(z)]}} \quad (3.18)$$

Aquest mètode però, presenta molta sensibilitat al soroll, que es pot minimitzar filtrant el senyal, però fent que en la mesura real de superfícies sigui poc pràctic.

Un cop es recupera l'envolvent, cal determinar el màxim d'aquesta, que correspon amb la posició de focus de la mostra. En general es fan servir dues maneres per a calcular-lo. La primera és a partir del centre de masses mitjançant la fórmula

$$z_{CM} = \frac{\sum[z \cdot \gamma(z)]}{\sum\gamma(z)} \quad (3.19)$$

Una de les limitacions del centre de masses és pot no coincidir amb la posició del màxim de l'envolvent. Sovint és suficient establint un llinar per tal que el soroll quedi exclòs del càlcul. De totes maneres, Ai [20] descobreix que la detecció del centre de masses és molt més robusta si es calcula a partir del quadrat la derivada del senyal detectat per la càmera. Llavors l'equació (3.19) resulta

$$z_{CM} = \frac{\sum(I_z - I_{z-1})^2 \cdot z}{\sum(I_z - I_{z-1})} \quad (3.20)$$

La segona manera de determinar la posició del màxim de l'envolvent és a partir d'ajustar la pròpia envolvent a una funció gaussiana al voltat del seu pic. El fet de no utilitzar totes les dades de l'envolvent, no ocasiona un error significatiu en la detecció de la posició de focus al no tenir una corba totalment gaussiana.

El mètode de centre de masses és força més robust quan l'envolvent del correlograma no és perfecta i presenta oscil·lacions en la seva forma, que poden tenir el seu origen en vibracions

externes o bé en un moviment no precís del motor. També presenta el benefici que es pot anar calculant en línia a mesura que es van capturant les imatges, reduint el temps de còmput un cop l'adquisició ja s'ha finalitzat. Per altra banda, l'ajust gaussià presenta una precisió molt més elevada si el sistema no pateix vibracions.

3.2.1. Perfils de moviment

En el cas de CSI, els algoritmes requereixen capturar les imatges de manera que el desplaçament en la direcció axial entre dues imatges consecutives sigui constant.

En l'àmbit d'aquesta tesi, on es pretén desenvolupar d'un sensor ultra-ràpid, el nostre objectiu és mesurar 1 mm en 1 s. Gràcies a que la càmera del nostre sensor arriba als 1000 fps entre frame i frame cal que el desplaçament sigui de 1 μ m. El desplaçament òptim entre imatges consecutives per a la majoria d'algoritmes de PSA és de $\lambda/8$, corresponent a un canvi de fase de $\pi/2$. Si fem servir una font d'il·luminació blanca, que té una longitud d'ona dominant al voltant dels 550 nm, llavors el pas entre dues imatges seguides és de 68.75 nm. Això implica que cal desplaçar el sensor a 13.8 vegades la seva velocitat òptima, essent l'imparell més proper 13 o 15. Per a que l'algoritme de fase sigui prou robust per a obtenir l'envolvent, cal moure el sensor a $(2N+1)$ vegades la velocitat òptima.

La informació útil d'un interferograma depèn de l'espectre de llum utilitzat i, en concret, de la seva longitud de coherència, que ve determinada per:

$$L = \frac{\lambda^2}{n\Delta\lambda} \quad (3.21)$$

on λ és la longitud d'ona dominant, n l'índex de refracció del medi i $\Delta\lambda$ l'amplada de l'espectre de llum. Com més ample sigui l'espectre de la font de llum, més curta serà la longitud de coherència i més estreta l'envolvent del correlograma. Això és degut a que la intensitat detectada per la càmera és la suma de la interferència per a totes les longituds d'ona. Això ocasiona que la interferència constructiva és dona únicament en la posició $OPD = 0$, mentre que a mesura que el sensor s'allunya d'aquesta posició, l'estat de la interferència del feix de referència amb el feix reflectit en la mostra serà diferent per a cada longitud d'ona. D'aquesta manera hi ha una modulació de les interferències constructives efectives fora de focus, arribant a un punt que la interferència detectada per la càmera perd totalment el contrast, doncs només detecta el bias descrit a l'equació (3.1). Com més ample sigui l'espectre, la longitud de coherència disminueix i abans es perdrà el contrast de la interferència i la longitud de coherència disminueix.

D'aquesta manera el rang d'escombrat del sistema en què encara es pugui detectar informació sobre la posició de la mostra ve determinada per l'espectre de llum utilitzat per a il·luminar la mostra. Com es pot veure en la Figura 3.40, l'espectre d'un làser conté una única longitud d'ona i per tant produeix una longitud de coherència de la interferència infinita, o gairebé infinita, mentre que en l'altre cas extrem, la llum blanca genera una interferència amb una envoltant de poques micres de longitud de coherència.

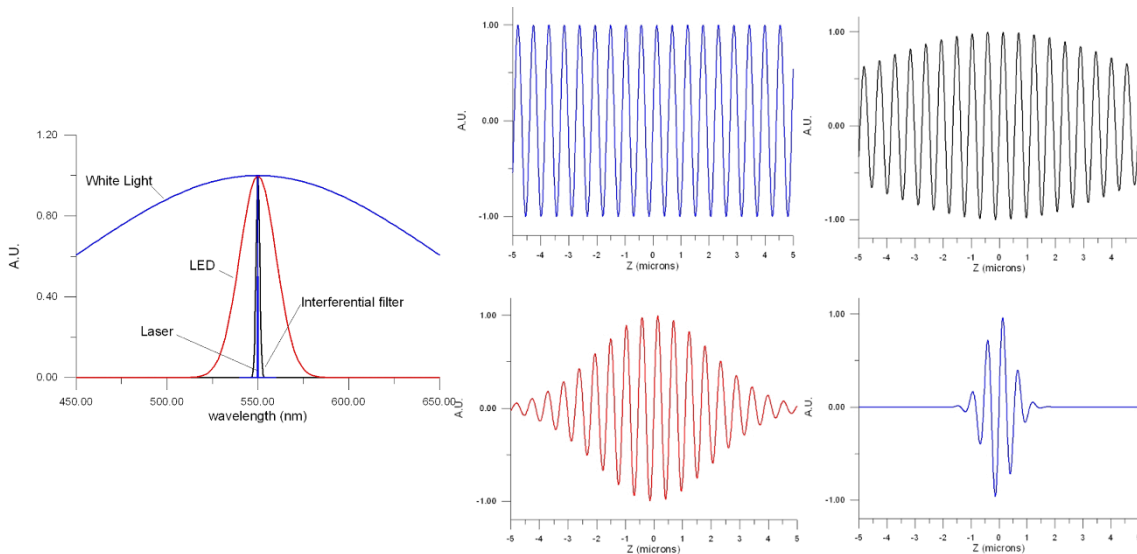


Figura 3.40. La longitud de coherència d'un interferograma depèn de l'espectre de la font de llum. Esquerra: Espectres de diferents fonts de llum: llum blanca, un LED, un filtre interferencial i un làser. Els interferogrames que generen a la dreta.

Això ocasiona que si la longitud de coherència és molt curta la informació del correlograma està continguda en un rang vertical limitat. Si, com en el nostre cas, necessitem tenir un mostreig 15 vegades inferior, la quantitat de punts en què encara hi ha interferència amb prou contrast per a ser detectada per la càmera pot ser massa baixa respecte al mínim nombre de punts necessari per a reconstruir l'envolent correctament i conseqüentment, poder detectar la posició de la mostra.

Per contra, com menor sigui la longitud de coherència de la font de llum, l'envolent reconstruïda a través de l'interferograma serà més estreta i el càlcul del màxim de la mateixa serà molt més precís i estable, ja sigui per centre de masses com per ajust parabòlic de la regió central. En canvi, amb un espectre de llum monocromàtic, l'envolent serà més ampla i es perdreà precisió a l'hora de detectar el màxim, que acaba traduint-se en un increment en el soroll instrumental del sistema [21].

Considerant tot això, en el nostre sistema necessitem utilitzar una font de llum prou monocromàtica com per a estendre suficientment la longitud de coherència de l'interferograma per a poder detectar prou franges d'interferència durant l'escombrat i que permeti poder reconstruir l'envolvent correctament malgrat tenir un mostreig 15 vegades inferior. Enlloc d'un LED blanc, hem fet servir un LED monocromàtic de color verd, amb una longitud d'ona dominant de 525 nm. La Figura 3.41 mostra la diferència en els correlogrames segons quin LED es fa servir a l'hora de mesurar una mostra.

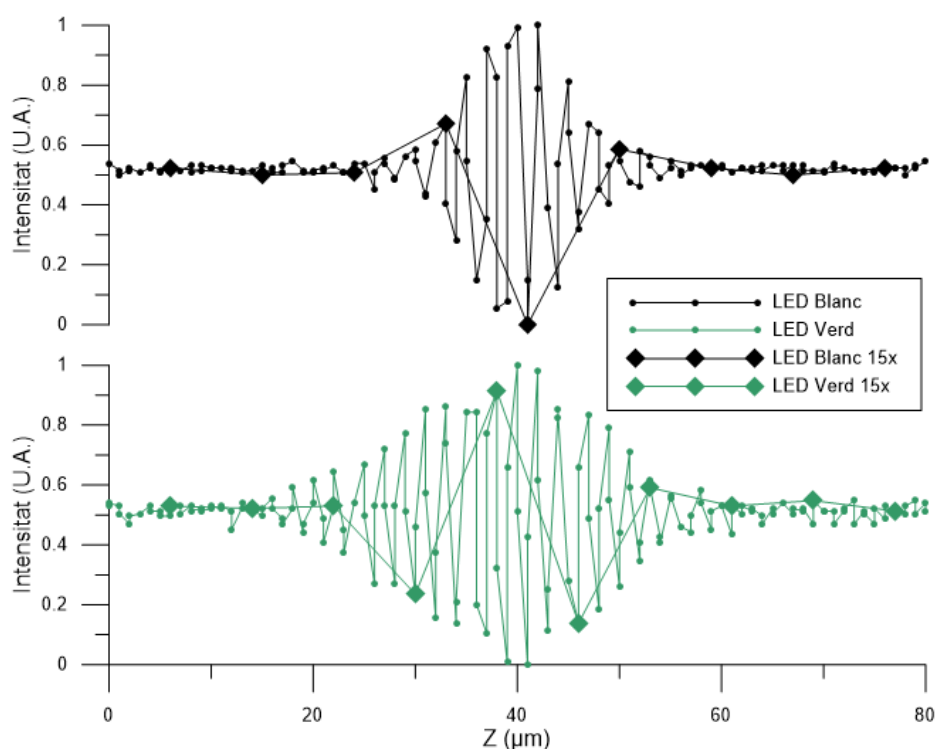


Figura 3.41. Correlogrames obtinguts segons la font de llum utilitzada. S'ha representat també l'interferograma que s'obtidria si el sistema s'hagués mogut a 15 vegades la seva velocitat òptima.

L'espectre del LED verd és menys estret que el del LED blanc, de manera que menys longituds d'ona interfereixen simultàniament. Conseqüentment el contrast de les franges d'interferència es manté durant més rang vertical que si s'utilitza un LED blanc, tal i com es pot apreciar en la figura anterior. Com que la longitud de coherència de l'interferòmetre augmenta, la quantitat de punts en què hi ha contrast també és major, i per tant, cal compensar-ho incrementant el rang vertical de mesura per a detectar correctament l'envolvent.

A priori aquest augment del rang mínim de mesura és un inconvenient ja que augmenta el temps de mesura. En el nostre cas, que el sensor es desplaçarà a una velocitat 15 vegades superior a l'òptima, ajuda a la sensitivitat i robustesa del sistema. En la Figura 3.41 es pot observar que

amb el LED blanc només apareixen 3 punts amb informació sobre la interferència, aspecte crític considerant que l'algoritme de PSA utilitzat fa servir 5 punts per a reconstruir l'envolvent. En les mateixes condicions, si s'il·lumina la mostra amb el LED verd hi haurà 6 punts amb un estat d'interferència visible.

D'altra banda, la manera més habitual de mesurar una mostra és començar en la posició en què està enfocada. Llavors el sensor es mou cap avall la meitat del rang de mesura, comença l'adquisició cap amunt per finalitzar retornant cap a la posició original. Es segueix aquesta seqüència com a alternativa de mesurar en direcció cap avall per si durant l'escombrada es produeix una fallada del software, fent que aquest mai envii l'ordre d'aturada del moviment. Llavors es produirà una col·lisió de l'objectiu de microscopi contra la mostra, amb el risc de danyar i inutilitzar qualsevol dels dos.

Per tal de minimitzar el temps improductiu del sensor, els moviments de posicionat es fan ràpidament amb velocitats i acceleracions el més altes possibles. Els beneficis d'aquesta manera de mesurar és que es poden optimitzar els rangs de mesura per tal de minimitzar el temps d'adquisició, però amb la contrapartida que es necessita enfocar la mostra abans de cada adquisició. A més a més, en els moviments ràpids de posicionat, el motor necessita un temps d'estabilització degut a que està oscil·lant per la forta frenada que és major com més elevada sigui la velocitat assolida. Una opció per compensar el temps d'estabilització és incrementar lleugerament el rang de mesura per a poder descartar les primeres imatges per aquests errors de posicionat.

D'altra banda tot component mecànic pateix un desgast amb el pas del temps. Aquest és major si el component mecànic ha de realitzar moviments bruscos i amb fortes acceleracions, i aquest és el cas dels motors dels sensors òptics que necessiten fer un escombrat de la mostra en la direcció axial. Aquest desgast comporta un increment de les no-linealitats del moviment del motor, traslladat en errors en la mesura; i en última instància en una reducció del temps de vida útil del component mecànic.

En entorns industrials, on es requereix mesurar un gran nombre de mostres en el menor temps possible, la pèrdua de productivitat degut a inutilitzar el sensor per a canviar el motor degut al desgast és crítica.

Proposem emprar un perfil de moviment sinusoidal per a mesurar les mostres per tal de minimitzar el desgast del motor, ja que s'eviten les acceleracions brusques en el moviment. Una

adquisició sinusoidal requerirà que la mostra estigui situada dins del rang de mesura, però augmentant el rang i conseqüentment la velocitat de moviment hauria de solucionar-ho sense haver de comprometre el temps de mesura.

Adicionalment, un perfil sinusoidal minimitzarà el temps improductiu del sensor, ja que les mesures poden ser totalment consecutives, amb l'única limitació externa del temps necessari per canviar de mostra. Un perfil de velocitats lineal necessita frenar i accelerar per a canviar el sentit de mesura, mentre que un de sinusoidal acaba amb velocitat nul·la, amb el que no necessita desviar-se del seu moviment natural per a canviar de sentit de mesura.

Per definició el moviment sinusoidal no tindrà mai punts equidistants en el temps que també ho siguin en posició, ja que això és una característica pròpia dels moviments lineals. D'aquesta manera, cal estudiar quins errors apareixen quan s'utilitza aquest perfil de moviment amb CSI en la mesura tridimensional d'una superfície.

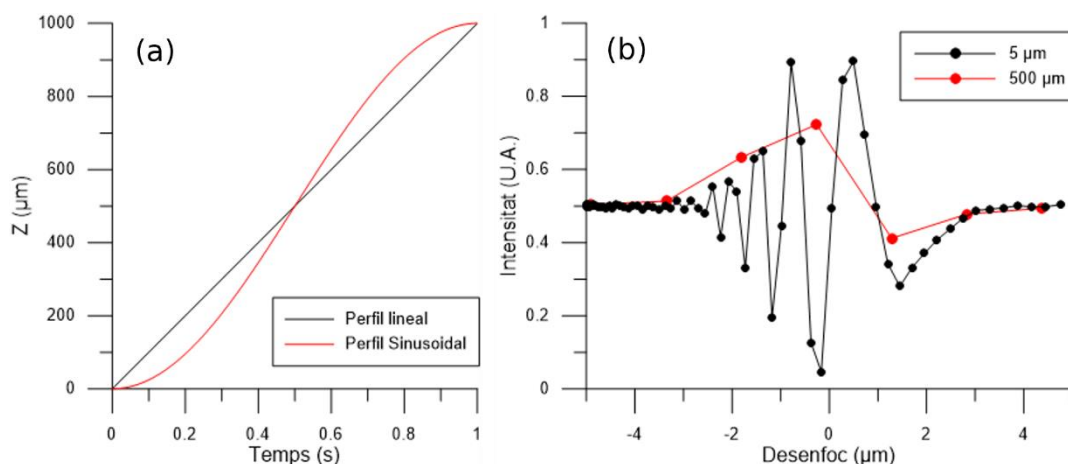


Figura 3.42. Perfils de moviment estudiats (a). Els correlogrames obtinguts (b) si la mostra està situada a l'inici de l'escombrat (5 μm) o a la part central (500 μm) del recorregut complet.

Segons la posició de la mostra dins de l'escombrat, l'interferograma serà molt diferent, ja que en les posicions d'inici i final de l'escombrat, on les velocitats són molt baixes i les acceleracions màximes, hi haurà una gran densitat de mostreig i no equiespaiada. Alhora, si la mostra està situada en la regió central de l'escombrat, la velocitat del sensor serà màxima amb poques variacions, traduint-se en poca quantitat d'informació útil però amb punts equidistants, ocasionant possibles comportaments diversos en funció de la regió del perfil de moviment.

Inicialment s'ha fet un estudi dels errors mitjançant una simulació, on s'ha considerat el suposat espectre de llum utilitzat, el tipus de perfil de moviment que segueix el sensor i l'algoritme per a la reconstrucció de l'envolvent.

La intensitat d'un interferograma en funció de la seva posició z és la suma espectral de la interferència de totes les longituds d'ona,

$$I(z) = \sum_{\lambda_0}^{\lambda_f} A(\lambda) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}z + \phi\right) \quad (3.22)$$

on λ_0 i λ_f són la longitud d'ona mínima i màxima de la font de llum, respectivament, $A(\lambda)$ és pes relatiu de cada longitud d'ona i ϕ és la seva fase inicial de cada longitud d'ona. Cal remarcar que la fase inicial conté la dispersió produïda al travessar un medi refractiu [16] com és el cas d'alguns objectius interferomètrics i el divisor de feix que permet generar la interferència. En el cas dels objectius de tipus Mirau, representat esquemàticament a la Figura 3.43, el divisor de feix consisteix en una làmina, enlloc d'un cub.

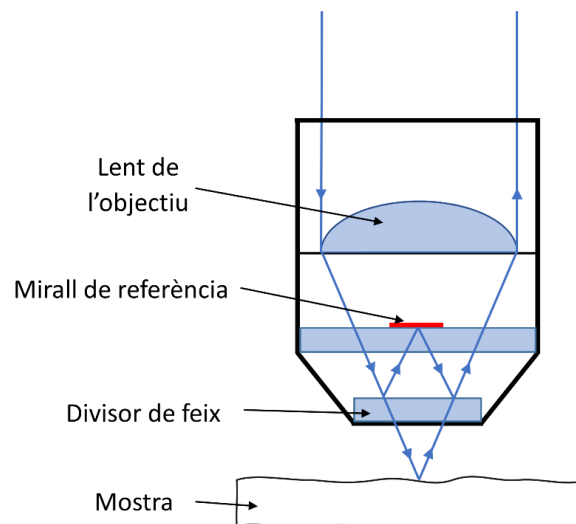


Figura 3.43. Esquema d'un objectiu interferomètric de tipus Mirau. El divisor de feix és una làmina i el mirall de referència està situat al centre de l'eix òptic.

Aquesta làmina sol tenir un gruix de 0.25 mm i de vidre BK7. En aquest cas la fase segueix la relació:

$$\phi(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} * h * n(\lambda) \quad (3.23)$$

on h és la diferència entre el gruix del vidre divisor de feix i el vidre que subjecta el mirall de referència, $n(\lambda)$ és l'índex de refracció en funció de la longitud d'ona, que es pot aproximar amb la fórmula de Cauchy

$$n(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} \quad (3.24)$$

amb els coeficients de Cauchy tenint uns valors de $B_1 = 1.03961212$, $C_1 = 0.006006986$, $B_2 = 0.231792344$, $C_2 = 0.0200179144$ per al vidre BK7.

D'aquesta manera la $OPD = 0$ pateix un lleuger desplaçament i es correspon a diferents posicions verticals per a diferents longituds d'ona. Això ocasiona que en l'interferograma final no hi ha una posició clara de $OPD = 0$ ja que l'interferograma és la suma de totes les longituds d'ona i si aquesta posició varia per a cadascuna d'elles, arribant a inclús generar una falsa sensació de posició $OPD = 0$ desplaçada de la seva posició real. En la Figura 3.44 hi ha dispersió cromàtica i hi apareix un màxim d'interferències globals aproximadament a $-0.6 \mu\text{m}$ respecte la posició de focus de la mostra.

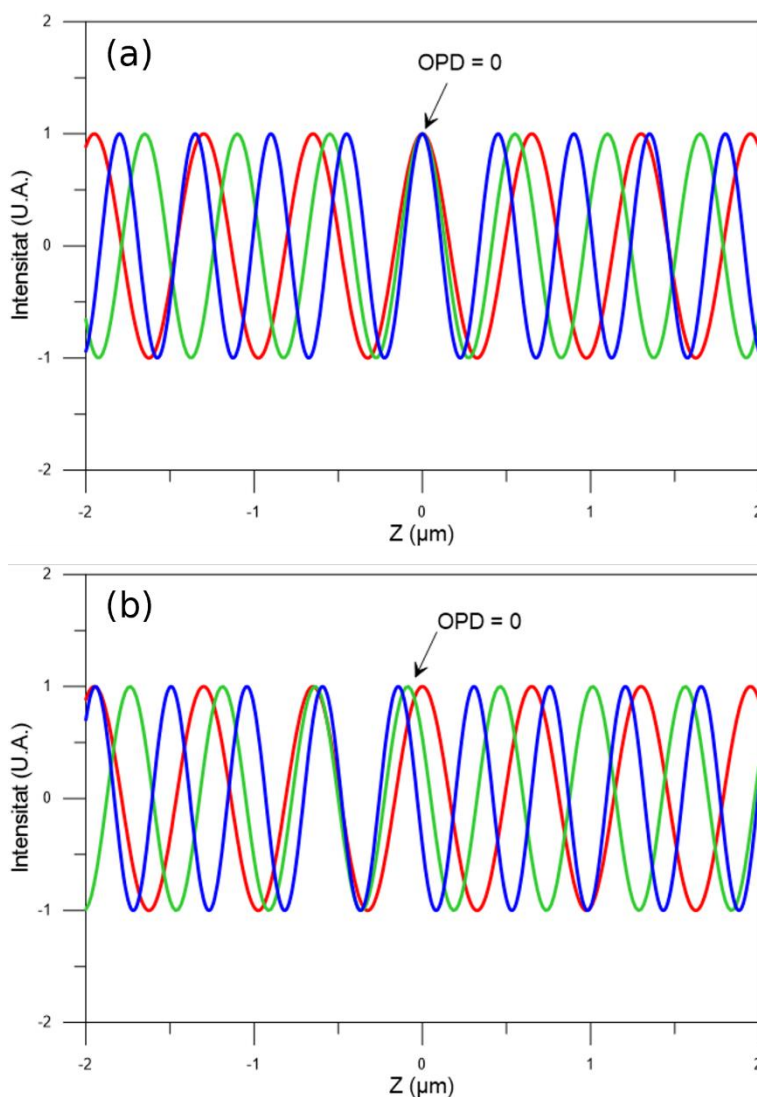


Figura 3.44. Interferències a través de focus per a diverses longituds d'ona, corresponents al blau (450 nm), verd (550 nm) i vermell (650 nm), segons si es negligeix la dispersió cromàtica (a) o no (b).

Aquest desplaçament erroni de la posició de la OPD = 0 que detectarà la càmera es traduirà en un desplaçament del màxim de l'envolvent, generant un error en la detecció de la posició axial de la mesura.

Tot i això, la fórmula de la intensitat del correlograma (Equació (3.22)) és molt costosa en termes computacionals, de manera que proposem que es tingui en compte una única longitud d'ona, en concret la dominant de l'espectre de llum, i que aquesta estigui modulada per una funció gaussiana, segons la relació

$$I(z) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-c}{d}\right)^2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2z + \phi\right) \quad (3.25)$$

on c és el centre de l'interferograma (OPD = 0), d l'amplada de l'espectre de la font de llum. Aquesta modulació intenta aproximar-se a la modulació natural de l'espectre d'un LED, amb els beneficis que computacionalment és molt eficient, ja que simplement es tracta d'una funció sinusoidal multiplicada per una exponencial, evitant-se el sumatori per a totes les longituds d'ona de l'espectre visible.

Per tal de descartar que tant la dispersió cromàtica com la monocromaticitat de l'interferograma modulats indueixin errors significatius en la simulació dels perfils de moviment sinusoidal, hem avaluat la magnitud dels errors d'aquests dos efectes. S'ha simulat un mirall inclinat amb els diferents mètodes, la modulació d'una funció exponencial en una interferència monocromàtica, l'integral de les interferències de diferents longituds d'ona negligint efectes de dispersió i, finalment, la mateixa integral considerant els prèviament esmentats efectes de dispersió cromàtica. En el cas de la gaussiana s'ha considerat una amplada de 1.5 μm i una longitud d'ona central de 580 nm.

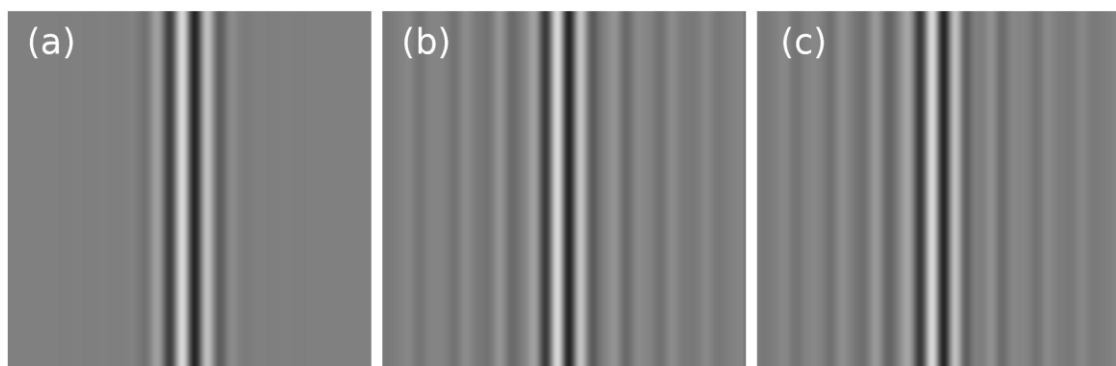


Figura 3.45. Imatges simulades d'un mirall inclinat segons com s'ha generat l'interferograma: (a) interferència monocromàtica modulada per una gaussiana, (b) interferència espectral negligint dispersió cromàtica i (c) interferència espectral incloent dispersió cromàtica.

En la Figura 3.45 es pot apreciar la modulació per una funció gaussiana suprimeix més ràpidament els batiments que apareixen a les zones fora de focus respecte a considerar totes les longituds d'ona. Addicionalment, també es pot comprovar l'efecte del petit desplaçament de la franja d'interferència amb major contrast, que se sol associar amb la OPD = 0, tot i que hem vist, que aquest desplaçament no correspon a la posició de la franja de major visibilitat amb la posició de focus. Aquest desplaçament es pot apreciar millor en la Figura 3.46 quan s'obté el correlograma d'un píxel qualsevol i es calcula l'envolvent.

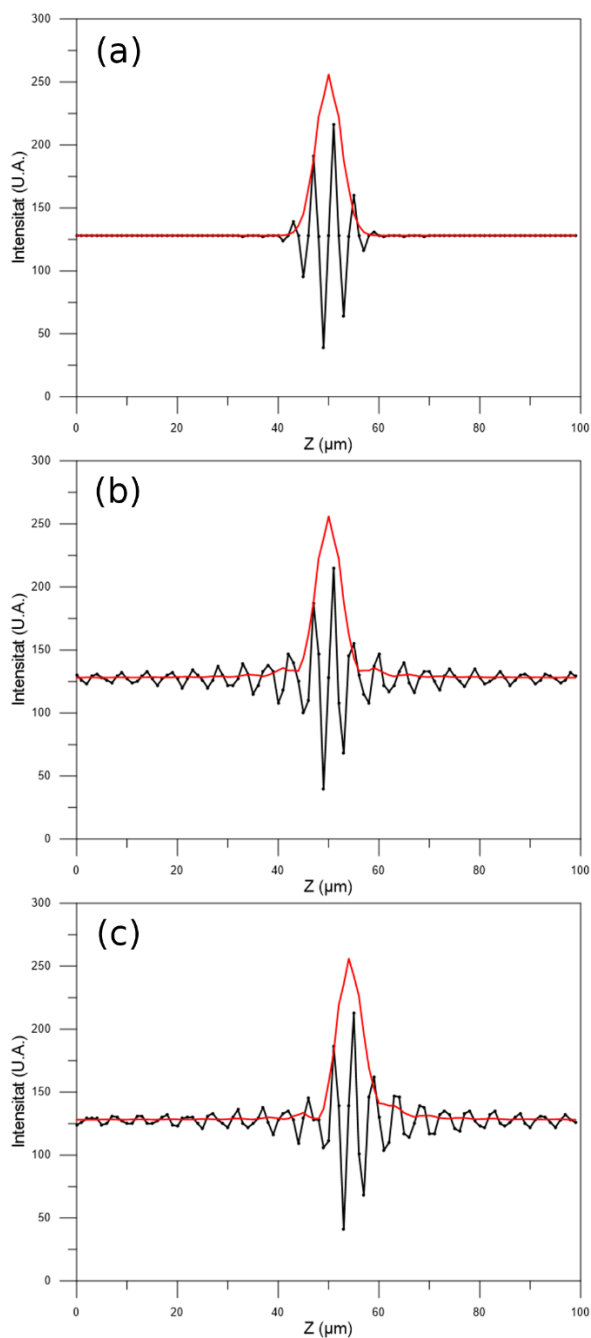


Figura 3.46. Interferograma (negre) i envolent calculada (vermell) de la simulació de la Figura 3.45.

Amb aquesta figura es pot apreciar que la regió central dels correlogrames (al voltant de posició de focus) és molt similar, i per tant l'envolvent també ho és en aquesta regió. Això implica que la detecció del màxim de l'envolvent serà molt similar. La presència dels batiments en el cas de tenir en compte totes les longituds d'ona no afectaran al centre de masses si es posa un llindar prou alt per rebutjar la informació del batiment. Aquest llindar s'acostuma a posar per a minimitzar els efectes que té el soroll de la càmera en el càlcul de l'envolvent. Respecte a tenir en compte o no la dispersió cromàtica degut al divisor de feix en l'objectiu interferòmetric, es pot observar que hi ha un desplaçament de fase del correlograma, que també causa un desplaçament de l'envolvent una quantitat de $6.5 \mu\text{m}$. Aquest desplaçament però, serà constant per a tots els punts de la superfície ja que tots tenen el mateix efecte de dispersió cromàtica. Això fa que aquest efecte sigui negligible, ja que la introducció d'un *offset* no canvia el resultat de la mesura, que és relativa entre els diferents punts de la mostra i no en alçades absolutes. Hi ha dues situacions, però, que presenten una excepció: la primera és quan la mostra està composta per diferents regions amb materials que tenen diferents dispersions, llavors les interferències de les diferents regions tindran diferents desplaçaments virtuals de l'envolvent. La segona és quan la mostra té regions amb pendents -locals o globals- significatius, on els raigs que formen la interferència no provenen del mateix raig original, sinó que tenen angles diferents. Això ocasiona que es travessin distàncies diferents dels vidres interns de l'objectiu i per tant l'efecte de la dispersió cromàtica es veurà magnificat.

En termes topogràfics, com es mostra en la Figura 3.47, es poden veure les diferències entre simular l'interferograma monocromàtic modulad gaussianament o bé amb la suma espectral de les interferències, amb i sense dispersió cromàtica, respectivament. El *offset* degut a la dispersió cromàtica s'ha eliminat ja que només es mostren els errors relatius, de manera que els efectes d'aquesta dispersió són prou petits com per a poder-los negligir ja que ambdues topografies mostren unes diferències similars. Respecte a considerar la suma espectral de les interferències o bé una interferència monocromàtica modulada, veiem que els errors són d'un desenes de nanòmetres, mentre que els errors de moure el sensor a velocitats no constants ocasionarà errors d'un ordre de magnitud més gran, com es veurà posteriorment. Per tant, els beneficis computacionals de considerar una única longitud d'ona modulada per una gaussiana són molt majors que els errors induïts per la manca de la resta de longituds d'ona de l'espectre d'il·luminació utilitzat.

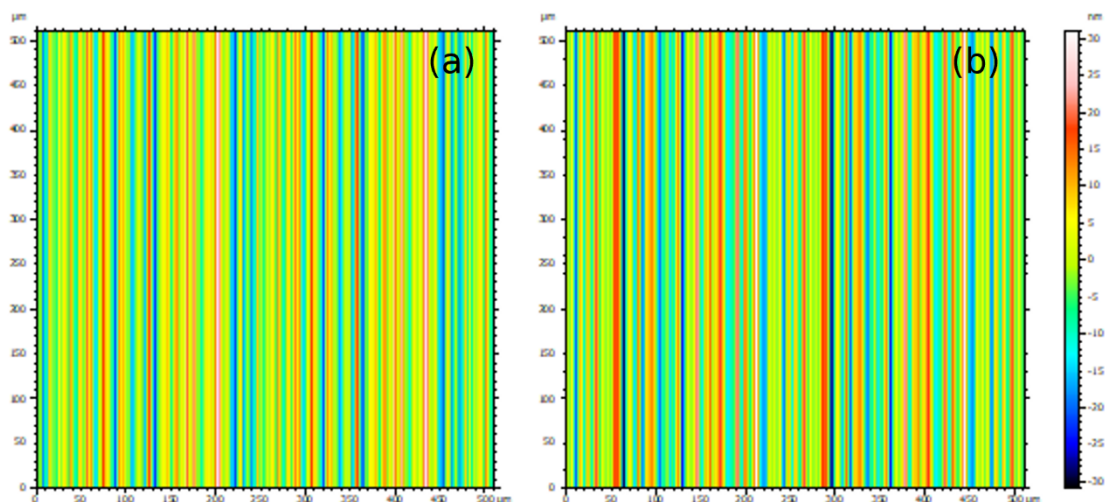


Figura 3.47. Diferències topogràfiques d'un mirall inclinat entre simular mitjançant la modulació exponencial i la suma multispectral sense dispersió cromàtica (a) i modulació gaussiana i suma multispectral sense dispersió (b).

Considerant tot els aspectes mencionats anteriorment, la nostra simulació consisteix en generar un interferograma amb una única longitud d'ona, corresponent a la dominant del LED utilitzat (525 nm), modulada per una gaussiana d'amplitud similar a la generada pel LED. En la Figura 3.48 es poden comparar l'interferograma simulat respecte a l'obtingut experimentalment.

En aquesta ocasió s'ha simulat un interferograma similar al produït per la nostra font de llum. Per tal de simplificar els càlculs i el temps de còmput, enlloc de simular un interferograma amb les contribucions corresponents a un espectre de llum gaussià, s'ha simulat únicament la interferència de la longitud d'ona dominant, 525 nm, modulada per una funció gaussiana d'amplitud similar a la generada pel LED.

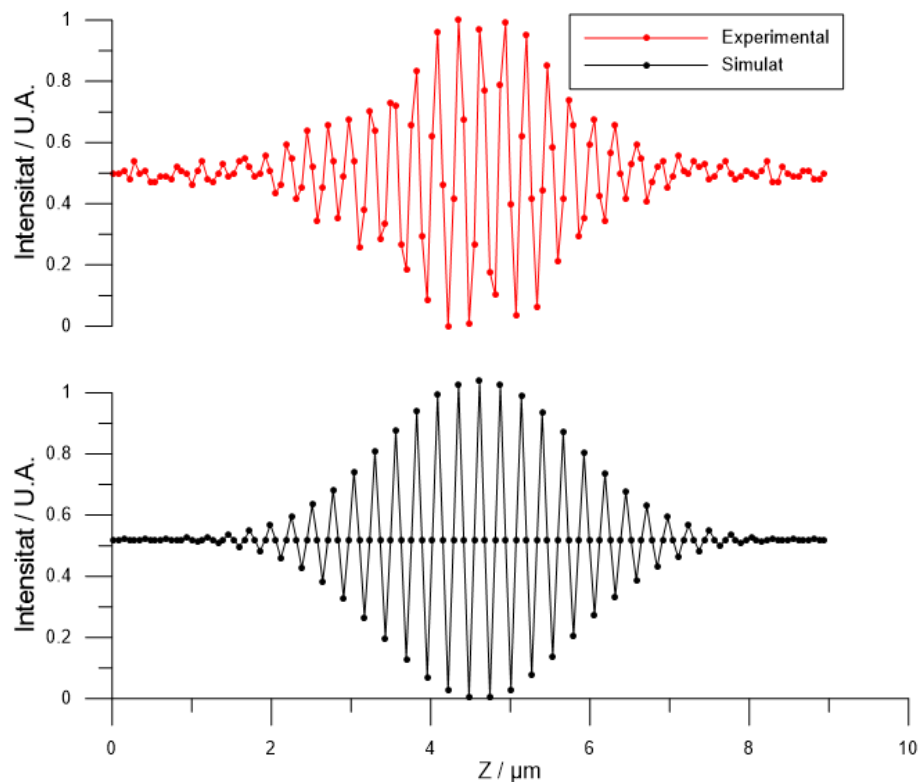


Figura 3.48. Comparació entre l'interferograma simulat i l'obtingut experimentalment.

Com es pot observar els espectres són força similars en termes d'amplada de l'envolent. S'ha de tenir en compte que el fet de no incloure totes les freqüències en la generació de l'interferograma ocasionarà un error en la detecció de l'envolent molt menor que les pròpies no-linealitats del sistema, o en aquest cas, la no-linealitat del perfil de moviment sinusoidal, com es comprovarà numèricament a continuació.

Per tal de simular un comportament més similar a la realitat, hem afegit soroll aleatori tant en la intensitat de l'interferograma com en el posicionat del motor. En el cas de la intensitat el soroll té una desviació estàndard de 1 nivell de gris, equivalent al soroll de la càmera mentre que en el cas del posicionat del motor la desviació estàndard del soroll té un valor de $0.005 \mu\text{m}$. El motiu de posar soroll en el posicionat del motor és que malgrat el bon funcionament del motor lineal, té uns errors intrínsecs de moviment, com s'ha pogut comprovar en el capítol anterior en les caracteritzacions de diferents tipus de motors lineals.

En l'estudi s'ha calculat la intensitat de l'interferograma segons la posició de la sinusoide que li pertoca en punts equiespaiats en el temps. Posteriorment s'ha reconstruït l'envolent amb l'algoritme de PSA i a través de la transformada de Hilbert. En el cas de la detecció del màxim s'ha fet únicament a través del centre de masses, ja que és més robust envers les vibracions i a

moviments no lineals i es pot calcular en línia, és a dir, que no cal esperar-se a acabar l'adquisició per a començar els càlculs, de manera que el temps de còmput un cop acaba l'adquisició es redueix significativament.

