

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

3. Metodologia per a la Descripció d'Entorns Feblement Estructurats

El primer pas necessari per assolir la navegació autònoma és l'obtenció, a partir de la informació sensorial, d'una descripció de l'entorn on es troba el mòbil. És a partir d'aquesta descripció, que el subsistema de planificació decidirà la trajectòria que ha de seguir el mòbil. En el nostre context, la navegació en camins feblement estructurats (camins veïnals, camins agrícoles, camins de muntanya, pistes forestals, etc.), la descripció de l'entorn ha d'indicar els límits del camí i, si n'hi ha, la posició dels obstacles presents al seu interior. Aquesta tasca es veu dificultada pel fet que els camins de muntanya no tenen uns límits ben definits, que la seva superfície està formada per diferents matèries, i per les condicions variables d'il·luminació pròpies dels entorns naturals.

Per afrontar aquestes dificultats i poder definir una metodologia de navegació coherent a la tasca que s'ha de realitzar, és necessari fer un estudi de les característiques dels camins feblement estructurats i de les consideracions a tenir en compte quan un vehicle es desplaça per aquest tipus de via. L'anàlisi de la tipologia d'aquests entorns ens ha de permetre obtenir un coneixement a priori que ens serà de gran utilitat a l'hora de definir i implementar una metodologia de navegació.

3.1. Consideracions Prèvies

Com ja hem apuntat al primer capítol, definim un camí mal o feblement estructurat com un espai natural transformat per l'home, sense pavimentar, amb la finalitat de facilitar la circulació de vehicles i persones. La construcció d'aquests camins acostuma a definir un espai pla i sense cap tipus d'obstacle al seu interior. Una altra característica a tenir en compte, és el traçat d'aquests camins, que s'adapta a l'orografia del terreny.

Degut a l'acció de l'erosió, dels elements naturals, i a la manca de manteniment, la superfície d'aquests camins acaba sent, molt sovint, irregular i formada per diferents matèries (herbes, terra, pedres, fulles caigudes dels arbres, tolls d'aigua, etc.). Si a més es té en compte que moltes de les matèries presents als marges del camí són les mateixes que les presents al camí, sovint la determinació dels límits del camí resulta poc clara i, fins i tot, ambigua. Així mateix, el traçat d'aquests camins, i el fet de que als seus marges hi hagi freqüentment arbres i matolls, fan que la visibilitat (distància

màxima a la que es veu la totalitat del camí des d'un punt del camí) sigui reduïda. Totes aquestes característiques, fan que la velocitat màxima a la que es pot desplaçar un vehicle, en un camí d'aquest tipus, estigui limitada (les persones acostumen a conduir a velocitats inferiors als 40 Km/h -11.1m/s-) i en tot cas, la velocitat sempre s'ha d'adaptar a les característiques particulars de la zona del camí en la que es troba el vehicle.

Les vies navegables (autopistes, carreteres, carrers o camins) es construeixen amb l'objectiu d'indicar a les persones que condueixen un vehicle, quina és la zona navegable i on estan els seus límits. Les persones per obtenir aquesta informació utilitzem, bàsicament, el nostre sistema visual. Per tant, resulta evident que el sensor més apropiat per realitzar, en un sistema de navegació autònom, la tasca del seguiment de la carretera o camí sigui la visió per ordinador. Els LRF o altres sensors d'abast, que també són utilitzats en sistemes de navegació autònoms, no permeten trobar els límits de la carretera o el camí, especialment quan els marge i el camí es troben en el mateix pla del terreny.

Ja que s'utilitza la visió per ordinador com sensor per detectar i seguir el camí, seria desitjable, amb el propòsit de minimitzar el cost del sistema, utilitzar el mateix sensor per acomplir l'altre tasca bàsica de tot sistema de navegació autònom, la detecció d'obstacles. Aquest és un dels objectius que ens hem fixat, definir una metodologia d'anàlisi de l'entorn basada en visió per ordinador, per generar la informació necessària per a la navegació utilitzant els sensors i processament de la informació el més simple i eficient possible.

