

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria de Sistemes Automàtica i Informàtica Industrial

**APORTACIÓ A LA DESCRIPCIÓ I
SEGUIMENT DE CAMINS
NAVEGABLES EN ENTORNS
NATURALS A PARTIR DE L'ANÀLISI
DE REGIONS EN SEQÜÈNCIES
D'IMATGES**

Autor: Josep Fernández Ruzafa

Director: Alícia Casals Gelpí

Barcelona, febrer del 1998

Annex A. Procés de Formació de la Imatge

En moltes aplicacions de la visió per ordinador, s'està interessat en deduir propietats dels objectes que es troben a l'espai tridimensional, com ara la seva posició o dimensions, a partir de la informació present a la imatge bidimensional. Amb aquest propòsit existeixen diferents formes de modelitzar el procés de formació de la imatge. El més fidel, i utilitzat de forma general, és l'anomenat de projecció perspectiva o "pinhole camera".

A.1. Model de Projecció Perspectiva

La figura A.1 mostra el procés de formació de la imatge en el model de transformació perspectiva. Definim el sistema de coordenades de la càmera (x,y,z) de forma que el pla imatge coincideixi amb el pla xy i l'eix òptic (definit pel centre de la lent de la càmera) estigui situat sobre l'eix z . Per tant, el centre de la imatge està situat en l'origen del sistema (x,y,z) i el centre òptic de la lent en la coordenada $(0,0,\lambda)$. Si la càmera està enfocant objectes distants, λ és la distància focal de la lent. Inicialment, s'assumeix que el sistema de coordenades del món (X,Y,Z) està alineat amb el sistema de coordenades de la càmera (x,y,z) . Aquesta restricció serà eliminada més endavant.

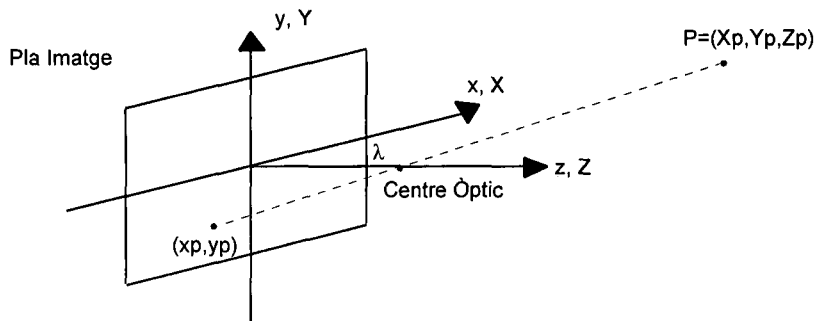


Figura A.1. Model bàsic del procés de formació de la imatge utilitzant la projecció perspectiva.

Sigui (X_p, Y_p, Z_p) les coordenades del punt P de l'escena 3D en el sistema de coordenades del món, tal com es mostra a la figura A.1. Les coordenades (x_p, y_p) del punt imatge queden definides pel punt d'intersecció entre el pla imatge i la recta que passa pels punts (X_p, Y_p, Z_p) i el centre òptic $(0, 0, \lambda)$ de la càmera. La relació entre la coordenada (x_p, y_p) al pla imatge i el punt (X_p, Y_p, Z_p) ve definida per la relació entre els triangles similars, i queda expressada en les següents equacions:

$$\frac{x_p}{\lambda} = -\frac{X_p}{Z_p - \lambda} = \frac{X_p}{\lambda - Z_p} \quad x_p = \frac{\lambda X_p}{\lambda - Z_p} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{y_p}{\lambda} = -\frac{Y_p}{Z_p - \lambda} = \frac{Y_p}{\lambda - Z_p} \quad y_p = \frac{\lambda Y_p}{\lambda - Z_p} \quad (\text{A.2})$$

Els signe menys que apareixen en les equacions A.1 i A.2, indiquen que els punts apareixen invertits en la imatge, com es pot veure en la figura A.1. Per evitar aquesta inversió cal utilitzar el model de projecció, que és equivalent, mostrat en la figura A.2, en el qual es situa el centre òptic de la càmera darrera del pla imatge en el punt $(0,0,-\lambda)$.

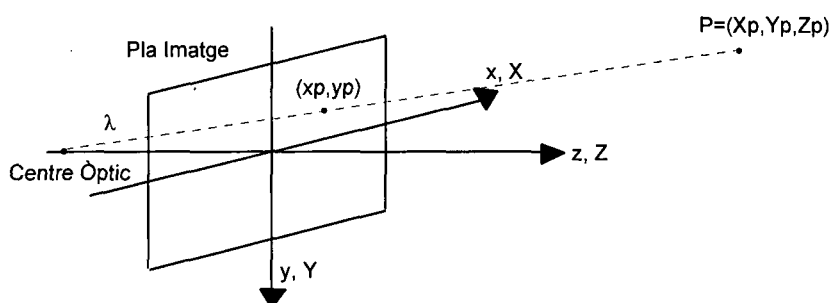


Figura A.2. Modificació de la posició del centre òptic de la càmera per evitar la inversió de la imatge.

Un punt de l'escena es projecta sobre un únic punt del pla imatge. Donat un punt de l'escena i la descripció de la lent, mitjançant les equacions A.1 i A.2 es pot determinar les coordenades del punt associat al pla imatge. Per contra, un punt de la imatge correspon a un conjunt de punts 3D coliniars que es troben sobre la recta que passa pels punts $(x_p, y_p, 0)$ i $(0, 0, \lambda)$. Aquest procés és anomenat projecció inversa. Per a determinar de forma unívoca la posició del punt (X_p, Y_p, Z_p) associat al punt de la imatge (x_p, y_p) , és necessari una altra informació, com la distància a la que es troba l'objecte, o una altra recta que interseca en el mateix punt de l'escena (com és el cas de l'estereovisió). Les equacions que defineixen la projecció inversa són:

$$X_p = \frac{x_p}{\lambda} (\lambda - Z_p) \quad (\text{A.3})$$

$$Y_p = \frac{y_p}{\lambda} (\lambda - Z_p) \quad (\text{A.4})$$

Si es coneixen les coordenades (x_p, y_p) , la distància focal de la lent i una de les coordenades del punt P, utilitzant les equacions A.3 i A.4, podem obtenir les altres dues coordenades que indiquen la posició del punt P a l'espai tridimensional.

En el cas general, els sistemes de coordenades de la càmera i del món no tenen per que coincidir. La figura A.3 mostra aquesta situació, on el sistema de coordenades del món

(X,Y,Z) s'utilitza per situar la càmera i el punts de l'escena. La càmera es troba en el punt (X_0,Y_0,Z_0) i el sistema de coordenades de la càmera està rotat un angle θ respecte l'eix X i un angle ϕ respecte l'eix Y. En aquestes condicions, les equacions que permeten determinar el punt del pla imatge en el que es projecta el punt P de l'escena són:

$$x_p = \lambda \frac{(X_p - X_0) \cos\theta + (Y_p - Y_0) \sin\theta}{-(X_p - X_0) \sin\phi \sin\theta + (Y_p - Y_0) \cos\theta \sin\phi - (Z_p - Z_0) \cos\phi + \lambda} \quad (\text{A.4})$$

$$y_p = \lambda \frac{-(X_p - X_0) \sin\theta \cos\phi + (Y_p - Y_0) \cos\theta \cos\phi + (Z_p - Z_0) \sin\phi}{-(X_p - X_0) \sin\phi \sin\theta + (Y_p - Y_0) \cos\theta \sin\phi - (Z_p - Z_0) \cos\phi + \lambda} \quad (\text{A.5})$$

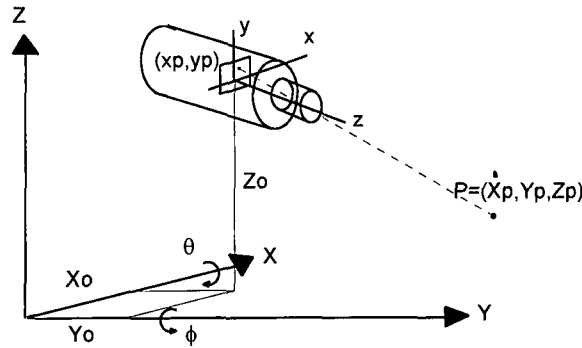


Figura A.3. Model genèric del procés de formació de la imatge utilitzant la projecció perspectiva.

De la mateixa forma que en el cas anterior, si es coneix la coordenada (x_p, y_p) del punt del pla imatge i el valor d'una de les coordenades del punt P, es pot deduir les dues altres aplicant la parella d'equacions adequada.

Si es coneix el valor de Z_p cal utilitzar les equacions A.6 i A.7.

$$X_p = X_0 + \frac{Z_p - Z_0}{y_p \cos\phi - \lambda \sin\phi} (x_p \cos\theta + y_p \sin\phi \sin\theta + \lambda \cos\phi \sin\theta) \quad (\text{A.6})$$

$$Y_p = Y_0 + \frac{Z_p - Z_0}{y_p \cos\phi - \lambda \sin\phi} (-x_p \sin\theta + y_p \sin\phi \cos\theta + \lambda \cos\phi \cos\theta) \quad (\text{A.7})$$

Si es coneix el valor de Y_p cal utilitzar les equacions A.8 i A.9.

$$X_p = X_0 + \frac{Y_p - Y_0}{-x_p \sin\theta + y_p \cos\theta \sin\phi + \lambda \cos\theta \cos\phi} (x_p \cos\theta + y_p \sin\phi \sin\theta + \lambda \cos\phi \sin\theta) \quad (\text{A.8})$$

$$Z_p = Z_0 + \frac{Y_p - Y_0}{-x_p \sin\theta + y_p \cos\theta \sin\phi + \lambda \cos\theta \cos\phi} (y_p \cos\phi - \lambda \sin\phi) \quad (\text{A.9})$$

Si es coneix el valor de X_p cal utilitzar les equacions A.10 i A.11.

$$Y_p = Y_0 + \frac{X_p - X_0}{x_p \cos\theta + y_p \sin\phi \sin\theta + \lambda \cos\phi \sin\theta} (-x_p \sin\theta + y_p \sin\phi \cos\theta + \lambda \cos\phi \cos\theta) \quad (\text{A.10})$$

$$Z_p = Z_0 + \frac{X_p - X_0}{x_p \cos\theta + y_p \sin\phi \sin\theta + \lambda \cos\phi \sin\theta} (y_p \cos\phi - \lambda \sin\phi) \quad (\text{A.11})$$

Fins ara, s'està considerant el pla imatge com a continu i de mida il·limitada. Aquesta situació no és real ja que la mida de l'element sensible d'una càmera està limitada i en el mateix element sensible o en la posterior adquisició, el pla imatge és discretitzat. Cada un dels elements de la imatge digital és anomenat pixel (de l'anglès *picture element*).