Per a estudiar com afecta a la mesura, hem simulat un perfil d'un mirall inclinat cobrint tot el rang d'escombrat, és a dir, en cada punt del rang de mesura hi haurà un punt del mirall que estarà enfocat. D'aquesta manera es podrà estudiar com afecta cada posició del perfil de moviment sinusoidal a la mesura tridimensional. El mostreig del rang de mesura és cada 15 μm .

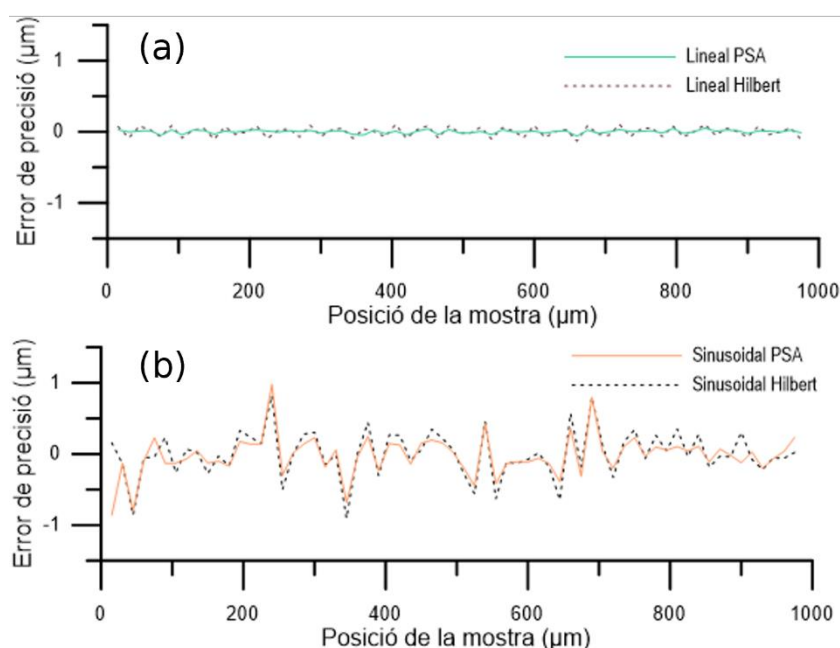


Figura 3.49. Simulació d'un mirall inclinat. Es mostra l'error de precisió de la mostra en funció de la posició de la mostra en el rang de mesura segons si es fa servir un perfil de moviment lineal (a) o bé sinusoidal (b).

Com es pot observar en la Figura 3.49, no apareix cap tendència clara de l'error en funció de la posició dins del moviment sinusoidal, sinó que aparentment és una distribució aleatòria. El que sí que hi ha és un canvi d'ordre de magnitud en l'error de la mesura del mirall inclinat quan movem el sensor sinusoidalment respecte a moure'l linealment. L'arrel de l'error promig quadràtic (error *rms* per les sigles en anglès) és de 0.025 μm per al perfil lineal i reconstrucció amb un algoritme de PSA, mentre que si la reconstrucció es fa mitjançant la transformada de Hilbert, l'error *rms* puja a 0.069 μm . Aquest error *rms* passa a l'ordre de les dècimes de micra quan utilitzem el perfil de moviment sinusoidal ja que té un valor de 0.292 μm amb la reconstrucció amb l'algoritme de fase, i de 0.330 μm amb la reconstrucció a través de l'espai de Hilbert.

En ambdós perfils de moviment veiem que la reconstrucció té una major dispersió quan la reconstrucció de l'envolvent es fa amb la transformada de Hilbert, mentre que els resultats amb un algoritme de fase són lleugerament més estables. Addicionalment, una reconstrucció via PSA, amb el càlcul del màxim de l'envolvent es fa amb centre de masses té l'avantatge que és acumulatiu, de manera que tant l'envolvent com el centre de masses de la mateixa es pot anar calculant en temps real a mesura que es van adquirint les imatges. Això redueix significativament el temps de còmput de la mesura un cop ja s'ha acabat l'adquisició, fent que la topografia final es calculi gairebé immediatament. En canvi, en una reconstrucció on s'ha de fer una transformada de Fourier o Hilbert, aquesta necessita tenir totes les dades capturades per a poder-se calcular, incrementant el temps de còmput un cop l'adquisició ja ha finalitzat.

Malauradament no podem comparar els resultats de la simulació amb mesures experimentals d'un mirall amb una inclinació d'1 mm, ja que amb el camp de visió d'un objectiu 20X, $492 \times 492 \mu\text{m}^2$, s'hauria d'inclinar la mostra 55° i llavors les franges d'interferència perden tota la visibilitat, ja que típicament un 20X pot arribar a mesurar pendents màxims de 24° . Llavors l'interferograma esdevé soroll i no es pot reconstruir l'envolvent, essent impossible trobar les alçades de la mostra.

Per tal de poder comparar la simulació amb resultats experimentals, es mesura l'alçada d'un graó en un espècimen calibrat. Els espècimens que s'han mesurat són: VS20 (Simetrics, Alemanya) i SHS 50.0 Q (VLSI Standards, EEUU), amb uns valors nominals de $21.702 \mu\text{m}$ i $48.643 \mu\text{m}$, respectivament. Per tal de simplificar les dimensions de l'estudi, només s'ha fet la reconstrucció de l'envolvent amb l'algoritme de PSA, que ha mostrat més estabilitat que via Hilbert; i la detecció del màxim s'ha fet amb el centre de masses, que és més ràpid. Els graons s'han simulat i mesurat en diferents posicions del rang de 1 mm per veure quin és l'error de mesura en funció la posició dins de la sinusoide.

La Figura 3.50 mostra els resultats de simular els dos graons. El valor del graó és el resultat directe de la diferència en les dues posicions separades per una distància igual a la del valor nominal del graó.

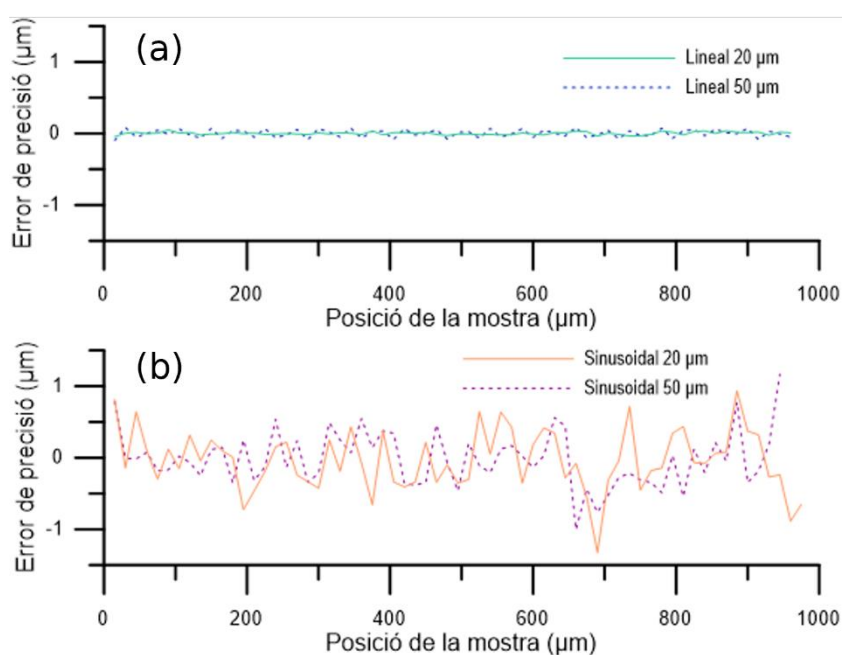


Figura 3.50. Error de precisió en simular la mesura de l'alçada d'un graó segons la posició de la mostra en un escombrat d'1 mm, amb un perfil de moviment lineal (superior) o sinusoidal (inferior).

Els resultats en l'alçada d'un graó tampoc mostren una tendència clara, sinó que, igual que amb el mirall, segueixen una distribució aleatòria. En ambdós perfils de moviment els errors tenen unes amplituds similars a les del mirall. En concret, amb el perfil lineal el graó de 20 μm té un error rms de 0.019 μm, que puja fins a 0.423 μm amb un perfil sinusoidal. En el cas del graó de 50 μm, els errors són del mateix ordre de magnitud que amb el graó de 20 μm, obtenint un error rms de 0.031 amb un moviment lineal i de 0.384 μm amb un moviment sinusoidal.

Habitualment, la magnitud de l'error en la mesura d'una variable està correlacionada amb el propi valor de la variable. Per tant, com més gran és l'alçada d'un graó s'espera que l'error en la mesura del graó sigui més també més gran. En la Figura 3.50 es pot apreciar, però, que al mesurar dos graons de diferent alçada, l'amplitud dels seus errors és pràcticament idèntica. Això ens fa suposar que els errors degut al moviment sinusoidal són la font predominant d'errors, i llavors hi ha una aparent independència de l'error respecte al valor de l'alçada del graó.

Per tal de mesurar els patrons certificats experimentalment, s'ha seguit el protocol la ISO 5436-1, que defineix el procediment per a extreure l'alçada d'un graó. Els resultats es mostren a la Figura 3.51.

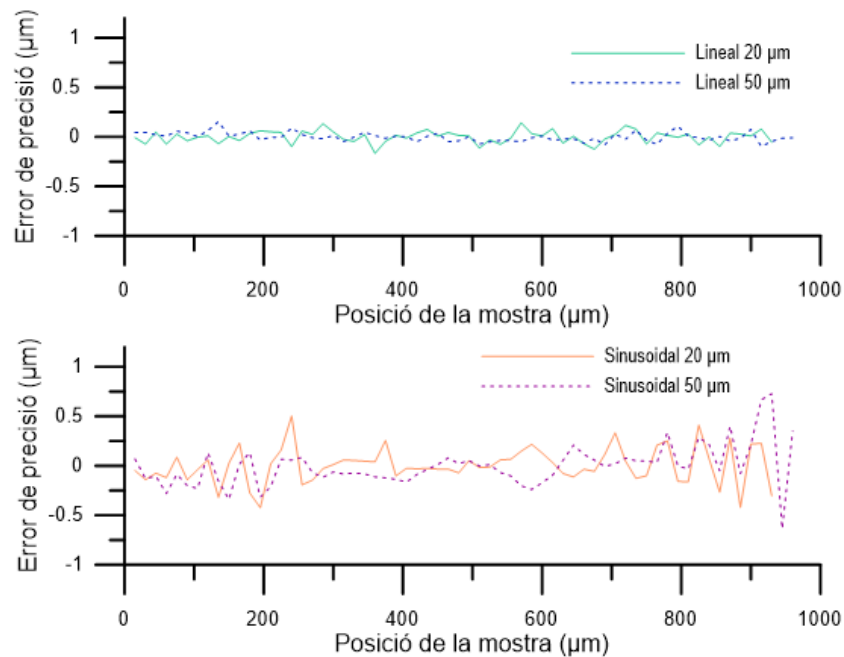


Figura 3.51. Error en la mesura experimental d'un graó en funció de la posició de la mostra dins del rang d'escombrat.

A nivell qualitatiu en els resultats experimentals podem apreciar algunes divergències respecte la simulació, la més important és que en la regió central del perfil sinusoidal, l'error és menor, sense variacions aleatòries, en canvi els extrems tenen una variabilitat més alta tot i que en amplitud tampoc divergeixen tant. Això és conseqüència que en la regió central del perfil el moviment s'assembla més a un perfil lineal de velocitat. També es repeteix el fet que les amplituds dels errors no depenen dels valors de l'alçada del graó, sinó que depenen bàsicament de l'ús o no d'un perfil de moviment sinusoidal.

A nivell quantitatiu, els perfils lineals dels graons de 20 µm i 50 µm tenen un error rms de 0.061 µm i 0.047 µm respectivament. Anàlogament, amb els perfils sinusoidals s'obté un error rms de 0.199 µm i 0.195 µm respectivament.

Els resultats experimentals dels graons són en general consistents amb els obtinguts en la simulació, ja que són del mateix ordre de magnitud. Les diferències poden explicar-se per les no linealitats del motor, que no s'han afegit en la simulació, sinó que només s'ha afegit un error de distribució gaussiana en el posicionat del motor. Això ens fa pensar que la simulació és vàlida per a estudiar el comportament a nivell de tendències i d'ordre de magnituds de l'error quan es fan servir perfils de moviment sinusoidal per a mesurar a altes velocitats.

Per tal de verificar si els errors obtinguts amb el perfil sinusoidal són propis del moviment o de les velocitats o rang, en la Figura 3.52 es mostren els errors de la mesura dels graons amb un

perfil sinusoidal de la meitat de rang, és a dir, 500 μm . S'ha mantingut l'objectiu de mesurar en 1 s, conseqüentment les velocitats també s'han reduït a la meitat per tal de finalitzar la mesura en el temps establert.

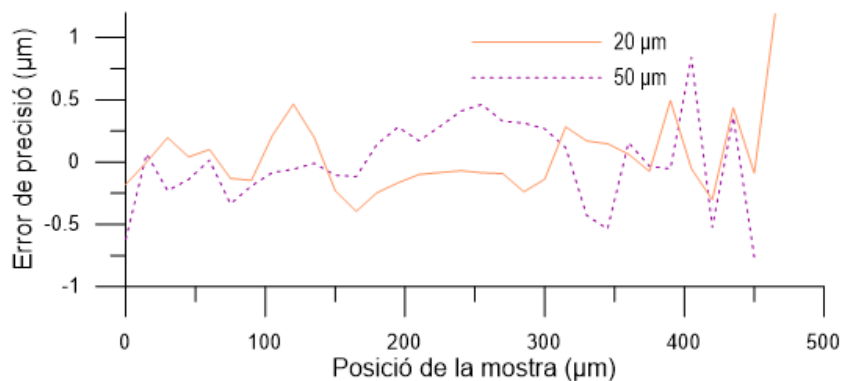


Figura 3.52. Error de precisió en la mesura de l'alçada d'un graó en diferents posicions d'un perfil de moviment sinusoidal. L'amplitud de la sinusoide és de 250 μm .

Amb aquest estudi podem corroborar que l'error obtingut en la mesura d'un graó ve determinat principalment pel tipus de perfil de moviment utilitzat, ja que l'error segueix la mateixa forma en els dos perfils sinusoidals malgrat tenir diferents rangs i velocitats de mesura. També en qüestió d'amplituds són del mateix ordre de magnitud. L'error rms és de 0.305 μm i 0.352 μm per als graons de 20 μm i 50 μm , respectivament.

Finalment hem volgut corroborar la hipòtesi que ens hem plantejat al veure en la primera simulació dels graons, que versa sobre la independència de l'error en l'alçada del graó en funció del valor de la pròpia alçada. Com que per a fer un estudi experimental es necessitarien patrons certificats dels que no disposem, hem recorregut a la simulació novament, en la qual hem repetit la simulació d'un graó amb un perfil sinusoidal d'1 mm de rang de mesura en 1 s. Com que la distribució de l'error dels perfils és aleatòria com a la Figura 3.50, a la Figura 3.53 es mostra el valor l'error rms en funció de les diferents alçades analitzades.

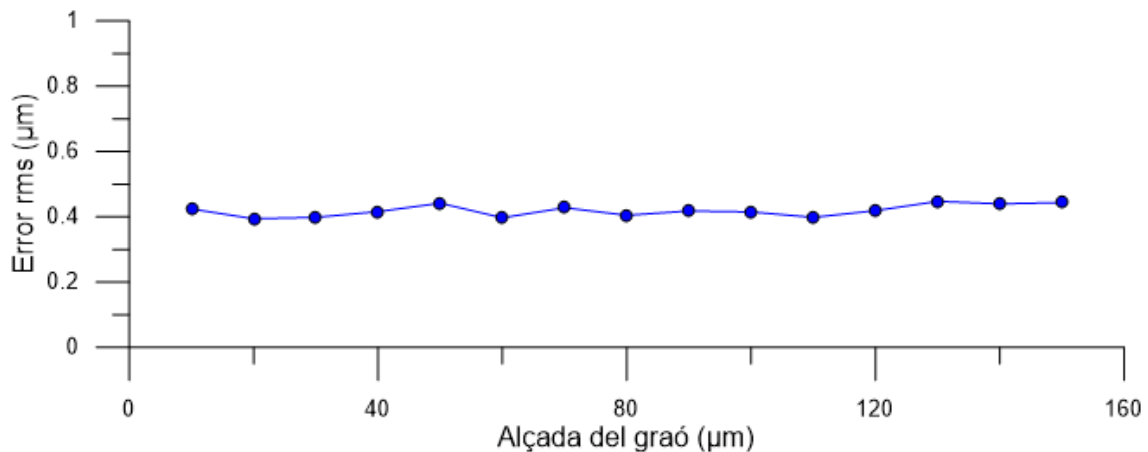


Figura 3.53. Error RMS de l'error de precisió en la mesura de l'alçada d'un graó, mesurant el graó a diferents posicions del moviment sinusoidal.

Aquests resultats confirmen que l'error en la mesura d'un graó és independent de l'alçada del graó. Això implica que l'error és sistemàtic i constant, de mode que en mesurar graons més grans, l'error percentual serà menor.

Donada la resolució vertical de la tècnica CSI -arriba als pocs nanòmetres-, els errors que s'obtenen amb aquest nou perfil de moviment són molt grans. S'ha de tenir en compte, però, que l'aplicació és per a entorns industrials, on es desitgen mesures molt ràpides i es vol maximitzar l'eficiència dels processos productius, entre els quals s'inclou el control de qualitat. Això implica que s'ha de minimitzar els temps d'adquisició i les pèrdues de temps de posicionat del sensor per a tenir la mostra dins del rang de mesura. A més a més, en un entorn de producció massiva, s'han de minimitzar els temps inoperatius degut a manteniments, sobretot aquells que no es poden preveure, com seria una fallada d'un motor.

Hi ha hagut altres propostes de mesura ultra-ràpida i amb aquests rangs de mesura emprant perfilòmetres òptics, però substituint el sistema d'escombrat mecànic per un sistema de lent ajustable [22], és a dir, que canvia la distància focal en funció del voltatge aplicat. Amb aquest sistema, però, s'obtenen errors de precisió en la mesura d'un graó de fins a 15 µm, un ordre de magnitud superior als aconseguits amb el nostre sistema i moviment sinusoidal.

3.3. Il·luminació estructurada

3.3.1. Texturització artificial

Una de les tècniques més emprades per a la mesura de superfícies és la variació de focus (*Focus Variation*, FV). Amb aquest mètode, es basa en detectar la textura present de la mostra que es vol mesurar. Amb aquest mètode, es captura una imatge de camp clar, i un algoritme anomenat operador de focus (*Focus Operator*) [23] és capaç d'extreure la posició axial del focus per a cada píxel de la imatge. Quan la superfície està en focus la seva textura està ben definida en la imatge i l'operador detecta un senyal elevat, mentre que si la superfície està fora de focus, la imatge està borrosa i el senyal detectat per l'operador es redueix dràsticament.

Els principals beneficis de FV són: la simplicitat del sistema òptic i la velocitat tant de captura de les imatges com de l'escombrada axial a través del focus de la mostra. Un sistema basat en aquesta tècnica només necessita un objectiu de microscopi i un sistema que permeti fer un escombrat de l'eix òptic. Com que la imatge que s'ha d'obtenir és de camp clar, no cal fer cap escombrat del pla axial, fet que permet que la velocitat d'adquisició del sistema de mesura sigui elevada.

Una de les limitacions que presenta FV respecte altres tècniques és la resolució lateral: per analitzar la presència de textura es necessita avaluar per cada píxel una petita regió al seu voltant, amb el compromís que com més gran és la finestra, més robusta és la tècnica però menys resolució lateral té. Aquesta magnitud no és fàcil de quantificar ja que depèn, entre d'altres, del contrast de la textura, de l'operador utilitzat per a detectar la textura de la imatge, de la NA de l'objectiu i de la longitud d'ona.

La limitació més immediata, però, és que FV no permet mesurar superfícies polides, ja que en aquest tipus de mostres la textura és inexistente i per tant l'operador no permetrà obtenir senyal si la superfície està en focus. A més a més, hi ha superfícies que segons la seva rugositat, per a una determinada longitud d'ona i NA, es comporten com òpticament rugoses, però si la longitud d'ona o NA augmenta, la mateixa superfície pot comportar-se com òpticament polida amb la nova observació.

El motiu és que la longitud d'autocorrelació de la rugositat de la mostra (i per tant de la textura en la imatge) és la mateixa independent de l'observació. Això implica que per a majors magnificacions i límit de difracció més petit, aquesta longitud s'escampa en més píxels. Com que l'operador funciona per finestres de certa quantitat de píxels, com major és la magnificació més gran ha de ser la finestra per a poder detectar-ne la textura (en el cas de poca rugositat de la mostra).

Típicament per a magnificacions baixes (2.5X fins a 10X), la majoria de superfícies mostren un contrast local elevat i finestres de 3x3 fins a 7x7 píxels són suficients. Per a majors magnificacions (20X fins a 100X), les mateixes superfícies escalen la textura en nombre de píxels i les finestres necessiten augmentar la seva mida fins a 21x21 píxels.

Adicionalment, els operadors per detectar el focus no omplen tots els píxels amb la mateixa intensitat de senyal, fins i tot els píxels que corresponen al mateix pla, de manera que es genera soroll de tipus *salt and pepper* en la imatge de seccionat òptic i, en última instància, un increment del soroll en la mesura 3D. Per a contrarestar aquest efecte, s'apliquen una sèrie de filtres, e.g. filtres morfològics *closing*, convolucions gaussianes, per a suavitzar variacions locals. Aquests

filtres, però, causen que la tècnica de FV sigui molt útil per a mesurar formes, però no per a caracteritzacions d'alta resolució i/o precisió de la rugositat de les mostres.

Una manera de revertir els desavantatges de FV és combinar FV amb altres tècniques de mesura 3D. En [24] es proposa un nou mètode de fusió de dades de Confocal i FV per a adquirir simultàniament la imatge confocal i la imatge de camp clar a través del mateix escombrat axial. Els dos conjunts d'imatges s'utilitzen per a calcular la qualitat del senyal per a cada píxel individualment i combinar les dades originals abans de computar la topografia 3D. Aquest mètode és capaç de preservar l'alta resolució lateral del confocal per superfícies que tenen bon senyal confocal, mentre que és capaç de proporcionar dades per a altres parts de la superfície que tenen pendents locals elevats, on FV és més adient. La combinació de les dues tècniques proporciona millors resultats que qualsevol d'ella per separada, amb la contrapartida d'una major complexitat tant de hardware com computacional.

3.3.1.1. Active illumination Focus Variation

Com hem vist, el principal problema de FV és la seva poca capacitat de mesurar mostres polides, fet que limita la usabilitat d'un sistema que utilitzi aquesta tècnica de mesura. Per exemple, la majoria de mostres en el camp de semiconductors són polides, i per tant, en aquest camp un sistema de FV té poca aplicació.

Noguchi i Nayar [25] proposen un mètode per il·luminar activament la mostra sota inspecció. El patró proposat en aquesta publicació és un *checkerboard* (CB) amb un període optimitzat per a la NA, magnificació i longitud d'ona. El patró està situat a la posició del diafragma de camp del microscopi i s'il·lumina uniformement. El CB és projectat cap a la mostra ocasionant que la seva reflexió en la mostra faci que la càmera capturi simultàniament la imatge de la mostra i la imatge del CB.

Amb aquesta il·luminació activa s'aconsegueix generar una textura artificial sobre la mostra: les regions amb poca textura (o fins i tot si no en tenen), el patró projectat proporciona contrast local quan les regions es troben en focus, mentre que si estan fora de focus el patró es difuminarà i no proporcionarà un contrast local significatiu. En canvi, les regions que originin *scattering* dels raigs de llum degut a la rugositat de la mostra no es veuran afectades per la presència del patró projectat, ja que la textura pròpia de la mostra dominarà sobre la textura artificial del patró [26].

En la Figura 3.54 es mostra la imatge de camp clar de l'espècimen de rugositat AIR-B40 del NPL (National Physics Laboratory, UK). La forma de la superfície ha estat dissenyada per a proporcionar resultats de rugositat traçables segons la ISO-25178-200 quan es mesura amb un perfilòmetre òptic. Malauradament, la superfície és òpticament polida, de manera que FV no és una tècnica que pugui proporcionar imatges de seccionat òptic suficientment bones. Com també es mostra en el centre de la mateixa figura, l'operador de focus *Sum of Modified Laplacian* (SML) amb una finestra de 5x5 només mostra un senyal intens per a aquells píxels que tenen petites taques fosques. La topografia 3D resultant és massa sorollosa per a ser considerada una tècnica que obtingui resultats traçables segons els estàndards NPL.

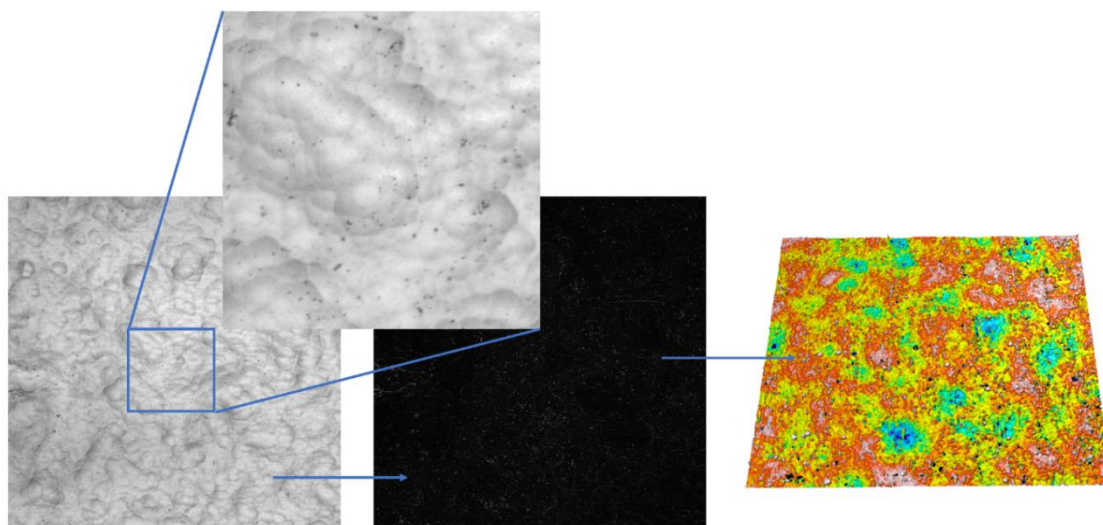


Figura 3.54. Imatge de camp clar en l'espècimen de rugositat AIR-B40 del NPL (esquerra), imatge de seccionat òptic per a un pla mitjançant l'operador SML amb una finestra de 5x5 píxels (centre) i la topografia 3D resultant de tota la mesura (dreta).

En canvi, si es projecta una textura artificial sobre el AIR-B40, els resultats canvien substancialment. En la Figura 3.55 es mostra les mateixes condicions que les de la Figura 3.54 però emprant la tècnica descrita per Noguchi i Nayar. S'il·lumina activament la mostra amb el patró CB, situat en el diafragma de camp del microscopi.

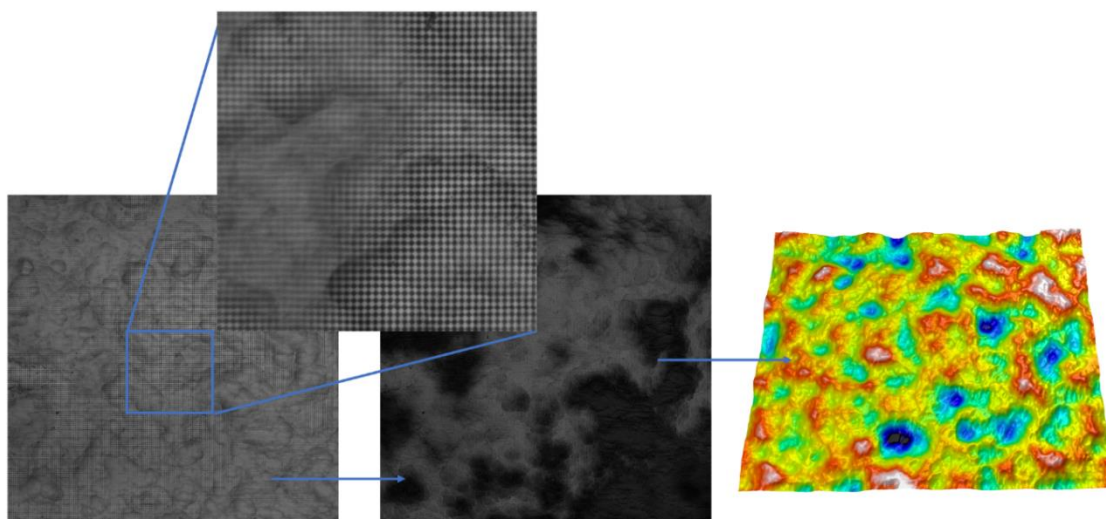


Figura 3.55. Mateixa mostra i condicions de mesura que en la FIGX, però amb una textura artificial sobre-imposada.

La superfície, que en la Figura 3.54 s'observava com a òpticament polida, ara conté contrast local en les regions en focus, mentre que mostra el mateix desenfocament total (textura de la mostra conjuntament amb el CB) en les regions que estan fora de focus. Ara la imatge de seccionat òptic amb un SML de 5x5 s'assembla a la imatge de seccionat òptic d'un microscopi confocal. La topografia 3D calculada a través d'aquestes imatges té prou qualitat com per a avaluar els paràmetres de rugositat segons la ISO-25178.

3.3.2. AiFV en un microscopi confocal

Hi ha diverses configuracions que proporcionen a un microscopi la capacitat d'adquirir imatges de seccionat òptic. Segons la ISO-25178-607 hi ha bàsicament tres tecnologies diferents: confocal de làser, confocal de disc rotatori i confocal de *microdisplay*, que ja s'han mencionant a l'apartat 2.1.2. Mentre els dos primers requereixen incloure una segona branca d'il·luminació per a poder obtenir la imatge de camp clar, el confocal de *microdisplay* permet obtenir-la amb la mateixa branca d'il·luminació i observació que s'utilitza per a obtenir la imatge confocal, tal i com es mostra en la Figura 3.56.

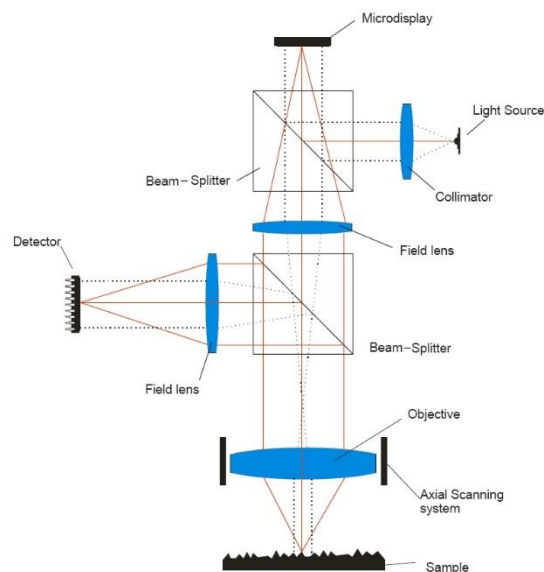


Figura 3.56. Esquema òptic d'un microscopi confocal de microdisplay compatible amb AiFV.

En aquesta configuració, la font d'il·luminació es col·lima per dirigir-la a un modulador espacial de llum (SLM, *Spatial Light Modulator*), situat a la posició del diafragma de camp del microscopi. El modulador treballa per reflexió, que pot basar-se en un cristall líquid ferroelèctric sobre silici (FLCoS, *Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon*) o bé un dispositiu digital de micro-miralls (DMD, *Digital Micromirror Device*). Es fa imatge de cada píxel del modulador sobre la superfície, i amb una lent de camp, en el pla de la càmera es fa simultàniament imatge de la mostra i del modulador.

Activar un únic píxel (comportant-se com un reflector) mentre tots els altres estan apagats funciona com un *pinhole* confocal. Un escombrat lateral de tots els píxels del modulador crea una imatge confocal. L'escombrat es pot optimitzar si el patró del modulador enlloc de ser un únic píxel encès consisteix en un patró de píxels distribuïts equidistantment, com poden ser franges verticals o qualsevol altre que restringeixi la quantitat de llum. Contràriament, si s'encenen tots els píxels del modulador simultàniament la imatge detectada per la càmera és la de camp clar, mentre que si només s'encén un de cada dos en cada fila crea un patró CB. El CB es pot escalar fàcilment per adaptar el període a la NA, magnificació i longitud del sistema. Típicament un CB de 2x2 píxels es fa servir per a magnificacions en el rang de 2.5X a 50X, mentre que si es superen aquestes magnificacions es necessiten CB de 3x3 o fins i tot de 4x4 píxels.

La Figura 3.57 mostra el resultat de mesurar el mateix espècimen AIR-B40 amb aquesta tècnica i amb mode confocal. La imatge de l'esquerra mostra els mateixos resultats que en la Figura 3.56

il·luminant la mostra activament i adquirint les imatges amb un objectiu 20X 0.45NA. L'operador de focus emprat per a calcular la topografia 3D és un SML amb una finestres de 5x5 píxels. Els valors numèrics estan representats a la Taula 3.5. El post processat de les mesures inclou un anivellat per ajust de mínims quadrats, un filtre S de 8 μm i un filtre L de 0.8 mm.

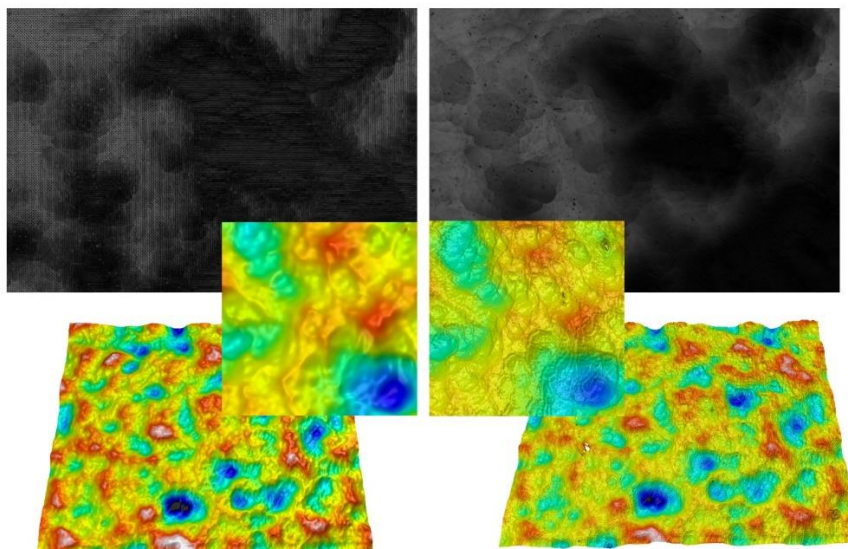


Figura 3.57. Seccionat òptic utilitzant AiFV (esquerra) i confocal (dreta) obtinguda amb un objectiu 20X 0.45 NA. Per a cada tècnica també es mostra la topografia 3D de la mesura.

Taula 3.5. Paràmetres de rugositat de l'espècimen del NPL AIR-B40.

Paràmetre	Valor certificat /nm	Incertesa estesa /nm	Confocal /nm	AiFV /nm
Sa	790.7	26.3	788.4	785.3
Sq	1008.1	21.6	1005.2	1001.2
Sz	7437.6	439.7	7415	7421

A partir d'aquests resultats podem concloure que la tècnica de AiFV és capaç de mesurar satisfactòriament la rugositat d'un espècimen òpticament polit ja que tots els paràmetres de rugositat obtinguts estan dins de la incertesa estesa de l'espècimen. Això obre la possibilitat que els perfilòmetres òptics utilitzin aquesta tècnica com a traçable fent servir les mesures d'espècimens de calibració. La Figura 3.58 mostra un perfil amb confocal i AiFV de l'espècimen de rugositat PRN-3 de Mahr (Göttingen, Alemanya).

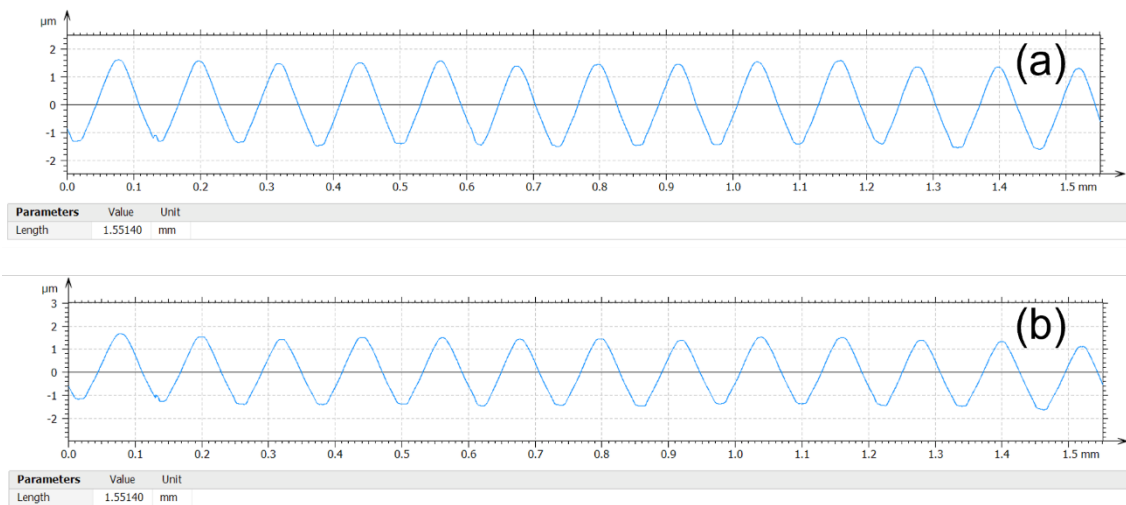


Figura 3.58. Perfil 2D de l'espècimen de rugositat PRN-3 de Mahr mesurat amb confocal (superior) i AiFV (inferior). Mesures fetes amb un objectiu 20X 0.45NA.

Com en el cas de l'AIR-B40, aquest espècimen és una mostra de baixes freqüències en el qual les altes freqüències no són rellevants per al càlcul de la rugositat. Addicionalment, el procés de filtratge de freqüències que s'ha de seguir segons estipula la ISO 4278 per a l'avaluació dels valors de rugositat en un perfil, especifiquen que s'ha d'aplicar un filtre passa-baixos, eliminant-ne les freqüències altes.