El requeriment essencial de tot sistema de navegació autònom és garantir la seguretat del vehicle i de l'entorn. La forma més simple d'assolir aquest objectiu és evitar les situacions perilloses. Aquest requeriment es pot descompondre en altres quatre:

- Garantir la detecció: El sistema sensorial ha de permetre detectar l'esdeveniment més petit en l'entorn que pot suposar un perill.
- Garantir la localització. La resolució dels sistema sensorial i de la descripció de l'entorn ha de ser prou acurada per prendre i executar les accions correctes.
- Garantir la coherència: La descripció de l'entorn s'ha d'actualitzar prou ràpidament per que representi la situació actual en la que es troba el mòbil.
- Garantir el temps de resposta: El sistema de navegació ha de respondre prou ràpid per poder afrontar els problemes que es presentin.

Els paràmetres bàsics que condicionen aquests requeriments són l'elecció del sistema de percepció que subministri les dades de l'entorn necessàries, la resolució espacial i l'abast i marge de mesura del sistema sensorial, el temps de càlcul necessari per processar les dades subministrades pels sensors i la velocitat del vehicle. Per exemple, si la resolució espacial del sensor és baixa, no serem capaços ni de detectar obstacles petits ni de situar amb fidelitat la seva posició ni la posició dels límits del camí a l'entorn. Per altra banda, si la distància recorreguda pel vehicle entre percepcions consecutives de l'entorn és major que el marge de mesura del sistema sensorial, el mòbil estarà travessant en el seu desplaçament àrees de l'entorn que no han estat analitzades anteriorment, amb els conseqüents perills que això comporta. Per a solucionar aquest problema existeixen quatre alternatives: 1) reduir la velocitat del vehicle, 2) reduir el temps de processament de les dades, 3) reduir el nombre de dades a processar, o 4) augmentar l'abast dels sensors. Normalment, la solució que s'adopta és un compromís entre les quatre.

Les relacions entre velocitat, abast del sensor i temps de càlcul presentades anteriorment poden expressar-se de la següent forma:

$$Y_{max} \geq D_{at} = D_{rea} + D_{fre} = T_{rea} * V + \frac{V^2}{2\mu g} \quad (3.1)$$

La distància màxima observada (Y_{max} , abast màxim del sensor -figura 3.1-) ha de ser més gran o igual a la distància que recorre el vehicle, que es desplaça a velocitat V , des de que un obstacle entra en el camp de visió del seus sensors fins que el vehicle s'atura (D_{at} , distància d'aturada). Aquesta situació correspondria al pitjor cas, on l'obstacle detectat no es pot evitar amb una maniobra de canvi de direcció i per tant, l'única possibilitat per evitar la col·lisió és l'aturada del vehicle. La distància recorreguda pel vehicle abans d'aturar-se davant de l'obstacle (D_{at}), es pot dividir en dues parts: distància de reacció (D_{rea}), distància recorreguda en l'interval de temps des de que l'obstacle entra en el camp de visió fins que es decideix l'aturada (T_{rea} , temps de reacció), i distància de frenat (D_{fre}), distància que es recorre des de que s'activen els frens fins que s'atura el vehicle. La distància de reacció és proporcional a la velocitat del vehicle i al temps de reacció, mentre que la distància de frenat creix amb el quadrat de la velocitat i decreix amb el coeficient de fricció (μ) - g és el valor d'acceleració de la gravetat-. La figura 3.2 ens mostra aquesta relació per a diferents velocitats i temps de reacció, prenent un valor de $\mu=0.5$ (μ és un paràmetre que depèn bàsicament de les característiques del terra, dels pneumàtics del vehicle i de la força de la frenada del vehicle).

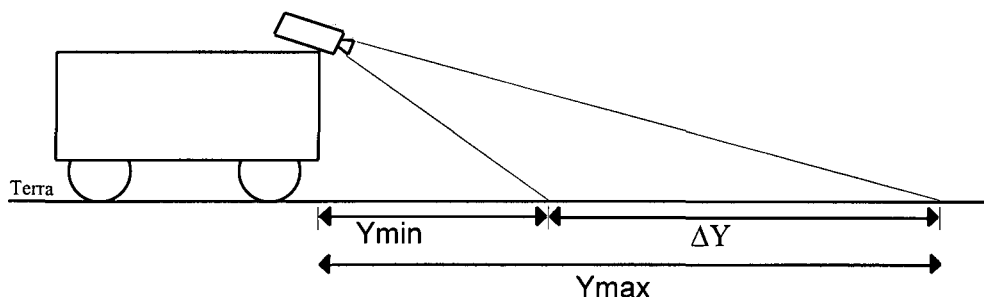


Figura 3.1. Camp de visió d'una càmera com sensor per percebre l'entorn.