Per determinar a quin pixel de la imatge digital està associat un punt del pla imatge cal aplicar les següents equacions:

$$i = \frac{x_p + (\text{CCD}_x) / 2}{\text{DIM}_x} \quad (\text{A.12})$$

$$j = \frac{y_p + (\text{CCD}_y) / 2}{\text{DIM}_y} \quad (\text{A.13})$$

on CCD_x i CCD_y són les dimensions del pla imatge i DIM_x i DIM_y són les dimensions d'un pixel de la imatge. Les equacions A.12 i A.13 situen l'origen de la imatge digital -pixel (0,0)- en l'extrem superior esquerra de la imatge.

El model de projecció perspectiva és una aproximació al fenomen real que té lloc quan una càmera capta una escena, ja que no contempla aspectes tant importants com la distorsió de la imatge generada per la lent.

Així doncs, si es coneixen els paràmetres intrínsecs (propis de la càmera) com són la mida del CCD i la del pixel, la distància focal (λ) i la distorsió de l'òptica de la càmera; i els paràmetres extrínsecs (els que depenen de la disposició de la càmera) com són el desplaçament i rotació relativa entre el sistema de coordenades de referència i els sistema de coordenades de la càmera $-(X_0, Y_0, Z_0)$ i (ϕ, θ) respectivament-, s'està en condicions de deduir informació dels objectes tridimensionals de l'escena, com ara la seva posició i dimensions, a partir de la informació present en la imatge bidimensional.

Per determinar d'una forma exacta el valor dels paràmetres intrínsecs i extrínsecs, cal realitzar el procés de calibració del sistema d'adquisició d'imatges [Tsai 89] [Zhang 91], pas previ a la utilització d'un sistema de visió per ordinador per a la mesura de distàncies físiques, , però aquest és un altre problema.

El camp de visió de la càmera i la resolució espacial són dos paràmetres a tenir en compte quan s'utilitza la visió per ordinador com sensor en un sistema de navegació autònoma.

El camp de visió, zona de l'entorn captada en una imatge, queda determinat per la distància focal (λ) i la disposició de la càmera respecte el sistema de coordenades del món (X_0, Y_0, Z_0, ϕ i θ). El camp de visió determina l'amplada (X_{\min} i X_{\max}) i la profunditat (Y_{\min} i Y_{\max}) de la zona del món que es observada en una imatge.

La resolució espacial amb la que es observat l'entorn, depèn del nombre de píxels de la imatge i de la distància focal. Aquest paràmetre resulta important, ja que ens fixarà l'error que es comet quan es vol conèixer les coordenades del punt de l'entorn a partir del seu punt imatge (utilitzant les equacions A.6 a A.11).

Les figures A.4.a i A.4.b ens mostren l'error màxim i mig, en el càlcul de la coordenada Y (distància mòbil-punt a l'espai 3D), d'un punt que s'assumeix que es troba a nivell del terra $-Z=0-$, utilitzant les equacions A.6 i A.7. Es pot observar que l'error en l'estimació de la posició del punt de l'entorn, decreix ràpidament amb la distància, així com amb l'augment del nombre de píxels de la imatge digital. Això és degut a l'augment de la resolució espacial (relació àrea al món que es projecta en un píxel de la imatge) a mesura que la distància objecte-càmera disminueix o que augmenten el nombre de píxels en la imatge. L'error màxim, en una imatge de 512x512 píxels, està al voltant de 12 centímetres (a 10 metres de distància) i l'error en l'estimació de la distància a menys de 4 metres, és inferior a 3 centímetres -l'error mig a aquestes dues distàncies és 10 i 4 centímetres respectivament-. En tot cas l'error relatiu en l'estimació de la distància relativa càmera-objecte, és sempre inferior al 1.3%. Com es pot observar en la figura A.4.b, per imatges de resolució 256x256 píxels, l'error és aproximadament el doble.

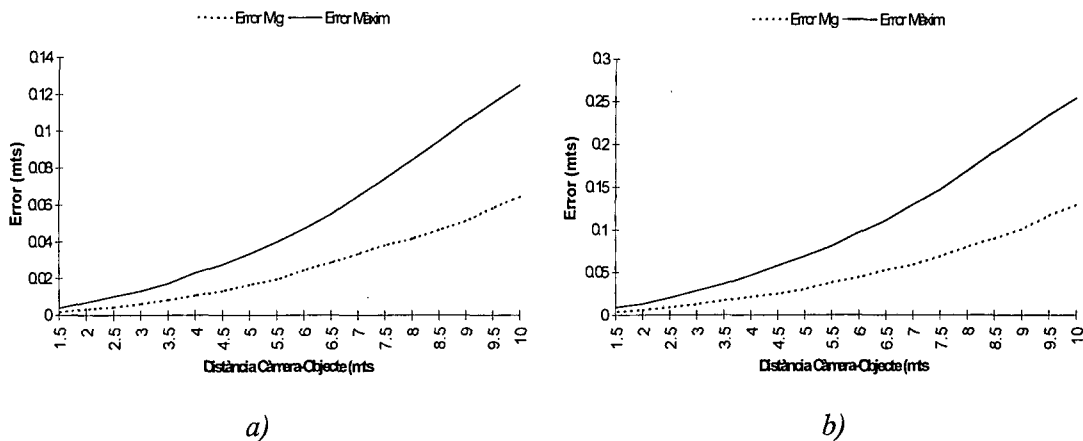


Figura A.4. Error màxim i mig en el posicionament d'un pixel a l'espai 3D en funció de la seva distància a la càmera. (S'assumeix $Z=0$). a) En una imatge de resolució 512x512 pixels. b) En una imatge de resolució 256x256 pixels.

A.2. Estimació de la Distància Càmera-Objecte a partir de l'Anàlisi d'una Seqüència d'Imatges

En aquesta secció es resumeix el treball realitzat per V. Graefe i J. Huber de la Universitat Federal de les Forces Armades de Munic, i que ha estat publicats a [Graefe 91] [Huber 90] i [Huber 94]. Aquests treballs presenten un mètode basat en la tècnica de "Stereo motion" per mesurar la distància a la que es troben els objectes del vehicle sobre el que s'ha disposat la càmera. El mètode només requereix d'una sola càmera no calibrada, i no es veu afectat per les possibles oscil·lacions de la càmera degudes al moviment del vehicle.

Aquest mètode es pot formular de la següent forma:

Sigui (x,y) el sistema de coordenades associat al pla imatge, que té el seu origen de coordenades en la cantonada superior esquerra del pla imatge. Sigui (X,Y,Z) el sistema de coordenades del món, que té el seu origen al punt C, que és el centre de projecció o centre òptic de la càmera. Els eixos X i Y estan alineats amb els x i y, i l'eix Z és ortogonal al pla imatge i l'intersecta en el punt $c=(x_c,y_c)$, el punt central del pla imatge.

Sigui P_1 i P_2 dos punts amb coordenades (X_1,Y_1,Z_1) i (X_2,Y_2,Z_2) respectivament. S'assumeix que $Z_1=Z_2=Z$, és a dir, els dos punts es troben a la mateixa distància de la càmera. Les projeccions dels punts P_1 i P_2 al pla imatge són:

$$p_1 = (x_c + \lambda \frac{X_1}{Z}, y_c + \lambda \frac{Y_1}{Z}) \text{ i } p_2 = (x_c + \lambda \frac{X_2}{Z}, y_c + \lambda \frac{Y_2}{Z})$$

Sigui $B=|X_1-X_2|$ la distància horitzontal entre els dos punts P_1 i P_2 (l'amplada de l'objecte), i $b=|x_1-x_2|$ la distància horitzontal entre els punts imatge p_1 i p_2 . Per tant, a partir de l'equació A.1 es dedueix que $b=\lambda \cdot B/Z$.

Assumint que la càmera es desplaça a una velocitat relativa (dX/dt , dY/dt , dZ/dt) respecte els punts P_1 i P_2 , mentre λ i B es mantenen constants. En general b canviarà de la següent forma:

$$\frac{db}{dt} = \frac{db}{dZ} \frac{dZ}{dt} = -\frac{\lambda B}{Z^2} \frac{dZ}{dt} = \frac{-b}{Z} \frac{dZ}{dt} \quad (\text{A.14})$$

Si la velocitat a la que es mou el vehicle es coneguda, es pot calcular la distància (Z) a la que es troben els punts P_1 i P_2 de la càmera de la següent forma:

$$Z = \frac{-b \cdot dZ/dt}{db/dt} = \frac{-b}{db/dZ} \quad (\text{A.15})$$

Com es pot veure, per calcular Z amb l'equació A.15, no és necessari conèixer cap paràmetre de la càmera.

En els diferents experiments realitzats pels autors en entorns exteriors, s'ha obtingut un error relatiu en la estimació de la distància del 10% en les primeres imatges de la seqüència (quan l'objecte es troba a més de 75 metres), però l'error decreix ràpidament (fins al 1.5%) després d'un desplaçament curt (7.5 m) de la càmera. L'error és inferior al 1% quan la distància càmera-objecte és inferior a 30 metres.

Annex B. Implementació de la Metodologia Presentada

En aquest annex es presenta en detall la implementació de les diferents etapes que formen la metodologia presentada en aquesta memòria. Com punt de sortida, en la primera secció, s'indica quin és el procediment per determinar les característiques del sistema de visió, fixades una condicions d'operació del sistema de navegació autònom.

B.1. Determinació de les Característiques del Sistema de Visió

Si es fixa com objectiu del sistema de navegació autònom, el circular a una velocitat màxima de 40 Km/h (11.1 m/s) i es considera un temps de reacció de 0.3 segons, la distància d'aturada (equació 3.1) serà de 16.5 metres. Com en la metodologia proposada es necessita analitzar dues imatges consecutives de la seqüència per detectar un obstacle, és necessari un abast màxim de 20 metres de distància. Si es fixa el temps de cicle (temps entre l'adquisició i l'anàlisi de dues imatges consecutives) igual al temps de reacció (0.3 s), el marge de mesura mínim del sensor (equació 3.2 i figura 3.3) ha de ser de 3.3 metres, i per tant en cada nova imatge es captaria l'entorn situat a una distància entre 16.7 i 20 metres. Com es vol detectar els possibles canvis de l'entorn més proper al vehicle, i completar i refinar la informació disponible de l'entorn analitzant varies vegades -en moments de temps i des de posicions diferents- la mateixa àrea de l'entorn, s'utilitza un sistema de visió amb un marge de mesura de 17 metres (i per tant d'un abast mínim de 3 metres).

Fixat el marge de mesura i l'abast del sensor, ens queda per definir la resolució de la imatge i la distància focal de la càmera en funció de amb quina resolució és vol observar l'entorn. L'ús d'una càmera amb distància focal de 20 mm i una digitalització de la imatge en 256x256 pixels, proporciona una resolució de 1.7, 5.2 i 14 cm² a 5, 10 i 20 metres, respectivament, de distància relativa càmera-empremta.