Altres espècimens de rugositat específics per a perfilòmetres òptics 3D tenen una textura aleatòria, com per exemple l'AIR-B40, analitzat a la Figura 3.57, que consta de freqüències baixes, mitges i altes. La fiabilitat de l'AiFV comença a comprometre's quan la longitud d'autocorrelació de la textura de la mostra s'apropa a la finestra d'avaluació de l'operador de focus de AiFV i a la textura projectada artificialment. Per tal de mostrar aquesta limitació, hem mesurat l'espècimen ARS-c3 de Simetrics GmbH (Limbach-Oberfrohna, Alemanya). Aquest espècimen té una rugositat de $S_a = 0.29 \mu\text{m}$ i una longitud d'autocorrelació propera a $3.5 \mu\text{m}$.

La Taula 3.6 mostra les mides del patró CB projectat segons la magnificació de l'objecte, conjuntament amb la finestra d'avaluació de l'operador de focus i el límit de difracció. El patró CB és en origen sempre el mateix, però com que s'utilitzen diferents objectius, es veu magnificat de manera diferent sobre el pla de la mostra. D'aquesta manera, amb baixes magnificacions el patró CB està molt lluny del límit de difracció, mentre que per magnificacions molt altes (i per tant, també NA altes), la mida del CB és molt proper al límit de difracció.

Taula 3.6. Taula comparativa entre diferents magnificacions del període del patró projectat, la mida de la finestra d'avaluació en el pla de l'objecte i el límit de difracció segons el criteri de Rayleigh

Magnificació	Període del patró CB (μm)	Mida de la finestra (μm)	Límit de difracció 532 nm (μm)
10X	7.2	6.9	1.1
20X	3.6	3.45	0.7
50X	1.4	1.38	0.4
100X	0.7	0.69	0.36
150X	0.47	0.46	0.34

Conseqüentment, un objectiu de baixa magnificació tindrà una resolució lateral més baixa, la longitud d'autocorrelació de la topografia mesurada serà major i el sistema no serà capaç de

resoldre correctament totes les freqüències d'una superfície rugosa, resultant en un valor de rugositat més baix.

La Figura 3.59 mostra la topografia de l'espècimen mesurada amb un objectiu 50X 0.8NA de Nikon amb confocal i AiFV. Es pot apreciar com la topografia d'AiFV és menys nítida que la topografia confocal, indicant que AiFV té una resolució lateral menor que la de confocal. Addicionalment, hem mesurat la mateixa mostra amb altres objectius per veure la relació entre els paràmetres de rugositat i longitud d'autocorrelació i la magnificació, representats en els gràfics de la Figura 3.60.

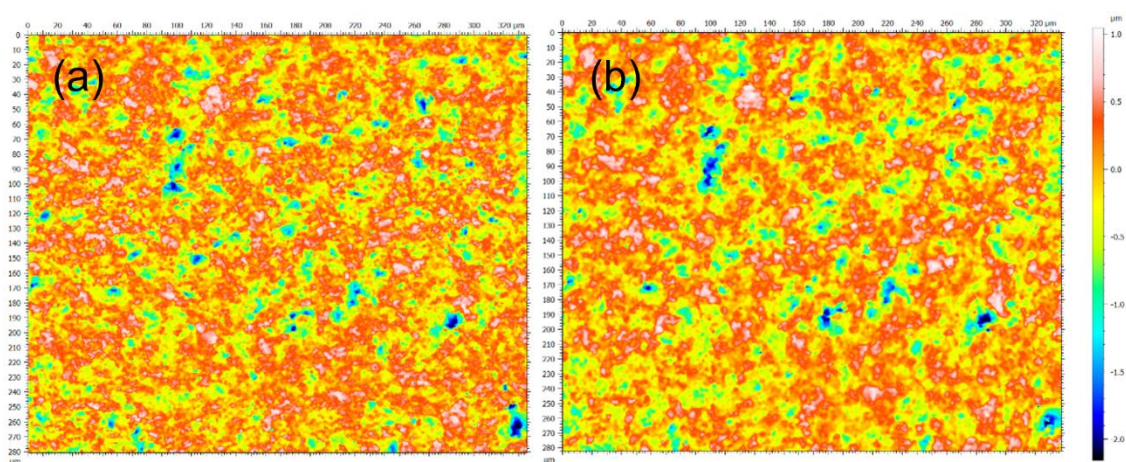


Figura 3.59. Topografia de l'espècimen ARS-c3 amb confocal (a) i AiFV (b).

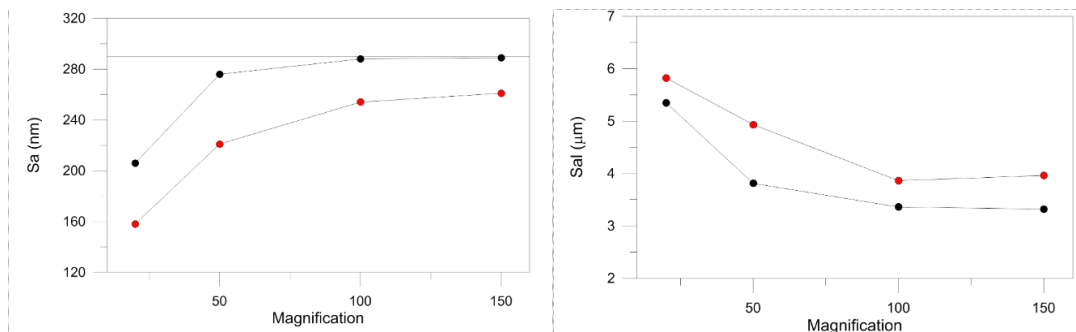


Figura 3.60. Rugositat (S_a) i longitud d'autocorrelació (S_{al}) per a diferents magnificacions. En negre els valors de les mesures confocals i en vermell els valors de les mesures AiFV.

Com hem mencionat, com més elevada sigui la magnificació, menor és la longitud d'autocorrelació de la mesura, indicant que la mesura de la mostra s'acosta a un valor més fiable, ja que més freqüències de la mostra estan representades en la mesura. Conseqüentment el valor de rugositat obtingut de la topografia és més alt i proper a la rugositat certificada de la mostra. De totes maneres, es pot apreciar que mentre magnificacions majors de 50X permeten mesurar correctament amb confocal la rugositat de la mostra o aproximar-s'hi molt, el valor de rugositat no es pot arribar a obtenir amb AiFV. Això ens indica que hi ha un límit de la tècnica en termes de resolució vertical i lateral que confocal sí és capaç de resoldre. Per a la gran majoria d'aplicacions, però, la rugositat present en les mostres és major que la d'aquest espècimen, i AiFV serà fiable per a mesurar la majoria mostres.

Finalment, hem avaluat el límit de resolució lateral de AiFV amb l'espècimen Siemens Star, també del NLP. La Figura 3.61 mostra les topografies de la mesura de l'espècimen amb un objectiu 20X i un 50X amb confocal i AiFV. En aquest espècimen s'avaluen perfils circulars, els quals preserven correctament l'alçada si estan situats a prop de la perifèria, corresponent a un període prou llunyà del límit de difracció. A mesura que el radi del perfil circular s'apropa al centre, el període entre les estructures disminueix i la capacitat de resoldre correctament l'alçada empitjora. És habitual definir el límit de resolució instrumental com a aquella freqüència en la que es resol el 50% de l'alçada certificada.

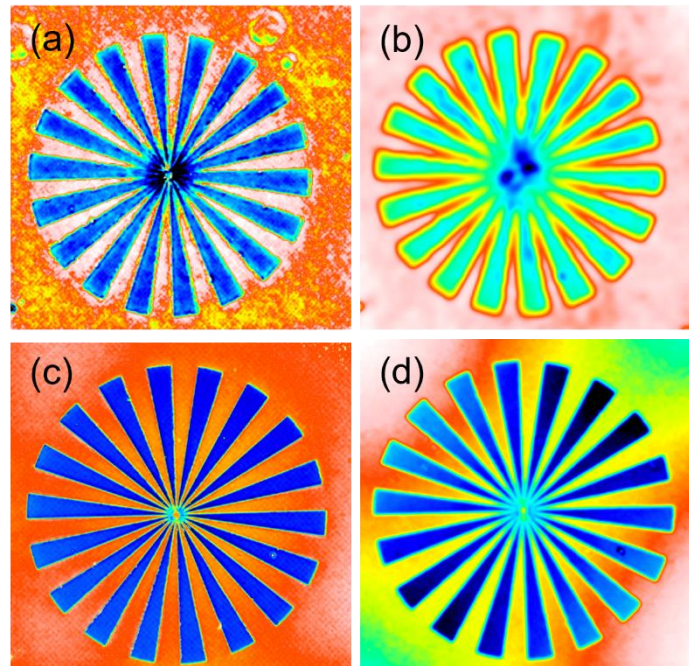


Figura 3.61. Siemens Star mesurat amb un 20X 0.45NA amb confocal (a) i AiFV (b), i amb un 50X 0.8NA amb confocal (c) i AiFV (d)

S'aprecia que el confocal té una capacitat clarament superior a AiFV en termes de preservar les dimensions laterals i per tant freqüències més altes. No obstant, AiFV és capaç de resoldre correctament fins a cert límit. El límit de resolució s'ha avaluat per a diferents magnificacions (des de 20X fins a 150X). A la Figura 3.62 es mostren els valors d'aquest límit, on es pot veure clarament que confocal té un millor comportament en termes de resolució lateral, sobretot a mesura que la magnificació disminueix. De totes maneres, AiFV és capaç de resoldre estructures de fins a 1 μm en superfícies òpticament polides amb un objectiu 20X.

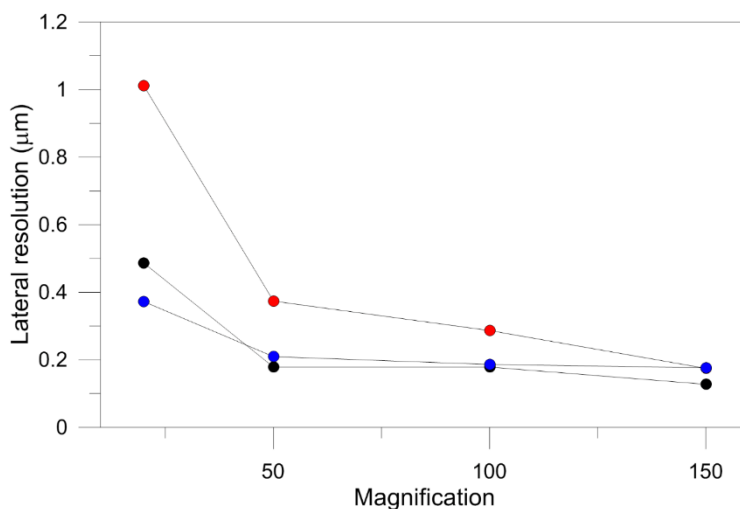


Figura 3.62. Resolució lateral per a diferents magnificacions. Negre: confocal; vermell: AiFV; blau: la meitat del límit de difracció.

En la Figura 3.63 es mostra la mesura d'un sistema microelectromecànic (MEMS per les sigles en anglès) amb les diferents tècniques. Es pot apreciar com, malgrat la mostra ser completament polida, la mesura amb AiFV és pràcticament idèntica a la de confocal. En canvi, la mesura amb FV convencional no aconsegueix mesurar correctament les zones polides, que estan plenes de punts erronis. Addicionalment, les regions amb textura que el FV convencional és capaç de mesurar també es mesuren correctament amb AiFV.

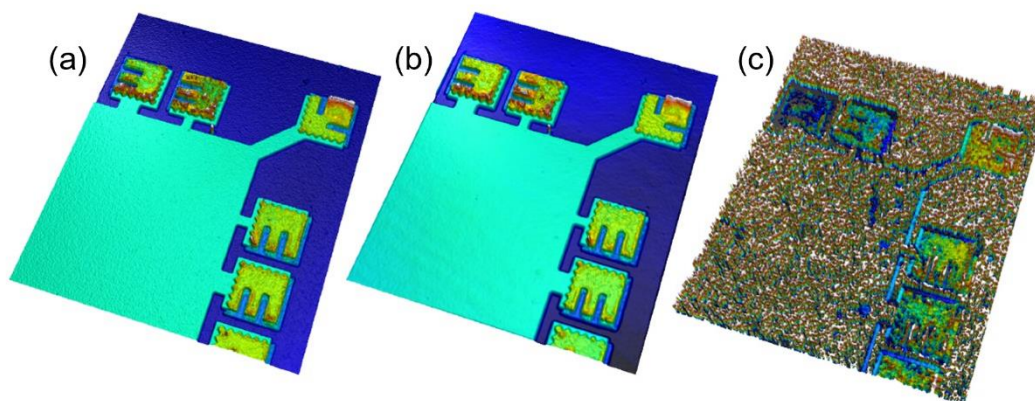


Figura 3.63. MEMS mesura amb l'objectiu 20X 0.45NA amb confocal (a), AiFV (b) i FV convencional (c).

En la Figura 3.64 es mostra la mesura d'un altre MEMS, però aquesta mesurada amb més NA corresponent a un 50X. Aquí es posa de relleu com la resolució lateral del confocal és lleugerament millor que la de AiFV, tot i que ambdues segueixen tenint molt bones prestacions.

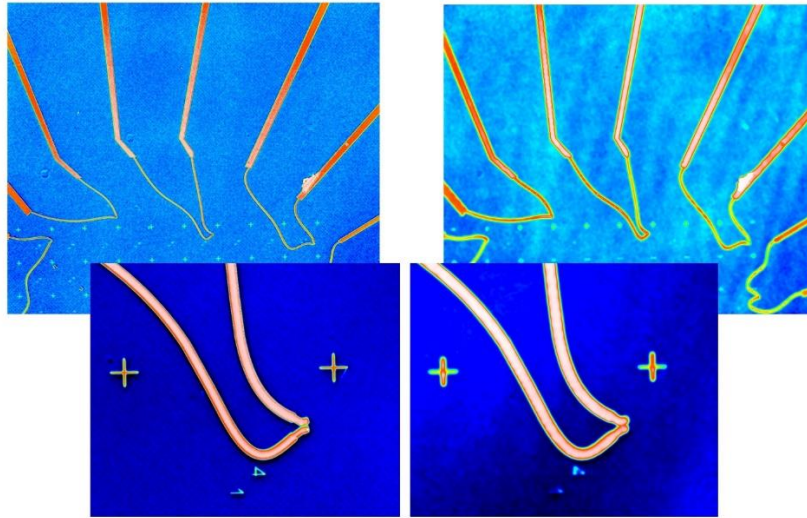


Figura 3.64. MEMS mesurat amb l'objectiu 50X 0.8NA amb confocal (esquerra) i AiFV (dreta).

3.3.3. Seccionat òptic

Els principals beneficis d'un microscopi confocal són, com ja hem mencionat anteriorment, una gran versatilitat en el tipus de mostres que és capaç de mesurar i una molt bona resolució lateral. La seva principal limitació, però, és la necessitat de realitzar un escanament de cada pla per a recuperar la imatge de seccionat òptic mentre s'està realitzant l'escanament a través de l'eix òptic. Aquest doble escanament augmenta substancialment el temps requerit per a realitzar una mesura.

Hi ha hagut diversos intents de reduir ambdós escanaments, però totes les opcions requereixen òptiques i/o mecàniques voluminoses que incrementen el costos del microscopi. Addicionalment, en entorns industrials de control de qualitat, els espais disponibles per a introduir els microscopis per a les inspeccions de les peces són sovint limitats.

Els tres principals mètodes per a realitzar l'escanament de cada pla són: escanament de làser, escanament de disc i escanament de *microdisplay*. Mentre els dos primers es basen en components opto-mecànics, l'últim es basa en elements electro-òptics per a generar un escanament del pla, superant les limitacions d'eficiència lumínica o bé desgast dels components que tenen els altres dos.

La microscòpia d'il·luminació estructurada (SIM, per les sigles en anglès) [27] és un altre mètode de seccionat òptic que proporciona imatges similars a les d'un microscopi confocal. La capacitat de seccionat òptic de SIM és gairebé la mateixa que la d'un microscopi confocal quan s'utilitza per a la mesura tridimensional de superfícies. En SIM es situa un patró sinusoidal periòdic en el diafragma de camp del sistema òptic, del qual es fa imatge en la superfície. Similarment a AiFV, les regions de la mostra que es trobin en la regió de focus de l'objectiu mantindran un contrast elevat del patró original, mentre que el patró perdrà contrast a mesura que la regió estigui més allunyada del focus. Desplaçant el patró lateralment en tres fases diferents en intervals equiespaiats en el rang de 2π és possible recuperar la modulació del contrast del patró.

Tot i que el principi de SIM és teòricament més senzill que el de confocal, el hardware necessari per a executar els desplaçaments de fase del patró han de ser molt precisos. En cas contrari,

apareixeran harmònics en la imatge, que es traduïran en artefactes en la topografia final. D'aquesta manera, la complexitat de hardware de SIM no difereix tant d'altres configuracions confocals. No obstant, el principal avantatge de SIM respecte a confocal és la velocitat de mesura amb càmeres d'alguns centenars de fps.

Per a evitar el desplaçament mecànic del patró sinusoidal, Wicker [28] proposa un mètode *single-shot* de seccionat òptic on la imatge les tres fases diferents del patró s'aconsegueixen amb tres polaritzacions diferents i emprant tres càmeres amb polaritzadors degudament alineats. Schwertner [29] proposa en canvi il·luminar el patró per reflexió i per transmissió. El fet que el patró estigui desplaçat π , fa impossible una recuperació immediata de la imatge de seccionat òptic, sinó que cal un procés de calibració previ per a calcular la fase de cada píxel i el gradient a través de la direcció del patró.

Altres implementacions de SIM per a evitar una escombrada lateral es basen en mètodes computacionals, concretament en la transformada de Hilbert. Patorski [30] proposa adquirir dues imatges, una amb la il·luminació del patró sinusoidal sobre la mostra i l'altra de camp clar. Amb elles es pot computar un desplaçament de fase de $\pi/2$ a través de la transformada de Hilbert-Huang. Hoffman [31] va aprofitar aquesta idea per tal de minimitzar els problemes de *scattering* de la llum en observació *in-vivo*, on el contrast del patró disminueix a través del medi *scattered* i per tant el canvi de fase ja no és fiable. Hoffman, a més a més, captura una única imatge i recupera la imatge de camp clar eliminant la freqüència principal del patró en l'espai de Fourier.

Ens hem basat en aquests dos últims enfocaments per a implementar un mètode de seccionat òptic a partir d'un patró projectat sense parts mòbils [32]. Una branca d'il·luminació dedicada a la il·luminació estructurada, descrita a la secció 3.1.1, ens permet introduir un patró de vidre que fa imatge del patró sobre la mostra, permetent la il·luminació estructurada, i en última instància, obtenir la imatge de seccionat òptic. L'ús d'un únic patró de vidre permet disminuir enormement els costos i la complexitat mecànica del sistema.

Primerament hem utilitzat un patró de *Ronchi*. Per a cada píxel de la imatge, la intensitat es pot aproximar com

$$I_{ij} = A_{ij} + B_{ij} * \cos\left(\frac{2\pi}{p}x_{ij} + \phi_{ij}\right) \quad (3.26)$$

on A_{ij} és la component no estructurada de la imatge (altrament conegut com a component DC), B_{ij} és l'amplitud de contrast del patró estructurat multiplicat per la distribució d'intensitat de la superfície, p el període del patró i ϕ_{ij} és la fase. Les components DC es poden obtenir sostraint la imatge de camp clar, resultant la imatge com

$$I'_{ij} = I_{ij} - A_{ij} = B_{ij} * \cos\left(\frac{2\pi}{p}x_{ij} + \phi_{ij}\right) \quad (3.27)$$

Per tal de calcular la imatge de seccionat òptic, és necessari recuperar l'amplitud B_{ij} , que és fàcilment recuperable amb un desplaçament de fase de $\pi/2$

$$I''_{ij} = G(I') = B_{ij} * \sin\left(\frac{2\pi}{p}x_{ij} + \phi_{ij}\right) \quad (3.28)$$

on G és qualsevol operador que desplaci $\pi/2$ les freqüències de la imatge. Finalment obtenim

$$B_{ij} = \sqrt{I'^2 + I''^2} \quad (3.29)$$

Hi ha diversos operadors G o maneres d'obtenir aquest desplaçament de $\pi/2$. La més fàcil d'aplicar és considerar la imatge com una sèrie de perfils on cada un d'ells consisteix en una columna, si la sinusoide és projectada en la direcció vertical, o bé una fila si la sinusoide és horitzontal. Llavors s'aplica la transformada de Hilbert a cada perfil, que genera un desplaçament exacte de $\pi/2$ en la fase de cada perfil. La imatge desplaçada s'obté simplement substituint cada columna o fila pel perfil transformat. Aquest enfoc, no obstant, no té en compte el gradient de la fase de la imatge original, de manera que s'introdueixen alguns errors en mostres que tenen direccions privilegiades. A més a més, no és un mètode massa eficient computacionalment, ja que necessita tantes FFT unidimensionals com columnes/files tingui la imatge, enlloc d'aplicar directament una FFT bidimensional.

La transformada de Hilbert-Huang és una extensió de la transformada de Hilbert que descomposa el senyal original en vèries funcions de modes intrínsecs. Aquesta descomposició permet eliminar els modes d'oscil·lació ràpida, que sovint corresponen a soroll, però amb la contrapartida de ser computacionalment molt costosa.

La principal limitació de la transformada de Hilbert aplicada a imatges és, doncs, com estendre la funció signe en una funció bidimensional. Hi ha hagut diverses propostes per a solucionar-ho, però pateixen de ser solucions anisotròpiques, i.e., no funcionen igual per a tots els punts de l'espai, i per tant, no són solucions universals. Únicament la transformada espiral de quadratura de fase (SPQT, *Spiral Phase Quadrature Transform*) proposada per Larkin [33], representada a la Figura 3.65, soluciona el problema de la discontinuïtat direccional de la funció signe. La solució és utilitzar una funció de fase espiral pura en l'espai de Fourier, definida com

$$S(u, v) = \frac{u + iv}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3.30)$$

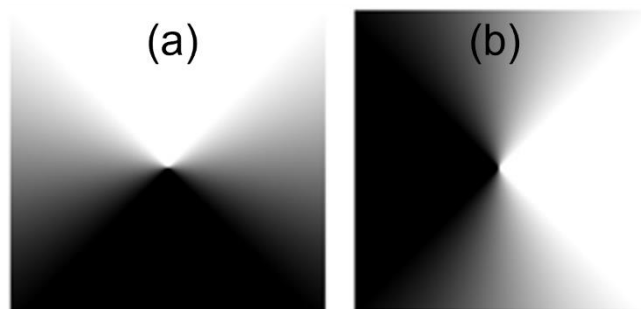


Figura 3.65. Funció de fase espiral pura en l'espai de freqüències espacials: part real (a) i part imaginària (b). L'escala és de -1 a 1.

No obstant, aquesta solució és únicament vàlida si la imatge a transformar no conté cap component DC. Hem estudiat dues maneres diferents per a recuperar la imatge de seccionat òptic depenent del procediment per cancel·lar el component DC de la imatge. El primer mètode consisteix en adquirir dues imatges, una imatge amb il·luminació estructurada i una imatge addicional de camp clar, que representa el component DC de la imatge. Llavors la imatge de camp clar es sostrau de la imatge estructurada per a obtenir I' . Posteriorment s'aplica la SQPT per a obtenir I'' i finalment s'aplica l'equació (3.29) per a generar la imatge de seccionat òptic B. En la Figura 3.66 es mostra el diagrama del mètode aplicat sobre l'espècimen AIR-B40.

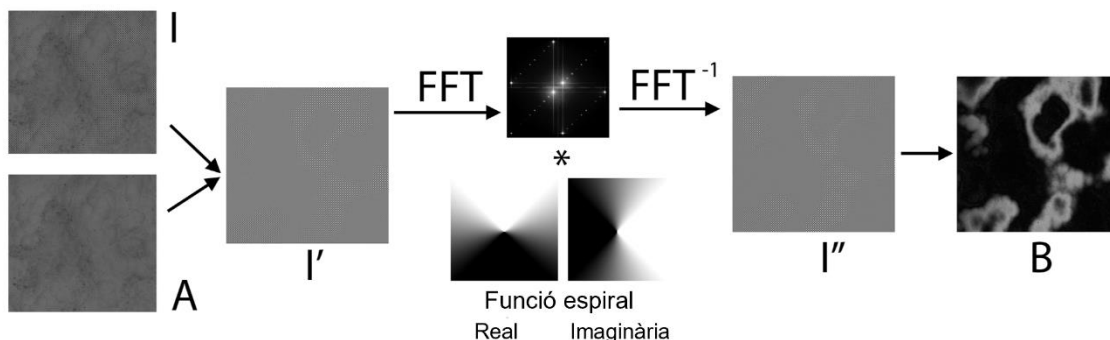


Figura 3.66. Diagrama del mètode de dues imatges per al seccionat òptic.

Aquest mètode requereix tenir o bé tenir una doble branca d'il·luminació (una amb el patró per la il·luminació estructurada i una altre sense cap patró per a la imatge de camp clar), fet que incrementa la complexitat del sistema òptic, o bé utilitzar un *microdisplay* en el sistema, que incrementa els costos del sistema. No obstant, tenir una il·luminació de camp clar proveeix del sistema versatilitat per a mesurar amb altres tècniques, com exemple CSI.

Alternativament, es pot eliminar aquesta necessitat si el mètode només necessita la imatge estructurada. En el segon mètode s'elimina el component DC eliminant la freqüència portadora del patró en l'espai de Fourier, tal i com es mostra en la Figura 3.67. Un cop s'obté artificialment la imatge de camp clar, s'aplica el mateix procediment que en el mètode de dues imatges per a obtenir la imatge de seccionat òptic.

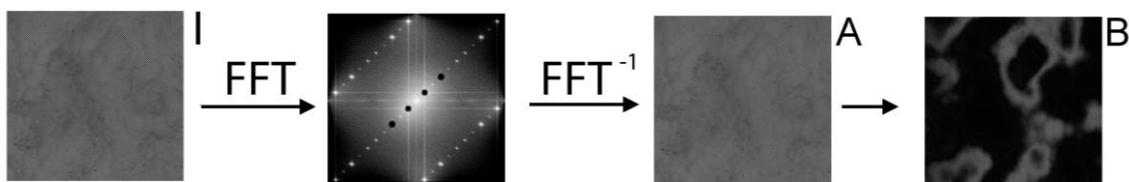


Figura 3.67. Diagrama del mètode d'una imatge per al seccionat òptic.

Aquest mètode és suficientment vàlid per a mostres amb variacions contínues del nivell de gris, però per a mostres que presenten discontinuïtats abruptes, la supressió de freqüències per a l'obtenció de la imatge de camp clar provoca l'aparició d'artefactes en la imatge de seccionat òptic. No obstant, aquest mètode presenta una millora en la velocitat d'adquisició d'un factor 3 respecte a SIM, ja que només requereix una única imatge per pla enlloc de tres. D'altra banda, però, és necessari aplicar quatre transformades de Fourier: endavant i enrere per a eliminar el component DC de la imatge i un altre cop endavant i enrere per a aplicar la SPQT. Anàlogament, el mètode de dues imatges únicament incrementa la velocitat d'adquisició per un factor de 1.5, però amb el benefici que els artefactes derivats de les superfícies amb discontinuïtats són menys visibles i significatius.

En la Figura 3.68 es mostra el resultat d'aplicar aquests dos mètodes en comparació amb la capacitat de seccionat òptic de AiFV. El mètode d'una sola imatge mostra un patró de freqüència residual amb la mateixa direcció que la direcció del patró projectat sobre la mostra. La imatge de AiFV es veu més difuminada degut a que l'operador SML és d'una finestra de 11x11 píxels en aquest cas.

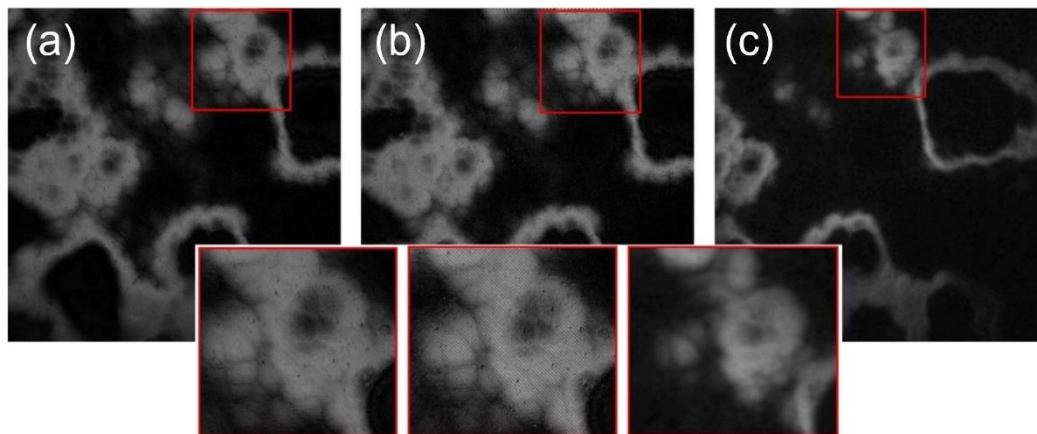


Figura 3.68. Imatge de seccionat òptic sobre l'espècimen AIR-B40, amb el mètode de dues imatges (a), una imatge (b) i AiFV (c).

Per a avaluar les capacitats metrològiques dels mètodes proposats hem realitzat una sèrie de tests. Totes les mesures s'han fet amb un sistema amb *microdisplay* enlloc del sistema amb doble branca d'il·luminació. El motiu és la facilitat i disponibilitat del sistema per a poder avaluar la viabilitat dels mètodes abans d'acabar de dissenyar el prototips i fer fabricar totes les òptiques. Addicionalment ens permet comparar els resultats amb AiFV i confocal ja que el *microdisplay* permet projectar tant la imatge de camp clar, un patró Ronchi com un patró CB. El patró Ronchi s'ha projectat de manera que les línies tenen un angle de 135° respecte a l'horitzontal.

El primer test és mesurar el soroll del sistema en un mirall de SiC amb una planitud de $\lambda/8$ amb diferents objectius de Nikon. Els resultats es mostren a la Taula 3.7.

Taula 3.7. Soroll mesurat en un mirall pla.

Objectiu / Sq (nm)	Confocal	2 Imatges	1 Imatge
10X 0.3NA	20.4	15.4	13.2
20X 0.45NA	6.3	7.5	9.2
50X 0.8NA	1.9	2.2	2.3
150X 0.9NA	1.9	3.8	3.8

Els valors de soroll de AiFV no estan inclosos en aquesta taula perquè els valors són equivalents als del confocal, però AiFV té l'inconvenient de la pèrdua d'informació d'altres freqüències degut als *smoothings* que es fan a les imatges de seccionat òptic. En termes de soroll, podem concloure que els mètodes proposats són equivalents al confocal.

El següent test consisteix en mesurar l'espècimen de rugositat AIR-B40 amb l'objectiu 20X 0.45NA de Nikon. Els resultats es mostren a la Figura 3.69 i la Taula 3.8. La topografia confocal no es mostra per la seva similitud amb la dels mètodes proposats.

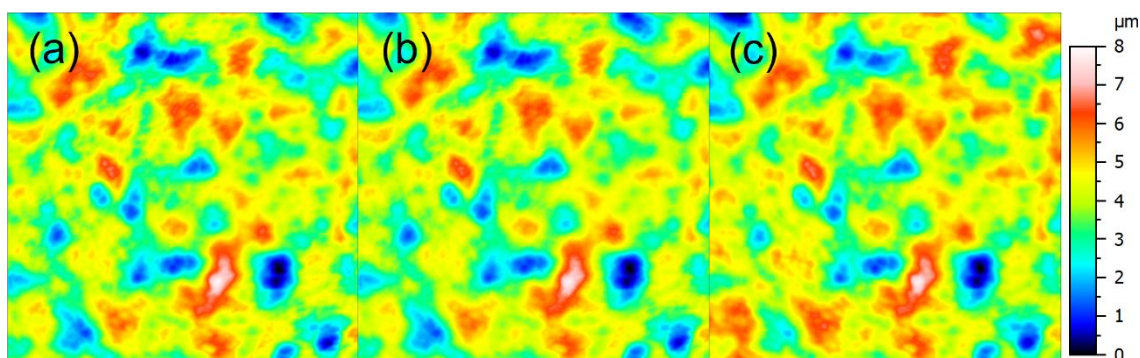


Figura 3.69. Topografia de l’AIR-B40 mesurat amb el mètode de dues imatges (a), una imatge (b) i AiFV (c).

Taula 3.8. Paràmetres de rugositat segons la ISO-25178 de l’espècimen AIR-B40.

Paràmetre	Confocal	2 Imatge	1 Imatge	AiFV
Sq (µm)	1.080	1.082	1.068	1.081
Sa (µm)	0.847	0.845	0.834	0.846
Sz (µm)	7.823	7.794	7.677	7.673

Per a mostres rugoses els mètodes proposats són visualment equivalents. No obstant, presenten algunes diferències numèriques amb el confocal quan es comparen els paràmetres de rugositat. El mètode d’una imatge mostra unes diferències més grans que el mètode de dues imatges, tot i que per a la majoria d’aplicacions ambdós mètodes són encara vàlids.

Com hem mencionat abans, el mètode d’una imatge elimina certes freqüències, per tant és necessari caracteritzar la resposta impulsional del sistema (ITF, per les sigles en anglès). La ITF s’ha obtingut mesurant amb un objectiu 50X 0.8NA l’espècimen Siemens Star, i els resultats s’han comparat amb els del confocal. Com que l’AiFV conté *smoothings* espacials, la ITF no es pot caracteritzar correctament amb aquest procediment i els resultats no són comparables amb altres tècniques.

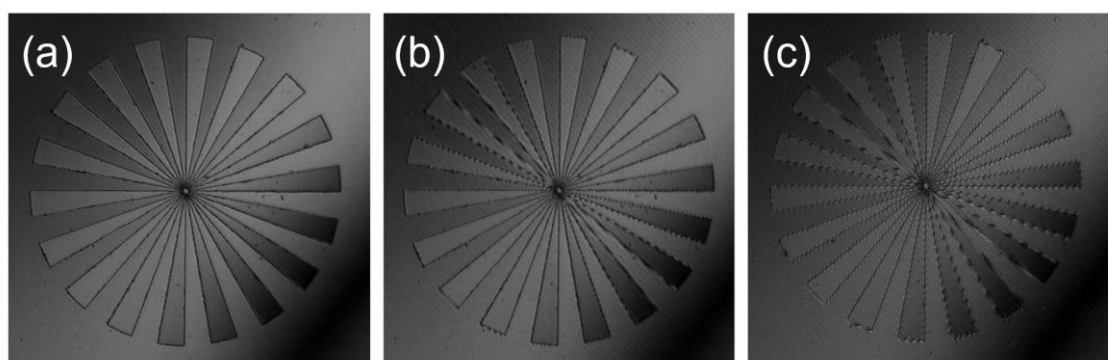


Figura 3.70. Imatge de seccionat òptic del Siemens Star obtinguda amb confocal (a), amb el mètode de dues imatges (b) i el mètode una imatge (c).

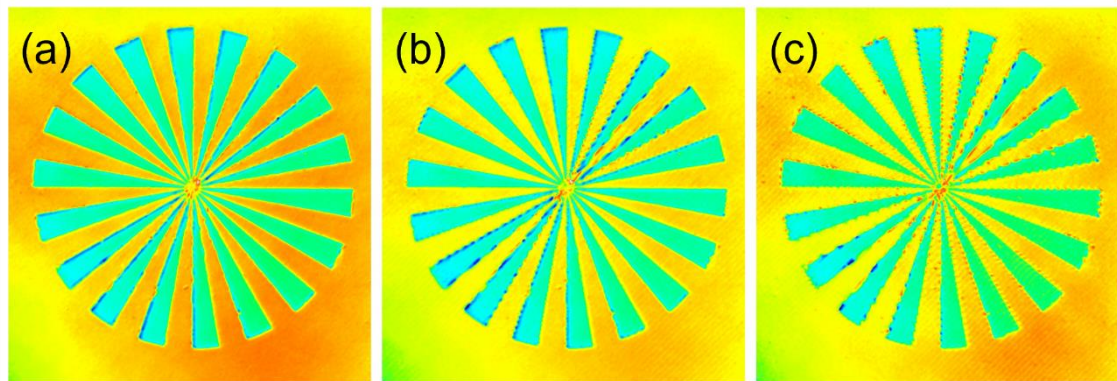


Figura 3.71. Topografia del Siemens Star mesurada amb confocal (a), el mètode de dues imatges (b) i el mètode d'una imatge (c).

Les imatges de seccionat òptic dels mètodes proposats presenten artefactes degut a les discontinuïtats de la superfície, més acusats en el mètode d'una sola imatge. En aquest tipus de mostres no es desplaça correctament la fase de totes les freqüències i per tant hi ha una direcció crítica on els artefactes apareixen predominantment. Aquesta direcció és paral·lela a les línies de Ronchi projectades sobre la mostra, però a l'hora de calcular la topografia, els artefactes apareixen en la direcció perpendicular.

La presència d'artefactes en la topografia mostra la limitació de mesurar mostres amb discontinuïtats, causant que aquests mètodes no siguin apropiats per a algunes aplicacions, com en la indústria de semiconductors, on determinar l'alçada de certes característiques com graons verticals és crucial.

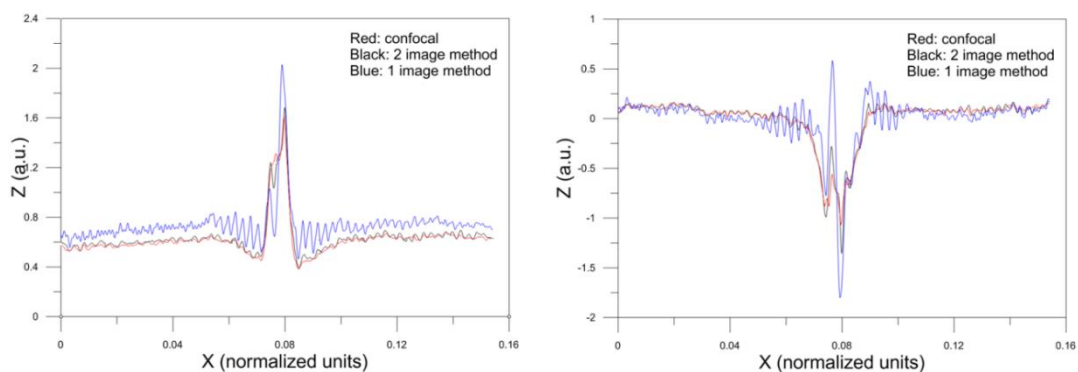


Figura 3.72. Perfil del Siemens Star. De vall a vall (esquerra) i de pic a pic (dreta).

A la Figura 3.72 es mostra el perfil de l'estàndard Siemens Star on s'aprecia que en termes de ITF el mètode de dues imatges és pràcticament igual al confocal, mentre que el mètode d'una única imatge no pot caracteritzar correctament les altes freqüències degut a la cancel·lació de freqüències en l'espai de Fourier per a obtenir la imatge de camp clar.