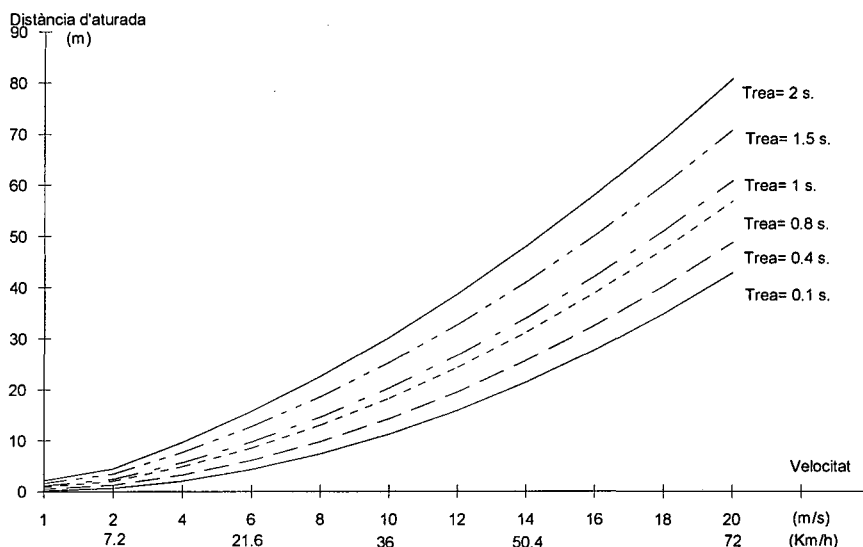


Figura 3.2. Distància d'aturada en funció de la velocitat del vehicle i el temps de reacció del sistema.

D'una altra banda, com el vehicle ha de percebre i analitzar la totalitat del terreny que ha de travessar, la distància recorreguda pel vehicle entre la presa de dues mostres consecutives de l'entorn, ha de ser més petita que el marge de mesura del sistema sensorial (ΔY), és a dir, de la zona de l'entorn que es observada en una imatge. En cas contrari, hi haurà zones de l'entorn per les que passa el vehicle, que no han estat analitzades amb el conseqüent perill que això suposa. La distància recorreguda pel vehicle entre l'adquisició de dues imatges consecutives és proporcional a la velocitat del mòbil i el temps entre l'adquisició de dues imatges consecutives (T_{cicle}). Aquesta restricció de funcionament del sistema queda reflectida en la equació 3.2.

$$\Delta Y \geq T_{cicle} * V \quad (3.2)$$

La figura 3.3 mostra, en funció del temps de cicle, la relació entre la velocitat del vehicle i el marge de mesura mínim necessari per a garantir que s'observa la totalitat de l'entorn pel que es circula.

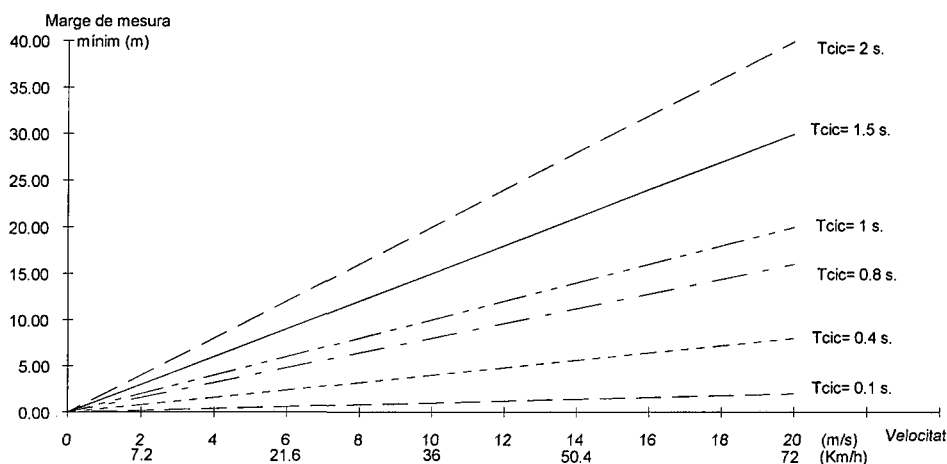


Figura 3.3. Marge de mesura mínim del sistema sensorial en funció de la velocitat del vehicle i el temps de cicle.