Per obtenir el marge de mesura de mesures desitjat, s'ha disposat la càmera a una alçada de 0.835 centímetres respecte el terra (alçada del vehicle autònom Eixerit - figura 2.2- del que disposem a la Universitat Politècnica de Catalunya) i inclinat menys 6 graus respecte el terra (figura B.1). En aquesta configuració l'abast mínim del sensor és de 3.05 metres. Tot i que l'abast del sistema de visió es pot considerar infinit, l'abast màxim útil queda limitat per la resolució espacial mínima desitjada. Fixant un abast màxim de 20 metres -el que suposa un marge de mesura de 16.95 metres- la resolució espacial mínima és de 14 centímetres quadrats per pixel.

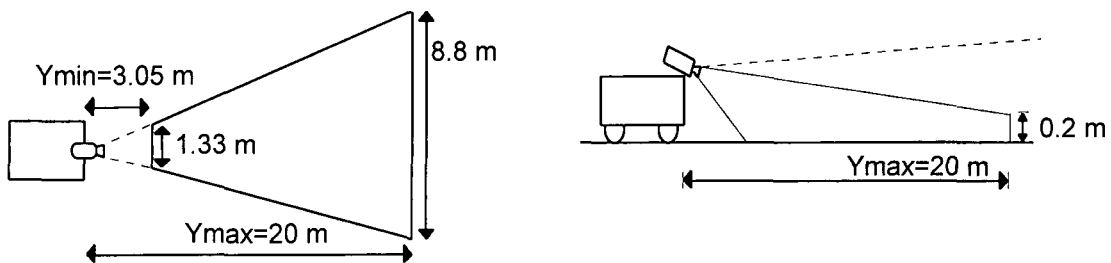


Figura B.1. Abast i marge del sistema d'adquisició d'imatges triat.

Un altre aspecte a tenir en compte quan s'utilitza una càmera per captar informació de l'entorn, és el fet que la part superior de la imatge correspon a la projecció de la zona de l'entorn (cel, part superior dels elements -arbres, matolls, etc.- que formen el marge del camí) que no aporta cap tipus d'informació per la tasca que hem de resoldre (veure imatges de la figura 1.2). Així doncs, l'anàlisi de la part superior de la imatge és irrellevant en el nostre cas, i per tant no es realitzarà amb l'objectiu de reduir el temps de procés per a l'anàlisi de les imatges. Fixades les característiques del sistema d'adquisició d'imatges seleccionat i el marge de mesura necessari, es pot calcular utilitzant l'equació A.4 i assumint que el pendent del terra és constant, quina és la part de la imatge que cal analitzar i quina no cal analitzar (ja que en ella no es projecta la zona del camí que ens interessa).

En el sistema de visió descrit anteriorment, l'àrea de l'entorn que s'ha d'analitzar, abast mínim 3 metres i màxim 20 metres, es projecta entre les files 79 i 256 de la imatge. En el cas que un obstacle de 0.2 metres d'alçada es trobés a 20 metres de la càmera, aquest es projectaria entre les files 71 i 79 de la imatge. Per tant l'anàlisi de les 184 files inferior de la imatge en la configuració del sistema de visió proposada, ens ha de permetre localitzar la posició del camí i la presència d'obstacles en un marge de 20 metres.

Una major inclinació de la càmera porta a una disminució de l'abast mínim (Y_{\min}) -i per tant un augment del marge de mesura-, i un augment de la mida de la zona on es projecta el camí a la imatge -i per tant un increment del temps necessari per analitzar la imatge-. Tenint en compte que l'àrea del camí més propera al vehicle, delimitada per Y_{\min} , ja ha estat observada i analitzada en anteriors imatges de la seqüència i que encara que es detecti a la imatge un obstacle a distància inferior a la distància de reacció -equació 3.1- ja no s'està a temps de prendre una acció per evitar-lo, no hi ha cap raó que justifiqui la disminució de l'abast mínim del sensor per sota de la distància de reacció.

B.2. Implementació de la Transformació RGB a H/I.

Existeixen dues alternatives per a la implementació de la transformació RGB a H/I:

- a) Mitjançant programari, on per cada pixel de la imatge de valor (R,G,B) es calcula quin es el valor H/I associat.
- b) Incorporant dintre de la placa d'adquisició d'imatges un mòdul dedicat a la transformacions dels valors dels pixels, de forma que sigui el *hardware* d'adquisició el que subministri directament la imatge H/I.

La implementació mitjançant programari requereix per a cada pixel (i,j) de la imatge:

1. Accedir a les posicions de memòria on es troben els valors RGB del pixel (i,j)
2. Determinar si el valor del Hue és estable
El Hue és inestable si $I=(R+G+B)/3 < 15$ o $|R-G| < 10$ o $|R-B| < 10$ o $|G-B| < 10$
3. Si el Hue és inestable llavors
 $H/I = 128 + (I/4)$

Si el Hue és estable llavors

$$H / I = \begin{cases} aux & \text{si } G \geq B \\ 2\pi - aux & \text{si } G < B \end{cases}$$

$$\text{on } aux = \arccos \left(\frac{\frac{1}{2}((R-G) + (R-B))}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right)$$

4. Deixar en la posició (i,j) de la imatge de sortida el valor H/I del pixel analitzat

En el pitjor cas, quan el valor H/I està associat amb el Hue, per a cada pixel de la imatge cal accedir a la zona de memòria on estan els tres valors RGB del pixel i on cal deixar el valor H/I calculat, realitzar 4 assignacions, 6 comparacions, 5 sumes, 3 productes, 2 divisions, 1 operació de arcosinus i 1 operació d'arrel quadrada, és a dir, un total de 24 operacions màquina simples i 2 operacions complexes. Com es pot veure, la realització d'aquesta transformació requereix d'un nombre de càlculs apreciables, fent que el temps total per realitzar la transformació sigui considerable quan es treballa amb imatges d'una certa resolució. La taula C.1 indica el temps

necessari per realitzar la conversió RGB a H/I de les imatges de la figura 1.2 -256x256 pixels-, utilitzant un ordinador PC equipat amb un processador Pentium a 200 Mhz de freqüència de rellotge.

Imatge	Temps procés (s)	Imatge	Temps procés (s)
a	0.44	f	0.44
b	0.44	g	0.20
c	0.44	h	0.44
d	0.20	i	0.44
e	0.20		

Taula B.1. Temps de procés per realitzar la conversió RGB a H/I de les imatges de la figura 1.2 mitjançant programari.

Una alternativa a la implementació amb programari presentada anteriorment, on el valor H/I de cada pixel s'obté mitjançant l'execució d'un conjunt d'operacions aritmètiques i lògiques, és l'avaluació de la transformació per tots els possibles valors (R,G,B) i la seva memorització en una taula, on s'indica per cada valor (R,G,B) el valor H/I associat. Ja que no es treballa amb una resolució cromàtica molt elevada, es poden representar els valors R, G i B amb 6 bits. En aquestes condicions, és necessari 256 Kbytes de memòria per a memoritzar la transformació. La necessitat de 256 Kbytes de memòria més a l'ordinador, pot quedar compensada per la disminució del temps necessari per realitzar la transformació. En aquesta cas, la transformació RGB a H/I queda reduïda a l'accés a la taula, i requereix per a cada pixel (i,j) de la imatge fer únicament 5 accessos a memòria -per obtenir els valors R, G i B, consultar la taula i deixar el valor H/I obtingut en la posició corresponen de la imatge de sortida-, i 2 productes i 2 sumes -per calcular a quina posició de la taula cal accedir-, és a dir, 9 operacions màquina simples, i per tant un temps d'execució d'aproximadament una tercera part del que apareixen a la taula B.1.

La implementació de la transformació mitjançant un *hardware* dedicat resulta molt més ràpida. Com en el cas anterior, la transformació es realitza mitjançant una taula a la que s'accedeix a partir del valor RGB generat per l'etapa de digitalització de la imatge -els valors R, G i B subministrats pels conversors analògic/digital adrecen directament la memòria-, i on en cada una de les seves posicions, es memoritza el valor H/I associat al valor RGB. El temps necessari per realitzar la transformació d'un pixel, és el temps d'accés a una RAM, que es pot considerar inclòs dintre del temps d'adquisició de la imatge. Un altre avantatge d'aquesta implementació és la no necessitat de memoritzar la imatge RGB. Existeixen al mercat plaques d'adquisició d'imatges color d'aquestes característiques [Batlle 92].

B.3. Implementació de la Segmentació.

Tot i que la tècnica de creixement de regions és relativament ràpida, s'ha d'efectuar un esforç considerable per minimitzar el temps de processament, ja que les operacions que es defineixin s'han de realitzar per tots els pixels de la imatge. A més de la partició de la imatge, cal per a cada regió calcular un conjunt de paràmetres (com són el color, la posició a la imatge o la mida de la regió), que seran utilitzats en etapes posteriors, així com la determinació dels colors-camí. Amb aquest objectiu s'ha de dissenyar amb molta cura l'estructura de dades que s'utilitzarà, ja que aquesta condicionarà el temps de processament.

L'algorisme implementat per a la realització de la segmentació, en pseudo-codi, és el següent:

Obtenir els **colors-camí** a partir de l'histograma H/I de la zona central inferior i la posició del pixel amb color-camí més freqüent que s'utilitzarà com element inicial de la primera regió

Per tots els pixels **p** de la imatge recorreguts en sentit esquerra-dreta, inferior superior fer

Obtenir l'identificador de les regions **R_a** i **R_b**, a les que han estat assignat els pixels veïns esquerra i inferior.

Avaluar la relació existent entre **p**, **R_a** i **R_b**

Cas 1. Color de **p** similar al color de **R_a**

Afegir **p** a **R_a**

Cas 2. Color de **p** similar al color de **R_b**

Afegir **p** a **R_b**

Cas 3. Color de **p** similar als colors de **R_a** i **R_b**

Unir **R_a** i **R_b** (*fusionen dues regions*)

Alliberar **R_b**

Afegir **p** a **R_a**

Cas 4. Color de **p** diferent als colors de **R_a** i **R_b**

Si el color de **p** és similar al color de pixel veí dret o superior

llavors Crear nova regió amb el pixel **p**

sinó Afegir **p** a la regió **R_a** o **R_b** de color més proper

Fi si

Si p està dintre de la zona central inferior

llavors Actualitzar l'histograma dels colors presents a la zona central inferior

Fi si

Fi Per

Un pixel **p** té un color similar a la regió **R** (tenint en compte la resolució coloromètrica de l'espai H/I i les característiques de la càmera color utilitzada) si la diferència entre el valor H/I de **p** i la mitjana dels valors H/I dels pixels que formen **R** és inferior a 4.5. Així mateix, es considera que donades dues regions **R_a** i **R_b**, amb mitja i variància dels valors H/I dels pixels associats a les regions (\bar{m}_a, σ_a) i (\bar{m}_b, σ_b) respectivament, tal que la mida en pixels de **R_a** és igual o més gran a la mida de **R_b**, tenen un color similar si el valor \bar{m}_b està inclòs en l'interval $(\bar{m}_a - 0.95 \cdot \sigma_a, \bar{m}_a + 0.95 \cdot \sigma_a)$.