En conclusió podem afirmar que els mètodes proposats per a recuperar la imatge de seccionat òptic són vàlids per a mesurar superfícies contínues (rugoses i polides), però que per a superfícies amb discontinuïtats apareixen artefactes, sobretot amb el mètode d'una sola imatge. No obstant, els beneficis d'implementar aquests mètodes superen les seves limitacions. Aquests mètodes permeten suprimir l'escombrat del pla necessari en un microscopi confocal, i a sobre redueixen el nombre d'imatges necessàries respecte a SIM, incrementant la velocitat

d'adquisició. La seva implementació física en un sistema només requereix d'una branca d'il·luminació estructurada amb un patró situat al diafragma de camp del microscopi, reduint significativament la complexitat de hardware i els costos del sistema.

3.3.4. Recuperació de les altes freqüències

L'origen dels artefactes i la seva direccionalitat pot ser deguda a la direcció dominant del patró projectat sobre la mostra. Una de les maneres per evitar aquesta anisotropia és canviar el patró de Ronchi projectat fins ara per el patró de CB que s'utilitza també per AiFV. El principal benefici del segon patró és que és un patró bidireccional enlloc d'unidireccional.

Una altra de les solucions per a suprimir els artefactes de les discontinuïtats és aplicar filtres *smoothing* en les imatges de seccionat òptic. Aquest procés no només elimina els artefactes sinó que redueix el soroll i proporciona robustesa a la tècnica a expenses de perdre resolució lateral, procés habitualment executat en la majoria dels equips comercials.

La imatge de seccionat òptic és necessària en molts camps per a aplicacions molt diverses. En aplicacions d'observació de mostres *in-vivo* la il·luminació és sovint amb làser per a treballar amb fluorescència, tot i que apareix *speckle* no desitjat en la imatge. No obstant, Ventalon [34] va fer servir el *speckle* per a generar-lo volumètricament a través de la mostra. La imatge registrada per la càmera és la suma dels components dins i fora de focus de la mostra, il·luminada pels grans de *speckle*, però només el senyal fluorescent correspondrà als components en focus, obrint la possibilitat a originar el seccionat òptic amb aparença granular degut al *speckle*.

Lin [35] aprofita la mateixa configuració però genera dues imatges, una amb un còbreeobjectes estàtic, i una altra amb el còbreeobjectes girant a velocitat molt alta. La segona imatge promitja el contrast de *speckle* i per tant s'assembla molt a una imatge de camp clar. Llavors es resten les dues imatges i s'aplica un filtre passa-baixos resultant en una imatge seccionada òpticament que ha perdut resolució lateral inherentment. Per recuperar detalls d'alta freqüència, s'aplica un filtre passa-alts a la imatge de camp clar i els components resultants s'afegeixen a la imatge de seccionat òptic. El resultat d'aquesta imatge s'anomena HiLo (de l'anglès *High and Low*), molt similar a una imatge confocal. Kang [36] fa servir el mateix principi d'imatge HiLo fent servir un patró sinusoidal per a la reconstrucció tridimensional d'una superfície.

Per tant el mètode HiLo, que és el que hem implementat, permet recuperar altes freqüències en la imatge de seccionat òptic, que precisament és el que es perdrà si s'apliquen *smoothings*. Un altre mètode més senzill i computacionalment més eficient de recuperar les altes freqüències és amb una simple multiplicació entre la imatge de camp clar i la imatge de seccionat òptic. La imatge de camp clar conté la informació de les altres freqüències, i la multiplicació amb la imatge de seccionat òptic simplement modularà la intensitat de la primera reduint el senyal en les regions fora de focus, sense arribar a perdre el detall de les regions en focus.

Ara, per tant, la imatge de seccionat òptic s'obté seguint els següents 4 passos:

1. Sostracció de la imatge uniforme (camp clar) a la imatge estructurada (patró CB)
2. Càlcul de la imatge de contrast
3. Difuminat (*blur*) de la imatge de contrast
4. Recuperació d'altes freqüències

Com amb el patró de Ronchi, les parts de la imatge fora de focus contenen el patró projectat però difuminat pel desenfocament. Per tant el primer pas elimina les regions fora de focus, deixant únicament el patró projectat a la mostra en les regions que està en focus. Els resultats del pas 1 de mesurar l’AIR-B40 amb un objectiu 20X 0.45NA de Nikon es mostren a la Figura 3.73

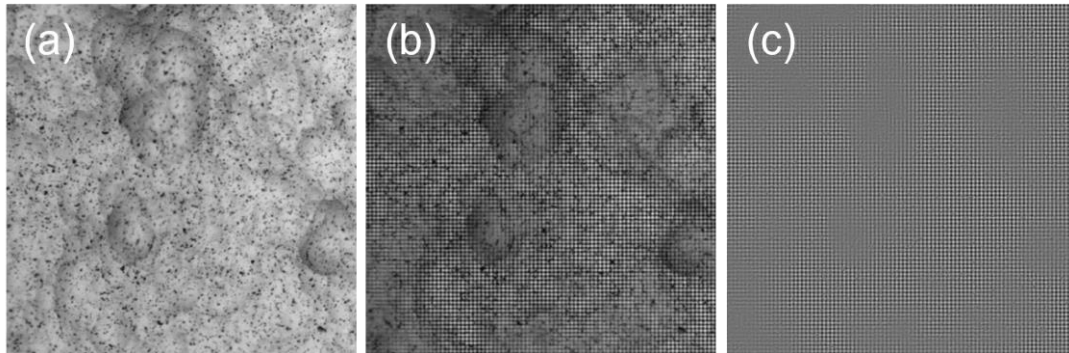


Figura 3.73. Imatges de l’AIR-B40: uniforme (a), estructurada (b) i sostracció de les anteriors (c).

Els resultats del pas 1 es transformen en una imatge de contrast. En el mètode anterior hem fet servir la SPQT, però en aquest estudi també hem analitzat l’operador SML amb una finestra de 5x5 píxels. Per a efectes de simplicitat computacional també hem calculat el quadrat de les intensitats obtingudes en la imatge sostracció. Ens referirem a aquest últim mètode com a diferències quadràtiques (DQ) . Malgrat l’operador SML només funciona quan la mostra té textura, el fet de projectar el patró CB fa que hi hagi la textura artificial en què es basa AiFV, de manera que també és capaç de mesurar superfícies polides. En el cas del quadrat de les diferències el benefici d’aquest operador és que computacionalment és molt eficient. Els resultats de cada operador aplicats sobre la imatge sostracció de la Figura 3.73 es mostren a la Figura 3.74.

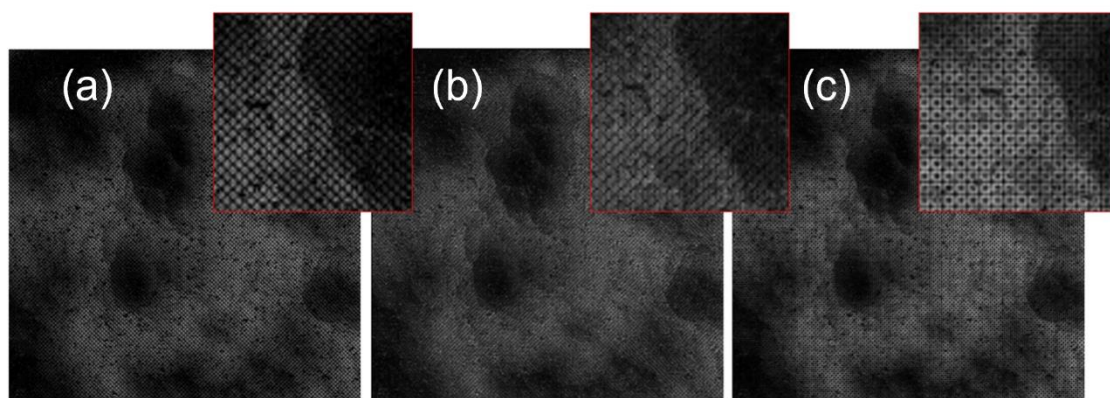


Figura 3.74. Imatge de contrast: DQ (a), FV (b) i SPQT (c).

Com es pot apreciar, els tres operadors tenen sensibilitat al focus de la mostra, retornant més senyal en les regions en focus que en les regions fora de focus. No obstant, queda una estructura espacial remanent. Per eliminar-la, s’aplica un difuminat Gaussià a la imatge (pas 3). Com hem mencionat, aplicar un difuminat afecta negativament a la resolució lateral del sistema, però amb el benefici que revesteix l’algoritme de robustesa i minimitza la presència de punts erronis a la topografia final, tal i com es pot apreciar en la Figura 3.75. En qualsevol cas, una pèrdua moderada de resolució lateral és acceptable per a la majoria d’aplicacions.

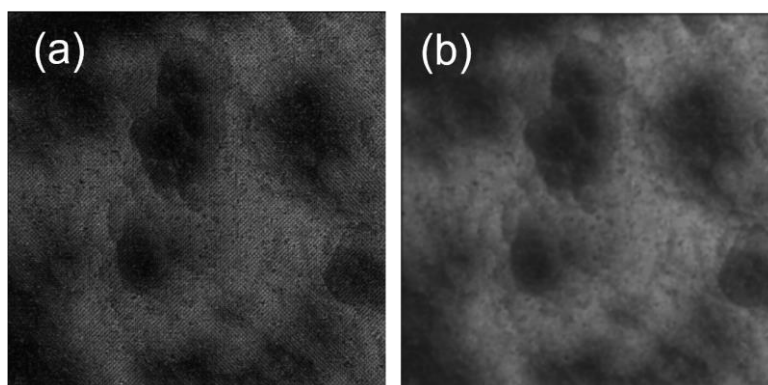


Figura 3.75. Imatge de contrast amb l'algoritme FV (a) i amb l'aplicació del blur (b).

En el pas final, consisteix en recuperar la informació d'altres freqüències que ha eliminat el procés de difuminat. Hem analitzat els dos mètodes que hem mencionat anteriorment: HiLo i multiplicació. En el primer s'aplica un filtre passa-baixos en la imatge difuminada (imatge Lo) i un filtre passa-alts complementari a la imatge uniforme (imatge Hi). Llavors les imatges Hi i Lo es combinen en l'espai de Fourier per formar la imatge HiLo, una imatge de seccionat òptic que conté informació de les altres freqüències. En el segon mètode es multiplica la imatge difuminada per la imatge uniforme. Aquesta imatge manté la capacitat de seccionat òptic a través de la imatge difuminada, però incorpora els detalls d'alta freqüència que conté la imatge uniforme. Les diferències entre els dos mètodes es poden apreciar a la Figura 3.76.

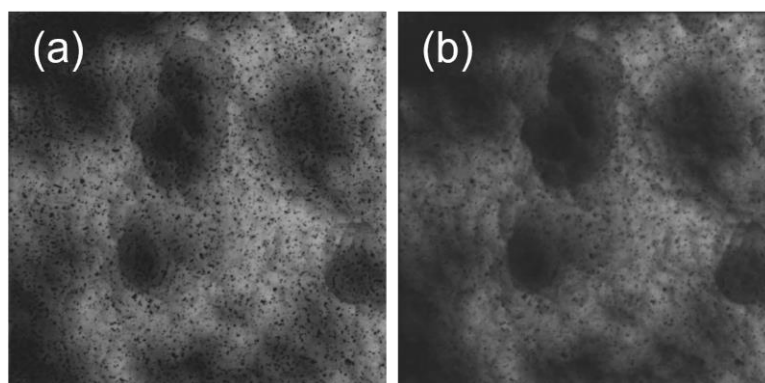


Figura 3.76. Reconstrucció HiLo (a) i mètode de multiplicació (b).

Mentre que el mètode de multiplicació és més eficient computacionalment, pateix d'una disminució de la capacitat de seccionat òptic quan la mostra té regions amb valors de reflectivitat molt diferents. Les regions de baixa reflectivitat disminueixen el seccionat òptic en el mètode de multiplicació, disminuint substancialment el ràtio entre senyal i soroll. En canvi, el mètode HiLo és més robust gràcies a treballar en l'espai de Fourier i manté l'amplitud de les freqüències espacials baixes independentment de variacions en la reflectivitat. Aquest efecte és visible en la Figura 3.77: mentre gairebé totes les regions de la imatge es troben en focus, en el mètode de multiplicació la imatge final de seccionat òptic té una reducció significativa en la intensitat en la regió de focus de baixa reflectivitat.

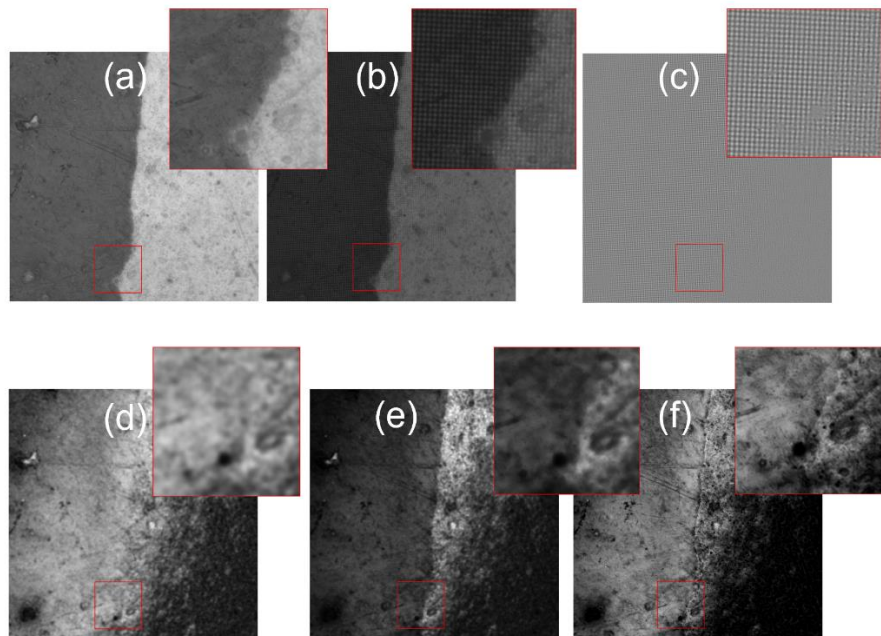


Figura 3.77. (a) Imatge uniforme, (b) imatge estructurada, (c) imatge sostracció, (d) imatge de contrast (FV), (e) mètode de multiplicació, (f) mètode HiLo.

En la Figura 3.78 es representa el diagrama de flux per a obtenir la imatge de seccionat òptic incorporant la informació de freqüències altes.

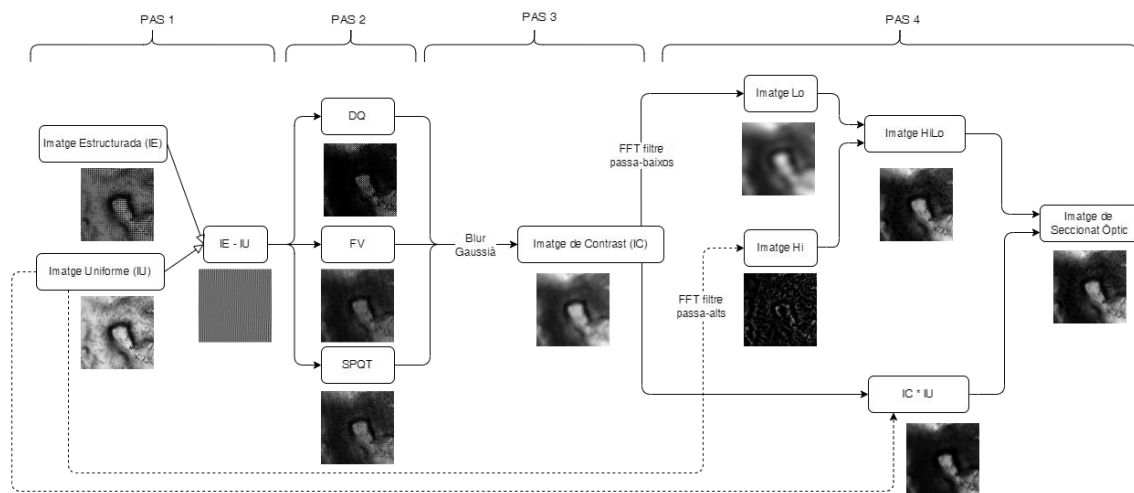


Figura 3.78. Diagrama per recuperar la imatge de seccionat òptic amb altes freqüències.

Adicionalment, proposem calcular la topografia final amb una suma ponderada de la imatge de contrast difuminada i la imatge de seccionat òptic dels passos 3 i 4, respectivament.

Hem avaluat la tècnica proposada fins ara estudiant la influència dels diferents paràmetres llistats a la Taula 3.9. Hem optimitzat aquests paràmetres per a què el sistema funcioni per a la gran majoria de mostres.

Taula 3.9. Llista de paràmetres i valors estudiats.

Pas	Paràmetre	Valors estudiats
2	Algorisme de contrast	DQ, FV i SPQT
3	Difuminat en la imatge de contrast	σ gaussiana de 3, 6, 12 i 24 píxels
4	Algorisme de recuperació d'altres freqüències	Multiplicació i HiLo
4	Freqüències de tall en HiLo	50 píxels en l'espai de Fourier
-	Pesos en el promig abans del càlcul de la topografia	Pesos des de 0 fins 1 cada 0.1

Per a avaluar el rendiment de la tècnica també s'ha utilitzat un microscopi amb *microdisplay*, per les mateixes raons que s'han mencionat abans: disponibilitat i simplicitat per a adaptar l'equip. El primer test consisteix en mesurar el soroll del sistema sobre el mirall de SiC. Els objectius provats són 10X 0.3NA, 20X 0.45NA i 50X 0.8NA. Agafant la tècnica confocal com a referència, s'obtenen uns valors de soroll de 16.5 nm, 4.9 nm i 1.2 nm per a cada objectiu, respectivament. Es mostren els resultats pels tres algorismes de contrast, els dos mètodes de recuperació de freqüències i 4 valors de σ gaussiana.

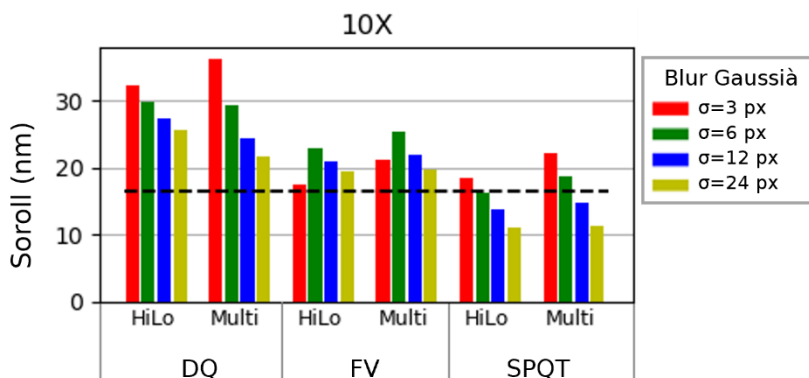


Figura 3.79. Soroll per a un objectiu 10X 0.3NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.

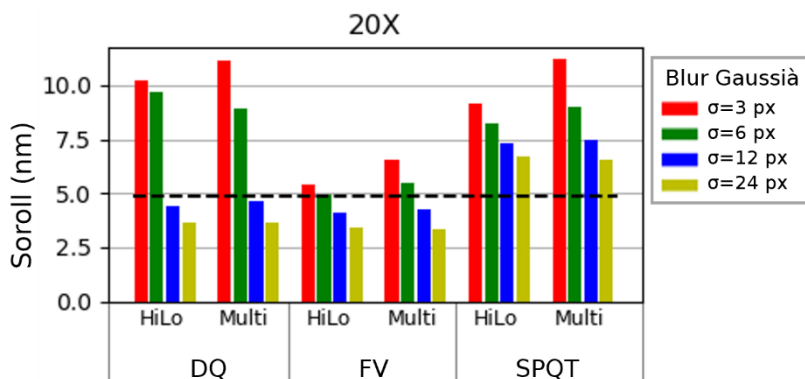


Figura 3.80 Soroll per a un objectiu 20X 0.45NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.

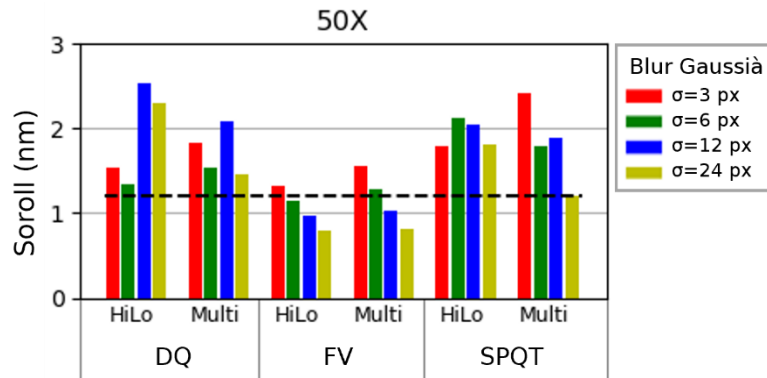


Figura 3.81. Soroll per a un objectiu 50X 0.8NA. La línia discontinua representa el valor de referència de confocal.

Els resultats mostren que el soroll disminueix com més gran és el factor de *blur* σ , fet totalment esperat, ja que el factor de *blur* és un *smoothing* del seccionat òptic, i per tant, elimina altes freqüències de la topografia. D'altra banda, una major *blur* comporta una disminució de la resolució lateral. Per tant, hi ha un compromís entre aquestes dues característiques.

Adicionalment, els resultats no mostren diferències significatives entre Hilo i el mètode de multiplicació, però sí que apareixen diferències entre els algorismes de contrast utilitzats. Per exemple FV proporciona els millors resultats en termes de soroll per als objectius 20x i 50X, que a més a més són comparables amb el valor de referència quan s'utilitza un factor de *blur* igual o major que 6 píxels. La mida del CB s'ha escollit per a que sigui equivalent a la resolució lateral d'objectius amb majors NA, que correspon a 1.2 i 0.9 vegades el criteri de Rayleigh per als objectius 20X i 50X, respectivament.

Per a l'objectiu 10X, la SPQT proporciona un soroll lleugerament més baix que FV. Aquest efecte pot tenir l'explicació degut a una mida sub-òptima del període del CB (físicament de 15.2 μm al *microdisplay*) de 3.57 μm a la mostra emprant l'objectiu 10X, que correspon a 1.6 vegades el criteri de Rayleigh de resolució lateral ($1.22\lambda/\text{NA} = 2.16 \mu\text{m}$). Aquesta no correspondència redueix la capacitat de seccionat òptic del sistema perquè el CB apareix amb contrast en un rang axial més extens, i per tant, incrementant el soroll del sistema. La mida òptima hauria de correspondre amb el criteri de resolució lateral per a maximitzar la capacitat de seccionat òptic mentre manté suficient contrast en els plans de focus.

Per a analitzar la tècnica en mostres rugoses hem tornat a mesurar l'AIR-B40 amb l'objectiu 20X. En la Figura 3.82 es representa un zoom de 300 μm x 300 μm per a poder apreciar millor la quantitat de detalls presents en la topografia obtinguda amb cada tècnica., mentre que els valors numèrics estan representats en la Figura 3.83. El valor de referència de confocal és $S_q = 1.033 \mu\text{m}$ mentre que amb AiFV la rugositat baixa fins a $S_q = 0.993 \mu\text{m}$.

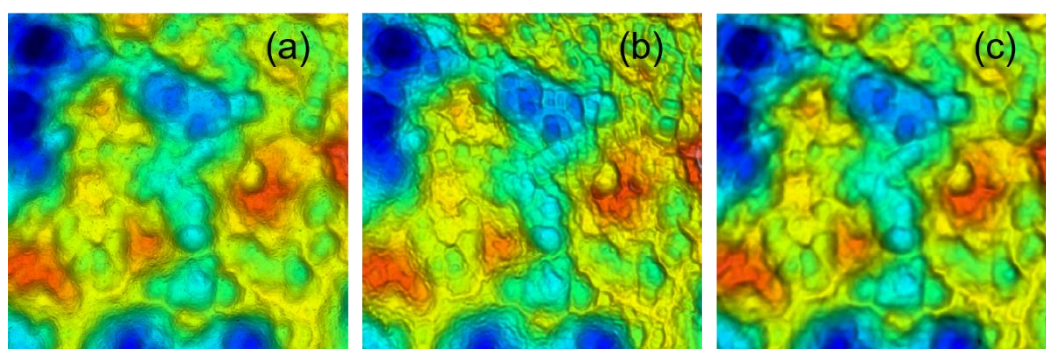


Figura 3.82. Zoom de 300 μm x 300 μm de l’AIR-B40 mesurat amb HiLo amb FV (a), confocal (b) i AiFV (c).

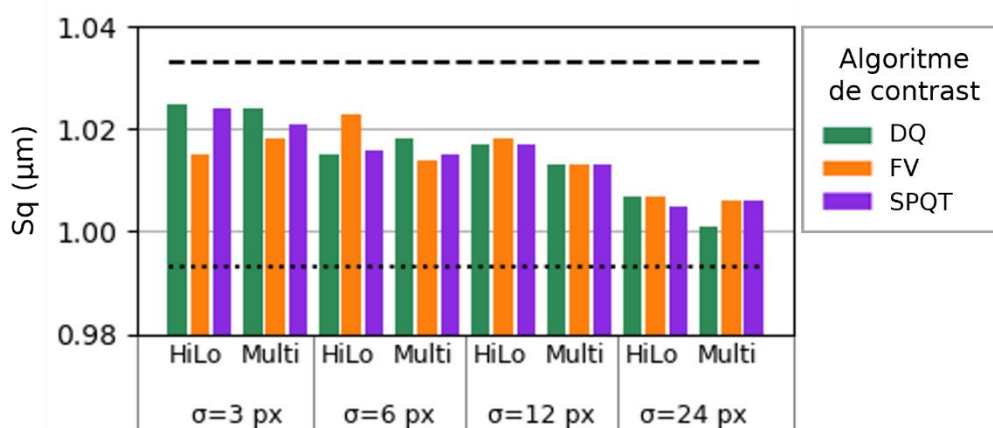


Figura 3.83. Sq mesurat en l’AIR-B40. La línia discontinua representa el confocal de referència, mentre que el la línia de punts representa AiFV.

Els resultats indiquen que no hi ha una diferència significativa entre els mètodes de HiLo i multiplicació, ja sigui en el mètode per a recuperar altes freqüències independentment de l’operador de contrast utilitzat. Com en el cas de soroll instrumental, com més gran sigui el difuminat, menor serà la rugositat detectada, ja que s’eliminen les freqüències més altes. La Figura 3.82 mostra com el mètode proposat, emprant la recuperació de HiLo, és capaç de recuperar la informació d’altes freqüències malgrat s’hagi aplicat anteriorment un difuminat relativament gros. La freqüència de tall en HiLo s’ha definit en l’espai de Fourier manualment, però es pot acabar d’optimitzar.

L’última característica metrològica que volem analitzar és la resolució lateral. Per a fer-ho hem mesurat de nou el Siemens Star amb l’objectiu 50X. La Figura 3.84 mostra la topografia de la part interior de l’espècimen amb diferents factors de *blur* mentre que els valors de la resolució lateral estan representats a la Figura 3.85.

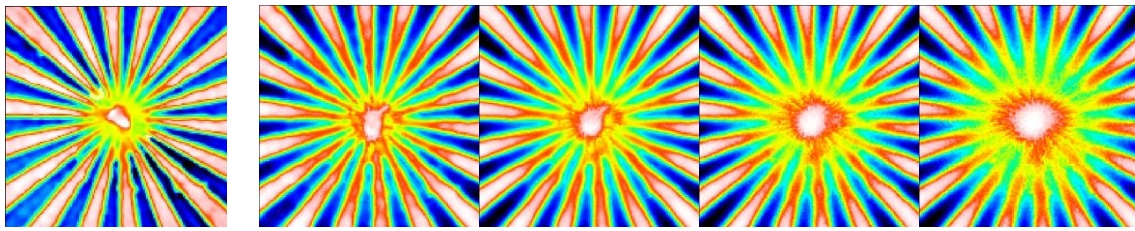


Figura 3.84. Àrea central del Siemens Star mesurat amb confocal (esquerra) i FV (dreta) amb diferents blurs d'esquerra a dreta $\sigma = 3, 6, 12, 24$ píxels.

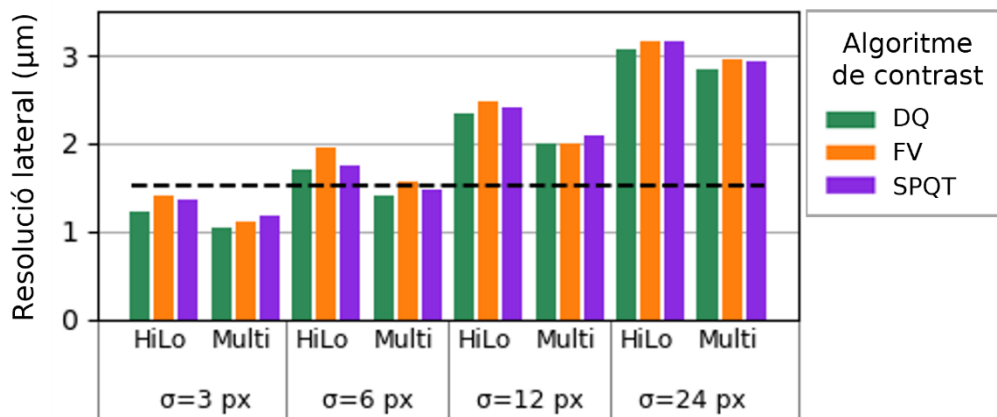


Figura 3.85. Resolució lateral en el Siemens Star. La línia discontinua representa el valor confocal.

La mesura de referència del confocal té una resolució lateral de $1.52 \mu\text{m}$, mentre el criteri de Rayleigh per a la resolució lateral diametral és de $0.405 \mu\text{m}$. La diferència és causada pels factors de *smoothing* inherents en les reconstruccions tridimensionals de superfícies. Com ja hem dit, la gran majoria d'equips comercials contenen aquests filtres per tal de dotar del sistema de més robustesa i per reduir el soroll a expenses d'una petita reducció de la resolució lateral del sistema. Això en general no presenta cap inconvenient ja que per a la gran majoria d'aplicacions, es pot utilitzar un objectiu amb major NA per a mesurar mostres amb estructures més petites. Quan s'utilitza un *blur* de $\sigma = 6$ píxels els valors que s'obtenen, ja sigui amb HiLo o multiplicació la resolució lateral és equivalent a la dels valors de confocal de referència.

Aquesta prova també mostra que en general el mètode de multiplicació és més efectiu que HiLo a l'hora de recuperar les altes freqüències a nivell topogràfic. Això és degut al filtre passa-baixos que s'aplica a la imatge difuminada de contrast, ja que afegeix intrínsecament un difuminat addicional a aquesta imatge. D'altra banda, el mètode HiLo permet una reconstrucció més robusta de les mesures, i aquestes són menys sensibles a variacions de reflectivitat en la mostra.

Per tal d'afegir encara més robustesa al mètode, hem provat de fer servir com a imatge per a calcular les respostes axials una mitjana ponderada entre la imatge de seccionat òptic amb les freqüències altes, i la imatge difuminada. A nivell qualitatiu amb un extens rang de mostres sembla l'opció més robusta, però per tal de quantificar com afecta, hem analitzat el canvi de resolució lateral en funció dels pesos de cada imatge, i els resultats es mostren a la Figura 3.86.

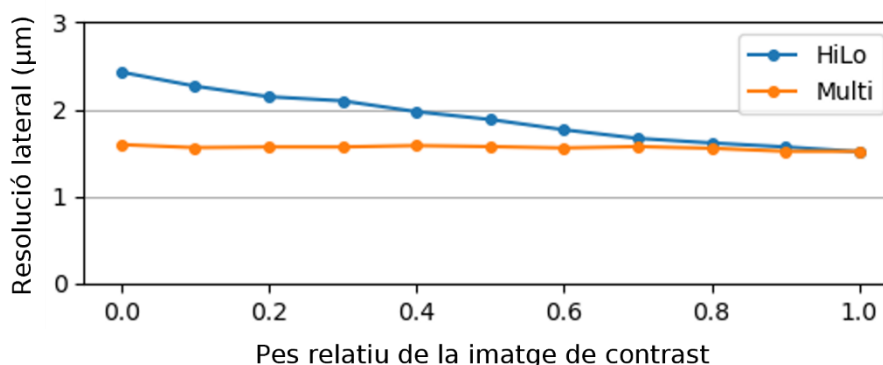


Figura 3.86. Resolució lateral en el Siemens Star ponderant amb diferents pesos la imatge de contrast i la imatge de seccionat òptic.

Aquests resultats confirmen la hipòtesi anterior: HiLo afegeix un difuminat addicional al generar la imatge Lo. D'aquesta manera, quan més pes té la imatge HiLo per al càlcul de la resposta axial, més difuminada és la imatge i pitjor resolució lateral. En canvi, com més ponderada està la imatge difuminada millor es preserven les altes freqüències. En el cas del mètode de multiplicació no hi ha pèrdua de resolució lateral en funció de la ponderació perquè la capacitat de seccionat òptic roman constant. No obstant, utilitzar una ponderació menor a 1 de la imatge de contrast difuminada proporciona resultats més robusts, en particular quan es mesuren mostres amb un contrast baix o altes variacions en reflectivitat, de manera que la petita pèrdua en resolució lateral és acceptable.

Tant el mètode de HiLo com el de multiplicació són incapaços de recuperar informació tridimensional de les altes freqüències, sinó que simplement recuperen informació dels detalls en la imatge. No obstant, aquesta millora de la informació en la imatge és molt útil per a la imatge de *stack* (*imatge de focus infinit*), que s'utilitza per a fer anàlisi bidimensional de les topografies, o bé en processos de *stitching* quan la mesura requereix de diversos camps de visió i unir-los tots en una sola topografia.

3.3.5. HiLo en el prototip

Fins ara totes aquestes proves s'han desenvolupat amb un sistema amb *microdisplay* enlloc d'un sistema de doble branca d'il·luminació. La principal diferència entre les dues configuracions òptiques és que en el sistema de *microdisplay* la branca d'il·luminació estructurada i la de camp clar és la mateixa, només canvia el patró projectat (o bé tots els píxels estan encesos o bé ho està només una part dels píxels). Per tant, fins ara hi ha hagut una equivalència d'il·luminació entre les dues imatges ja que provenen del mateix LED. Això ocasiona que la imatge diferència només tingui contrast en les regions en focus, tal i com es pot apreciar en la Figura 3.87, on les regions fora de focus no mostren contrast local i tenen una intensitat uniforme.

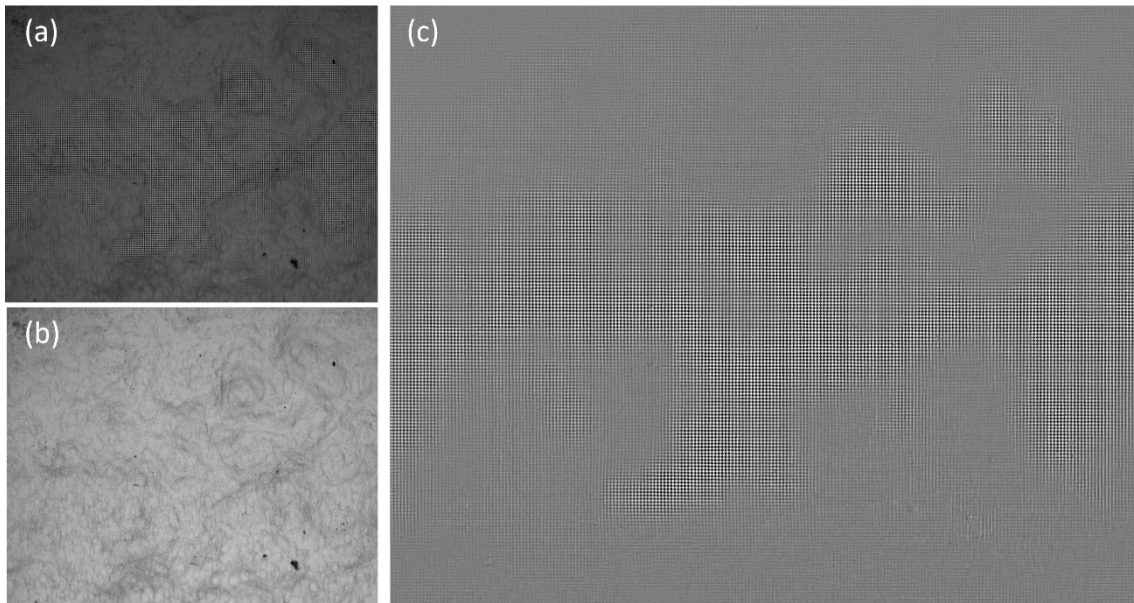


Figura 3.87. Imatge amb un microdisplay. Imatge estructurada (a), uniforme (b) i sostracció entre elles(c).

En canvi, en un sistema amb doble branca d'il·luminació hi ha una diferència en la il·luminació entre les dues imatges degut a l'alineat de les òptiques i que cada unitat del mateix LED és diferent, per tant, la distribució de la il·luminació és diferent. Aquest efecte és perfectament visible en la Figura 3.88, on en la imatge diferència, en la part esquerra es veu el contrast local degut a que les regions estan en focus i per tant el CB apareix enfocat. No obstant, en la mateixa imatge a la part de la dreta es veu la textura de la mostra que no s'ha cancel·lat al fer la sostracció. Això a l'hora de generar la imatge de contrast generarà una falsa intensitat ja que no hem eliminat el component DC de la imatge estructurada.

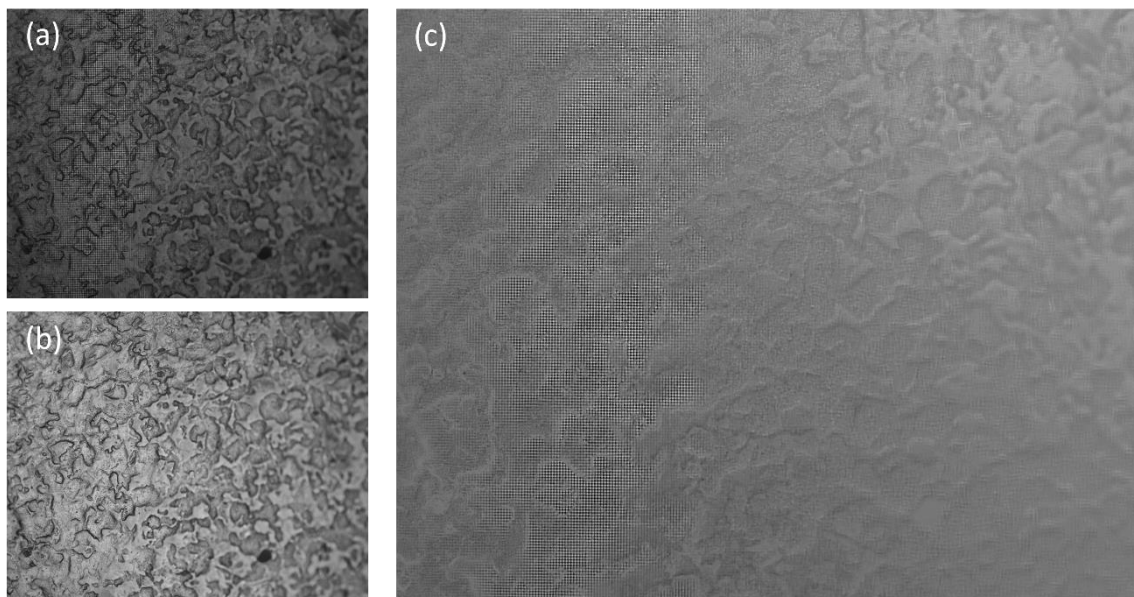


Figura 3.88. Imatge amb un sistema de doble branca d'il·luminació. Imatge estructurada (a), uniforme (b) i sostracció entre elles(c).