Si es volen detectar possibles canvis en l'entorn posteriors al moment on s'analitza una àrea donada i augmentar la fiabilitat de les accions realitzades pel sistema de navegació analitzant en moments de temps i des de posicions diferents una mateixa àrea de l'entorn, cal fixar el marge de mesura del sistema sensorial a un valor que s'aproxima a l'abast màxim del sensor.

Normalment, el primer paràmetre del sistema de navegació que s'acostuma a fixar és la velocitat màxima desitjada del vehicle. A partir d'ell, es determinaran els valors de les característiques del sensor, com ara l'abast i el marge de mesura, i del sistema que ha de processar la informació sensorial, temps de resposta i temps de cicle.

Un altre aspecte important a considerar, és la resolució espacial amb la que és observat l'entorn, ja que ens determinarà la resolució de la descripció que es pot obtenir, i la mida dels objectes més petits que es poden detectar. La resolució espacial amb la que s'observa l'entorn ve determinada per l'àrea de l'entorn que es projecta en un pixel. Aquesta relació és anomenada l'empremta del pixel de la imatge (figura 3.4). Si es considera el model de formació de la imatge de projecció perspectiva (veure Annex A), es pot determinar la mida de l'empremta del pixel de la següent forma:

Siguin $p_1=(x_1, y_1)$, $p_2=(x_2, y_2)$, $p_3=(x_3, y_3)$ i $p_4=(x_4, y_4)$ les coordenades dels 4 punts que delimiten, sobre el pla imatge continu, el pixel (i,j) .

Siguin r_1, r_2, r_3 i r_4 , les quatre rectes que passen pel centre òptic de la càmera i els punts p_1, p_2, p_3 i p_4 , respectivament.

Siguin $P_1=(X_1, Y_1, Z_1)$, $P_2=(X_2, Y_2, Z_2)$, $P_3=(X_3, Y_3, Z_3)$ i $P_4=(X_4, Y_4, Z_4)$ la posició dels punts a l'espai tridimensional de l'objecte que al projectar-se al pla

imatge defineix el valor del pixel (i,j) . Es diu que els punts p_1, p_2, p_3 i p_4 , són la imatge de P_1, P_2, P_3 i P_4 , respectivament. A l'annex A s'inclouen les equacions que permeten determinar el punt imatge p_i d'un punt de l'espai P_i , i com es pot determinar la recta r_{ij} a partir del pixel (i,j) .

L'empremta del pixel (i,j) es defineix com la superfície delimitada pels punts P_1, P_2, P_3 i P_4 .