Aquests valors, que ens indica quina és la variació del valor H/I d'un objecte/estructura que perceptivament es considera de color homogeni, s'ha calculat analitzant la variació del valor H/I en imatges captades amb il·luminació natural, de cartes de color i en camins feblement estructurats, i un sistema de visió donat. En tot cas, aquest llindar s'ha d'adaptat tenint en compte les característiques del sistema de visió (càmera i placa d'adquisició) utilitzat, i la resolució (nombre de colors considerats) en l'espai H/I, seguint un procediment semblant al que es presenta a la secció 4.1.3.

Com ja s'ha comentat prèviament, encara que el nombre d'objectes a l'entorn és gran i la seva il·luminació heterogènia, el nombre d'elements d'interès de l'escena, en el nostre cas, és reduït (camí, obstacles -si n'hi ha- i marges del camí). Per localitzar aquests elements no és necessari generar un gran nombre de regions en la imatge segmentada. Per aquesta raó i amb l'objectiu de simplificar el procés de segmentació, es fixa un nombre màxim de regions que existiran durant la segmentació. Aquest nombre ha de tenir en compte quina és la complexitat de la imatge. En el nostre cas, s'ha fixat un valor de 256 regions -màxim nombre de valors representables amb 1 byte-.

Les accions més costoses en temps, a realitzar durant el procés de segmentació, són la unió de dues regions -cal assignar a tots els pixels de la regió que s'elimina el valor de l'índex de la regió amb la que es fusiona, i que per tant els contindrà a partir d'ara- i la búsqueda d'una regió lliure per crear una nova regió -ja que el nombre total de regions

està limitat a un màxim de 256-. L'estructura de dades utilitzades està orientada a simplificar aquests processos. Els elements bàsics de l'estructura de dades són:

- Una matriu de N elements que indica per a cada un dels segments creats a la imatge a quina de les 256 possibles regions està associat. Cada nova regió creada durant la segmentació té un identificador propi, independentment de si és fusionada o absorbida posteriorment. La dimensió N d'aquesta matriu depèn de la complexitat de la imatge, i indica el màxim nombre de regions que es poden crear durant tot el procés de segmentació. El seu valor depèn, bàsicament, de la complexitat de la imatge (nombre d'objectes de l'escena i com estan il·luminats), de la resolució de la imatge i del criteri de creixement utilitzat. Per a la segmentació de les imatges de la figura 4.18, s'ha utilitzat un valor per N de 4200.
- Una matriu de 256 elements amb els paràmetres de les regions existents a la imatge en un moment donat. Per a cada regió s'indica, el seu color -mitjana del valor H/I-, la desviació estàndard dels valors H/I dels pixels que formen la regió, la mida en pixels de la regió, la posició de la regió a la imatge i si alguna de les regions veïnes té un color proper al seu.
- Una matriu de 256 x 256 elements que indica les relacions de veïnatge entre les regions.
- Una llista de regions lliures. Llista on s'indica quines regions, de les 256, estan disponibles per ser utilitzades. Inicialment hi ha les 256 regions. Cada vegada que es crea una regió l'algorisme obté de la llista l'índex d'una regió buida. Cada vegada que s'uneixen dues regions, una de elles queda lliure i passa a formar part d'aquesta llista.
- Una llista de regions absorbibles. Llista on s'indica quines regions, de les com a màxim 256 considerades, corresponen a regions actuals de la imatge amb una mida en pixels inferior a un valor prefixat. Aquestes regions són candidates a ser unides a una altra regió veïna encara que no tingui un color similar (en aquest cas direm que la regió és absorbida) si durant la segmentació es necessita crear una nova regió i la llista de regions lliure està buida. Inicialment aquesta llista està buida. Quan es crea una regió, i per tant la seva mida és 1, s'afegeix a la llista de regions absorbibles. Quan degut al seu creixement, una regió sobrepasa la mida del valor prefixat, aquesta és extreta de la llista de regions absorbibles i passa a la de regions finals. El nombre de pixels mínim que ha de tenir una regió per ser considerada rellevant, i per tant ja no podrà ser absorbida, depèn de la grandària a la

imatge de l'objecte més petit que es vol representar a la descripció de l'entorn. Com s'ha introduït a la secció 3.1, la mida en pixels de la regió associada a un objecte depèn bàsicament de la distància focal de l'objectiu, de la resolució de la imatge digital, i de la distància càmera-objecte. En la implementació realitzada, el nombre de pixels mínim per a que una regió no sigui absorbida, s'ha fixat al nombre total de pixels de la imatge dividit per 1024 (64 pixels per imatges de 256x256 pixels). Això suposa que tota regió de grandària superior al 1⁰/₀₀ de la mida de la imatge és considerada rellevant en la segmentació. Una regió de 64 pixels situada a 5, 10 i 15 metres correspon a un objecte pla (alçada nul·la) d'àrea 0.01, 0.12 i 0.38 metres quadrats respectivament, o a un objecte d'alçada 0.1 metres que en el pitjor cas té una amplada de 0.035, 0.12 i 0.25 metres respectivament¹. Per tant, les regions absorbides estan associades a objectes petits que es troben a prop del vehicle o a objectes que, encara que les seves dimensions siguin rellevants en la tasca que es realitza, es troben lluny del vehicle i per tant seran analitzats en imatges posteriors a distàncies més properes. Les regions que al final del procés de segmentació estan encara en aquesta llista, formen part del resultat final de la segmentació.

- Una llista de regions finals. Llista on s'indica quines de les regions creades tenen una mida superior al valor prefixat, i per tant es consideren rellevants. Aquestes regions, ja formen part del resultat final de la segmentació, excepte si són unides a un altre regió veïna de color similar. Inicialment aquesta llista està buida, i al finalitzar la segmentació totes les regions que hi ha a la llista formen part de la segmentació.

Com la segmentació d'imatges resulta un procés molt costós en temps, sempre s'ha tingut present la necessitat d'utilitzar un sistema multiprocessador. Malgrat l'esforç realitzat per reduir el temps de procés necessari per segmentar la imatge, aquest resulta elevat quan la tasca ha de ser realitzada per un únic processador (veure taula B.2, on s'indica el temps necessari per realitzar la segmentació de les imatges de la figura 1.2 -184x256 pixels-, utilitzant un ordinador PC equipat amb un processador Pentium a 200 Mhz de freqüència de rellotge.). Per satisfer els requeriments de temps que imposa un sistema de navegació autònom, és necessari una implementació multiprocessador.

¹ Utilitzant un sistema d'adquisicions d'imatges de les característiques descrites a la secció B.1.

L'algorisme de segmentació presentat és paral·lelitzable, ja que per determinar a quina regió s'assigna un pixel, només s'analitza informació local (el color de les regions i els pixels veïns). Per tant, es pot partir la imatge en subimatges, per que cada subimatge sigui segmentada per un processador diferent. Posteriorment, cal veure si en la frontera de dues subimatges contigües, hi ha regions que són veïnes en la imatge i tenen un color similar, per tal de fusionar-les en una única regió. Una implementació MIMD ha de permetre realitzar la segmentació en l'interval de temps necessari, fixada una velocitat màxima del vehicle.

	Nombre regions creades	Nombre regions fusionades	Nombre regions absorbides	Nombre final regions	Temps de procés (s)
a.	2180	698	1145	37	0.88
b.	746	221	504	21	0.44
c.	1070	615	433	22	0.55
d.	1460	854	560	46	0.66
e.	828	400	416	12	0.44
f.	871	511	341	19	0.43
g.	2851	1006	1750	95	1.1
h.	2198	1304	833	61	0.88
i.	1067	522	532	13	0.49

Taula B.2. Temps de procés durant la segmentació de les imatges de la figura 4.18.

B.4. Implementació de la Classificació de les Regions

La realització de la classificació de les regions en camí, camí ampliat, obstacle potencial o marge requereix de la matriu de regions, de les llistes de regions finals i regions absorbibles (veure secció B.3) generades durant el procés de segmentació a baix nivell de la imatge, que ens indiquen les regions presents a la imatge i les seves característiques. Així mateix, per realitzar la classificació es necessita la descripció de l'entorn que s'ha generat amb l'anàlisi de les anteriors imatges de la seqüència, que ens indica la posició i direcció esperada del camí a la imatge per definir les 7 zones en la que es divideix la imatge.

L'algorisme implementat per a la classificació de les regions, en pseudo-codi, és el següent:

Definir a partir de la descripció actual de l'entorn les 7 zones de la imatge
Per tota regió **R** inclosa total o parcialment en les zones 1, 2, 3 o 4 i amb color igual a un **color-camí** fer

Si R està total o parcialment dintre de les zones 1 i 2 i el color de **R** és igual a un **color-camí llavors** Classificar **R** com *camí*

sinó

Si R està totalment dintre de les zones 1 i 2 i el color de **R** és similar a un **color-camí llavors** Classificar **R** com *camí*

sinó

Si R està fora de les zones 5, 6 i 7 i el color de **R** és similar a un **color-camí llavors** Classificar **R** com *camí ampliat*

Fi si

Fi si

Fi si

Fi per

Per tota regió **R** encara no classificada fer

Si R està dintre de 1, 2, 3 o 4 **llavors**

Si R està envoltada per regions classificades com *camí* o *camí ampliat llavors* Classificar **R** com *obstacle potencial*

sinó Classificar **R** com *marge*

Fi si

sinó Classificar **R** com *marge*

Fi si

Fi Per

El procés de classificació resulta bastant ràpid ja que en ell s'ha de manipular un nombre petit de dades, la llista de regions que formen la segmentació de la imatge.