L'efecte de tenir dues il·luminacions lleugerament acaba causant un senyal (més baix) en les imatges de seccionat òptic en regions fora de focus. Conseqüentment, les respostes axials poden presentar batiments, un soroll més elevat i, per tant, baixar el seu SNR.

3.3.5.1. Resultats

Diferents tipus de mostres s'han mesurat per a avaluar la capacitat metrològica del sistema amb la tècnica HiLo. Les mostres són: un texturitzat làser (Figura 3.89), un filtre òptic (Figura 3.90) i un disc de polir (Figura 3.91).

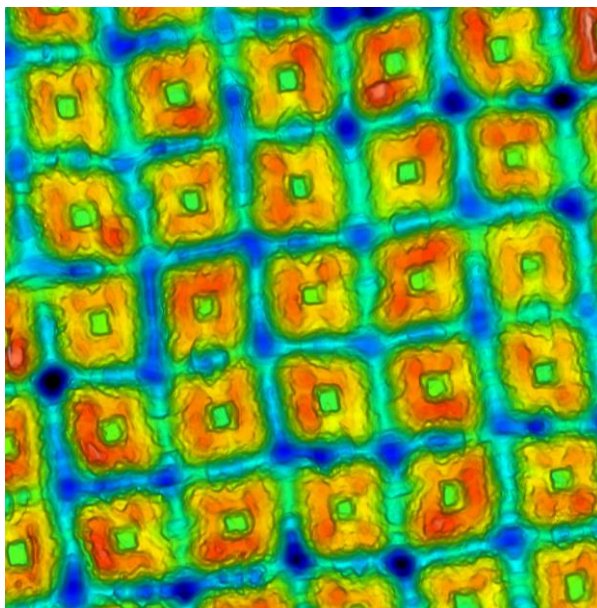


Figura 3.89. Mostra de texturitzat làser.

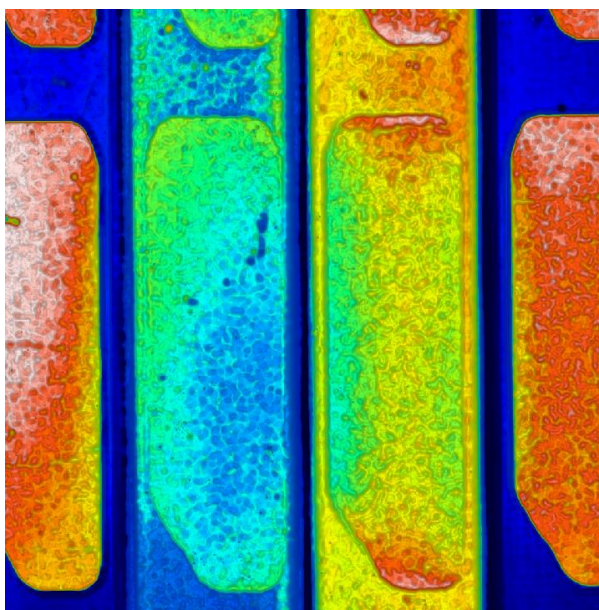


Figura 3.90. Filtre òptic.

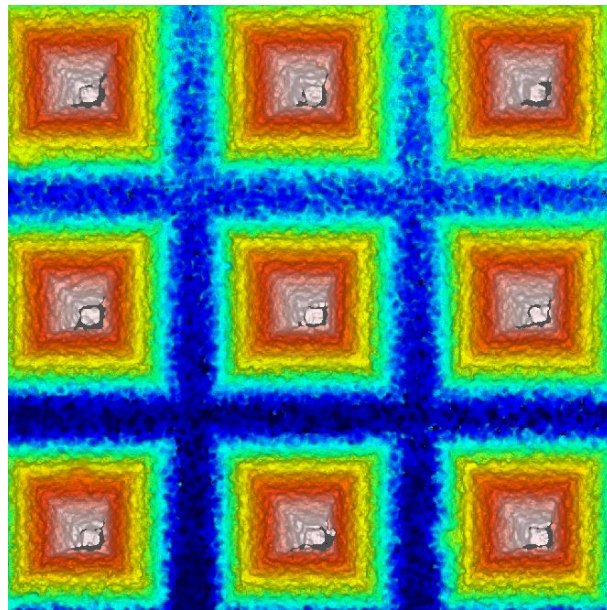


Figura 3.91. Disc de polir.

Amb aquest tipus de mostres es pot apreciar que la qualitat topogràfica de la tècnica HiLo és alta, no té artefactes ni *spikes*, pot mesurar mostres polides i rugoses, amb reflectivitats altes o baixes gràcies al filtre OTF. Quantitativament també hem observat que els valors numèrics de la caracterització metro lògica de la tècnica són equiparables als de confocal. En definitiva podem concloure que la tècnica és vàlida per a mesurar superfícies amb resultats equivalents a confocal.

Els principals beneficis de la tècnica és la supressió de l'escombrat de cada pla, de manera que amb un únic patró de vidre s'eliminen elements opto-mecànics o optoelectrònics que incrementaven la complexitat i els costos del sistema. Addicionalment, com hem vist a l'apartat 3.1.2, permet reduir considerablement les dimensions, i en conseqüència, també el pes del sensor.

4. TÈCNICA DE MESURA SINGLE-SHOT

La mesura precisa i ràpida de superfícies tridimensionals és essencial en entorns de producció on el cost del temps invertit en el control de qualitat és un factor important. En aplicacions de ciències de la vida, la velocitat de mesura pot ser crítica per capturar informació espacio-temporal, com poden ser processos transitoris i/o dinàmics. Les mesures dels processos cel·lulars i la dinàmica de les membranes poden requerir un seguiment ràpid de partícules i imatges topogràfiques ràpides, respectivament. Així mateix, la metrologia superficial precisa és fonamental en la fabricació de components en indústries que van des de l'automoció, manufactura additiva i, sobretot pel seu important volum, la indústria de semiconductors.

La forma, i possiblement la textura de la superfície dels components manufacturats, normalment determina la seva funcionalitat i la metrologia superficial s'ha convertit en una eina essencial per a la inspecció, sent utilitzada i adoptada habitualment en aquestes indústries. A més de la precisió de la mesura, la velocitat pot ser de gran importància per reduir el cost per peça inspeccionada a un nivell acceptable.

Per a la imatge macroscòpica, tècniques com la projecció de franges o l'estereoscòpia ofereixen un mitjà d'adquisició de dades ràpida i fins i tot d'una sola imatge per a la metrologia de superfícies 3D. Tanmateix, per a imatges microscòpiques d'alta resolució, és a dir, amb una obertura numèrica alta (NA), la profunditat de camp (DOF) és normalment inferior a 1 micra i els principals mètodes establerts utilitzen tècniques basades en el seccionament òptic en combinació amb una escombrada axial.

Els mètodes basats en contacte com els perfilòmetres *stylus* o els microscopis de força atòmica, aquests proporcionen la millor resolució i precisió lateral i vertical, però no estan exempts d'inconvenients: requereixen repetir exploracions de línies mitjançant un dispositiu tàctil que interacciona amb la mostra, cosa que no és ideal. A més, requereixen un temps d'escombrada molt llarg. En lloc d'aquest sondeig mecànic, els perfilòmetres òptics utilitzen la detecció òptica per a realitzar les mesures. Entre aquests, destaquen ICM, FV i CSI, ja que exploten la paral·lelització de la mesura que ofereix la capacitat d'imatge del capçal òptic, realitzant mesures d'àrea. Típicament implementats en un microscopi òptic tradicional, són capaços de proporcionar mesures topogràfiques precises a nivell micro- i nanomètric en pocs segons. Entre aquestes tècniques, CSI proporciona la millor resolució vertical però és molt sensible a les vibracions ambientals, mentre que FV proporciona una major robustesa per a superfícies òpticament rugoses (en cas contrari, la tècnica no és aplicable), però requereix una òptica de NA elevada per aconseguir una resolució vertical satisfactòria. Altrament, ICM proporciona una bon

balanç entre robustesa, és acceptablement immune a les vibracions i permet obtenir resolucions verticals de pocs nanòmetres i laterals properes al límit de difracció.

És important destacar que totes aquestes tècniques es basen en una escombrada axial: la mostra es desplaça a través de l'eix òptic per adquirir un conjunt d'imatges de la superfície. En tots els casos es calcula un senyal, anomenat resposta axial, que és sensible a la presència de la superfície respecte al pla a partir de la sèrie d'imatges adquirides a través de focus. La localització del senyal màxim en la resposta axial, permet identificar l'alçada de la superfície. Aquest senyal s'adquireix en paral·lel per a tots els píxels, de manera que es pot reconstruir la superfície 3D de la mostra que s'està inspeccionant. A més d'evitar el contacte amb la mostra, descartant possibles danys sobre la mateixa, la velocitat millorada dels perfilòmetres òptics és un avantatge clau sobre els perfilòmetres de contacte.

No obstant això, el fet d'haver d'adquirir la resposta axial a través tot el rang que es vol cobrir comporta tres implicacions òbvies:

- i. L'instrument requereix un mitjà (generalment car) per dur a terme una escombrada vertical (un motor en l'eix z, òptiques de focal variable, etc.).
- ii. La mesura requereix una exploració completa i, per tant, el temps associat per completar-la.
- iii. La precisió de mesura es veu directament afectada per la precisió i les no linealitats del sistema d'escombrada vertical.

Per a millorar la velocitat d'adquisició, s'han proposat algunes modificacions per evitar l'escombrada axial en microscòpia confocal. Aquestes variacions inclouen la microscòpia confocal cromàtica (CCM), la microscòpia confocal diferencial (DCM) i la microscòpia confocal de detecció dual (DDCM). CCM fa ús de l'aberració cromàtica longitudinal, que canvia la posició focal axial en funció de la longitud d'ona, i la supressió del senyal desenfocat utilitzant un *pinhole* de filtratge [37], [38]. DCM col·loca dos *pinholes* simètricament desenfocats en el camí de detecció [39]. La informació de les alçades s'obté a partir de la diferència d'intensitat detectada de cada *pinhole*, que s'ha de calibrar per a una reflectivitat concreta depenent de la mostra. Per a superar la dependència de la reflectivitat de la mostra, DDCM utilitza dos *pinholes* enfocats de forma idèntica de diferents mides [40]. Aleshores, es pot inferir la profunditat de la mostra a partir de la relació entre les intensitats de cada *pinhole*.

El rang de mesura amb CCM depèn del grau d'aberració cromàtica de l'objectiu (fins a uns quants mil·límetres) i la resolució vertical depèn de la capacitat de discriminació de la longitud d'ona (fins a dècimes de micròmetres), mentre que amb DCM i DDCM el rang de mesura està limitat pel DOF de l'objectiu. Aquesta profunditat es pot estendre mitjançant la il·luminació amb un feix anular en el pla de la pupila d'entrada de l'objectiu [41], amb l'inconvenient de reduir l'eficiència de la llum i limitar la resolució vertical. No obstant, totes aquestes variacions en l'adquisició confocal tenen l'inconvenient de requerir una exploració en el pla (cal rastrejar lateralment un *pinhole* per reconstruir la topografia de camp complet), limitant el temps d'adquisició tot i que mantenen una bona resolució lateral.

Per realitzar mesures topogràfiques ultra ràpides, s'han desenvolupat algunes tècniques per reconstruir la topografia d'una superfície utilitzant només una imatge de la càmera (*single-shot*), evitant així la necessitat d'escombrada axial. Normalment proporcionen mesures de menor qualitat (ja sigui amb un augment del soroll del sistema o amb l'aparició d'artefactes de mesura),

però són capaços de proporcionar mesures molt ràpides. Per a investigacions o mesures de processos transitoris o fenòmens dinàmics molt ràpids, aquesta capacitat pot proporcionar un mitjà per a extreure informació que d'altra manera seria impossible. En aplicacions industrials, pot ser molt útil, ja que una reducció del temps d'escombrada pot reduir dràsticament el cost d'inspecció a un nivell acceptable (en termes de cost per part mesurada) proporcionant un avantatge en competitivitat.

Un exemple d'aquestes tècniques és l'holografia [42]. S'utilitza per a la metrologia *single-shot* de superfícies, proporciona una mesura ultra ràpida i és capaç de mantenir una bona resolució lateral i vertical. El desavantatge és un compromís entre la resolució vertical i el rang de mesura, que està limitat per la longitud d'ona de la font de llum. El rang es pot ampliar, mitjançant una font de llum de doble longitud d'ona [43], fins a uns pocs micròmetres mantenint una resolució propera a alguns nanòmetres. D'altra banda, CCM també es pot modificar per tal que pugui funcionar també com a tecnologia *single-shot* [44], tot i que s'ha de calibrar per a la reflectivitat espectral de la mostra.

De fet, per a les tècniques *single-shot*, el rang de mesura és limitat en principi pel DOF del sistema, de manera que l'extensió del DOF és una necessitat per a moltes aplicacions. L'ampliació del DOF es pot aconseguir reduint l'apertura numèrica efectiva, però això sacrifica la resolució lateral i vertical a més de l'eficiència llumínica. L'ús de lents de focal variable com a mitjà per rastrejar ràpidament el punt focal també pot augmentar eficaçment el DOF, o bé la introducció d'una aberració òptica controlada juntament amb la deconvolució d'imatge posterior a la detecció [45]–[49]. Tanmateix, ampliar el DOF per augmentar el rang de mesura sense sacrificar la resolució vertical requereix un mecanisme alternatiu pel qual es detecti l'alçada de la mostra. Per a mesurar l'alçada es poden utilitzar funcions de resposta impulsional (*Point Spread Function*, PSF) especialment dissenyades per a ser sensibles a la profunditat de la mostra, com ara la PSF doble hèlix [50] (Figura 4.1.b), la PSF tetràpode [51] (Figura 4.1.c), o paral·laxi [52] (Figura 4.1.d). No obstant, requereixen fonts puntuals no solapades o simplement puntuals [53], reduint substancialment la resolució lateral.

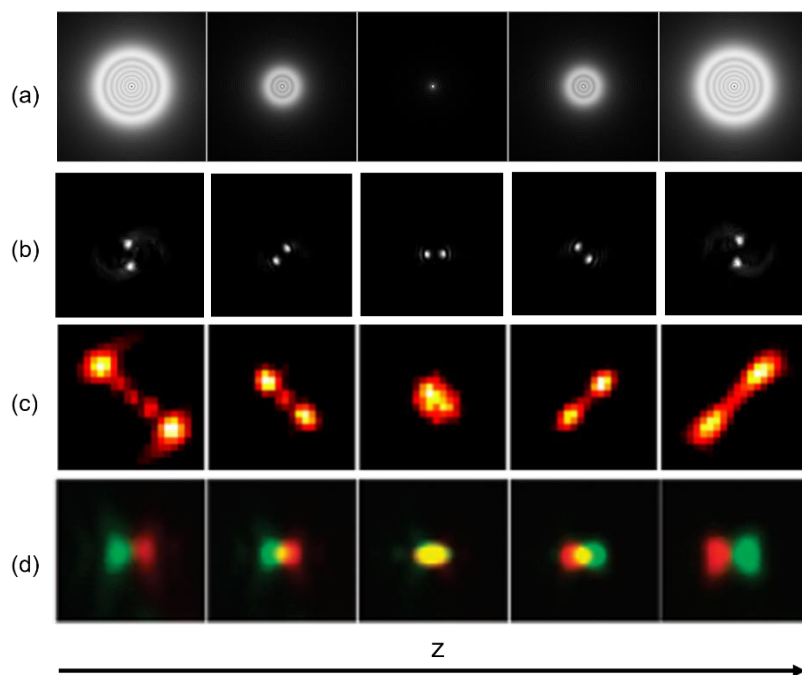


Figura 4.1. Imatges de la PSF a través de focus amb diferents sistemes òptics. (a) PSF convencional (discs d'Airy), (b) PSF doble hèlix, (c) PSF tetràpode, (d) paral·laxi.

4.1. Complementary Kernel Matching

Una de les maneres d'ampliar el DOF i preservar les resolucions tant verticals com laterals alhora que es detecta l'alçada és a través de la tècnica de *Complementary Kernel Matching* (CKM) [54]. L'extensió del DOF s'aconsegueix afegint una placa de fase en el camí òptic. La placa utilitzada en implementacions prèvies de CKM afegeix un camí òptic addicional, equivalent a un canvi de fase del front d'ona amb un perfil bicúbic, que es pot escriure com:

$$\Phi(u, v) = 2\pi\alpha(u^3 + v^3), \quad (4.1)$$

on (u, v) són les coordenades cartesianes al pla de la pupil·la, i α és la potència de la placa de fase. Com major sigui la potència, més s'estendrà el DOF del sistema. En la Figura 4.2 es pot apreciar com la forma de la PSF es manté invariant amb la introducció de la placa de fase bicúbica, fent efectiva una extensió de la profunditat de focus. Mentre el sistema sense placa de fase es va desenfocant i l'energia es va dispersant en els píxels veïns, el sistema amb placa de fase no veu canvis tan significatius en la seva PSF a través de focus, i per tant, el DOF s'estén.

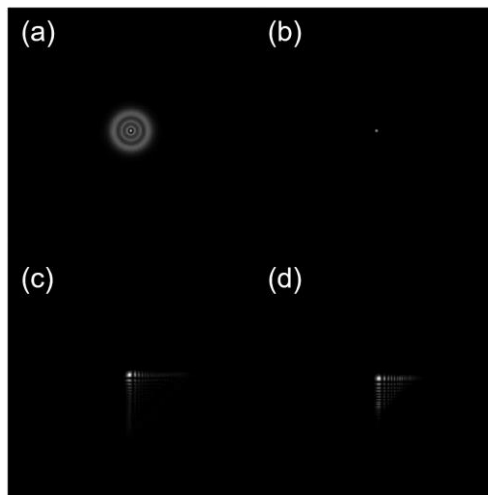


Figura 4.2. Imatges simulades de PSF per a un sistema de 0.3NA, sense placa de fase amb un desenfocament de (a) $z = 30 \mu\text{m}$ i (b) $z = 0 \mu\text{m}$, i amb placa de fase bicúbica de $\alpha = 4$ i desenfocaments equivalents a (c) $z = 30 \mu\text{m}$ i (d) $z = 0 \mu\text{m}$.

La principal funció de la placa de fase és modificar la PSF del sistema, amb una sèrie de propietats interessants [55], [56].

- i. la funció de transferència de modulació (MTF) no té valors nuls en l'espectre de freqüències espacials de manera que la deconvolució de la imatge utilitzant la PSF mesurada no presentarà artefactes addicionals,
- ii. la PSF és tolerant al desenfocament, és a dir, té una forma altament invariant sobre un DOF estès,
- iii. la PSF es desplaça lateralment en funció del desenfocament. Aquest desplaçament lateral de la PSF es produeix pel perfil de fase antisimètric emprat a l'Equació (4.1). És conseqüència de la propietat coneguda d'autoacceleració del feix Airy d'energia finita [57], que no es pot atribuir a un canvi del centre de masses de la PSF sinó a un canvi en la forma de la PSF [58]. Quan la placa de fase bicúbica està present en un sistema de formació incoherent d'imatges, es produeix una translació aparent de la PSF a mesura que l'objecte es mou per diferents posicions de focus. Aquest desplaçament

aparent de la PSF amb modulació de fase bicúbica és proporcional al quadrat del desenfocament i inversament proporcional a la potència de la placa de fase α [9], [55]. A més del desenfocament, la modulació de fase també proporciona tolerància a altres tipus d'aberracions relacionades i, per tant, juntament amb la deconvolució de la imatge, proporciona un mecanisme per a corregir les aberracions [46].

A la Figura 4.3 es mostra un exemple d'una PSF mesurada experimentalment i un conjunt de PSF superposades i codificades per colors amb diferents quantitats de desenfocament (obtingudes en diferents plans axials). Per tant, només observant el desenfocament axial s'aprecia clarament la propietat del desplaçament lateral.

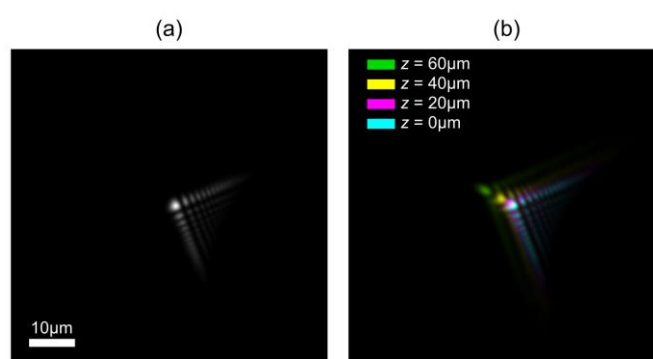


Figura 4.3. (a) PSF mesurada experimentalment. (b) Superposició de la PSF del sistema en diferents plans axials.

El mètode de CKM és capaç d'obtenir les alçades de la mostra a través de la mesura del desplaçament lateral ocasionat pel desenfocament. Per a mesurar-lo calen dues càmeres situades a dues posicions axials diferents a dins i fora de focus. D'aquesta manera, una càmera està situada amb un desenfocament concret, i l'altra càmera amb un altre desenfocament, causant un desenfocament relatiu entre les dues càmeres. D'aquesta manera el desplaçament lateral de la PSF a través de focus degut a la placa de fase causarà que la imatge d'una càmera estigui desplaçada lateralment respecte a la imatge de l'altra càmera.

En la Figura 4.4 es mostra aquest desplaçament lateral de les imatges (en la direcció X), que està calculat, per a cada càmera, calculant la correlació creuada de la PSF de cada pla amb la PSF del pla $z = 0 \mu\text{m}$. El desplaçament apareix perquè la PSF de cada pla presenta una translació respecte a la PSF del pla d'enfoc, però la distribució geomètrica de la PSF es manté pràcticament invariant en diferents posicions de focus.

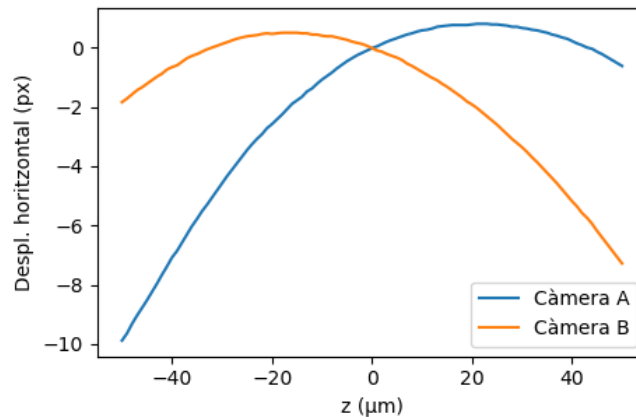


Figura 4.4. Desplaçament lateral de la PSF a través de focus per una càmera i per una altra.

Els desplaçaments laterals observats són equivalents als obtinguts utilitzant la deconvolució. Si es deconvoluciona la PSF del pla de la mostra per una PSF qualsevol, el resultat serà un pic, però desplaçat (respecte al centre de la imatge) exactament la mateixa quantitat que la translació entre les PSF del pla enfocat i la PSF emprada.

Es pot apreciar que el desplaçament lateral té un comportament parabòlic. Com que les càmeres estan situades a diferents posicions de focus, les paràboles de les càmeres estan desplaçades entre elles. Això implica que el desplaçament lateral relatiu entre les dues càmeres té un comportament lineal a través de focus, tal i com es representa a la Figura 4.5.

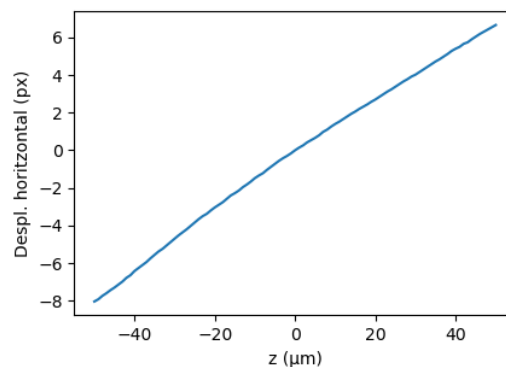


Figura 4.5. Desplaçament relatiu entre les dues imatges en funció de la posició axial.

L'element clau de la tècnica és el següent: el fet que per a cada pla el desplaçament relatiu entre les imatges de les dues càmeres sigui únic permet la codificació entre les dues imatges de la mostra i la posició de focus de la mostra. Això és degut a que la placa de fase causarà un desplaçament lateral per a la imatge de cada càmera. Aquest desplaçament lateral serà diferent per a cada càmera, i addicionalment, el desplaçament relatiu entre les dues càmeres també varia en funció de la posició de la mostra. Això implica que únicament deconvolucionar per la parella de PSFs (càmera A i càmera B) que corresponen al pla de la mostra, permetrà recuperar les imatges enfocades on no hi ha un desplaçament lateral entre les dues imatges. Aquesta parella de PSFs correspon a un pla determinat, que és la posició en el qual la mostra es troba en focus.

Un diagrama de les operacions que realitza CKM per a determinar les alçades es mostra a la Figura 4.6. Primer s'adquireix un conjunt de PSFs a través de focus que cobreixi el rang de mesura que es vol assolir. Les imatges de referència de les PSFs es guarden a disc. L'adquisició de les PSF és un procés de pre-calibració únic i no cal repetir-lo per a cada mesura. En segon lloc, s'adquireix una parella d'imatges (una de cada càmera, adquirides simultàniament) de la mostra que es vol mesurar en tres dimensions. Per a la reconstrucció topogràfica, les dues imatges adquirides es deconvolucionen amb tota la sèrie de PSFs enregistrades. El resultat de cada deconvolució conté una translació de la imatge segons el desplaçament de la PSF deconvolucionada (vegeu la Figura 4.4). Posteriorment, per a cada pla es calcula una mètrica, explicada a continuació, amb l'objectiu d'obtenir una resposta axial. Finalment, a partir de la resposta axial es determina l'alçada de la mostra.

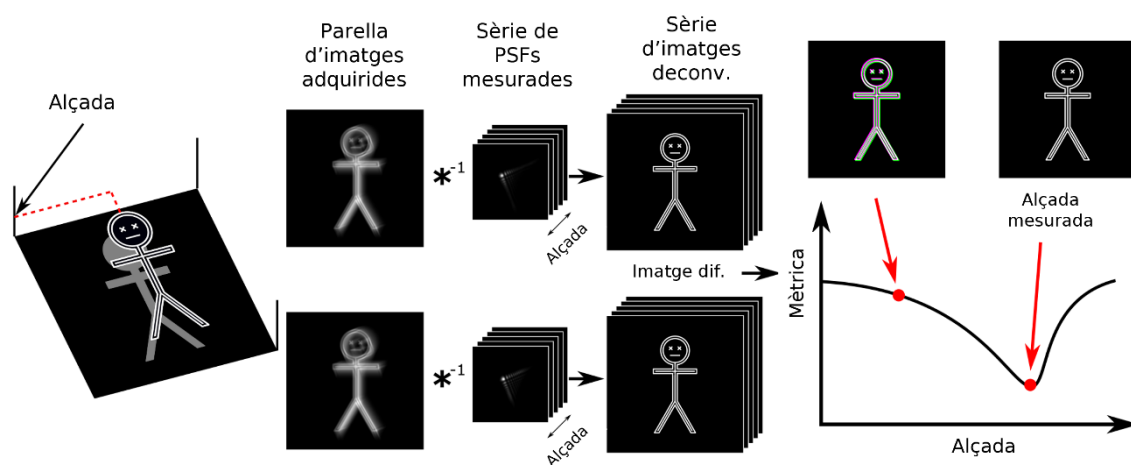


Figura 4.6. Diagrama de la tècnica CKM.

Com hem explicat anteriorment, PSF de diferents plans difereixen principalment en un desplaçament lateral, ja que en forma són molt similars. La deconvolució de la mateixa imatge (mostra) per diferents PSFs resultarà pràcticament en la mateixa imatge, però amb un desplaçament lateral diferent.

Per a quantificar numèricament el bon registre de les dues imatges deconvolucionades, la mètrica utilitzada és el sumatori del valor absolut de les diferències d'intensitats entre les dues imatges. D'aquesta manera, si les imatges estan ben registrades el valor de la mètrica serà baix, i si les imatges no estan ben registrades el valor serà alt.

Per tal d'obtenir una resposta axial utilitzant aquesta mètrica, cal deconvolucionar el parell d'imatges de la mostra per cada parell de PSFs corresponent a cada pla de la calibració. Com que per a cada alçada del pla de la mostra només hi ha un pla en què el nucli deconvolucionador proporciona les dues imatges sense desplaçament lateral relatiu, només hi haurà un parell d'imatges que estiguin ben registrades. El pla corresponent al mínim de la resposta axial correspondrà a l'alçada de la mostra.

En la Figura 4.7 es representa, per a dos plans diferents, la superposició de les imatges deconvolucionades per la PSF del pla en qüestió. Si el pla correspon al de la mostra, les imatges quedaran registrades i la mètrica serà mínima (cas de la dreta). En el cas contrari, en el que el pla de la PSF no és el pla de la mostra, es produeix una disparitat de les imatges

deconvolucionades i la superposició de les imatges presenta diferències (representades amb colors verd i magenta) i, per tant, el valor de la mètrica serà més elevat.

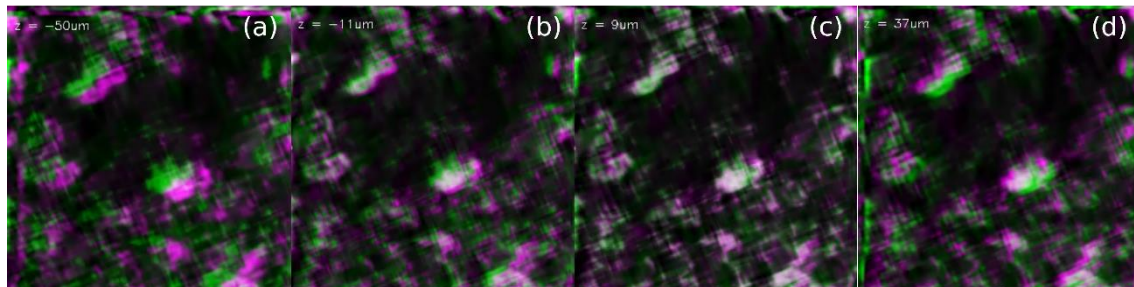


Figura 4.7. Superposició de la imatge d'una càmera (color verd) amb l'altra càmera (magenta) deconvolucionades per la PSF corresponent a $z = -50 \mu\text{m}$ (a), $z = -11 \mu\text{m}$ (b), $z = 9 \mu\text{m}$ (c) i $z = 37 \mu\text{m}$. Quan el nucli deconvolucionador correspon al pla en què es troba el píxel (o regió), la superposició de verd i magenta resulta en blanc. En el cas contrari hi ha un desplaçament lateral relatiu entre les dues imatges i es diferencien els colors de la regió.

Fins a aquest punt, cal tenir present diverses consideracions:

1. Una limitació immediata de la mètrica presentada és que és imprescindible que hi hagi un mínim de textura en ambdues imatges. Si la mostra és polida i no té detalls, deconvolucionar per una PSF corresponent a un pla erroni ocasionarà un desplaçament lateral que no s'apreciarà en la imatge i no es podrà determinar el mínim de la resposta axial.
2. El càlcul d'aquesta mètrica no es pot fer píxel a píxel ja que requereix comparar les diferències en imatges i no píxel per píxel. El motiu és obvi: un desplaçament lateral modifica la informació del píxel analitzat. Això fa que si només consideréssim un píxel per al càlcul de la seva resposta axial (mètrica vs alçada), estaríem utilitzant informació de diferents punts de la mostra per a diferents alçades.
3. Dins de la mateixa mostra hi ha alçades molt diverses. Per tant, quan es calcula la mètrica utilitzant una PSF corresponent a un pla determinat, els desplaçaments resultants d'una àrea prou gran, la disparitat ocasionada pels desplaçaments laterals de totes les alçades pot ser molt diversa. Això implica que el càlcul de la mètrica té en compte la disparitat de tots els píxels de la regió.

Per tal de minimitzar aquests efectes, per a cada píxel de la imatge es selecciona una finestra i es calcula la mètrica en aquesta finestra, eliminant la dependència de veïns molt llunyans. D'aquesta manera es pot recuperar un valor d'alçada per a cada píxel de la imatge. No obstant, les alçades dels veïns inclosos dins de la finestra acaben condicionant el valor de la mètrica, limitant la resolució tant vertical com lateral.

En definitiva, CKM fa ús d'una placa de fase bicúbica que genera una PSF prou invariant en focus i amb un desplaçament lateral aparent quan el pla d'imatge està a dins o fora de focus. La tècnica utilitza la codificació òptica i el processat d'imatge de manera que un canvi en l'alçada de la mostra provoca un canvi mesurable en les dues imatges registrades. Tot això en combinació amb la reconstrucció computacional que explota la textura de la mostra. La principal limitació, per tant, és que la mostra ha de tenir una textura suficientment contrastada i espacialment propera a pocs píxels com per què es pugui detectar aquest desplaçament entre les dues imatges.

4.2. Disseny i prototip

Les implementacions de CKM presents en la literatura inclouen l'ús d'un modulador espacial de llum [54] i l'ús d'un divisor de feix lateral [9] amb una única càmera, i combinat amb un procediment de calibratge complex.

En aquest capítol hem dissenyat i desenvolupat un prototip basat en aquesta tècnica de mesura, amb algunes modificacions.

Enlloc de generar els dos desenfocaments amb una única càmera i un cub BS de desplaçament lateral, hem fet servir un cub BS i dues càmeres posicionades a dins i fora de focus. Aquestes posicions han de complir diverses condicions:

- Una de les posicions ha d'estar abans de la posició de millor focus i l'altra després
- Les dues posicions han d'estar prou separades com per a què la diferència del desenfocament de la mostra sigui detectable. Com més properes a focus estan les dues càmeres, menor és el desplaçament lateral degut a un desenfocament de la mostra
- Els desenfocaments de la mostra en tot el rang de mesura ha de poder ser perceptible per ambdues càmeres simultàniament

La posició de les càmeres depèn del rang de mesura que es vol assolir, que juntament amb l'apertura numèrica de l'objectiu determinaran la potència de la placa de fase. El rang de mesura que hem volgut assolir en aquest muntatge és de $100\ \mu\text{m}$ ($\pm 50\ \mu\text{m}$ respecte a la posició de focus de l'objectiu). Per tal d'aconseguir un compromís entre sensibilitat de la mètrica i extensió del rang, hem considerat que les càmeres estiguin situades a la posició equivalent a un desenfocament d'un terç del rang de mesura. Tenint en compte la longitud d'ona utilitzada ($\lambda = 460\ \text{nm}$), i la distància focal de l'objectiu ($f = 10\ \text{mm}$), la distància a què s'han de col·locar les dues càmeres són $d_1 = 1.7924\ \text{mm}$ i $d_2 = -1.7304\ \text{mm}$ respecte a la posició de millor focus de l'objectiu.

L'objectiu que hem utilitzat és un 20X 0.45NA de Nikon amb una obertura de 9 mm. Com que la placa de fase té unes dimensions físiques de fabricació de $7.35 \times 7.35\ \text{mm}^2$, l'obertura de l'objectiu s'ha de reduir per tal que tots els raigs que entrin a l'objectiu travessin la placa de fase. Per tal d'evitar possibles defectes o imperfeccions a les vores de la placa de fase durant el procés de fabricació, hem decidit tancar l'obertura a 6 mm de diàmetre. Aquesta reducció de l'apertura comporta una reducció també de l'apertura numèrica efectiva de l'objectiu, que passa a ser d'aproximadament 0.3. No obstant, afegir un diafragma d'obertura ocasiona un efecte de pèrdua de telecentricitat de l'objectiu si la posició del diafragma d'obertura no correspon amb la posició de la pupil·la d'entrada de l'objectiu, com s'explica més endavant.

En la Figura 4.8 i la Figura 4.9, es pot apreciar com, per la mateixa potència de la placa de fase, una apertura numèrica més baixa estén la profunditat de focus de l'objectiu, limitant la deformació de la imatge de la PSF en la mateixa posició de desenfocament.

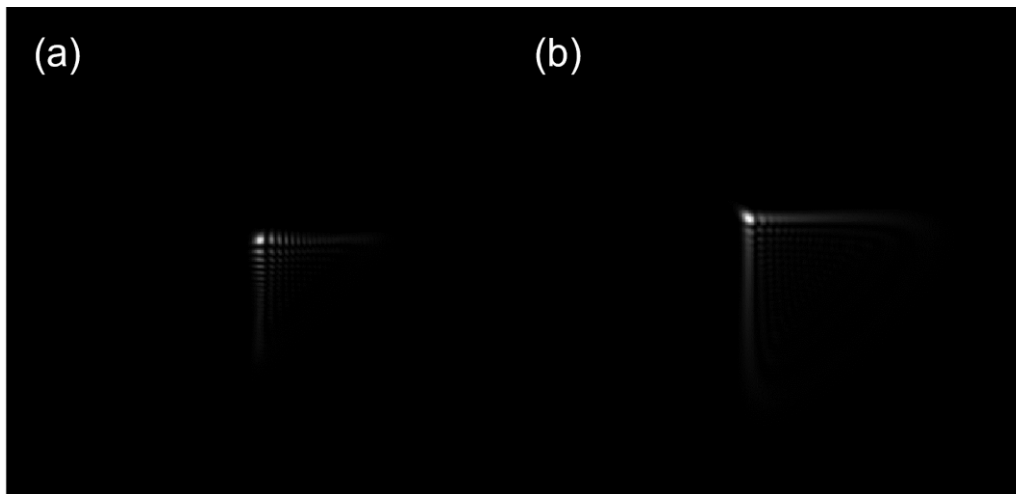


Figura 4.8. PSF simulada a una posició de l'objecte de $+50 \mu\text{m}$ respecte a la posició de focus amb cada una de les càmeres respecte quan l'objectiu té una apertura numèrica de 0.3. Les intensitats estan normalitzades per a cada imatge.