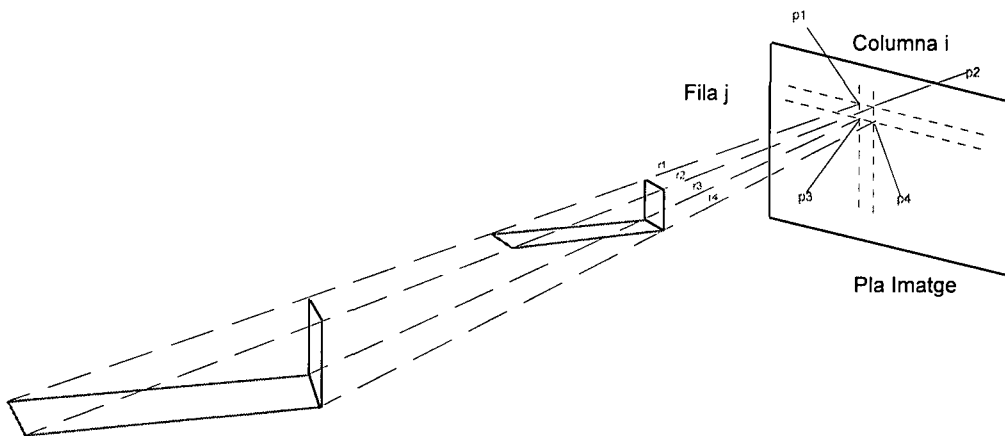
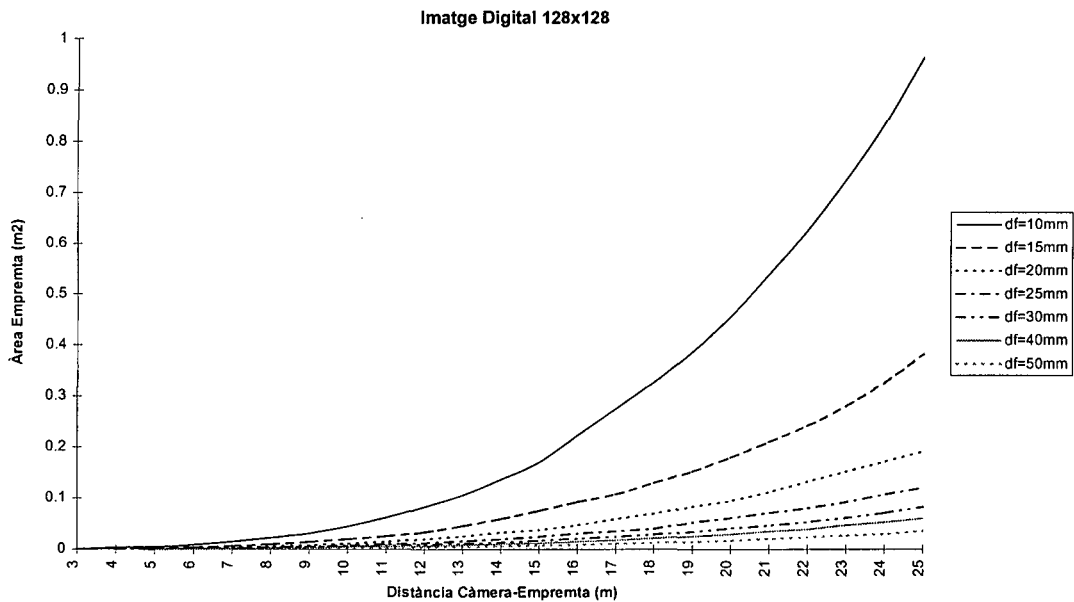


Figura 3.4. Mida de l'empremta del pixel (i,j) en funció de la distància càmera-objecte i de l'orientació relativa objecte-eix de projecció.

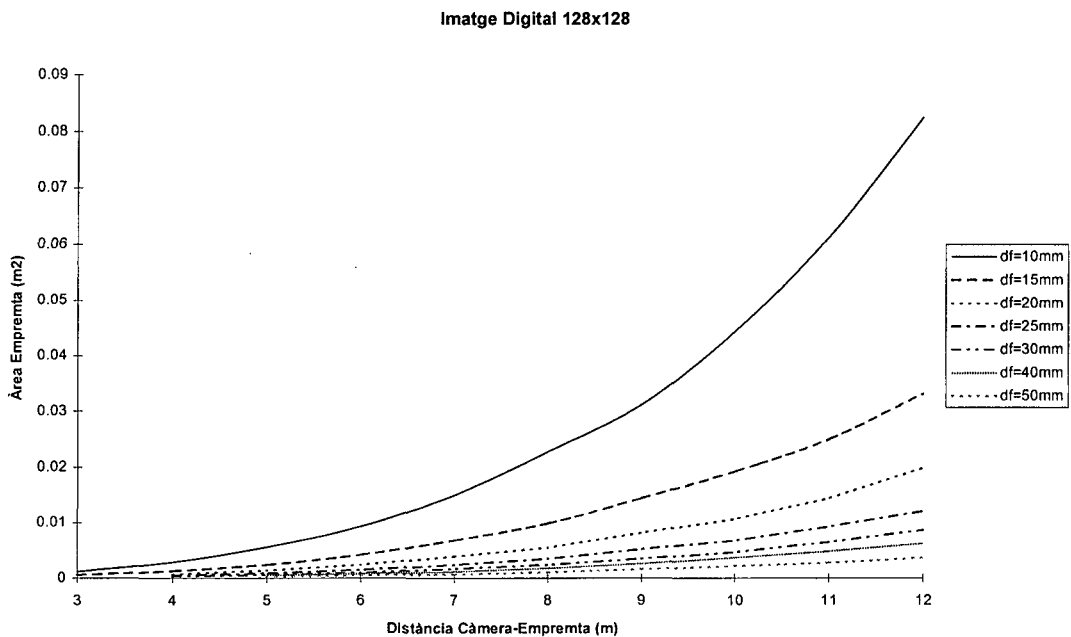
Els paràmetres principals que determinen l'empremta d'un pixel de la imatge són el nombre de pixels que formen la imatge digital (resolució de la imatge), la distància focal de l'òptica de la càmera, la distància entre la càmera i la zona de l'entorn definida per l'empremta del pixel i l'orientació relativa entre la càmera i l'àrea de l'entorn definida per l'empremta. L'augment dels dos primers paràmetres impliquen un augment de la resolució espacial amb la que és observat l'entorn, per contra la resolució espacial amb la que s'observa l'entorn decreix ràpidament amb la distància. Així mateix, fixats els altres paràmetres, la mida de l'empremta és màxima si aquesta es projecta sobre una zona de l'entorn que és paral·lela a la direcció de projecció, i mínima si es projecta sobre una zona de l'entorn ortogonal a la direcció de projecció (figura 3.4).