La mida de les zones 3 i 4 en la que es divideix la imatge depèn del valor de α utilitzat. Com ja s'ha comentat el valor de α determina quin és el màxim error assumible per la metodologia entre la direcció/posició esperada i la direcció/posició real de *camí*, i influencia en la possibilitat que àrees del marge de color similar a un dels colors *camí* sigui classificada com *camí*, i en el temps de procés de la segmentació i classificació de la imatge. En la implementació actual, el valor de la màxima variació de direcció considerada és de $\alpha=15^\circ$, que resulta un compromís entre els tres efectes d'aquest paràmetre. Per triar aquest valor s'ha considerat que l'error màxim en l'orientació del vehicles és de 15° i les característiques dels camins feblement estructurats, especialment el fet que la vegetació que forma els marges acostuma a ocultar el *camí* quan aquest canvia de direcció, i per tant encara que hi hagi una variació important en la direcció del *camí*, l'àrea del *camí* posterior al canvi de direcció queda oculta pels elements que formen el marge. Si a més es té en compte l'interès per reduir el temps de procés (taula 4.1) i de no permetre que una àrea important del marge sigui considerada com *camí* si el seu color és similar al colors del

camí, són les raons que ens han fet triar el valor $\alpha=15^\circ$. De totes maneres α és un paràmetre que pot ser variat en funció de si es vol reduir el temps de procés o es volen considerar errors en el control i/o moviment del vehicle superiors. Així mateix, el valor de α podria ser variar de forma dinàmica en funció de les característiques de l'entorn (per exemple quan es coneix que el vehicle arriba a una bifurcació).

El temps necessari per obtenir la classificació de les imatges mostrades a la figura 4.20 (imatges de 256x184 pixels, utilitzant un ordinador PC amb processador P-200), a partir del resultat de la segmentació i la descripció de l'entorn queden recollits a la taula B.3.

Imatge	Temps de procés (s)
a.	0.05
b.	0.06
c.	0.05
d.	0.04
e.	0.05
f.	0.04
g.	0.06
h.	0.05
i.	0.05

Taula B.3. Temps de procés per a la classificació de les regions de les imatges de la figura 4.20.

B.5. Implementació de la Tècnica de Hipòtesi i Test

Dintre de l'algorisme que implementa el mètode proposat per a la determinació de l'alçada dels objectes, hi ha dues parts diferenciades: la que genera les hipòtesis i la que verifica quina de les hipòtesis s'ajusta més a la realitat.

Cada A imatges de la seqüència, es calculen les característiques (alçada i profunditat) dels N objectes-hipotètics considerats. D'aquesta forma, s'aprofita l'augment de la resolució amb la que s'observa els objectes conforme disminueix la distància càmera-objecte, per definir a més precisió les característiques dels objectes-hipotètics.

A partir de la segona imatge de la seqüència, ja s'està en condicions de verificar les hipòtesis definides. En aquest pas, es calcula la diferència d'alçada entre la regió considerada i cada una de les regions-hipotètiques. Aquests errors es van acumulant durant la seqüència. La implementació del mètode presentat, en pseudo-codi és la següent:

Per cada imatge **j** de la seqüència fer

Per totes les regions **R** marcades com obstacles potencials a la imatge **j** fer

Calcular l'alçada de la regió **R**

Obtenir els pixels (x_m, y_i) i (x_m, y_s) de la regió **R**

Estimar la posició al món del punt associat al pixel inferior (x_m, y_i) de **R** mitjançant les equacions A.6 i A.7, i assumint que el punt associat al pixel es troba a nivell de terra. D'aquest càlcul s'obté una estimació de la posició $(X_I, Y_I, 0.0)$ de la part inferior de l'objecte de l'entorn associat a la regió **R**.

Si $j > 0$ llavors (*Verificació de les hipòtesis. Amb dues imatges ja podem estimar l'alçada*)

Per cada objecte-hipotètic **k** fer

Calcular en quin pixel de la imatge es projectaria el punt superior de l'objecte-hipotètic **k**, tenint en compte que el punt inferior està a la posició $(X_I, Y_I, 0.0)$. D'aquest pas obtenim la coordenada (x_{mk}, y_{sk}) del pixel superior de la regió-hipotètica **k**.

Calcular l'error entre la posició del pixel superior (x'_m, y'_s) de la regió homologa **R_j** i el pixel superior (x_{mk}, y_{sk}) de la regió-hipotètica **k**.

$$Error_{kj} = |x'_m - x'_{mk}| + |y'_s - y'_{sk}|$$

Actualitzar l'error acumulat de l'objecte-hipotètic **k** amb el valor normalitzat de l'error obtingut en el pas anterior

$$Error_k = Error_k + \frac{Error_{kj}}{\max_k(Error_{kj})}$$

Alçada del objecte associat a $(R_j) = \min(Error_k)$ (*L'alçada estimada de la regió analitzada és l'alçada de l'objecte hipotètic amb un valor de $Error_k$ mínim.*)

Si $Alçada(R_j) > H$ llavors

Classificar **R_j** com obstacle

Estimar la posició de **R_j** a l'entorn

Incorporar l'obstacle a la descripció de l'entorn

sino

Si **R_j** està envoltada de regions classificades com a camí llavors

Classificar (R_j) com camí

sino Classificar (R_j) com marge

Fi_si

Fi_si

Fi Per

Fi Si

Si ($j \text{ mòdul } A == 0$) llavors (*Veure figura B.2*)

(*Generació de les hipòtesis. Cada A imatges s'actualitza el conjunt d'objectes hipotètics*)

Definir la recta r_0 que passa pel centre òptic de la càmera

-punt $(X_0, Y_0 - \lambda * \cos(\phi), Z_0 + \lambda * \sin(\phi))$ - i el punt (X_s, Y_s, Z_s) .

Per **k** de 0 a **N-1** fer (*N és el nombre d'alçades hipotètiques considerades*)

Definir el pla p_k que passa pel punt $(0, 0, h_k)$ i que és coplanar al

pla **XY**, on $h_k = k * \text{increment_Alçada}$

Mobile Robot Navigation

"<http://giskard.eng.yale.edu/vision/projects/navigation.html>"

Mobile Robot Research at the MIT AI Laboratory

"<http://www.ai.mit.edu/projects/mobile-robots/>"

Mobile Robotics Laboratory Overview

"<http://itobor.ee.washington.edu/>"

Mobile Robots and Navigation

"<http://www.laboratorium.dist.unige.it/./navig.html>"

NavLab: Autonomous Navigation

"http://www-cgi.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/member/www/projects/navlab_overview.html"

Navlab: Autonomous Navigation

"[http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/vision/www/samplers/thorpe.fame.html](http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/vision/www/samplers/thorpe.frame.html)"

Outdoor Robotic Vehicles

"<http://www.cs.rochester.edu/u/brown/vehicles.html>"

PANORAMA - 2483

"<http://cabernet.esprit.ec.org/esp-syn/text/2483.html>"

RWI Mobile Robot Catalog

"http://www.rwii.com/catalog/product_line.html"

The MEAM Mobile Robotics Lab

"<http://www-personal.engin.umich.edu/~johannb/moroblab.htm>"

Visió per Ordinador

USC Annotated Computer Vision Bibliography: Table of Contents

"<http://iris.usc.edu/Vision-Notes/bibliography/contents.html>"

Tsai Camera Calibration Software

"<http://almond.srv.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/user/rgw/www/TsaiCode.html>"

A Public Domain System for Camera Calibration and Distortion Correction

"<http://www.eecs.lehigh.edu/~mcc5/calib/root.html>"

Camera Calibration User Guide

"<http://smart.iis.sinica.edu.tw/resource/CamCal/CamCal.html>"

Computer Vision Home Page

"<http://www.cs.cmu.edu/~cil/vision.html>"

CS223B - Computer Vision

"<http://www-leland.stanford.edu/class/cs223b/>"

ECVNet Services

"<http://afrodite.lira.dist.unige.it/textservice.html>"

Resource Database

"<http://www.TeleosResearch.COM/resources.html>"

The Pilot European Image Processing Archive: Home Page

"<http://peipa.essex.ac.uk/>"

USC Annotated Computer Vision Bibliography: Table of Contents

"<http://iris.usc.edu/Vision-Notes/bibliography/contents.html>"

VASC Image Database

"http://www.ius.cs.cmu.edu/IUS/ppt_usr0/yx/idbm/"

Welcome to Computer Motion on the Web

"<http://www.computermotion.com/>" ADD_DATE="838065884"

Pictures & Videos

"<http://www.jpl.nasa.gov/pictures/>"

Referències Bibliogràfiques

[Abdel-Mottaled 93] Abdel-Mottaled M., Chellappa R., Rosenfeld A. "*Binocular Motion Stereo using MAP*". Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 1993, pp 321-327.

[Aggarwal 87] Aggarwal J.K., Nandhakumar N. "*Analysis of a Sequence of Images using Point and Line Correspondance*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987, pp 1275-1279.

[Aggarwal 88] Aggarwal J.K., Nandhakumar N. "*On the Computation of Motion from Sequence of Images - A Review*". Proc. of the IEEE, Vol. 76, n. 8, pp 917-935. Agost 1988.

[Amat 86] Amat J., Casals A. Llarío V. "*Improving Accuracy and Resolution of a Motion Stereo Vision System*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1986, pp 634-638.

[Ancona 92]. Ancona N. "*A Fast Obstacle detection Method based on Optical*". Proc. Second European Conference on Computer Vision 1992 (ECCV'92), pp 267-271.

[Andersen 85] Andersen F.P., Davis L.S. et al. "*Visual Algorithms for Autonomous Navigation*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1985, pp 856-861.

[Angelopoulou 92] Angelopoulou E., Hong T.H., Wu A.Y. "*World Model Representation for Mobile Robots*". Proc. SPIE 1992?, pp 293-297.

[Allen 87] Allen P.K. "*Robotic Object Recognition using Vision and Touch*". Kluwer Academic Publishers 1987.

[Araki 91] Araki K. et al. "*High Speed and Continous Rangefinder System*". Trans IECE of Japan. Vol. E74, n 10, pp 3400-3406. 1991.

[Aranda 97] Aranda J. "*Aportació als Mètodes de Seguiment Tridimensional d'Objectes d'Alta Velocitat d'Operació, mitjançant l'Estereovisió*". Tesis Doctoral. UPC. Barcelona 1997.

[Asada 88] Asada M., "*Building a 3-D World Model for a Mobile Robot from Sensory Data*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1988, pp 918-923.

[Asada 90] Asada M., "*Map Building for a Mobile Robot from Sensory Data*". IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 37, n 6, pp 1326-1336. Nov./Dec 1990.

[Asada 93] Asada N., Fujiwara M., Matsuyana T. "*Edge and Depth from Focus*". Proc. Asian Conf. on Computer Vision 1993, pp 83-86.

[Batlle 93] Batlle J. "*Aportació a la Detecció de Moviment Independentment del Moviment de la càmera, basat en el Processat d'Imatges Color*". Tesis Doctoral. UPC. Barcelona 1993.

[Bidlack 94] Bidlack C., Hampapur A., Katkere A. et al. "*Visual Robot Navigation using Flat Earth Obstacle Projection*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1994, pp 3374-3381.

[Binford 83] Binford T.O. "*Stereo-vision: Complexity and Constraints*". Proc. First Int. Symp. Robotics Research 1983, pp 475-487.

[Borestein 96] Borestein J., Everett H.R., Feng L. "*Navigating Mobile Robots. Systems and Techniques*". Ed. A.K. Peters 1996.