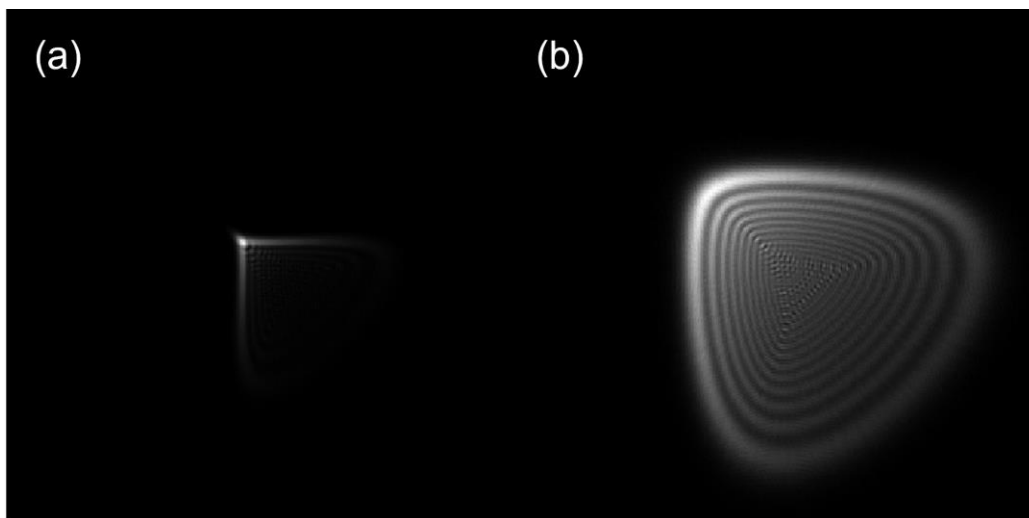


Figura 4.9. PSF simulada a una posició de l'objecte de $+50 \mu\text{m}$ respecte a la posició de focus amb cada càmera quan l'objectiu té una apertura numèrica de 0.45. Les intensitats estan normalitzades.

Per tal de facilitar la visualització les imatges estan normalitzades per a cada càmera. El rang dinàmic del sistema està limitat per a què en la posició de major concentració d'energia de la PSF ($z = 0 \mu\text{m}$), cap píxel estigui saturat. Llavors, en el cas extrem de $z = 50 \mu\text{m}$ i $0.3NA$ la imatge es distorsiona molt i l'energia es distribueix uniformement en més regió del pla d'imatge, de manera que la PSF es barrejarà amb el soroll i la caracterització experimental serà més difícil.

Per tal de seleccionar la potència de la placa de fase s'ha de tenir en compte que hi ha un compromís entre l'extensió del DOF de l'objectiu i la sensitivitat del sistema. La sensitivitat de la tècnica de mesura depèn del desplaçament lateral que apareix al deconvolucionar per una PSF que no correspon al pla en que està la mostra. Com més potència tingui la placa de fase, més s'estendrà el DOF, però a la vegada el desplaçament lateral de la PSF serà menor, i per tant, la capacitat de discriminar en alçades també serà menor.

El rang de mesura desitjat és de $\pm 50 \mu\text{m}$. Amb una potència de $\alpha = 4$ en els extrems del rang de mesura la PSF comenci a perdre la forma, però encara és caracteritzable i per tant, la forma continua sent similar a quan està en focus, així doncs encara serveix per a generar la mètrica de CKM. En canvi, si augmentem la potència ($\alpha = 7$) sí que la forma es mantindrà més constant a través de l'eix òptic, però la tècnica perdrà sensibilitat. Per contra, una potència més baixa ($\alpha = 3$) disminueix l'extensió del DOF del sistema, fent que en els límits del rang de mesura la PSF es barregi amb el soroll, dificultant la correcta deconvolució en el procés de mesura de la tècnica. L'efecte de la potència es pot veure en la Figura 4.10. La potència seleccionada de la placa de fase és $\alpha = 4$.

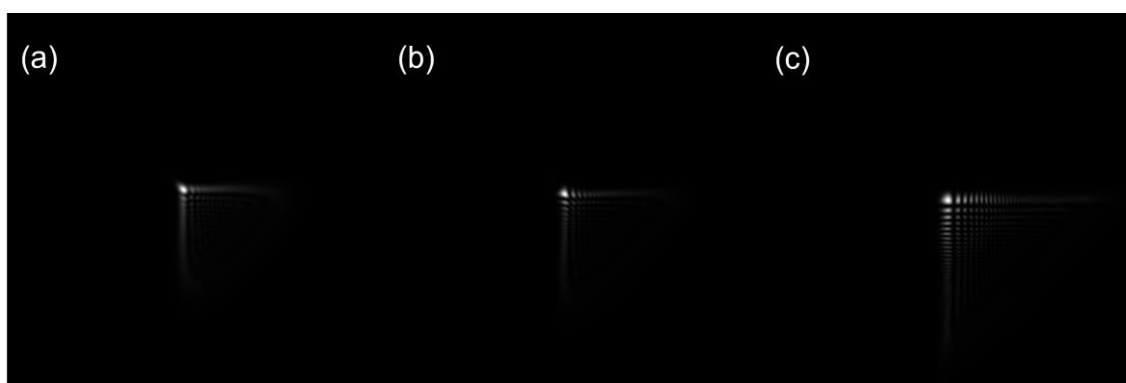


Figura 4.10. PSF a la posició $+50 \mu\text{m}$ amb una potència de la placa de fase de $\alpha = 3$ (a), $\alpha = 4$ (b) i $\alpha = 7$ (c), respectivament.

Com hem comentat, forçar l'apertura numèrica a 0.3 mitjançant un diafragma, no només provoca una extensió del DOF de l'objectiu, sinó que també provoca una pèrdua de telecentricitat del sistema. La raó és que hem col·locat el diafragma a l'obertura de l'objectiu enlloc de situar-lo a la pupil·la d'entrada de l'objectiu, condició *sine qua non* per a tenir telecentricitat. El motiu és que el disseny de l'objectiu és desenvolupat per Nikon i és força probable que la posició de la pupil·la d'entrada de l'objectiu estigui dins de les pròpies dimensions físiques de l'objectiu, fet que impossibilita situar-hi la placa de fase.

La telecentricitat és la propietat d'un sistema òptic de múltiples elements en la qual el raig principal està col·limat per a tots els punts de l'objecte o la imatge, o dit d'una altra manera, que el raig principal és paral·lel a l'eix òptic en l'espai de l'objecte o l'espai de la imatge. Això implica que es manté constant la magnificació si es desplaça l'objecte o bé el sensor d'imatge a través de l'eix òptic.

En la Figura 4.11 es pot apreciar que si el sistema és telecèntric, diferents posicionaments axials de l'objecte mantindran les seves alçades. En canvi, en el sistema convencional l'alçada de l'objecte es percep diferent en funció d'on estigui situat axialment. En aquest cas, l'objecte situat més lluny de la lent (línia negra contínua) es percebrà més gran que el mateix objecte situat més a prop de la lent (línia negra discontinua). Això es tradueix en un canvi de magnificació efectiva en funció de la posició de l'objecte (o imatge) dins de l'eix òptic.

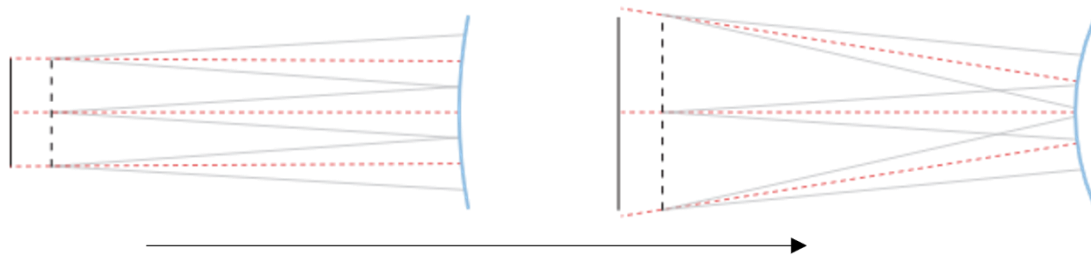


Figura 4.11. Exemple de projecció de raigs en un sistema telecèntric a l'objecte (esquerra) i un sistema convencional (dreta). Font: www.opto-e.com.

Podem distingir entre telecentricitat en l'objecte o bé telecentricitat en la imatge. La telecentricitat en l'objecte implica que el moviment de l'objecte a través de l'eix òptic no resultarà en una imatge més gran o més petita, i conseqüentment, la magnificació de l'objecte serà constant a través de focus. La telecentricitat en l'objecte es pot aconseguir introduint un diafragma d'obertura a la distància focal del grup frontal de lents. A la Figura 4.12 es pot observar un diagrama d'un sistema de lents telecèntric en l'objecte.

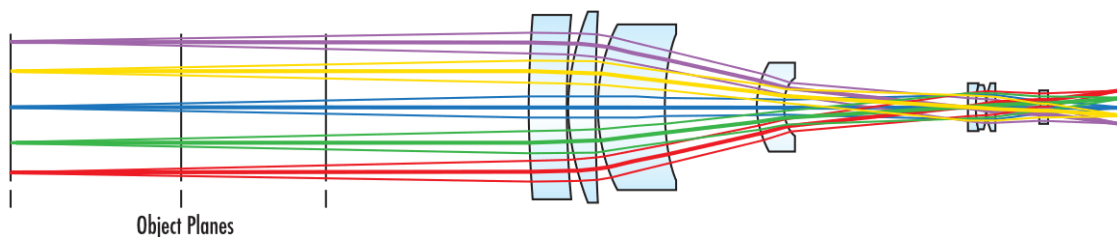


Figura 4.12. Diagrama d'un sistema telecèntric a l'objecte. Es pot veure que els raigs principals de cada punt de l'objecte són paral·lels a l'eix òptic fins que arriben a la primera lent. Font: www.edmundoptics.com.

Quan es dissenya un sistema de mesura òptica, la telecentricitat en l'objecte és crítica en la majoria de les aplicacions. En les tècniques basades en una escombrada axial la informació topogràfica s'obté a partir de respostes axials per a cada píxel, i si hi ha variació de magnificació durant l'escombrada, la informació d'un punt de la mostra pot acabar en diferents píxels de la càmera segons la seva posició axial. Això es tradueix en *crossstalk* entre píxels, falsejant les respostes axials i resultant en punts erronis o increment de soroll a les topografies reconstruïdes.

La telecentricitat en la imatge és totalment equivalent a la de l'objecte amb la diferència que els rajos principals són paral·lels en l'espai imatge, de manera que la magnificació no canviarà en funció de la posició axial del sensor que captura la imatge de l'objecte. La telecentricitat en imatge s'aconsegueix situant el diafragma d'apertura a una distància equivalent a la focal posterior del grup final de lents. La Figura 4.13 mostra un digrama d'un sistema telecèntric en l'espai imatge.

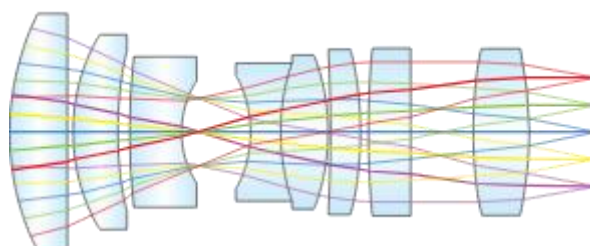


Figura 4.13. Diagrama d'un sistema telecèntric a la imatge. Els diferents punts de l'objecte tindran la mateixa alçada en el pla de la imatge, independentment de la posició axial del sensor. Font: www.edmundoptics.com.

En el nostre cas la telecentricitat en l'espai imatge sí que té un efecte molt rellevant, ja que les dues càmeres es troben a diferents posicions axials, i existirà una magnificació relativa entre elles. Tanmateix, aquestes posicions són fixes, i en conseqüència la magnificació relativa entre elles sempre serà constant i calibrable.

Un sistema bi-telecèntric és aquell que compleix telecentricitat en l'espai objecte i l'espai imatge simultàniament. En un microscopi s'aconsegueix fent que la posició del diafragma coincideixi amb la *back focal length* de l'objectiu i alhora amb la *back focal length* de la lent de camp. En general un sistema bi-telecèntric té la limitació que només pot observar objectes més petits que el diàmetre de l'última lent, però en microscòpia no té gaire efecte ja que el camp a observar és petit per definició i per tant no calen objectius de grans dimensions.

En la Figura 4.14 es mostra el disseny del prototip del microscopi amb tots els elements que el componen: com a font d'il·luminació hi ha un LED blau ($\lambda = 460 \text{ nm}$), que es col·lima amb un condensador situat a una distància tal que amb la lent de camp compleixi la condició d'un sistema d'il·luminació Köhler. A través d'un cub BS que permet acoblar la branca d'il·luminació i la d'observació, la imatge del LED es forma sobre la pupil·la d'entrada de l'objectiu, aconseguint-se així una il·luminació uniforme sobre el pla de la mostra. Idealment la placa de fase es col·locaria en la pupil·la d'entrada de l'objectiu, degut a que hem de limitar l'obertura de la pupil·la d'entrada per les dimensions físiques de la placa de fase. Com ja s'ha comentat anteriorment, la pupil·la d'entrada de l'objectiu està dins de l'objectiu, i no al seu diafragma d'obertura. Per tant, quan posem la placa de fase amb el corresponent diafragma, es perd la telecentricitat del sistema.

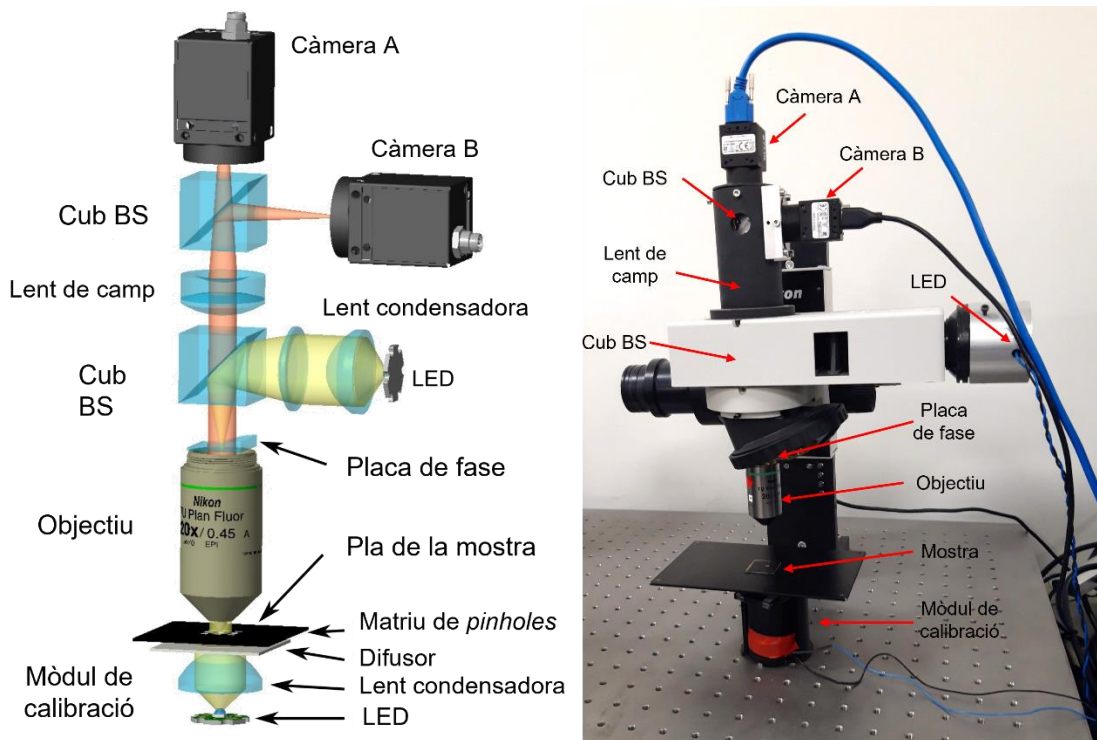


Figura 4.14. Esquema dels elements del prototip i muntatge experimental del prototip.

La llum que il·lumina la mostra es reflecteix i se'n forma imatge en el pla del sensor gràcies a la lent de camp ($f = 100 \text{ mm}$), introduint una magnificació addicional de 0.5X al sistema. Com que CKM requereix un sistema de doble observació, després de la lent de camp s'afegeix un cub BS que separa el feix en dos, per a col·locar cada una de les dues càmeres amb el desenfocament corresponent (positiu per a la càmera A i negatiu per a la càmera B).

La caracterització de la sèrie de PSFs a través de l'eix òptic es fa adquirint una imatge d'un *pinhole* il·luminat per transmissió a través de focus. Per tant, és necessari un mòdul addicional d'il·luminació, que consta d'una font de llum amb les mateixes característiques espectrals que pel mode en reflexió, una lent col·limadora, un difusor i el *pinhole*. Per a desplaçar el *pinhole* a través de focus es desplaça axialment tot el sistema, exceptuant el mòdul de calibració, utilitzant un desplaçador lineal actuat amb un motor de passos.

El *pinhole* ha de ser prou petit com per a què es produeixi difracció de la llum i no introdueixi efectes de la seva mida. Si per a la magnificació del sistema i la seva apertura numèrica (0.3 NA) l'objecte no és prou petit, llavors els raigs que passin per diferents punts del *pinhole* interferiran quan formin la imatge, i la imatge resultant ja no serà la PSF, sinó que serà imatge d'un forat circular convolucionada per la difracció. En canvi, si l'objecte és suficientment petit, el sistema es comportarà com si fos una font de llum puntual. La imatge d'aquest *pinhole* petit sí que tindrà la forma de PSF ja que els raigs de diferents punts del *pinhole* no interferiran en l'espai imatge.

El diàmetre màxim que considerem adient és aproximadament $1 \mu\text{m}$. Aquestes dimensions fan que la mostra no es pugui fabricar amb perforació làser ja que és molt costós enfocar en un punt tant petit tot el feix del làser. El *pinhole* s'ha fabricat en col·laboració amb el Dr. Trifon Todorov Trifonov, del Centre de Recerca en Ciència i Enginyeria Multiescala de Barcelona (UPC). El mètode de fabricació és la tècnica de Feix d'Ions Focalitzats (*Focused Ion Beam, FIB*) sobre una

deposició de crom sobre una placa de vidre. La Figura 4.15 mostra el *pinhole* mesurat amb un microscopi electrònic d'escombrada (*Scanning Electronic Microscope, SEM*). Com es pot apreciar, el diàmetre del *pinhole* és inferior a 1 μm .

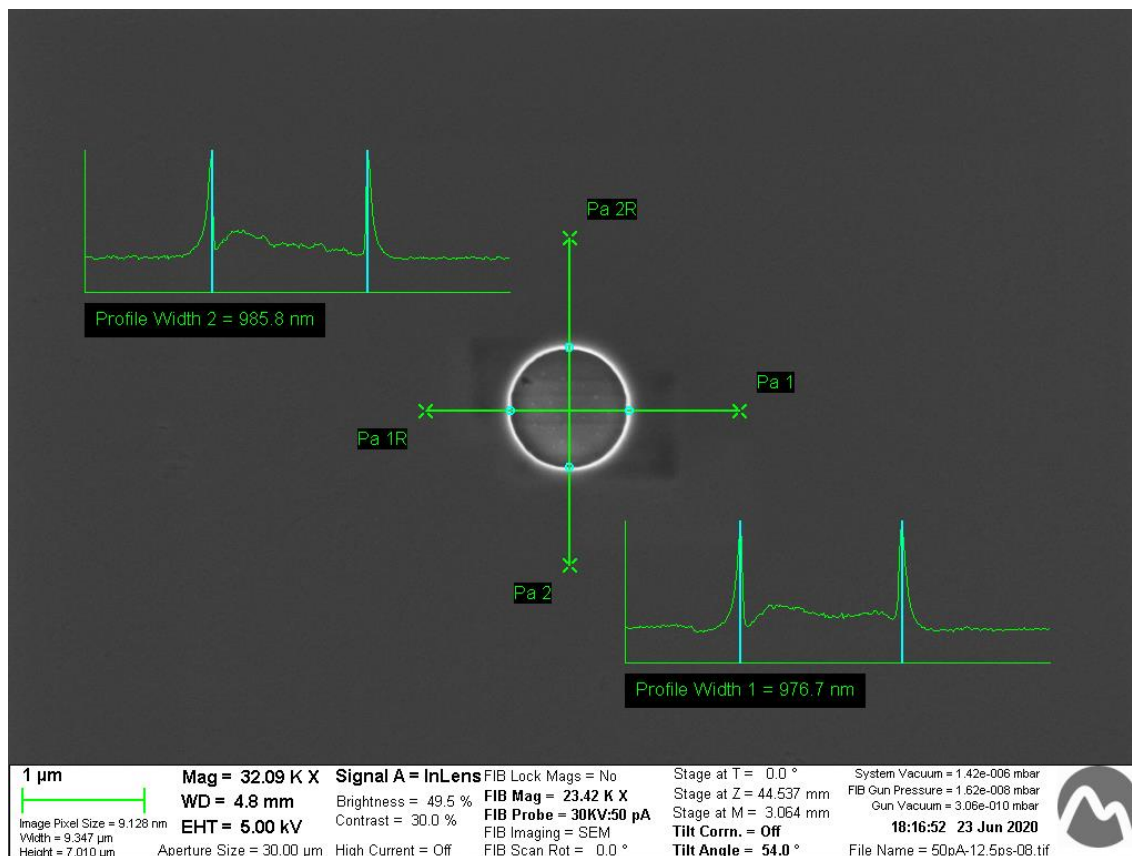


Figura 4.15. Imatge amb un SEM d'un *pinhole* fabricat amb FIB. Com es pot apreciar en els perfils, el diàmetre del *pinhole* és inferior a 1 μm .

El motiu d'introduir un difusor abans del *pinhole* és que la lent col·limadora envia els raigs a l'infinit, reduint l'apertura numèrica d'il·luminació. Per a poder caracteritzar correctament la PSF d'un sistema cal que l'apertura numèrica d'il·luminació sigui major que la d'observació. Per reflexió el limitant de l'apertura numèrica és l'objectiu de microscopi. Per transmissió, en canvi, el limitant no és l'objectiu sinó la pròpia il·luminació que ha de tenir una apertura suficientment elevada per que la calibració de les PSF sigui vàlida, ja que no tota la informació de les PSFs s'estaria caracteritzant correctament i les deconvolucions proporcionarien resultats amb artefactes si l'apertura no fos suficientment elevada.

4.3. Calibració

En la descripció de la tècnica es menciona a el procés de deconvolució de la imatge per la seva PSF i la comparació de les imatges de diferents posicions axials. Per al primer procés cal realitzar una caracterització experimental de les PSFs, mentre que el segon procés requereix una calibració que compensi les possibles translació, rotació i magnificació relativa entre les dues imatges.

4.3.1. Caracterització de les PSFs

Per a la caracterització experimental de les PSFs El procés de calibratge requereix l'adquisició d'una escombrada axial del *pinhole*. Amb les imatges adquirides durant aquesta escombrada s'obtenen les PSF que s'utilitzaran posteriorment en el procés de deconvolució en l'algoritme de reconstrucció i, que per tant, cal guardar en memòria. El rang de mesura d'aquesta tècnica està determinat pel rang de l'exploració axial en què s'adquireixen les PSF de calibratge, però està limitat al DOF del sistema. Gràcies a l'efecte de la placa de fase cúbica, s'amplia el DOF del sistema i, per tant, també s'amplia el rang de mesura.

En la nostra implementació hem adquirit, amb el mòdul de calibració, les PSF a través d'un rang de 100 μm amb passos de 1 μm (el DOF limitat per difracció per a 0.3 NA és aproximadament 5 μm). A continuació, pre-processem les PSF adquirides per eliminar el soroll i emmagatzemar les dades a disc.

Per a minimitzar el soroll de la càmera sense haver de recórrer a processat d'imatge, que sempre pot introduir artefactes, s'augmenta substancialment el temps d'exposició de la càmera, però vigilant que la PSF no tingui cap píxel saturat en tot el rang de l'eix òptic. Addicionalment també es fa una mitjana de 10 imatges de cada pla per reduir el soroll de la càmera, augmentant així el rang dinàmic de la imatge.

Inevitablement, però, quedarà soroll residual que s'ha de filtrar, ja que el soroll és el principal causant dels artefactes presents en el procés de deconvolució. El processat inclou establir un llindar (5 nivells de gris) per eliminar el soroll de fons de la càmera, que s'intenta minimitzar augmentant considerablement el temps. Posteriorment, s'eliminen els píxels saturats aïllats de la càmera o píxels que tinguin un soroll superior al llindar. En el cas que aquests píxels no tinguin veïns amb intensitats similars, es consideren píxels erronis (saturats o soroll) i llavors es substitueix el seu valor per zero.

4.3.2. Calibració geomètrica

Un cop les PSF ja estan processades, els passos a seguir amb CKM és la deconvolució de les dues imatges pel conjunt de totes les PSFs, i finalment l'obtenció de la mètrica, utilitzant la comparació de les dues imatges. Com hem vist, el fet que el nostre sistema no sigui telecèntric provoca una magnificació relativa entre les dues càmeres i ocasiona que no es pugui fer una alineació experimental entre elles. Per tant, és necessària una calibració geomètrica que proporcioni un mapeig de cada píxel d'una càmera respecte de l'altra per a cada pla. D'aquesta manera, les imatges es podran registrar correctament i la mètrica serà unívoca punt a punt.

En l'estudi de la calibració geomètrica hem provat dues estratègies diferents. La primera és mitjançant un patró CB i la detecció de les seves cantonades. La segona és utilitzar una matriu de *pinholes* i deconvolucionar per la PSF central per obtenir un punt de cada *pinhole*.

4.3.3. Checkerboard

Per poder projectar la imatge d'una càmera a l'altra es necessita establir un model geomètric. Per a poder determinar aquest model es necessiten diversos punts que es puguin correlacionar entre les dues imatges. Hi ha dues implicacions bàsiques: la primera és que els punts de les imatges han de representar el mateix punt de la mostra. La segona és que una major quantitat de punts correlacionats permetrà corregir més efectes geomètrics (translació, rotació, magnificació, distorsió, etc...). Al mateix temps, utilitzar un gran nombre de punts correlacionats permet reduir la propagació dels errors en la detecció dels punts cap a la generació del model geomètric.

La selecció d'utilitzar un patró CB és que té unes cantonades ben definides que permeten ser detectades amb precisió. Una de les dificultats d'establir un model geomètric és que en la majoria de mostres no hi ha característiques o estructures que es puguin detectar amb precisió quan s'adquireix una imatge de la mostra. Un altre motiu és que cada intersecció dels quadres dels CB és una característica reconeixible, de manera que la quantitat de punts utilitzables en la generació del model és suficientment gran.

Les diferents etapes de la calibració consisteixen en:

1. Adquisició de la PSF per a cada pla (i càmera) cobrint tot el rang de mesura

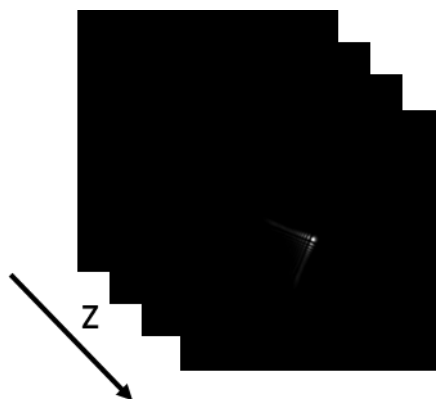


Figura 4.16. Sèrie de PSFs adquirides a través de focus per a una càmera.

- Adquisició del CB per a cada pla (i càmera) cobrint tot el rang de mesura

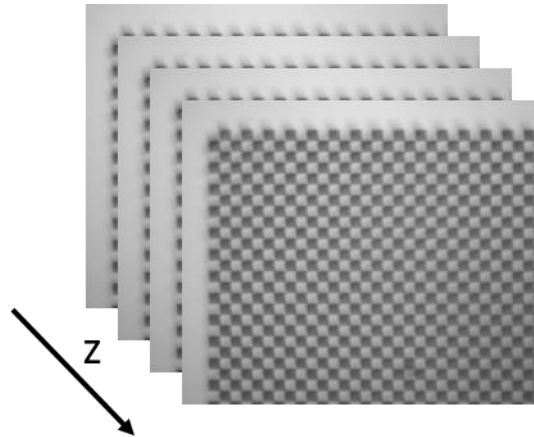


Figura 4.17. Imatges de CB adquirides a través de focus per a una càmera.

- Deconvolució del CB per la PSF corresponent al pla del patró

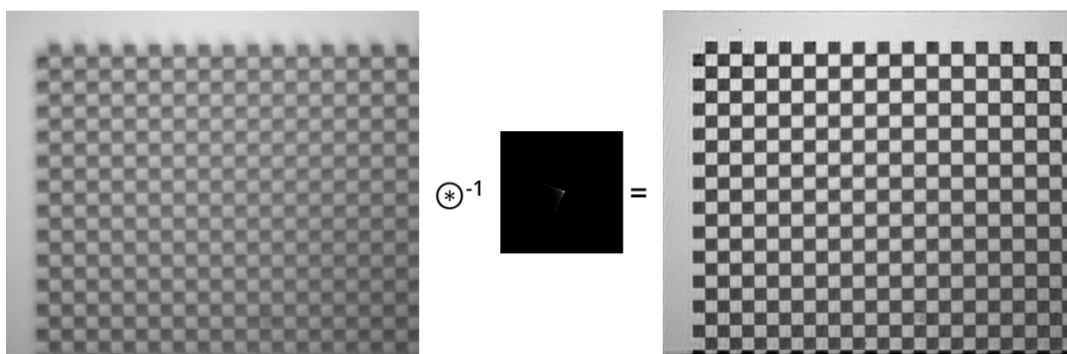


Figura 4.18. Deconvolució de la imatge del CB per la PSF corresponent al mateix pla de desenfocament.

- Detecció de les cantonades per a cada pla i càmera

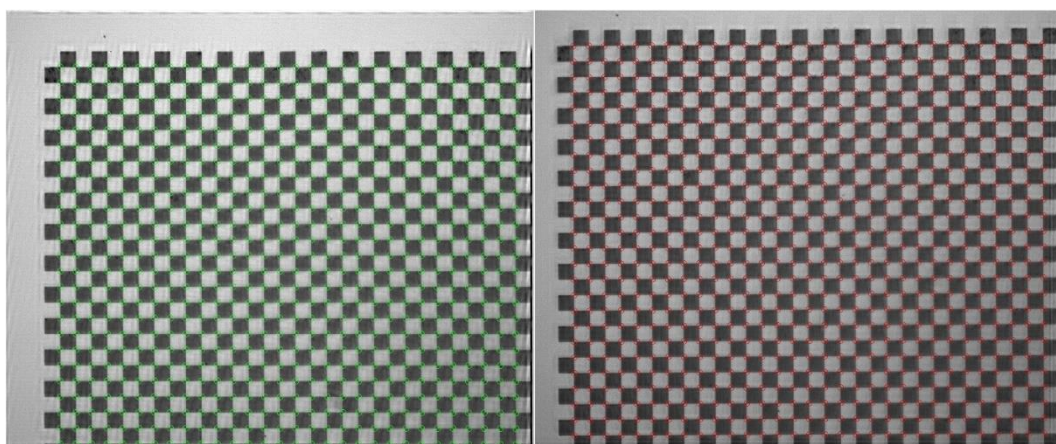


Figura 4.19. Detecció de les cantonades per la càmera A (esquerra) i per la càmera B (dreta). Els punts verds i vermelles representen les cantonades detectades de les càmeres A i B, respectivament.

5. Establir un model de projecció geomètrica d'una càmera a l'altra per a cada pla. El model geomètric més senzill és aplicar una transformació afí que corregeixi la translació, rotació i magnificació relatives entre les dues càmeres.

El fet de fer servir òptiques comporta unes aberracions associades. Per tal de minimitzar-les, després d'aplicar el càlcul de la matriu de transformació afí, establim un model que corregeixi la distorsió de cada imatge. A partir de les dimensions del CB reals, comparat amb les dimensions del CB detectades per cada càmera, es pot establir un polinomi radial del tipus:

$$x_{\text{distorsió}} = x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (4.2)$$

$$y_{\text{distorsió}} = y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \quad (4.3)$$

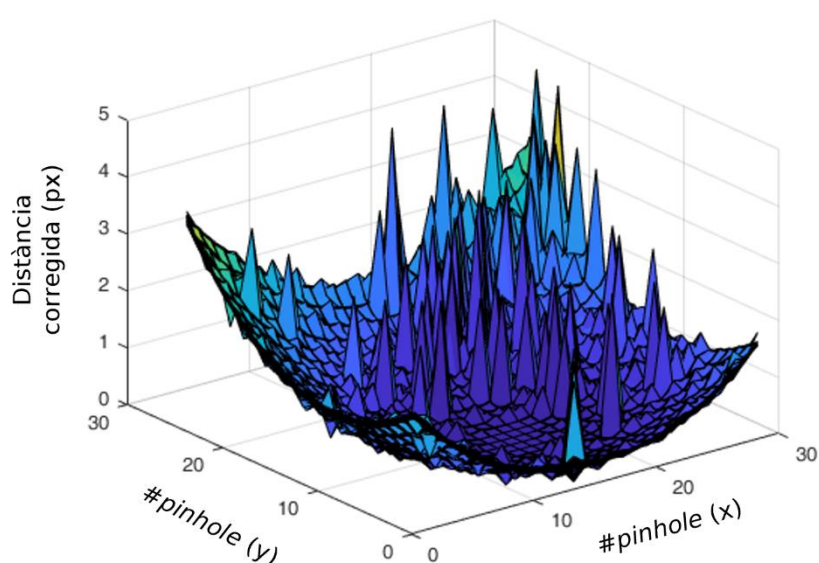


Figura 4.20. Diferència mitja entre el punt de la imatge i el punt corregit.

La Figura 4.20 representa la mitjana de 51 superfícies, on cada punt de la superfície representa (en l'eix z) la distància en píxels entre el punt i el mateix punt corregit. Els pics són deguts a artefactes en alguna de les deconvolucions, de manera que l'algoritme de detecció de les cantonades presenten error en la detecció de la seva localització.

Es pot observar que hi ha una forma predominant que és precisament la distorsió que corregeix la imatge de la càmera, però aquesta és força constant a través de Z. Per acabar-ho de comprovar representem en la Figura 4.21 alguns dels punts a través de Z, computant la distància del punt al centre òptic:

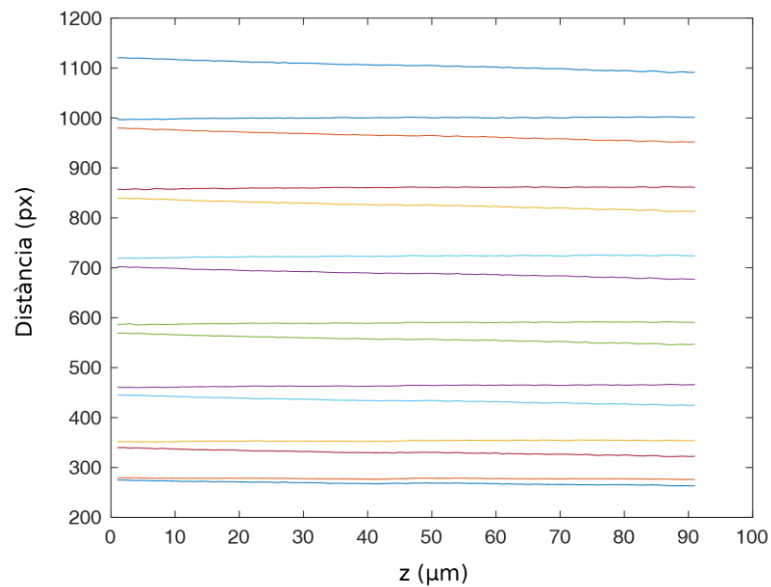


Figura 4.21. Detecció de la posició (x) d'una cantonada en funció del pla axial. Les diferents línies representen diferents punts.

O bé la diferència entre el punt i l'equivalent corregit, en la Figura 4.22:

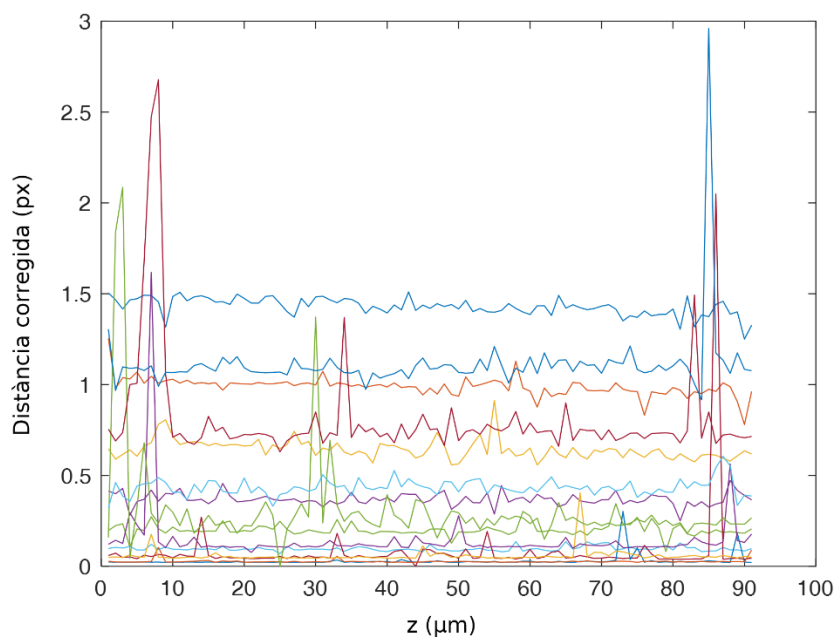


Figura 4.22. Diferència entre la posició (coordenada x) de la cantonada i la posició amb la distorsió corregida.

Les principals limitacions que presenta aquest mètode de calibració geomètrica són:

- Cal una doble escombrada de les dades: un per a l'adquisició de les PSFs i un altre per a l'adquisició de CB a través de tot el rang de mesura de l'eix òptic. Això implica que s'inclouen els errors de repetibilitat del motor entre els dos moviments.

- Per a determinar el model de distorsió els punts s'obtenen amb la deconvolució del CB per la PSF del pla corresponent. Per tant, cal establir una equivalència perfecta entre els plans de les dues mostres. Precisament com que el DOF del sistema és estès degut a la placa de fase, aquesta equivalència no és trivial de determinar.
- El procés de deconvolució no és lliure d'errors, que es propaguen en la detecció dels punts per a cada càmera.
- L'algoritme de detecció de les cantonades té una limitació en precisió, especialment si hi ha artefactes degut a la deconvolució. En aquesta tècnica es necessita resolució sub-píxel.

Degut a tots aquests efectes, aquest enfoc de calibració geomètrica presenta inestabilitats. En la Figura 4.22 es pot apreciar com la detecció del punt no és constant i el soroll (sense tenir en compte els *spikes* és prou elevat. Per a aquest motiu, hem desestimat aquesta estratègia per a establir el model geomètric entre les dues càmeres.

4.3.4. Matriu de *pinholes*

Per tal d'evitar els artefactes deguts a la distorsió en el procés de calibració, el segon mètode per a la calibració geomètrica consisteix en utilitzar una matriu de *pinholes* equiespaiats. En aquest cas, les dues imatges registrades es divideixen en finestres (en el nostre cas 11x9 finestres). Dins d'una mateixa finestra la distorsió geomètrica del sistema òptic es pot considerar negligible. Això simplifica el registre de les imatges dins de la regió, però implica que la reconstrucció s'ha de realitzar per a cada finestra i finalment unir totes elles mitjançant un procés de *stitching*.

Per a implementar aquest mètode, cal calibrar amb un sistema que permeti caracteritzar la PSF dins de cada finestra i de cada pla, de manera que s'ha utilitzat una matriu de *pinholes*, tal i com es mostra a la Figura 4.23. Així doncs, amb una sola imatge es poden caracteritzar la PSF per a totes les finestres

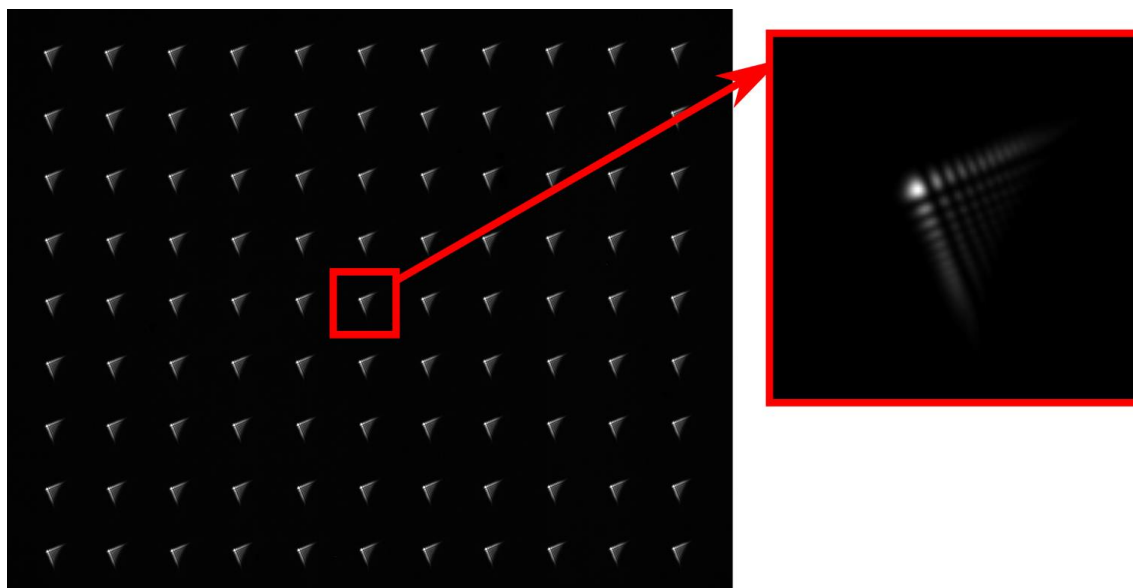


Figura 4.23. Imatge de la matriu de *pinholes* per a un pla, i el zoom de la PSF del centre de la imatge. La imatge està corregida amb un factor gamma per a efectes de visualització.

Aquest espècimen de calibració també s'ha fabricat amb un sistema FIB sobre una placa de vidre amb una capa de crom. Cada *pinhole* té un diàmetre inferior a $1\ \mu\text{m}$, ja que ha estat fabricat amb els mateixos paràmetres que amb el *pinhole* de la calibració anterior. La distància entre els forats de la matriu és de $69\ \mu\text{m}$, com es pot apreciar en la caracterització de l'espècimen de la Figura 4.24 i la Figura 4.25, obtingudes amb un SEM.

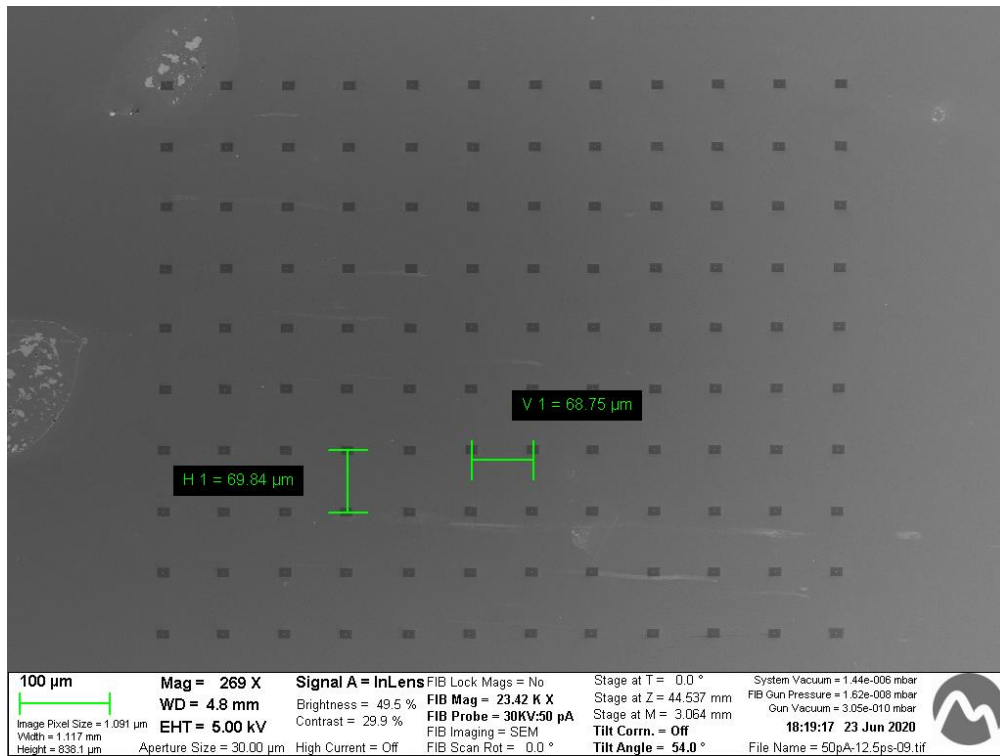


Figura 4.24. Imatge de la matriu de *pinholes* obtinguda amb un SEM.

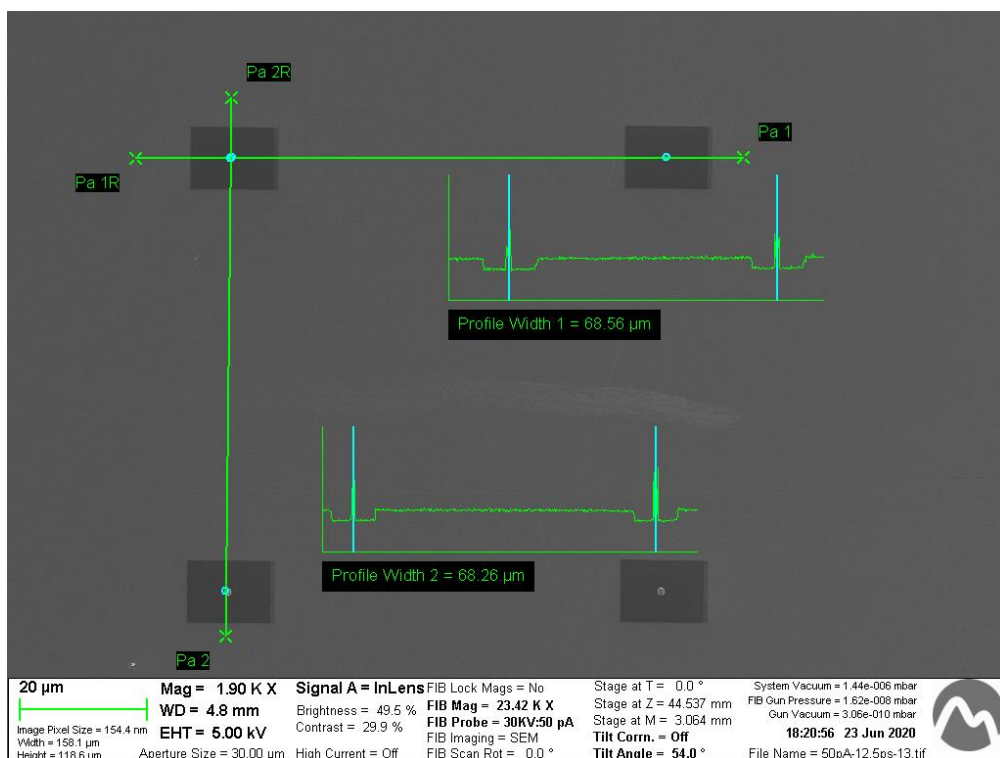


Figura 4.25. Zoom de la matriu de *pinholes*.

La distància entre *pinholes*, i per tant, la mida de cada finestra no és arbitrària: l’hem determinat a partir de la mida de la PSF en tot el rang de mesura. En el cas de més desenfocament, la PSF ocupa uns 100 píxels de costat. Així doncs, hem definit les nostres finestres que tinguin 200 píxels de costat per evitar *crosstalk* entre les PSF de diferents *pinholes*, i per tant, *crosstalk* entre finestres. Com que el píxel de la càmera (quadrat) té un mida de 3.45 μm, i la magnificació efectiva del sistema és 10X, la separació de finestra de 200 píxels resulta en les 69 μm de separació entre *pinholes*.

El nombre de finestres màxim depèn de les dimensions de la càmera, que té una resolució de 2448x2048 píxels. Donat que les finestres fan 200x200 píxels, el nombre màxim de regions que tolera la càmera és de 12x10 finestres. No obstant, el fet que hi hagi una rotació, translació i/o magnificació efectiva entre les dues càmeres fa que possiblement algunes de les finestres quedin truncades en alguna de les dues càmeres. Per aquest motiu, malgrat la matriu té 12x10 *pinholes*, només en farem servir 11x9, i per tant la resolució topogràfica final serà de 2200x1800 píxels, que equival a una regió 759x621 μm² en el pla de la mostra.

En el procés de reconstrucció topogràfica, la PSF no necessita estar centrada exactament al centre de cada finestra: la deconvolució trasllada la imatge, però el desplaçament generat és comú entre les imatges de les dues càmeres i el desplaçament relatiu es manté constant. No obstant, el desplaçament és fixe en les coordenades locals de la càmera. Llavors per a funcionar no pot haver-hi ni rotació ni magnificació efectiva entre les dues càmeres. Com hem mencionat anteriorment, malgrat sigui possible experimentalment ajustar el sistema per a tenir telecentricitat en l’espai imatge (modificant l’objectiu) i eliminar la rotació relativa entre les dues càmeres, la solució més pràctica és compensar computacionalment aquests efectes. Per tant, la calibració incorpora també una caracterització de la rotació i magnificació efectiva entre les dues

imatges. Això simplifica el muntatge i alineat experimental i permet un registre que depèn únicament dels desplaçaments laterals induïts per la placa de fase.

Per a calcular la magnificació i rotació fem servir el mateix espècimen de la matriu de *pinholes*. Es deconvoluciona la imatge de la matriu de pinholes per una PSF (la central). El resultat és una matriu de punts limitats per difracció. Per a obtenir resolució de sub-píxel, es calcula el centre de masses de cada punt. Es repeteix el procés per a cada càmera i s'obté un conjunt de punts que correlacionen les coordenades de les dues càmeres, ja que corresponen als mateixos punts de la mostra, malgrat que les imatges tinguin coordenades diferents.

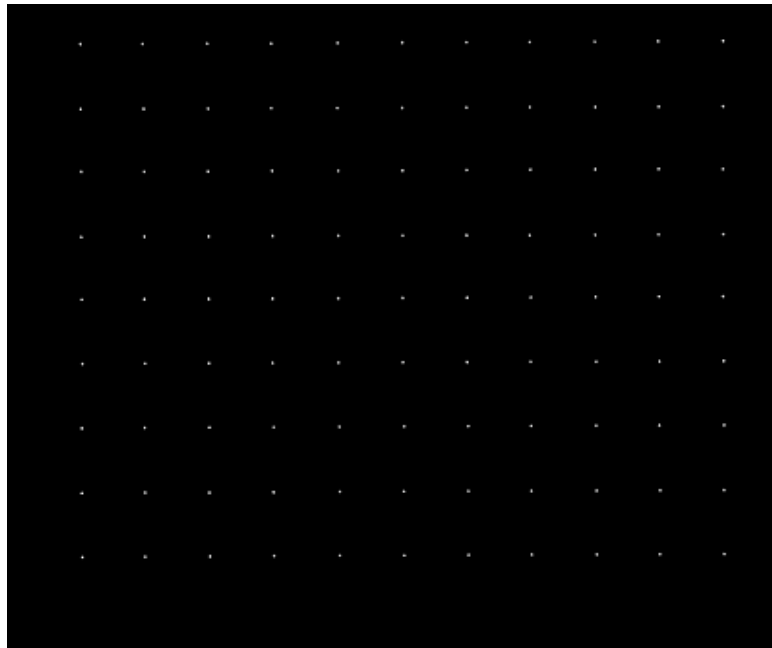


Figura 4.26. Matriu de *pinholes* amb placa de fase deconvolucionats per la PSF.

L'origen del canvi de coordenades d'una càmera a l'altra és per motius mecànics o òptics (translació, rotació i magnificació entre les dues càmeres), de manera que una transformació afí ja és suficient, donat que treballem per finestres i assumim que la distorsió, que té termes no lineals, és negligible dins de la finestra.

Finalment es calcula una transformació afí mitjançant un mètode d'ajust de mínims quadrats, per tal de reduir els errors. La matriu afí corregirà la translació, rotació i magnificació que hi ha entre les dues càmeres.

Estudis previs de la tècnica CKM utilitzaven mètodes no rígids per a la calibració geomètrica. En registres no rígids es fa una projecció d'un punt de la càmera a l'altra i s'extrapolen les regions entre els punts. Així doncs, si els punts utilitzats tenen un error, aquest error es trasllada en el model de projecció.

El nostre model de calibració geomètrica per una matriu de *pinholes* no està lliure d'errors, ja que tant en la deconvolució de la matriu de punts per la PSF, com en l'obtenció del centroide de cada *pinhole* mitjançant el centre masses hi ha un error intrínsec. De totes maneres, utilitzar 11x9 punts per al càlcul de la projecció afí (per mínims quadrats), que té 6 graus de llibertat, minimitza aquests errors.

El pas final de la calibració geomètrica correspon a caracteritzar, per a cada finestra, la posició del *pinhole* com una funció de la posició axial en l'objecte. Aquesta informació és necessària per a poder fer el *stitching* final dels resultats després de la reconstrucció topogràfica. Per a trobar aquesta posició fem servir els centres de masses de cada *pinhole* i s'ajusta a un model lineal.

La justificació d'aplicar aquest model és que al posar un iris a l'obertura de l'objectiu (al mateix pla que la placa de fase), es perd la condició de telecentricitat en l'espai objecte, per tant la magnificació del sistema té una dependència en la posició axial del *pinhole* o la mostra. Aquest canvi de magnificació a mesura que canvia la posició axial de l'objecte causa un canvi lineal en el desplaçament lateral, però en la direcció radial respecte l'eix òptic. A la pràctica, aquesta distorsió radial afegeix un desplaçament addicional als desplaçaments ocasionats per la placa de fase.

En la Figura 4.4 no hi ha el desplaçament radial ja que el desplaçament mesurat està fet pel *pinhole* del centre del FOV. La placa de fase genera un desplaçament isotròpic, és a dir, que el desplaçament té sempre la mateixa direcció independentment de la posició dins del FOV. D'altra banda, el desplaçament produït per la magnificació succeeix en la direcció cap al centre òptic (proper al centre de la imatge). En qualsevol cas, ambdues contribucions estan compensades per a cada finestra en la reconstrucció ja que estan incloses en la calibració.

Tot i així, es necessita la caracterització dels desplaçaments produïts per la magnificació variable per a poder reconstruir correctament la topografia final en la fusió de les diferents finestres amb el procés de *stitching*. Per tant, es fa una regressió lineal dels desplaçaments laterals del *pinhole* a través de focus per a cada finestra.

En la Figura 4.27 es pot apreciar com el canvi de magnificació afecta a través de focus per a cada *pinhole* dins de la matriu. De cada recta es fa la regressió lineal, els paràmetres de la qual es guardaran a disc per al posterior procés de *stitching*.

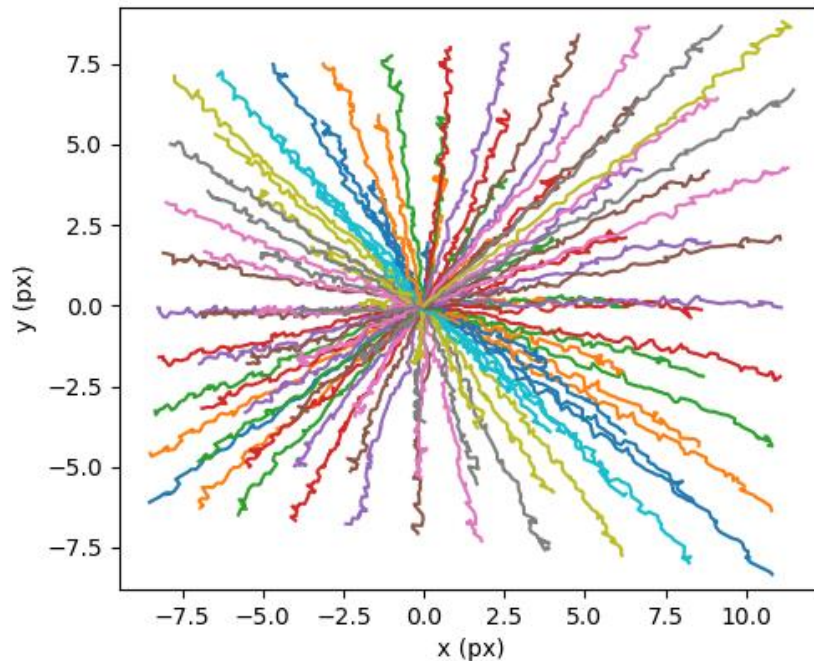


Figura 4.27. Posició de cada *pinhole* a través de focus. Per a representar la posició de cada *pinhole* s'ha restat la posició absoluta del *pinhole* en qüestió en el pla $z = 0$. Cada *pinhole* és representat per una recta diferent, on cada punt de la recta representa la posició relativa del *pinhole* en cada pla respecte al pla $z = 0$.

Com es pot apreciar, la detecció del centroide per a cada *pinhole* a través de focus és una mica sorollosa. El fet de calcular la magnificació amb una regressió lineal minimitza aquests errors.

Finalment, es determina l'alçada promig dels marges exteriors de cada finestra per compensar els desplaçaments degut a la no-telecentricitat i que les finestres encaixin en la reconstrucció final. En la Figura 4.28, es pot veure la fusió de dues finestres amb i sense correcció.

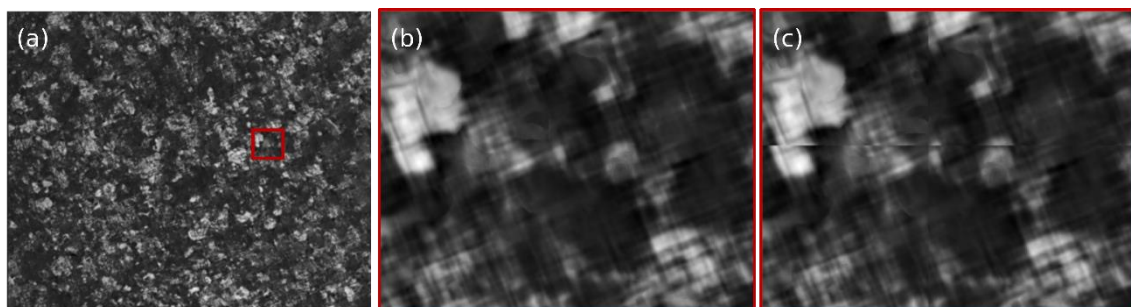


Figura 4.28. Imatge de focus infinit de la mostra (a). Zoom de la regió marcada amb (b) i sense (c) correcció del desplaçament lateral degut a la no-telecentricitat del sistema.

4.4. Reconstrucció topogràfica

Com hem dit anteriorment, la reconstrucció topogràfica es basa en:

1. Per a cada càmera i finestra, deconvolucionar la imatge de mostra (1 única per a cada càmera) per la sèrie de PSFs corresponent a diferents plans axials.
2. Per a cada pla i finestra:
 - a. Projectar la imatge deconvolucionada d'una càmera a l'altra amb la projecció afí determinada en la calibració del sistema
 - b. Càlcul de la imatge diferència: imatge deconvolucionada d'una càmera menys la imatge projectada de l'altra càmera en valor absolut.
 - c. Càlcul de la mètrica. Per a cada píxel es sumen les intensitats de la imatge diferència dins d'una regió. Aquesta regió de veïnatge té una mida molt més petita que la d'una finestra.
3. Per a cada píxel, trobar el mínim de la mètrica. El valor de l'alçada correspon al pla del mínim de la mètrica.
4. Fer el procés de *stitching* de les finestres

Com també hem comentat, el procés de reconstrucció té certes limitacions, entre les quals es troben la dependència del càlcul de la mètrica amb els valors en alçada del veïns. Si els veïns tenen alçades molt dispers respecte a un píxel en concret, el desplaçament laterals que generaran serà significatiu i el registre entre les dues imatges serà alt, donant un valor de mètrica alt.

Suposant que els veïns més propers tenen alçades similars a la pròpia alçada d'un píxel que el veïns que estan més allunyats, el càlcul de la mètrica inclou una ponderació en la suma de diferències en el registre de les imatges en funció de la distància al píxel. Això és equivalent a aplicar un difuminat a la imatge diferència. D'aquesta manera s'afegiria un nou pas entre el pas $2b$ i el pas $2c$, que inclou la convolució de la imatge diferència per una gaussiana d'amplada σ . Això substitueix el procés de definir una regió de veïnatge ja que la contribució de veïns llunyans serà mínima després de la convolució per la gaussiana.

En la Figura 4.29 es pot apreciar la topografia (a) resultant de mesurar una mostra rugosa amb CKM. Es busca el mínim de la mètrica representada en (b). Com que el punt A està a un punt més elevat que el punt B, el mínim de la resposta axial estarà situat en un pla superior de la mètrica que el mínim del punt B. També, a nivell comparatiu, es mostra la mateixa mostra mesurada amb el perfilòmetre confocal comercial S neox (Sensofar, Terrassa, Espanya) com a mesura de referència.

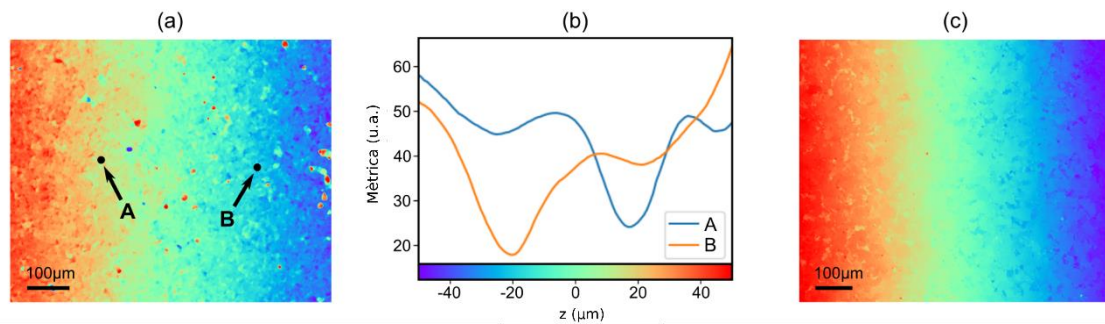


Figura 4.29. Mostra rugosa inclinada (a), on l'alçada de cada píxel és el mínim de la resposta axial (b). La mateixa mostra mesurada amb confocal (c).

4.4.1. Algoritme “coarse to fine”

Una altra limitació és que el mètode CKM és molt sensible a la falta de textura de la mostra, de manera que és propici a generar artefactes en zones amb poca textura en la imatge. Per tal de minimitzar aquest problema es pot fer la reconstrucció amb diferents valors de σ , produint lleugeres variacions en les respostes axials. Zones que tinguin suficient textura en la imatge tindran un resultat força robust, però zones que en tinguin poca, el resultat serà més inestable i serà més propici a generar artefactes. Una σ gran implica incorporar informació de molts veïns. Conseqüentment el resultat és més robust però es redueix la resolució lateral, i viceversa. En el cas ideal σ hauria de ser el més petit possible, però suficientment gran com per a captar la textura en la imatge, que depenen de la mostra i poden ser diferents en diverses regions de la mateixa mostra.

Una manera d'abordar aquest problema és promitjant les topografies obtingudes amb diferents valors de σ [54]. Hem desenvolupat una altra manera d'enfocar-ho, que hem anomenat algoritme “coarse to fine” (de groller a fi) [59] per intentar adaptar la reconstrucció a la mida de la textura local en la imatge.

L'algoritme comença amb el valor de σ més gran per a reconstruir una topografia inicial. Posteriorment el valor de σ es redueix successivament per refinar el resultat. La clau de l'algoritme és que per a una σ gran la reconstrucció serà robusta, però amb una resolució lateral baixa, i com més es redueix σ millor és la resolució lateral. No obstant, si reduir el valor de σ implica en un canvi d'alçada massa gran respecte a la iteració anterior, llavors finalitzem el procés. Un canvi massa gran implica que és altament probable que el valor de σ sigui massa petit i el resultat amb la nova σ sigui un artefacte.

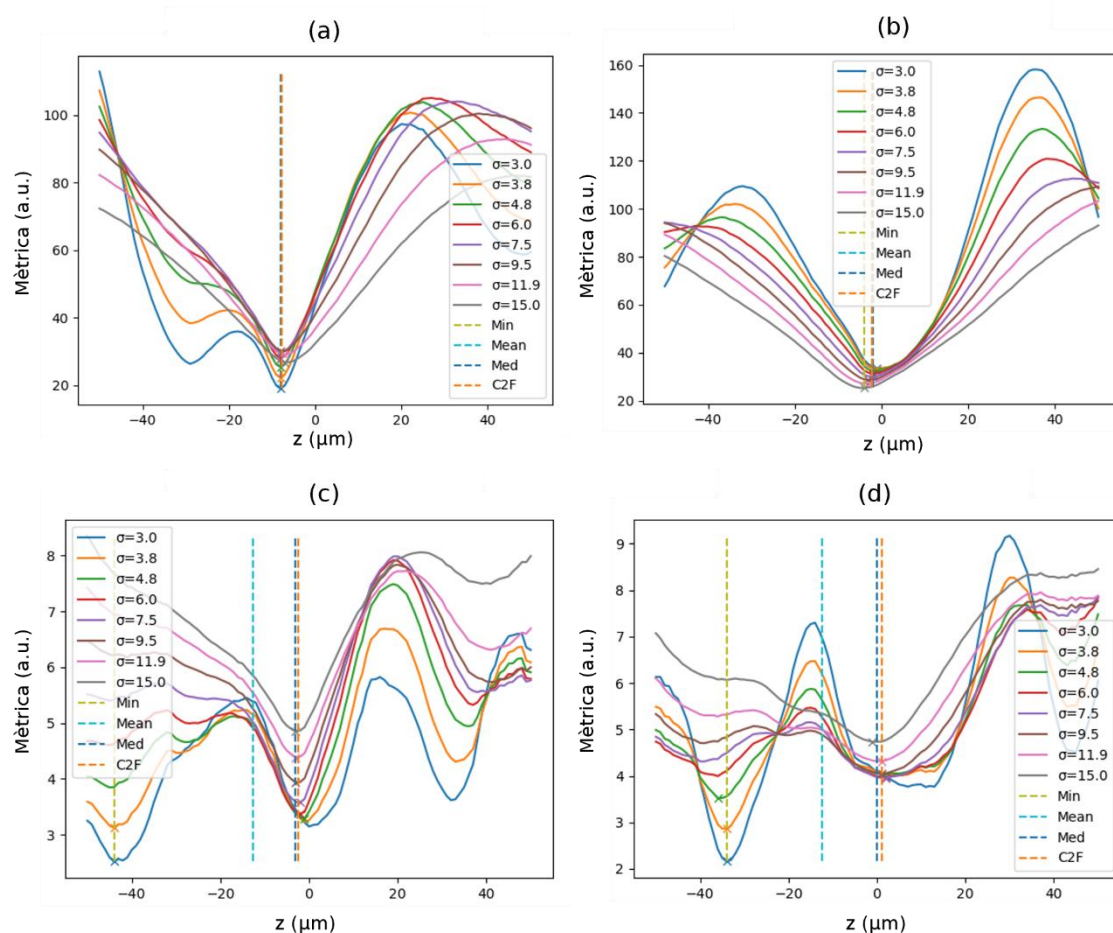


Figura 4.30. Respostes axials per a diversos píxels per a diferents valors de σ . Les línies verticals representen diferents criteris a l'hora d'estimar l'alçada del píxels segons els mínims corresponents a la resposta axial de cada σ : el mínim dels mínims, la mitjana dels mínims, a la mediana dels mínims o l'algoritme coarse-to-fine.

Mentre Figura 4.30 (a) i (b) mostren píxels amb un senyal inequívoc a l'hora de calcular l'alçada, (c) i (d) mostren píxels que tenen un senyal molt divergent segons la σ utilitzada. A mesura que el valor de σ disminueix, apareixen múltiples mínims en la resposta axial, localitzant-se el mínim global en un valor de z molt llunyà a l'obtingut amb valors de σ alt, i per tant, generant artefactes. L'algoritme *coarse-to-fine* considera la informació de σ altes per a estimar l'alçada grollera per a tots els píxels, però és capaç de discriminar quan aquestes respostes són divergents i quan no, per tal de refinar el valor de l'alçada amb la informació de σ baixes, que proporcionaran més precisió.

En la Figura 4.31 es representa la mateixa mostra rugosa que en la Figura 4.29 amb (a) $\sigma = 3$, (b) $\sigma = 15$ i (c) amb l'algoritme *coarse-to-fine*. La topografia amb la σ baixa mostra una gran quantitat d'artefactes, mentre que la σ gran redueix en gran mesura els artefactes, a expenses de reduir la resolució lateral. L'algoritme *coarse-to-fine* manté el baix nombre d'artefactes que la σ gran alhora que mostra més textura topogràfica gràcies a una millor resolució lateral.

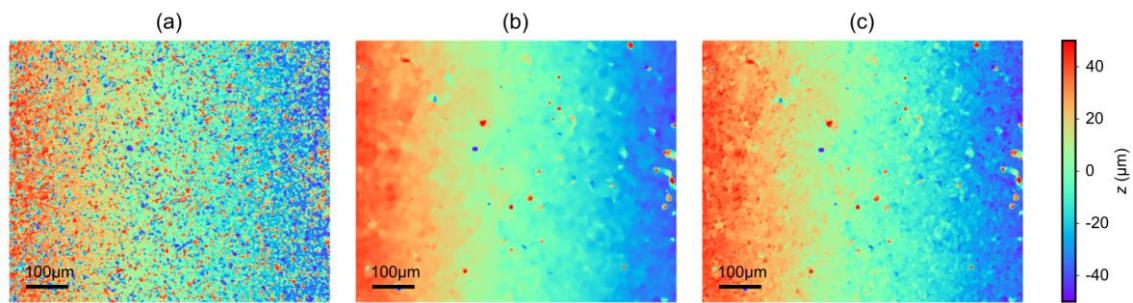


Figura 4.31. Reconstrucció topogràfica d'una mostra rugosa utilitzant (a) $\sigma = 3$, (b) $\sigma = 15$, (c) l'algoritme coase-to-fine.

Per últim, cal explicar que hi ha un efecte que s'ha de calibrar, que és independent de la tècnica CKM, i és la presència d'una reflexió interna a l'hora d'adquirir el parell d'imatges de la mostra en mode d'il·luminació per reflexió. Aquesta reflexió és deguda a la placa de fase, ja que a nivell macroscòpic és una placa plano-paral·lela perpendicular a l'eix òptic, de manera que es produeix una reflexió en aquestes superfícies, que en la calibració geomètrica no observàvem degut a que la il·luminació era per transmissió.

Aquesta reflexió és calibrable: simplement cal sostreure una imatge on només es detecti aquesta reflexió interna. Per a obtenir-la, es posa un mirall molt inclinat com a mostra per tal que cap dels raigs de la font de llum que travessa l'objectiu del microscopi sigui capaç de retornar al sistema. El mirall, al ser una mostra polida evita que es produeixi *scattering* i que raigs residuals retornin cap a l'objectiu. En la Figura 4.32 es mostra, una imatge sense calibrar, la calibració i la imatge calibrada.

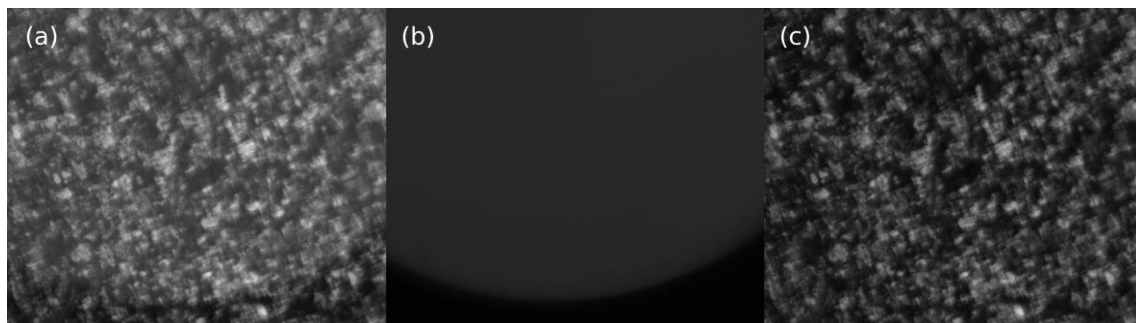


Figura 4.32. Imatge capturada de la mostra per una de les dues càmeres (a), imatge de la reflexió interna de la placa de fase (b), i sostracció de les dues (c).

4.5. Resultats

Com ja hem reiterat anteriorment, per a poder mesurar satisfactòriament amb la tècnica de CKM cal que la mostra tingui textura. Per a demostrar els resultats de la tècnica sobre una mostra real s'ha mesurat una moneda de 10 cèntims d'euro. La moneda té una rugositat suficient com per a mostrar textura en la imatge i poder fer el registre entre les imatges de les dues càmeres. S'han mesurat tres regions diferents: Escòcia, Itàlia i una de les estrelles, tal i com es mostra en la Figura 4.33, conjuntament amb els resultats topogràfics. La figura també mostra les mateixes regions mesurades amb un perfilòmetre confocal per a poder comparar els resultats obtinguts mitjançant CKM amb mesures de referència.

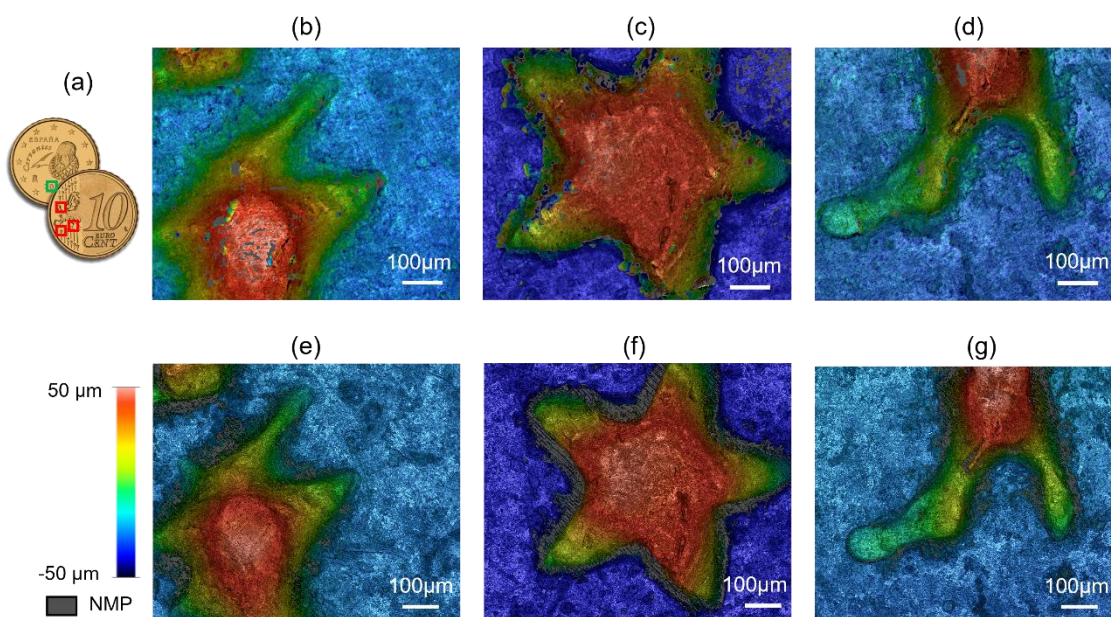


Figura 4.33. (a) Esquema d'una moneda de 10 cèntims d'euro. En vermell estan marcades les regions mesurades: (b, e) Escòcia, (c, f) una estrella i (d, g) Itàlia mitjançant les tècniques de CKM i confocal, respectivament. NMP = punts no mesurats (non-measured points).

El rang d'alçades d'aquestes mesures és d'aproximadament 100 μm . Amb la tècnica de CKM l'adquisició és una única captura de dues imatges (una per cada càmera), mentre que per a les mesures confocals cal un mostreig de 100 plans. En aquest cas, el confocal és de tipus *microdisplay*, que requereix 3 imatges per a obtenir la imatge confocal de cada pla, resultant l'adquisició confocal en 300 imatges per a 100 μm de rang de mesura.

En general es pot apreciar com les mesures d'ambdues tècniques són qualitativament equivalents, amb la diferència que en CKM hi ha alguns artefactes en la topografia, mentre que en confocal no apareixen. Cal notar, tot i així, que confocal té estratègies per discriminar artefactes mitjançant la qualitat de la resposta axial, com per exemple un llindar mínim de la relació senyal-soroll (*signal-to-noise ratio*, SNR), que substitueix punts potencials de ser artefactes com a punts no mesurats (*non-measured points*, NMP). Per exemple, àrees amb grans pendents redueixen significativament la quantitat de llum que es reflecteix de tornada cap al sistema, de manera que el SNR és molt baix i conseqüentment es determina com a NMP, com és el cas del contorn de l'estrella de la Figura 4.33 (f).

Amb la tècnica de CKM, però, calen futurs estudis per a desenvolupar alguna estratègia per a poder discriminar la qualitat de la mètrica, i per tant, ser capaç de discriminar els potencials artefactes, com per exemple els píxels corresponents a la Figura 4.30 (c) i (d). L'algoritme *coarse-to-fine* ja redueix la quantitat d'artefactes, però continua havent-hi punts que l'algoritme no és capaç de mesurar correctament. Una possible estratègia pot ser establir llimdars de mètrica en funció de la textura de la imatge, però l'aplicació no és tant directa com en confocal i caldria un estudi molt més detallat per a analitzar curosament la correlació entre la textura de la imatge i la mètrica.