[Bulata 94] Bulata H., Devy M. "*Perception of a Mobile Robot for Navigation in Structured Scenes*" Proc. Int. Symposium and Business Convention. ORIA 1994. pp 211-219.

[Casals 90] Casals A., Amat J., Martinez A.B. "*High Speed Processors for Autonomous Vehicles Guidance*". Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Motion Control 1990. pp 45-52.

[Celenk 90] Celenk M. "*A Color Clustering Technique for Image Segmentation*". Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol 52, pp 145-170. 1990.

[CMU-RI 87] Dowling K., Guzikowski R., Ladd J., Pangels H., Singh J., Whittaker W. "*NAVLAB: an Autonomous Navigation Testbed*". Report de Recerca. The Robotics Institute. Carnegie Mellon University. 1987.

[Codina 92] Codina J., Frau J. "*Mobile Robot Guidance based on Predictive Tracking*". Proc. IFAC Symposium on Intelligent Components and Instrument for Control Applications 1992. pp 387-394.

[CR 96] "*Report de Treball del Centre de Referència en Robòtica Mòbil*". Universitat Politècnica de Catalunya. Octubre 1996.

[Cufi 96] Cufi J., Casals A. "*A Criterion for Circumscribed Contour Determination for Image Segmentation*". Proc. IAPR Workshop on Machine Vision Applications 1996. pp 309-312.

[Chenavier 92] Chenavier F., Crowley J.L. "*Position Estimation for a Mobile Robot using Vision and Odometry*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1992, pp 2588-2293.

[Crowley 89] Crowley J.L. "*World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot using Ultrasonic Ranging*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1989, pp 674-680.

[Curran 93] Curran A., Kyriakopoulos K. "*Sensor-based Self-localiation for Wheeled Mobile Robots*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1993, pp 8-13.

[Daily 88] Daily M., Harris J., Keirse D., et el. "*Autonomous Cross-country Navigation with ALV*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1988. pp 718-726.

[Davis 89] Davis L.S. "*Visual Navigation at the University of Maryland*". Proc. Intelligent Autonomous Systems 1989. pp 1-19.

[Delahoche 97] Delahoche L., Pégard C. et al. "*A Navigation System Based on an Ominidirectional Vision Sensor*". Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 1997. (IROS'97). pp 718-724.

[Dickmanns 90] Dickmanns E.D., Mysliwetz B., Christians T. "*An integrated spatio-temporal approach to automatic visual guidance of autonomous vehicles*". IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 20, n 6, pp 1273-1283.

[Dickmanns 92] Dickmanns E.D., Mysliwetz B.D. "*Recursive 3-D Road and Relative Ego-state Recognition*". IEEE Trans. on Pattern Recognition and Machine Intelligence, Vol. 14, n 2, pp 199-213. Febrer 1992.

[Dickmanns 95] Dickmanns E.D. "*Performance Improvements for Autonomous Road Vehicles*". Proc. Intelligent Autonomous Systems. IAS-4 1995. pp 2-14.

[Elfes 89] Elfes A. "*Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation*". Computer Juny 1989, pp 46-57.

[Fernández 94a] Fernandez J., Frau J. "*Color Image Segmentation for Autonomous Land Vehicle Road Following*". Proc. European Robotics and Intelligent Systems Conference 1994, pp 517-525.

[Fernández 94b] Fernandez J., Martinez A.B., Frau J. "*Visual Guidance of an Autonomous Vehicle in Natural Environments Based on Reflexive Control*". Proc. Intelligent Vehicle Symposium 1994, pp 103-108.

[Fernández 96] Fernandez J., Casals A. "*Aportació a la Detecció de Camins Navegables en Entorns Naturals a partir de l'Anàlisi de Regions en Seqüència d'Imatges*". 1er Seminari de Treball en Automàtica, Robòtica i Percepció. 1996. pp 187-196.

[Fernández 97a] Fernandez J., Casals A. "*A Color Image Segmentation Technique for Outdoor Scene*". Com. VII Simposium Nacional de Reconocimiento de Formas y Análisis de Imagenes 1997. Vol. 2. pp 116-118.

[Fernández 97b] Fernandez J., Casals A. "*Autonomous Navigation in ill-Structured Outdoor Environments*". Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 1997. (IROS'97). pp 395-400.

- [Frau 92] Frau J. et al. "*A Robust Tracking System for Mobile Robot Guidance*". Robotic Systems. Advanced Techniques and Applications. Kluwer Academic Publishers.
- [Fujii 92] Fujii Y., Weke D.K., Weymouth T.E. "*Robust Monocular Depth Perception using Feature Pairs and Approximate Motion*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1992, pp 33-39.
- [Gonzalez 87] Gonzalez R.C, Wintz P. "*Digital Image Processing*". 2ª Ed. Addison-Wesley Publis. Company. 1987.
- [Graefe 90] Graefe V. "*Precise Range Measurement by Monocular Stereo Vision*". Proc. Japan-USA Symposium on Flexible Automation 1990, pp 1321-1324.
- [Grandjean 93] Grandjean P., Matthies L. "*Perception control for obstacle detection by a cross-country rover*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1993, pp 20-27.
- [Grau 97] Grau A. "*Mètode d'Extracció Multiparamètrica de Característiques de Textura Orientat a la Segmentació d'Imatges*". Tesis Doctoral. UPC. Barcelona 1997.
- [Goldstein 87] Goldstein M., Pin F.G. De Saussure G et al. "*3-D World Modelling Based on Combinatorial Geometry for Autonomous Robot Navigation*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987, pp 727-733.
- [Grossman 87] Grossman P. "*Depth from Focus*". Pattern Recognition. Vol 9, n 1, 1987, pp 63-69.
- [Haralick 85] Haralick R.M., Shapiro L.G. "*Image Segmentation Techniques*". Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol 29, pp 100-132. 1985.
- [Ho 97] Ho P.K., Chung R. "*Stereo-Motion that Complements Stereo and Motion Analyses*". Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition 1997, pp 213-218.
- [Hoffman 93] Hoffman R., Krotkov E. "*Terrain Mapping for Outdoor Robots: Robust Perception for Walking in the Grass*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1993, pp 529-533.
- [Huber 91] Huber J., Graefe V. "*Motion Stereo for Mobile Robots*". IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, n 4, pp 378-383. Agost 1994.
- [Huber 94] Huber J., Graefe V. "*Quantitative Interpretation of Images Velocities in Real Time*". Proc. IEEE Workshop on Visual Motion 1991, pp 211-216.
- [Jochem 96] Jochem T., Pomerleau D. "*Life in the Fast Lane - The Evolution of an Adaptive Vehicle Control System*". AI Magazine, Summer 1996. pp 11-49.

- [Jerian 91] Jerian C.P., Jain R. "*Structure from Motion - A Critical Analysis of Methods*". IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 3, pp 572-587. Maig/June 1991.
- [Kanade 80] Kanade T. "*Region Segmentation: Signal vs Semantics*". Computer Graphics and Image Processing, Vol 13, pp 279-297. 1980
- [Kelly 97a] Kelly A, Stentz A. "*Analysis of Requirements for High Speed Rough Terrain Autonomous Mobility Part I: Throughput and Responses*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1997. pp 3318-3325.
- [Kelly 97b] Kelly A, Stentz A. "*Analysis of Requirements for High Speed Rough Terrain Autonomous Mobility Part II: Resolution and Accuracy*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1997. pp 3326-3333.
- [Kelly 97c] Kelly A, Stentz A. "*Computational Complexity of Terrain Mapping Perception in Autonomous Mobility*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1997. pp 1047-1052.
- [Kelly 97d] Kelly A, Stentz A. "*Minimum Throughput Adaptive Perception for High Speed Mobility*". Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 1997. (IROS'97). pp 215-223.
- [Kender 76] Kender J. "*Saturation, Hue and Normalized Color: Calculation, Digitization effects and Use*". Master Thesis Carnegie-Mellon University 1976.
- [Kuc 87] Kuc R., Siegel M.W. "*Efficient Representation of Reflecting Structures for a Sonar Navigation Model*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987, pp 1916-1923.
- [Kuipers 88] Kuipers B.J, Byun Y.T. "*A Robust Qualitative Method for Spatial Learning in Unknown Environments*". Proc. of the Seventh National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI) 1988, pp 1-12.
- [Lacroix 94] Lacroix S., Chatila R., Fleury S., et al. "*Autonomous Navigation in Outdoor Environment: Adaptive Approach and Experiment*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1994, pp 426-432.
- [Langer 94] Langer D., Rosenblatt, Hebert M. "*An Integrated System for Autonomous Off-Road Navigation*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1994. pp 414-419.
- [Laws 80] Laws K.I, "*Textured Image Segmentation*". USCIPR Report #940, Image Processing Institute, University of Southern California, Los Angeles. 1980.

[Lebèque 92]. Lebèque X., Aggarwal J.K. "*Detecting 3-D Parallel Lines for Perceptual Organization*". Proc. Second European Conference on Computer Vision 1992 (ECCV'92), pp 720-724.

[Li 95] Li F., Brady M., Hu H. "*Visual Guidance of an AGV*". Proc. IFRR Seventh International Symposium of Robotics Research 1995, pp 403-415.

[Luong 90] Luong Q.T. "*La Couleur en Vision par Ordinateur: une Revue*". Traitement du signal Vol. 8. n 1. pp3-34. 1990.

[Maeyama 97] Maeyama S., Ohya A., Yuta S. "*Long Distance Outdoor Navigation of an Autonomous Mobile Robot by Playback of Perceived Route Map*". Proc. Fifth International Symposium on Experimental Robotics 1997. (ISER'97). pp 141-150.

[Martínez 92] Martínez A.B., Climent J., Asensio J.M., Batlle J. "*Absolute Positioning for Indoor Mobile Robots Guidance*". International Symposium on Industrial Robots. (ISIR) 1992. pp 529-532.

[Matthies 88] Matthies L., Elfes A. "*Integration of Sonar and Stereo Range Data Using a Grid-Based Representation*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1988, pp 727-733.

[Matthies 95] Matthies L., Kelly A., Litwin T., Harp G. "*Obstacle Detection for Unmanned Ground Vehicles: A Progress Report*". Proc. IFRR Seventh International Symposium of Robotics Research 1995. pp 475-486.

[Maurer 94] Maurer M. et al. "*VaMoRs-P: an Advanced Platform for Visual Autonomous Road Vehicle Guidance*". Proc. of SPIE Vol. 2352. 1995. p 239-248.

[Morgan 90] Morgan A.D., Dagless E.L., Milford D.J., Thomas B.T. "*Road Edge Tracking for Robot Road Following: a Real-time Implementation*". Image and vision Computing, Vol 8, n 3, pp 233-240. 1990.

[Moravec 83] Moravec H.P. "*The Stanford and the CMU Rover*". Proc. of the IEEE, Vol.71, n 7, July 1983, pp 872-884.

[Nashashibi 94] Nashashibi F., Fillatreau P., Dacre-Wright B., Simeon T. "*3-D Autonomous Navigation in a Natural Environment*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1994, pp 433-439.

[Nayar 96] Nayar B.K, Watanabe M, Noguchi M. "*Real-Time Focus Sensor*". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 18, n 12, pp 1186-1198, Decembre 1996.

[Nevatia 76] Nevatia R. "*Depth Measurement by Motion Stereo*". Computer Graphics and Image Processing, Vol 2, pp 203-214, 1976.

- [Ohlander 75] Ohlander R. "*Analysis of Natural Scenes*".
Tesi Doctoral. Carnegie-Mellon University. 1975.
- [Otha 80] Otha Y., Kanade T., Sakai T. "*Color Information for Region Segmentation*".
Computer Graphics and Image Processing, Vol 13, pp 222-241. 1980.
- [Pagès 93] Pagès J., Aranda J., Casals A. "*A 3D Vision System to Model Industrial Environments for AGV's Control*". Proc. Int. Symposium on Industrial Robots. 1993.
pp 701-708.
- [Payton 86] Payton D. W. "*An Architecture for Reflexive Autonomous Vehicle Control*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1986. pp 1838-1845.
- [Pomerleau 91] Pomerleau D.A. "*Efficient Training of Artificial Neural Networks for Autonomous Navigation*". Neural Computing Vol. 3, n 1, 1991.
- [Prazdny 79] Prazdny K. "*Motion and Structure from Optical Flow*". Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence 1979. pp 702-704.
- [Pujas 95] Pujas Ph., Aldon M.J. "*Robust Colour Image Segmentation*". 7th International Conference on Advanced Robotics 1995 (ICAR'95). Vol. I, pp 145-155.
- [Rao 87] Rao N.S, Iyengar S.S. et al. "*On Terrain Acquisition by a Finite-Sized Mobile Robot in Plane*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987, pp 1314-1319.
- [Ricotti 93] Ricotti M., Barili A., Ceresa M. "*Obstacle Avoidance using a line laser*". Proc. of SPIE Vol. 2058 Mobile Robots VIII 1993. pp 164-177.
- [Robert 86] Robert de Saint Vincent A. "*A 3D Perception System for the Mobile Robot HILARE*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1986. pp 1105-1111.
- [Robert 87] Robert de Saint Vincent A. "*Visual Navigation for a Mobile Robot: Building a Map of the Occupied Space from Sparse 3-D Stereo Data*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987. pp 1429-1435.
- [Ron-Tabak 89] Ron-Tabak Y., Jain R. "*Building an Environment Model using Depth Information*". Computer. Juny 1989. pp 85-90.
- [Shariat 90] Shariat H., Price K. E. "*Motion Estimation with More Than Two Frames*". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 12, n 5, pp 417-433, Maig 1990.
- [Tan 92] Tan T.N., Sullivan G.D., Baker K.D. "*Structure from Motion Using the Ground Plane Constraint*". Proc. Second European Conference on Computer Vision 1992 (ECCV'92), pp 277-281.

[Thorpe 88] Thorpe C., Herbert M.H., Kanade T., Shafer S.A. "*Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab*". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 10, n 3, pp 362-373.

[Thorpe 91] Thorpe C., Herbert M.H., Kanade T., Shafer S.A. "*Towards Autonomous Driving: The CMU NavLab I. Perception*". IEEE Expert. Vol 6, n 4, pp 31-42.

[Tomita 90] Tomita F., Tsuji S. "*Computer Analysis of Visual Textures*". Kluwer Academic Publishers, 1990.

[Tominaga 87] Tominaga S. "*Expansion of Color Images using Three Perceptual attributes*". Pattern Recognition Letters 6. pp 77-85, 1987.

[Tomiyasu 91] Tomiyasu H., Nishio S. "*A Study of Image Segmentation using a Perceptual Color System*". Proc. Intelligent Robots and Computer Vision X. SPIE Vol. 1607. pp 348-357. 1991.

[Tseng 92] Tseng D.C., Chang C.H. "*Color Segmentation Using Perceptual Attributes*". Proc. 11th Int. Conf. Pattern Recognition 1992. pp228-231.

[Tsugawa 79] Tsugawa S., Yatabe T., Hirose T., Matsumoto S. "*A Mobile with Artificial Intelligence*". Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence 1979 (IJCAI'79). pp 893-895.

[Tsugawa 94] Tsugawa S., "*Vision-based Vehicles in Japan: Machine Vision Systems*". IEEE Trans. on Industrial Robotics. Vol. 41, n. 4, pp 398-405.

[Turk 88] Turk M.A., Morgenthaler D.G., Gremban K.D., Marra M. "*VITS-A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation*". IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 10, n 3, pp 342-361.

[Wallace 87] Wallace R.S. "*Robot road following by adaptative color classification and shape tracking*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1987, pp 258-263.

[Wang 92] Wang H., Bowman C., Harris C. "*A Parallel Implementation of a Structure-from-motion Algorithm*". Proc. Second European Conference on Computer Vision 1992 (ECCV'92), pp 272-276.

[Waxman 86] Waxman A. M., Le Moigen J., Davis L.S. et al. "*A Visual Navigation System*". Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation 1986, pp 1600-1606.

[Waxman 87] Waxman A. M., Wohn K.. "*Image Flow Theory: A Framework for 3-D inference from Time-varying Imagery*". Advances in Computer Vision. Ed. Hillside 1987.

[Yagi 95] Yagi Y., Nishizawa Y., Yachida M. "*Map-based Navigation for a Mobile Robot with Ominidirectional Image Sensor COPIS*". IEEE Trans. on Robotics and Automation. Vol 11, October 1995, pp 634-648.

[Zhang 91] Zhang D., Nomura Y., Fujii S. "*Error Analysis and Optimization of Camera Calibration*". Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems 1991. (IROS'91). pp 392-297.

Calcular el punt superior (X_{Sk}, Y_{Sk}, Z_{Sk}) de l'objecte-hipotètic k associat a la regió R com la intersecció de la recta r_0 i el pla p_k . Memoritzar la dimensió de l'objecte-hipotètic k com les coordenades del seu punt inferior (X_i, Y_i, Z_i) i superior (X_{Sk}, Y_{Sk}, Z_{Sk}) .

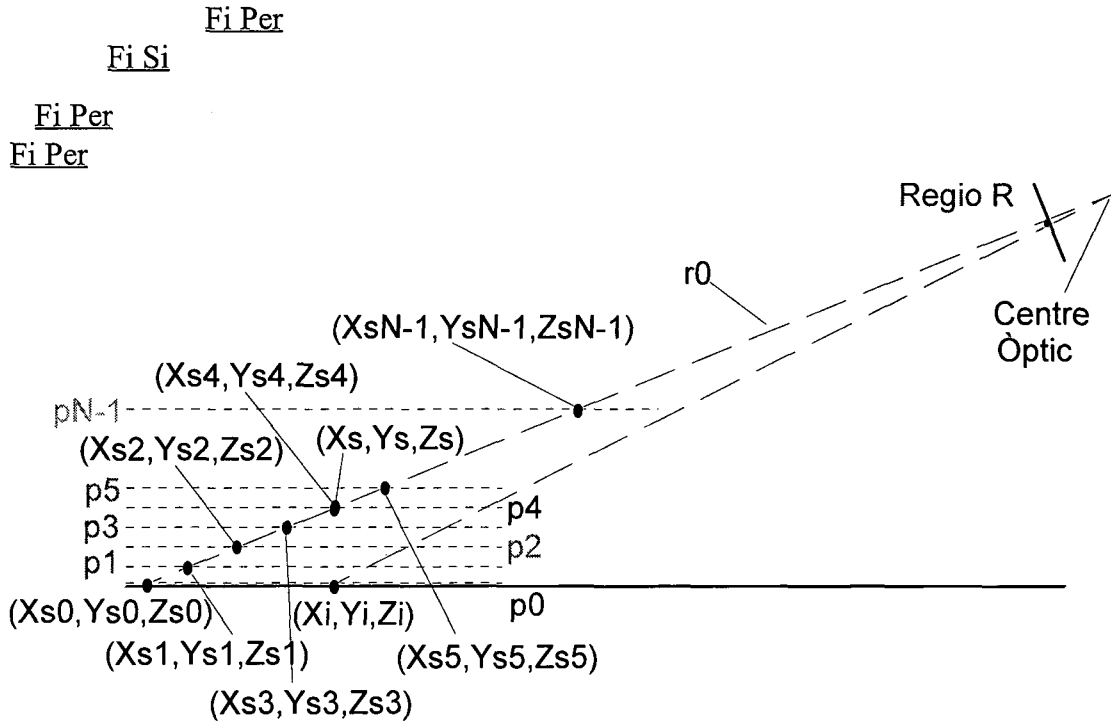


Figura B.2. Determinació de les dimensions dels N objectes-hipotètics.

En la taula B.4 s'indiquen els temps necessaris per estimar l'alçada de 6 regions classificades com obstacle potencial (figura 5.4). El temps s'han obtingut amb l'execució del programa en un ordinador PC equipat amb un processador P-200.

En el mètode presentat, cal considerar dos casos: donada una imatge j de la seqüència només cal verificar les hipòtesis, o cal verificar les hipòtesis i generar unes noves hipòtesis. Cal tenir present que el temps necessari per determinar l'alçada de la regió està lligat amb la seva mida en píxels a la imatge. Per tant, com més gran sigui la regió associada a l'obstacle, més gran serà el temps necessari per estimar la seva alçada.

Imatge	Temps (ms)
a	1
b	2
c	3
d	2
e	3
f	3
g	2
h	2
i	2

Taula B.4. Temps d'execució de l'estimació de l'alçada en la seqüència de la figura 5.4.

B.6. Implementació de l'Etapa de Descripció de l'Entorn

Com ja s'ha descrit, l'obtenció de la descripció de l'entorn es realitza en tres passos (generació de la descripció de la imatge, integració de la informació de la seqüència i imposició de les restriccions d'amplada i direcció localment constants -figura 5.13-) a partir de les imatges subministrades per l'etapa de classificació i els obstacles detectats. La generació de la descripció de la imatge resulta un procés relativament lent, ja que l'element bàsic sobre el que es realitza el processament és el pixel i no la regió com en etapes anteriors. El temps de procés necessari per integrar la informació de la seqüència generant així la descripció de l'entorn és proporcional al nombre de caselles que formen la descripció, és a dir, a la mida de l'àrea del món que es vol representar internament i a la resolució amb la que es fa la representació (Resolució_X i Resolució_Y).