Per a fer una anàlisi més quantitativa de la tècnica també s'ha recorregut a la mateixa moneda de 10 cèntims d'euro. L'objectiu era mesurar un graó, però tradicionalment els espècimens amb graons molt ben definits són superfícies polides, així que no presenten textura en imatge, impossibilitant la mesura amb aquesta tècnica. La moneda, en canvi, té una textura en tota la mostra i una de les seves estructures, els zeros del revers de la moneda, tenen estructura de graó alhora que mantenen la rugositat necessària per a poder ser mesurat amb CKM. Addicionalment, s'ha repetit la mesura de la mateixa mostra situada a diferents posicions de z. Els resultats es mostren en la Figura 4.34, on també s'ha afegit la mesura del confocal com a referència.

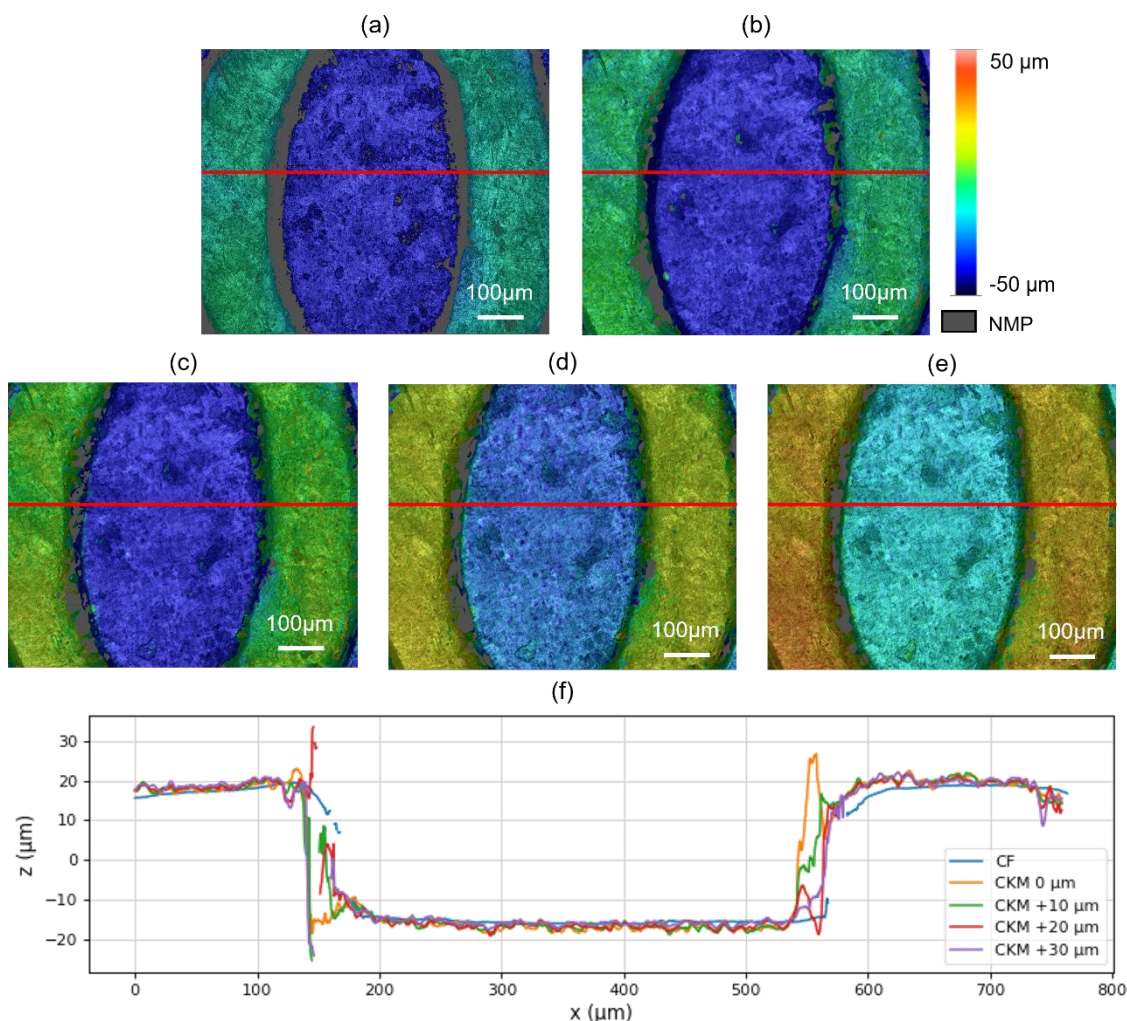


Figura 4.34. Mesura d'un 0 del revers de la moneda amb confocal (a) i CKM (b). La mesura de (b) s'ha repetit desplaçant la mostra en z 10 μm (c), 20 μm (d) i 30 μm (e). La línia vermella de les topografies marca el perfil central del promig de 49 perfils de cada topografia, representats en (f).

L'alçada del graó és de 34.401 μm mesurat amb confocal, i de 36.320 μm mesurat amb CKM. La repetició de la mesura amb CKM a +10 μm , +20 μm i +30 μm dóna uns valors del graó de 36.425 μm , 35.804 μm i 35.780 μm , respectivament.

Per tal de poder fer una adequada valoració dels resultats quantitatius, cal determinar primerament la resolució lateral i vertical del sistema. Per a estimar la resolució lateral hem calculat la longitud d'autocorrelació (paràmetre S_{al} definit a la ISO 25178-2) de la regió plana del centre del "0" (després d'eliminar les baixes freqüències). Per a confocal s'ha obtingut una longitud d'autocorrelació de $S_{al} = 1.5 \mu\text{m}$ mentre que per a CKM el valor augmenta fins a $S_{al} = 7.5 \mu\text{m}$. Com que el valor amb CKM és superior al de confocal i és la mateixa superfície, el valor d'autocorrelació és un indicador de la resolució lateral.

En la mateixa regió plana de la moneda hem calculat el paràmetre de rugositat S_q que proporciona una estimació del soroll de l'instrument. Amb confocal s'obté un valor de $S_q = 0.15 \mu\text{m}$ i donat que és de dos ordres de magnitud superior al soroll de l'instrument (6 nm), el valor de rugositat és atribuïble a la rugositat pròpia de la mostra. Amb el nostre sistema s'obté un valor de $S_q = 1.5 \mu\text{m}$ per a la mateixa regió, de manera que aquest valor també és una

estimació del soroll instrumental. Assumint que la capacitat de resoldre petits canvis en alçades és tres vegades aquest valor, obtenim l'estimació que la resolució vertical del nostre sistema és de $4.5 \mu\text{m}$.

Tenint en compte aquests valors de resolució vertical, els resultats obtinguts en la mesura del graó són consistents amb la mesura de referència del confocal, ja que la desviació màxima obtinguda és de $1.919 \mu\text{m}$, inferior a la nostra resolució vertical. D'aquesta manera podem determinar que la tècnica és capaç de mesurar acuradament aquest tipus d'estructures. També s'ha demostrat que el fet de col·locar la mostra en diferents posicions axials no afecta a la mesura sempre i quan la mostra estigui dins del DOF del sistema (en el nostre cas $100 \mu\text{m}$).

Amb aquests resultats hem pogut demostrar la viabilitat de la tècnica de CKM en metrologia de superfícies. Fins ara només s'havia aplicat al seguiment de les trajectòries tridimensionals de partícules, però no a la mesura tridimensional superfícies on es necessita una resolució lateral molt més elevada, amb les limitacions que comporta.

La correspondència de les mesures de CKM amb mesures de confocal (utilitzades com a referència) és suficientment bona si es considera la resolució vertical del sistema, que és de $4.5 \mu\text{m}$. Juntament amb la resolució lateral també és del mateix ordre de magnitud ($7.5 \mu\text{m}$).

4.6. Optimització computacional

Tot i que la tècnica només requereix adquirir una única imatge per a cada càmera, una de les seves principals limitacions és la gran potència computacional requerida per a poder obtenir una topografia. La primera implementació es va realitzar amb *python*, un llenguatge interpretat fàcil per a implementar primeres proves de concepte, però que no estan optimitzats per a ser ràpids. El càlcul d'una topografia sencera requereix 40 minuts amb un ordinador i7 (2.20 GHz) amb 15.7 GB de memòria RAM i 12 nuclis. Això és un clar impediment a l'hora d'avaluar la usabilitat i utilitat de la tècnica. Tot l'esforç per a desenvolupar una tècnica *single-shot* és reduït pel temps de còmput de CKM.

Hi ha diverses estratègies per a reduir el temps de còmput, una d'elles és passar a un llenguatge compilat com C++. Un dels beneficis d'aquests llenguatges és que el programa desenvolupat és compilat directament en la màquina enlloc d'anar executant línia rere línia a mesura que es llença el programa, reduint per tant el temps d'execució dels càlculs.

Un dels motius del cost computacional de la tècnica és l'enorme quantitat de transformades de Fourier (FT, per les sigles en anglès) que es requereixen per a obtenir la mètrica. S'utilitza la llibreria de *The Fastest Fourier Transform in the West (FFTW)*, on les FT estan optimitzades pel hardware que s'utilitza. Les principals funcions que es desenvolupen i que requereixen una FT són únicament dues, però amb una gran quantitat de repeticions:

1. Deconvolució. Per a cada càmera, finestra i pla cal aplicar una deconvolució (en el nostre cas un filtre de *Wiener*) entre la imatge i la PSF corresponent, que implica una FT de la imatge i una FT de la PSF cap a l'espai de Fourier, i després una transformada de Fourier inversa (IFT per les sigles en anglès) de tornada a l'espai real. Com que el càlcul de FT i IFT és força equivalent en termes computacionals, podem aproximar que el procés de deconvolució realitzar 3 FT. El nombre total de FT realitzades és:

$$2 \text{ cam} \cdot 99 \frac{\text{finestres}}{\text{càmera}} \cdot 101 \frac{\text{plans}}{\text{finestra}} \cdot 3 \frac{\text{FT}}{\text{pla}} = 59994 \text{ FT} \quad (4.4)$$

2. Convolució Gaussiana. Per a cada píxel dins de la finestra, s'agafa una regió per a computar la mètrica. En termes computacionals, és molt més eficient convolucionar la imatge diferència (ja deconvolucionada i registrada entre les dues càmeres) per una gaussiana. Així es tenen en compte la distància amb els veïns, ja que eliminem la repetició del procés per a cada píxel, i.e., només s'ha de calcular un cop per imatge i pla, però s'ha de repetir per a cada valor de σ , en el nostre cas 10 valors diferents. En aquest cas també cal la FT de la imatge diferència, la FT del filtre gaussià, i la IFT per a tornar a l'espai real:

$$99 \text{ finestres} \cdot 101 \frac{\text{plans}}{\text{finestra}} \cdot 10 \frac{\sigma}{\text{pla}} \cdot 3 \frac{\text{FT}}{\sigma} = 299970 \text{ FT} \quad (4.5)$$

Com podem apreciar amb aquests valors, la gran quantitat de FT que s'han de realitzar penalitza enormement el temps necessari per a obtenir la reconstrucció topogràfica. No obstant, no totes les FT aquí descrites s'han de calcular sempre, ja que algunes es poden pre-calcular i guardar en memòria, ja que són constants i no depenen de la mostra a mesurar.

1. Deconvolució: la FT de PSF sempre serà la mateixa per a totes les mostres, ja que depèn del sistema òptic. Aquesta es pot pre-calcular abans de mesurar i guardar en memòria.

La FT de la imatge és constant per a tots els plans, de manera que només s'ha de fer una cop un cop per finestra i càmera. La IFT sí que s'ha de fer per a cada pla, finestra i càmera. Amb aquesta reducció passem a necessitar 20196 FT, un factor 3 gairebé de reducció.

2. Convulsió Gaussiana: la FT de la imatge diferència només es necessita fer per a cada pla i finestra, ja que és constant per a cada valor de σ . La FT del filtre gaussià serà constant per a cada valor de σ , però es poden guardar en memòria i precalcular abans d'adquirir les imatges de la mostra. Com en el cas anterior, la IFT sí que s'ha de calcular sempre. D'aquesta manera el nombre de FT necessàries és de 109989 FT, gairebé també un factor 3 de reducció.

Per a seguir optimitzant les FT, cal saber que aquestes estan optimitzades per a treballar amb mides de potències de 2. Així que si reduïm la mida de la finestra de 400 a 256 píxels, també obtindrem una millora en el temps de còmput. Malgrat la reducció del temps de càlcul sigui molt baixa per a cada FT, considerant la gran quantitat de repeticions que es realitzen, la millora de temps total és considerable. No obstant, hi ha una limitació que és la quantitat de memòria RAM utilitzada. La variable que més memòria ocupa són les FT de la PSF, requerint una memòria de 5038 MB si la finestra és de 256 píxels de costat i de 12266 MB si el costat de la finestra té 400 píxels. El pre-processat d'aquestes variables agilitza molt els càlculs però limita la quantitat de memòria disponible per a la resta de càlculs.

Aquesta limitació en la memòria disponible s'ha de tenir en compte per a l'últim aspecte que hem desenvolupat per a l'optimització del temps de còmput, que és la paral·lelització dels càlculs. Típicament els ordinadors tenen varis nuclis en què desenvolupar els càlculs. Tal i com esta plantejat el codi de prova de concepte, els càlculs es realitzen seqüencialment, és a dir, fins que no acaba una comanda no comença la següent. Però degut a que la nostra tècnica funciona per finestres és altament paral·lelitzable. No obstant, per cada finestra cal calcular la mètrica per a cada pla, i per a tal efecte, calcular les imatges deconvolucionades, la imatge diferència i la imatge convolucionada amb la gaussiana. Per tant, si està cada nucli executant el càlcul de la mètrica per a una finestra diferent, segons el tipus d'ordinador utilitzat es pot arribar a tenir problemes de memòria. Per a evitar-ho, hem preferit paral·lelitzar el càlcul de la mètrica per a cada pla dins d'una mateixa finestra, que també és independent de cada pla. Aquest enfoc és més conservador en termes de memòria utilitzada a la vegada que obtenim una millora equivalent en termes de temps de còmput.

Tenint en compte aquestes tres millores s'ha aconseguit reduir el temps de còmput de la reconstrucció topogràfica des dels 40 minuts en *python* fins als 190 segons amb C++, precàlcul de les FT i paral·lelització en els diferents nuclis.

La millora computacional és significativament gran, però continua estant lluny de ser una tecnologia que permeti un ritme de topografies en temps real. No obstant, es podria arribar a millorar encara més el temps de còmput si els càlculs es traslladen a la targeta gràfica (GPU, *Graphics Processing Unit*). La GPU permet una millora de temps respecte càlculs altament paral·lelitzables, com són totes les TF, ja que té molts més nuclis més petits. A més a més s'ha de tenir en compte el context de creixement continu en la quantitat (com també en millora de l'eficiència) dels nuclis disponibles en les targetes gràfiques. No obstant, aquesta millora implica canviar l'estructura del codi i ha quedat fora de l'abast de l'estudi d'aquesta tesi.

4.7. Futur treball

Una de les majors limitacions de la tècnica a l'hora de mesurar superfícies és que aquestes necessiten mostrar una textura en la imatge. Una de les opcions per a satisfer aquesta condició necessària és texturitzar la mostra artificialment, tal i com hem fet en l'apartat 3.3. D'aquesta manera la textura del CB patirà els efectes de la placa de fase i es podrà quantificar la diferència de desplaçament lateral entre les dues imatges, ja sigui per la textura pròpia de la mostra o bé per la textura artificial creada amb la projecció del CB.

No obstant, cal muntar un sistema 4F per tal de col·locar la placa de fase a la posició conjugada de la pupil·la d'entrada de l'objectiu. El motiu és que amb el nostre muntatge la placa de fase afecta la il·luminació. En el cas d'il·luminació uniforme els efectes són menyspreables, però si projectem un patró sobre la mostra, llavors aquest patró està distorsionat per la placa de fase. Per tant, quan es reflecteix a la mostra es torna a distorsionar abans d'arribar a la càmera i es produirà un desplaçament lateral diferent que el de la mostra, invalidant el càlcul de la mètrica de CKM. En el cas que la placa de fase estigui a la posició conjugada de la pupil·la de l'objectiu, llavors tant mostra com patró es distorsionen de la mateixa manera i els desplaçaments laterals són idèntics.

5. CONCLUSIONS

Aquest capítol resumeix les principals aportacions d'aquesta tesi, especifica les potencials línies de treball que han sorgit arran dels avanços fets i llista les contribucions científiques que han resultat de la investigació feta durant tot el període.

5.1. Conclusions

En el desenvolupament de la tesi s'han assolit els dos objectius principals: evolucionar un perfilòmetre òptic actual en termes de velocitat i dimensions, i per altra banda, desenvolupar un prototip de nou sistema basat en una nova tècnica per a la mesura tridimensional de superfícies.

Respecte al primer objectiu s'ha realitzat el disseny i fabricació d'un perfilòmetre òptic d'alta velocitat que supera les capacitats metrològiques d'equips actuals equivalents. Referent al disseny òptic, s'ha dissenyat un sistema dual que permet il·luminació estructurada i il·luminació de camp clar. També s'ha dissenyat una lent de camp de focal curta, alhora que s'han minimitzat satisfactòriament les aberracions òptiques que aquest tipus de lents sovint tenen associades. El fet d'utilitzar una focal curta permet reduir les dimensions i el pes del sistema, de manera que es poden aconseguir unes majors acceleracions i velocitats del sistema.

El component més crític de cara als errors en la mesura és el motor. Per tal de determinar un bon funcionament del sistema s'han avaluat tres tipus de motors diferents, amb els corresponents anàlisis de precisió, repetibilitat i no-linealitat de cada un d'ells. El model escollit finalment per a fabricar el prototip ha sigut el motor sense escobretes, degut a un millor comportament en molts aspectes.

La incorporació del sistema dual d'il·luminació dota al sistema de la capacitat de mesurar amb diverses tècniques de metrologia òptica. En aquesta tesi ens hem centrat en CSI i ICM. En CSI, al ser un moviment continu, hem aplicat un perfil de moviment sinusoidal per a cobrir un extens rang de mesura en poc temps, alhora que es minimitza el desgast del motor i el temps improductiu del perfilòmetre. Tanmateix, mesurar interferometria amb un moviment no-lineal té uns errors associats que s'han caracteritzat.

En ICM hem incorporat un patró de vidre per a substituir el *microdisplay*, component essencial del tipus de ICM utilitzat. Aquest patró de vidre permet projectar una textura artificial sobre la mostra que permet recuperar la imatge de seccionat òptic a través d'algoritmes com AiFV o SIM. Addicionalment, també hem analitzat dos mètodes diferents per a recuperar la informació

d'altres freqüències a la topografia final després d'aplicar diferents filtres passa-baixos a la imatge de seccionat òptic.

El prototip desenvolupat en aquest capítol de la tesi ha resultat evolucionant cap a un producte comercialment actiu, el *S mart 2* de Sensofar, l'empresa responsable de l'àmbit empresarial d'aquesta tesi industrial. Aquest producte és un sensor integrable on s'han reduït els costos i dimensions del capçal i s'ha augmentat la versatilitat de les tècniques de mesura gràcies a la incorporació dels algoritmes proposats, especialment HiLo.

Respecte al segon objectiu, hem demostrat la viabilitat d'aplicar la tècnica de CKM a la mesura tridimensional de superfícies. Hem desenvolupat una nova manera de calibrar el sistema treballant per finestres de manera que es minimitzin els problemes de distorsions òptiques. Addicionalment, hem desenvolupat un nou algoritme per detectar el punt d'enfocament de cada píxel en funció de la seva resposta axial que dota a la tècnica de més robustesa.

La tècnica de CKM permet adquisicions instantànies al només requerir una imatge per cada càmera. Té la limitació que el tipus de mostres han de tenir textura en la imatge per a poder mesurar-les i que el temps de còmput és superior al temps de mesura complet d'altres tecnologies. Els càlculs, però, es poden paral·lelitzar encara més utilitzant processadors multi-thread, com són les GPU. Com que els resultats obtinguts proporcionen prou precisió, CKM presenta un potencial molt elevat de proporcionar una solució molt útil per a algunes aplicacions molt concretes.

5.2. Propostes futures

Aprofitant el coneixement adquirit en el desenvolupament de la tesi, apareixen noves línies de treball que no estaven previstes i que poden ser d'interès científic:

- En la part de CSI, nous perfils de moviment. Els perfils estudiats són lineal i sinusoidal, però se'n podrien estudiar d'altres que minimitzessin els errors a l'hora que es redueix el temps improductiu degut al posicionament de la mostra.
- En CKM és necessària la definició d'un índex de qualitat en les respostes axials. Si la mostra no té prou textura o bé la calibració no està ben adquirida, l'algoritme ha de ser prou robust per a desestimar aquell píxel i declarar-lo com punt no mesurat. Metrològicament parlant és molt més desitjable tenir punts no mesurats que punts amb alçades errònies.
- La texturització artificial de la mostra en CKM. Com a requisit indispensable de la tècnica, el fet que les mostres hagin de mostrar textura en imatge limita molt el rang d'aplicacions. Amb la projecció d'un patró sobre la mostra s'aconsegueix una texturització artificial de la mostra que servirà per a poder fer el registre entre les imatges de les dues càmeres. Com s'ha comentat en l'apartat 4.7, però, la implementació física no és tant senzilla ja que la imatge del patró s'ha de codificar per la placa de fase, a la vegada que la placa de fase ha d'estar situada a la pupila d'entrada de l'objectiu.

A data de finalització del document de tesi, ja s'ha començat a treballar en el muntatge del sistema que permeti projectar una textura sobre la mostra que es codifiqui a través de focus, obtenint uns resultats preliminars positius en quant a viabilitat de la proposta. De totes maneres cal seguir investigant i desenvolupant aquesta via.

5.3. Publicacions

5.3.1. Publicacions en revistes científiques

- Article en la revista "Optics Express" de *Optica* (2022)

Martínez P, Bermudez C, Artigas R, Carles G. "Single-shot optical surface profiling using extended depth of field 3D microscopy." *Opt Express*. 2022 Sep 12;30(19):34328-34342.

5.3.2. Presentacions orals en congressos

- Conferència del *SPIE* "Photonics Europe" (2018)

Bermudez C, Felgner A, **Martínez P**, Matilla A, Cadevall C, Artigas R, "Residual flatness error correction in three-dimensional imaging confocal microscopes," *Proc. SPIE 10678*, Optical Micro- and Nanometrology VII, 106780M

- Conferència del *SPIE* "Optical Metrology" (2019)

Bermudez C, **Martínez P**, Cadevall C, Artigas R, "Active illumination focus variation," *Proc. SPIE 11056*, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI, 110560W

- Conferència del *SPIE* "Photonics Europe" (2020)

Martínez P, Bermudez C, Cadevall C, Matilla A, Artigas R, "Three-dimensional imaging confocal profiler without in-plane scanning," *Proc. SPIE 11352*, Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology, 113520L

- Conferència del *SPIE* "Optical Metrology" (2021)

P. Martínez, C. Bermudez, G. Carles, C. Cadevall, A. Matilla, J. Marine, R. Artigas, "Metrological characterization of different methods for recovering the optically sectioned image by means of structured light," *Proc. SPIE 11782*, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XII, 117820Q

- Conferència de *Optica* "Optical Sensors and Sensing Congress" (2021)

P. Martínez, C. Bermudez, R. Artigas, and G. Carles, "Extended Depth of Field Microscopy for Single Shot 3D Surface Profiling," in *OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021* (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES)

5.3.3. Pòsters

- Conferència "euspen's International Conference & Exhibition" (2020)

Martínez P, Bermudez C, Artigas R, "Small footprint high-speed optical 3D profiler", euspen's International Conference & Exhibition (2020)

- Conferència "euspen's International Conference & Exhibition" (2021)

Martínez P, Bermudez C, Artigas R, "High repetition rate 3D optical sensor", euspen's International Conference & Exhibition (2021)

- Conferència “euspen’s International Conference & Exhibition” (2022)

Martinez P, Bermudez C, Artigas R, “3D optical sensor in continuous motion”, euspen’s International Conference & Exhibition (2022)

5.3.4. Publicacions fora de l’àmbit de la tesi doctoral

- Conferència “euspen’s International Conference & Exhibition” (2019)

Bermudez C, **Martinez P**, Cadevall C, Artigas R, “High-speed, Roll to Roll Coherence Scanning Interferometry in a laser texturing process”, euspen’s International Conference & Exhibition (2019)

- Article en la revista “Measurement Science and Technology” de *IOP* (2020)

Heikkinen, V., Kassamakov, I., Viitala, T., Järvinen, M., Vainikka, T., Nolvi, A., Bermúdez, C., Artigas, R., **Martinez, P.**, Korpelainen, V., Lassila, A., & Hæggström, E. (2020). Step height standards based on self-assembly for 3D metrology of biological samples. In *Measurement Science and Technology* (Vol. 31, Issue 9, p. 094008).

6. REFERÈNCIES

- [1] J. Schmit, K. Creath, and J. C. Wyant, "Surface Profilers, Multiple Wavelength, and White Light Interferometry," in *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 667–755. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470135976.ch15>.
- [2] P. de Groot, "Coherence Scanning Interferometry," in *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 187–208. doi: [10.1007/978-3-642-12012-1_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_9).
- [3] P. de Groot, "Phase Shifting Interferometry," in *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 167–186. doi: [10.1007/978-3-642-12012-1_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_8).
- [4] H. Schreiber and J. H. Bruning, "Phase Shifting Interferometry," in *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 547–666. doi: <https://doi.org/10.1002/9780470135976.ch14>.
- [5] J. A. N. Buytaert and J. J. J. Dirckx, "Study of the performance of 84 phase-shifting algorithms for interferometry," *Journal of Optics*, vol. 40, no. 3, pp. 114–131, Sep. 2011, doi: [10.1007/s12596-011-0044-y](https://doi.org/10.1007/s12596-011-0044-y).
- [6] R. Artigas, "Imaging Confocal Microscopy," in *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 237–286. doi: [10.1007/978-3-642-12012-1_11](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_11).
- [7] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," *Adv Opt Photonics*, vol. 3, no. 2, p. 128, Jun. 2011, doi: [10.1364/AOP.3.000128](https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128).
- [8] F. Blateyron, "Chromatic Confocal Microscopy," in *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 71–106. doi: [10.1007/978-3-642-12012-1_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_5).
- [9] P. Zammit, A. R. Harvey, and G. Carles, "Practical Single Snapshot 3D Imaging Method with an Extended Depth of Field," in *Imaging and Applied Optics 2015*, 2015, p. CT2E.2. doi: [10.1364/COSI.2015.CT2E.2](https://doi.org/10.1364/COSI.2015.CT2E.2).
- [10] T. Colomb and J. Kühn, "Digital Holographic Microscopy," in *Optical Measurement of Surface Topography*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 209–235. doi: [10.1007/978-3-642-12012-1_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_10).

- [11] T. Kiire, T. Yatagai, S. Nakadate, and M. Shibuya, "Quadrature phase-shifting interferometer with a polarization imaging camera," *Opt Rev*, vol. 17, no. 3, pp. 210–213, May 2010, doi: 10.1007/s10043-010-0037-0.
- [12] G. Franz and J. Kross, "Generation of two-dimensional surface profiles from differential interference contrast (DIC) — images," *Optik (Stuttg)*, vol. 112, no. 8, pp. 363–367, 2001, doi: 10.1078/0030-4026-00063.
- [13] P. Martinez, A. Matilla, C. Cadevall, C. Bermudez, A. Felgner, and R. Artigas, "Residual flatness error correction in three-dimensional imaging confocal microscopes," in *Optical Micro- and Nanometrology VII*, May 2018, p. 23. doi: 10.1117/12.2306903.
- [14] D. Malacara, *Optical Shop Testing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007. doi: 10.1002/9780470135976.
- [15] D. Ghiglia and M. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping - Theory, Algorithms, and Software*, 1st ed. Wiley-Interscience, 1998.
- [16] A. Harasaki, J. Schmit, and J. C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry," *Appl Opt*, vol. 39, no. 13, p. 2107, May 2000, doi: 10.1364/AO.39.002107.
- [17] S. S. C. Chim and G. S. Kino, "Phase measurements using the Mirau correlation microscope," *Appl Opt*, vol. 30, no. 16, p. 2197, Jun. 1991, doi: 10.1364/AO.30.002197.
- [18] S. S. C. Chim and G. S. Kino, "Three-dimensional image realization in interference microscopy," *Appl Opt*, vol. 31, no. 14, p. 2550, May 1992, doi: 10.1364/AO.31.002550.
- [19] P. C. Montgomery, F. Salzenstein, D. Montaner, B. Serio, and P. Pfeiffer, "Implementation of a fringe visibility based algorithm in coherence scanning interferometry for surface roughness measurement," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII*, May 2013, vol. 8788, p. 87883G. doi: 10.1117/12.2020560.
- [20] C. Ai and E. Novak, "Centroid approach for estimating modulation peak in broad-bandwidth interferometry," US5633715, May 27, 1997
- [21] C. Bermudez, P. Martinez, C. Cadevall, and R. Artigas, "High-speed, Roll to Roll Coherence Scanning Interferometry in a laser texturing process," in *euspen's International Conference & Exhibition*, 2019.
- [22] H. Jeong, H. Yoo, and D. Gweon, "High-speed 3-D measurement with a large field of view based on direct-view confocal microscope with an electrically tunable lens," *Opt Express*, vol. 24, no. 4, p. 3806, Feb. 2016, doi: 10.1364/oe.24.003806.
- [23] M. S. Muhammad, H. Mutahira, A. Majid, and T.-S. Choi, "Recovering 3D Shape of Weak Textured Surfaces," in *2009 International Conference on Computational Science and Its Applications*, 2009, pp. 191–197. doi: 10.1109/ICCSA.2009.25.
- [24] A. Matilla, J. Mariné, J. Pérez, C. Cadevall, and R. Artigas, "Three-dimensional measurements with a novel technique combination of confocal and focus variation with a simultaneous scan," in *Optical Micro- and Nanometrology VI*, 2016, vol. 9890, p. 98900B. doi: 10.1117/12.2227054.

- [25] M. Noguchi and S. K. Nayar, "Microscopic shape from focus using active illumination," in *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition*, 1994, vol. 1, pp. 147–152 vol.1. doi: 10.1109/ICPR.1994.576247.
- [26] C. Bermudez, P. Martínez, C. Cadevall, and R. Artigas, "Active illumination focus variation," in *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*, Jun. 2019, p. 31. doi: 10.1117/12.2525981.
- [27] M. A. A. Neil, R. Juškaitis, and T. Wilson, "Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope," *Opt Lett*, vol. 22, no. 24, p. 1905, Dec. 1997, doi: 10.1364/OL.22.001905.
- [28] K. Wicker and R. Heintzmann, "Single-shot optical sectioning using polarization-coded structured illumination," *Journal of Optics*, vol. 12, no. 8, p. 084010, Aug. 2010, doi: 10.1088/2040-8978/12/8/084010.
- [29] S. Michael, "METHOD AND ASSEMBLY FOR OPTICAL REPRODUCTION WITH DEPTH DISCRIMINATION," 2009 [Online]. Available: <https://lens.org/068-851-540-230-062>
- [30] K. Patorski, M. Trusiak, and T. Tkaczyk, "Optically-sectioned two-shot structured illumination microscopy with Hilbert-Huang processing," *Opt Express*, vol. 22, no. 8, p. 9517, Apr. 2014, doi: 10.1364/OE.22.009517.
- [31] K. Kivanc, Z. R. Hoffman, and C. A. DiMarzio, "Single image structured illumination (SISIM) for in-vivo imaging," in *Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing XXV*, Feb. 2018, p. 34. doi: 10.1117/12.2285699.
- [32] P. Martínez, C. Bermudez, C. Cadevall, A. Matilla Ayala, and R. Artigas, "Three-dimensional imaging confocal profiler without in-plane scanning," in *Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology*, Apr. 2020, p. 23. doi: 10.1117/12.2554716.
- [33] K. G. Larkin, D. J. Bone, and M. A. Oldfield, "Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns I General background of the spiral phase quadrature transform," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 18, no. 8, p. 1862, Aug. 2001, doi: 10.1364/JOSAA.18.001862.
- [34] C. Ventalon, R. Heintzmann, and J. Mertz, "Dynamic speckle illumination microscopy with wavelet prefiltering," *Opt Lett*, vol. 32, no. 11, p. 1417, Jun. 2007, doi: 10.1364/OL.32.001417.
- [35] D. Lim, T. N. Ford, K. K. Chu, and J. Metz, "Optically sectioned in vivo imaging with speckle illumination HiLo microscopy," *J Biomed Opt*, vol. 16, no. 1, p. 1, Jan. 2011, doi: 10.1117/1.3528656.
- [36] S. Kang, I. Ryu, D. Kim, and K. Kauh Sang, "High-speed Three-dimensional Surface Profile Measurement with the HiLo Optical Imaging Technique," *Current Optics and Photonics*, vol. 2, no. 6, pp. 568–575, Dec. 2018, doi: 10.3807/COPP.2018.2.6.568.
- [37] S. L. Dobson, P. Sun, and Y. Fainman, "Diffractive lenses for chromatic confocal imaging," *Appl Opt*, vol. 36, no. 20, p. 4744, Jul. 1997, doi: 10.1364/AO.36.004744.

- [38] T. Kim, S. H. Kim, D. Do, H. Yoo, and D. Gweon, "Chromatic confocal microscopy with a novel wavelength detection method using transmittance," *Opt Express*, vol. 21, no. 5, p. 6286, Mar. 2013, doi: 10.1364/OE.21.006286.
- [39] Y. Fainman, E. Lenz, and J. Shamir, "Optical profilometer: a new method for high sensitivity and wide dynamic range," *Appl Opt*, vol. 21, no. 17, p. 3200, Sep. 1982, doi: 10.1364/AO.21.003200.
- [40] D.-R. Lee, Y.-D. Kim, D.-G. Gweon, and H. Yoo, "High speed 3D surface profile without axial scanning: dual-detection confocal reflectance microscopy," *Meas Sci Technol*, vol. 25, no. 12, p. 125403, Dec. 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/12/125403.
- [41] D.-R. Lee, D.-G. Gweon, and H. Yoo, "Annular-beam dual-detection confocal reflectance microscopy for high-speed three-dimensional surface profiling with an extended volume," *Meas Sci Technol*, vol. 31, no. 4, p. 045403, Apr. 2020, doi: 10.1088/1361-6501/ab4d2e.
- [42] M. K. Kim, "Principles and techniques of digital holographic microscopy," *J Photonics Energy*, p. 018005, Apr. 2010, doi: 10.1117/6.0000006.
- [43] J. Kühn *et al.*, "Real-time dual-wavelength digital holographic microscopy with a single hologram acquisition," *Opt Express*, vol. 15, no. 12, p. 7231, Jun. 2007, doi: 10.1364/OE.15.007231.
- [44] H. J. Tiziani and H.-M. Uhde, "Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy," *Appl Opt*, vol. 33, no. 10, p. 1838, Apr. 1994, doi: 10.1364/AO.33.001838.
- [45] E. R. Dowski and W. T. Cathey, "Extended depth of field through wave-front coding," *Appl Opt*, vol. 34, no. 11, p. 1859, Apr. 1995, doi: 10.1364/AO.34.001859.
- [46] T. Vettenburg, N. Bustin, and A. R. Harvey, "Fidelity optimization for aberration-tolerant hybrid imaging systems," *Opt Express*, vol. 18, no. 9, p. 9220, Apr. 2010, doi: 10.1364/OE.18.009220.
- [47] W. Chi and N. George, "Electronic imaging using a logarithmic asphere," *Opt Lett*, vol. 26, no. 12, p. 875, Jun. 2001, doi: 10.1364/OL.26.000875.
- [48] S. Liu and H. Hua, "Extended depth-of-field microscopic imaging with a variable focus microscope objective," *Opt Express*, vol. 19, no. 1, p. 353, Jan. 2011, doi: 10.1364/OE.19.000353.
- [49] P. Mouroulis, "Depth of field extension with spherical optics," *Opt Express*, vol. 16, no. 17, p. 12995, Aug. 2008, doi: 10.1364/OE.16.012995.
- [50] S. R. P. Pavani and R. Piestun, "High-efficiency rotating point spread functions," *Opt Express*, vol. 16, no. 5, p. 3484, Mar. 2008, doi: 10.1364/OE.16.003484.
- [51] Y. Shechtman, S. J. Sahl, A. S. Backer, and W. E. Moerner, "Optimal Point Spread Function Design for 3D Imaging," *Phys Rev Lett*, vol. 113, no. 13, p. 133902, Sep. 2014, doi: 10.1103/PhysRevLett.113.133902.

- [52] Y. Sun, J. D. McKenna, J. M. Murray, E. M. Ostap, and Y. E. Goldman, "Parallax: High Accuracy Three-Dimensional Single Molecule Tracking Using Split Images," *Nano Lett*, vol. 9, no. 7, pp. 2676–2682, Jul. 2009, doi: 10.1021/nl901129j.
- [53] R. Gordon-Soffer *et al.*, "Microscopic scan-free surface profiling over extended axial ranges by point-spread-function engineering," *Sci Adv*, vol. 6, no. 44, Oct. 2020, doi: 10.1126/sciadv.abc0332.
- [54] P. Zammit, A. R. Harvey, and G. Carles, "Extended depth-of-field imaging and ranging in a snapshot," *Optica*, vol. 1, no. 4, p. 209, Oct. 2014, doi: 10.1364/OPTICA.1.000209.
- [55] G. Carles, "Analysis of the cubic-phase wavefront-coding function: Physical insight and selection of optimal coding strength," *Opt Lasers Eng*, vol. 50, no. 10, pp. 1377–1382, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.optlaseng.2012.05.014.
- [56] G. Muyo and A. R. Harvey, "Decomposition of the optical transfer function: wavefront coding imaging systems," *Opt Lett*, vol. 30, no. 20, p. 2715, Oct. 2005, doi: 10.1364/OL.30.002715.
- [57] G. A. Siviloglou and D. N. Christodoulides, "Accelerating finite energy Airy beams," *Opt Lett*, vol. 32, no. 8, p. 979, Apr. 2007, doi: 10.1364/OL.32.000979.
- [58] N. K. Efremidis, Z. Chen, M. Segev, and D. N. Christodoulides, "Airy beams and accelerating waves: an overview of recent advances," *Optica*, vol. 6, no. 5, p. 686, May 2019, doi: 10.1364/OPTICA.6.000686.
- [59] P. Martinez, C. Bermudez, R. Artigas, and G. Carles, "Single-shot optical surface profiling using extended depth of field 3D microscopy," *Opt Express*, vol. 30, no. 19, p. 34328, Sep. 2022, doi: 10.1364/OE.464416.