Les dues estructures de dades bàsiques que s'utilitzen són:

- La descripció de la imatge (M_I). Matriu bidimensional de $N_1 \times M_1$ caselles on cada casella està associada a una àrea de mida Resolució_X*Resolució_Y centímetres del món i a una zona de la imatge de mida variable en funció de la distància càmera-àrea del món. Per tant, en la descripció de la imatge, es representa una àrea del món de N_1 *Resolució_X centímetres d'ample i M_1 *Resolució_Y centímetres de profunditat. La mida i resolució de l'àrea del món que cal analitzar en una imatge està lligada bàsicament a la velocitat del vehicle i a les característiques del sistema de visió (veure secció 3.1).

Cada casella de la descripció de la imatge en té associats 3 comptadors, en els que s'indiquen el nombre de pixel de la zona de la imatge associats a la casella que han estat classificats com a camí, marge o obstacle potencial, i una variable on s'indica la classificació -característica- de la casella.

- La descripció de l'entorn (M_E). Matriu bidimensional de $N_2 \times M_2$ caselles on cada casella està associada al conjunt de caselles de la seqüència de descripcions de la imatge que han representat la mateixa àrea de Resolució_X*Resolució_Y centímetres del món. En cada casella de la descripció de l'entorn es memoritzen els M.S (memòria del sistema) valors amb que s'han classificat les caselles associades de les descripcions de les imatges de la seqüència. Si el nombre de categories possibles és inferior o igual a quatre (tal com és el nostre cas: camí, marge, obstacle potencial i desconegut) i la memòria del sistema és igualment inferior o igual a quatre, aquesta informació es pot representar utilitzant un byte per casella. En el cas

general, el nombre de bits necessaris per representar la informació associada a cada casella de M_E és igual a \log_2 (nombre de categories)*M.S. Així mateix, en cada casella de M_E s'indica la classificació -característica- de la casella que s'ha fet en funció dels valors de les 4 sumes ponderades.

Amb l'objectiu de reduir el temps de procés, es té memoritzat en una taula (T) la casella de la descripció a la que està associada cada pixel de la imatge. D'aquesta forma l'avaluació de les equacions A.6, A.7, 5.1 i 5.2 necessàries per a determinar a quina casella (i,j) de la descripció està associat el pixel (x,y) de la imatge, queda substituïda per una consulta a la taula.

La implementació, en pseudo-codi, del procés que genera la descripció de l'entorn és:

Per cada imatge j de la seqüència fer

(*Generació de la descripció de la imatge*)

Determinar la fila inferior (y_{\max}) i la fila superior (y_{\min}) de la zona d'interès a la imatge utilitzant l'equació A.5.

Per tota fila y tal que $y_{\max} \geq y \geq y_{\min}$ fer

Determinar la columna esquerra (x_{\min}) i la columna dreta (x_{\max}) de la zona d'interès a la fila y , utilitzant l'equació A.4.

Per tot pixel (x,y) tal que $x_{\max} \geq x \geq x_{\min}$ fer

Consultar la taula T on s'indica la casella (i,j) a la que està associat el pixel (x,y).

Incrementar el valor del comptador v de $M_I(i,j)$, on v és la categoria que ha estat assignada al pixel (x,y) en l'etapa de classificació.

Fi Per

Fi Per

(*Integració de la informació de la seqüència i generació de la descripció de l'entorn*)

Per tota casella (i,j) de M_I fer

Classificar $M_I(i,j)$ com camí, marge, obstacle o desconegut en funció dels valors dels comptadors i els percentatges V_1 i V_2 .

$M_E(i,j) = M_E(i + \Delta i, j + \Delta j) + \text{classificació } M_I(i,j)$.

($\Delta i = \text{Desp}_X / \text{Resolució}_X$, $\Delta j = \text{Desp}_Y / \text{Resolució}_Y$ desplaçament en la descripció degut al desplaçament del vehicle des de l'última descripció de l'entorn generada. En $M_E(i,j)$ es té memoritzat com s'ha classificat les caselles associades de les últimes M.S descripcions de la imatge. En $M_E(i,j,t)$ memoritzem la classificació de l'última M_I , en $M_E(i,j,t-1)$ es memoritza la classificació de la penúltima M_I i així successivament.)

cam= mar= obs= 0;

Si $M_E(i,j,t)$ és camí llavors cam= P_0 Fi si

Si $M_E(i,j,t)$ és marge llavors mar= P_0 Fi si

Si $M_E(i,j,t)$ és obstacle potencial llavors obs= P_0 Fi si

Si $M_E(i,j,t-1)$ és camí llavors cam= cam+ P_1 Fi si

Si $M_E(i,j,t-1)$ és marge llavors mar= mar+ P_1 Fi si

Si $M_E(i,j,t-1)$ és obstacle potencial llavors obs= obs+ P_1 Fi si

Si $M_E(i,j,t-2)$ és camí llavors cam= cam+ P_2 Fi si

Si $M_E(i,j,t-2)$ és marge llavors mar= mar+ P_2 Fi si

Si $M_E(i,j,t-2)$ és obstacle potencial llavors obs= obs+ P_2 Fi si

.....

Si $M_E(i,j,t-M.S-1)$ és camí llavors cam= cam+ $P_{M.S-1}$ Fi si

Si $M_E(i,j,t- M.S-1)$ és marge llavors mar= mar+ $P_{M.S-1}$ Fi si

Si $M_E(i,j,t- M.S-1)$ és obstacle potencial llavors obs= obs+ $P_{M.S-1}$ Fi si

m= màxim (cam,mar,obs)

Si m=0 llavors $M_E(i,j)$ es classifica com desconeguda

sino Si m=obs llavors $M_E(i,j)$ es classifica com obstacle potencial

sino Si m=mar llavors $M_E(i,j)$ es classifica com marge

sino $M_E(i,j)$ es classifica com camí

Fi si

Fi si

Fi si

Fi per

Fi per

(Incorporació de la informació del mòdul de detecció d'obstacles)

Per tota regió obstacle potencial R de la imatge classificada fer

Si Alçada estimada de l'objecte O associat a R \geq H llavors

Reclassificar totes les caselles de M_E associades al objecte com **Obstacle**

Si R està dintre del camí llavors

Reclassificar totes les caselles de M_E associades a l'ombra de l'obstacle com **camí**

sino Reclassificar totes les caselles de M_E associades a l'ombra de l'obstacle com **marge**

Fi si

sino Si R està dintre del camí llavors

Reclassificar totes les caselles de M_E associades a R com **camí**

sino Reclassificar totes les caselles de M_E associades a R com **marge**

Fi si

Fi si

Fi per

(Imposició de les restriccions d'amplada i direcció localment constants)

Per tota fila j de M_E fer

Trobar la posició de l'inici del camí i_{ij} a la fila j

Trobar la posició del final del camí i_{fj} a la fila j

Amplada camí $_j = i_{fj} - i_{ij}$

Si ($|Amplada\ camí_j - Amplada\ camí_{j-1}| > A$) i ($i_{fj} - i_{ij} > A$) llavors

Si $|i_{ij} - i_{i-1j-1}| > |i_{fj} - i_{fj-1}|$ llavors

Nova posició del camí a la fila j és $i_{ij} = i_{fj} - Amplada\ camí_{j-1}$ i i_{fj}

sino Nova posició del camí a la fila j és i_{ij} i $i_{fj} = i_{ij} + Amplada\ camí_{j-1}$

Fi si

Fi per

El valor dels paràmetres triats per l'obtenció de les descripcions de les figures 5.13 i 5.14 són: memòria del sistema 6, V_1 i V_2 igual a 20%, $P_0=4$, $P_1=3$, $P_2=2$, $P_3=2$, $P_4=1$ i $P_5=1$.

En la implementació actual de la metodologia, tenint en compte que el marge de mesura i el desplaçament del vehicle entre la captació d'imatge consecutives (veure secció 3.1), el valor màxim de la memòria del sistema és 11. Utilitzant un valor de $M.S=6$, la descripció de l'entorn es genera utilitzant la informació obtinguda durant els últims 9 metres de recorregut i donat els valors de P_k els canvis de l'entorn s'incorporen a la descripció després de ser observat en dues imatges consecutives.

Així mateix, les caselles de la descripció de la imatge que tenen més del 30% dels pixels associats de tipus marge, són classificades com marge. La classificació de les caselles de tipus obstacle es fa directament a partir de la informació provinent del mòdul de detecció d'obstacles, que indica en quines caselles es situa, a la descripció de la imatge, els obstacles detectats. L'ombra generada per l'obstacle (part de l'entorn no visible des de la càmera per ser ocultada per l'obstacle) es classificada en M_1 en funció del valor de les caselles veïnes (com camí si l'obstacle es troba al mig del camí o com marge si l'obstacle es troba contigu al marge).

Els valors de P_k utilitzats presenten les característiques que una mal classificació en una descripció de la imatge no es reflecteix en la descripció de l'entorn, i que per que un canvi de l'entorn aparegui en M_E , cal observar-lo en les dues últimes imatges captades.

En la taula B.5 s'indiquen el temps necessari per generar la descripció de l'entorn en les seqüències de les figures 5.19 i 5.20. El temps s'han obtingut amb l'execució del programa en un ordinador PC equipat amb un processador P-200.

Imatge	Temps de Procés (s)	
	Figura 5.19	Figura 5.20
1	1.43	1.32
2	1.43	1.32
3	1.42	1.37
4	1.49	1.38
5	1.48	1.37
6	1.43	1.37

Taula B.5. Temps d'execució per la generació de la descripció de l'entorn per la seqüències de les figures 5.19 i 5.20.

Annex C. DIRECTIONS INTERNET D'INTERÈS

Robots Mòbils o Autònoms

ALVINN Project Home Page

"<http://www-cgi.cs.cmu.edu/afs/cs/project/alv/member/www/projects/ALVINN.html>"

LRT-13, English home page

"http://www.unibw-muenchen.de/campus/LRT/LRT13/index_E.html"

NASH

"<http://www.nahsc.volpe.dot.gov>"

National Automated Highway System Consortium

"<http://nahsc.volpe.dot.gov/>"

Serveur WWW du LAAS

"<http://www.laas.fr/laas.html>"

3-D Vision for Autonomous Navigation

"<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/vision/www/samplers/nav3d.html>"

Abstract

"http://www.cs.cmu.edu/~thrun/papers/thrun.robot_mapping.html"

Autonomous Mobile Robotics Lab

"<http://www.cs.umd.edu/projects/amrl/amrl.html>"

Autonomous Navigation

"<http://www.inria.fr/robotvis/personnel/vthierry/acvis-demo/demo1/main.html>"

Christopher M. Brown's Home Page

"<http://www.cs.rochester.edu/users/faculty/brown/home.html>"

Euro-Robots: Mobile Robots Archive

"<http://hpl.essex.ac.uk/Eurobots/>"

ITO Sponsored Research

"<http://www.ito.darpa.mil/ResearchAreas.html>"