Com l'increment del nombre de pixels de la imatge digital implica un augment del temps de procés necessari per al seu anàlisi, resulta aconsellable treballar amb una resolució de la imatge que ofereixi un bon compromís entre el detall necessari a observar i el temps de processat. Així mateix, s'ha de tenir en compte que l'augment de la distància focal implica una reducció del camp de visió de la càmera, i per tant de l'àrea de l'entorn que és observada en una única imatge, situació que pot anar en contra de la necessitat d'observar la totalitat de l'entorn que s'ha de travessar (equació 3.2).

Les figures 3.5, 3.6 i 3.7 mostren la relació entre l'àrea de l'empremta d'un píxel (projectada sobre un terra pla), la distància càmera-àrea de l'entorn definida per l'empremta i la distància focal, en imatges de 128x128, 256x256 i 512x512 píxels respectivament. (Aquestes gràfiques s'han generat a partir de les imatges preses amb una càmera situada a 83 centímetres del terra i amb el seu eix focal inclinat -6 graus respecte el terra i de distància focal de 20 mil·límetres).



a)



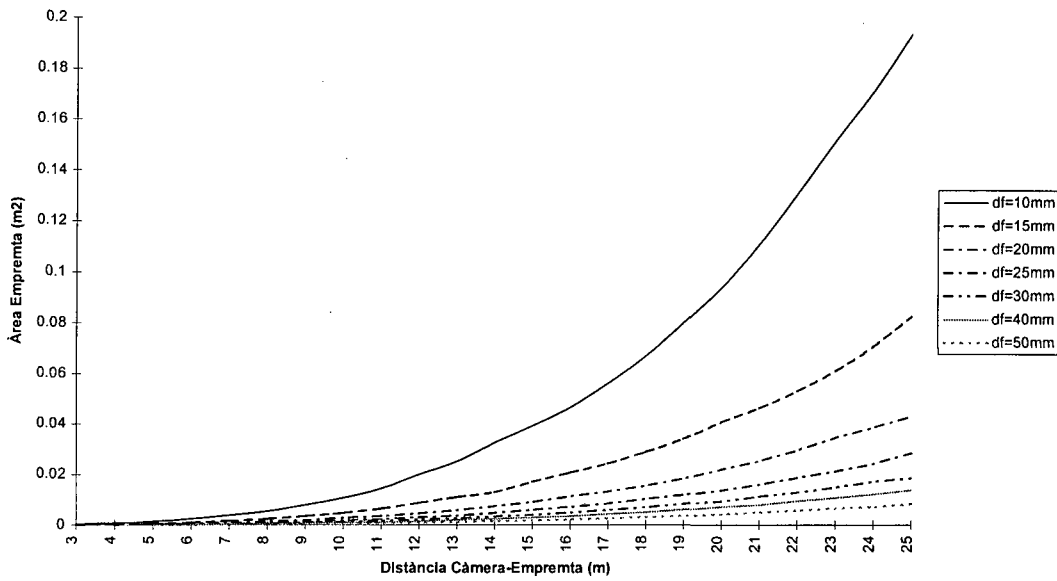
b)

Figura 3.5. Relació entre l'àrea de l'empremta, la distància càmera-entorn i la distància focal de la càmera per a una imatge de 128x128 píxels.

a) Gràfica per a distàncies de 2 a 25 metres.

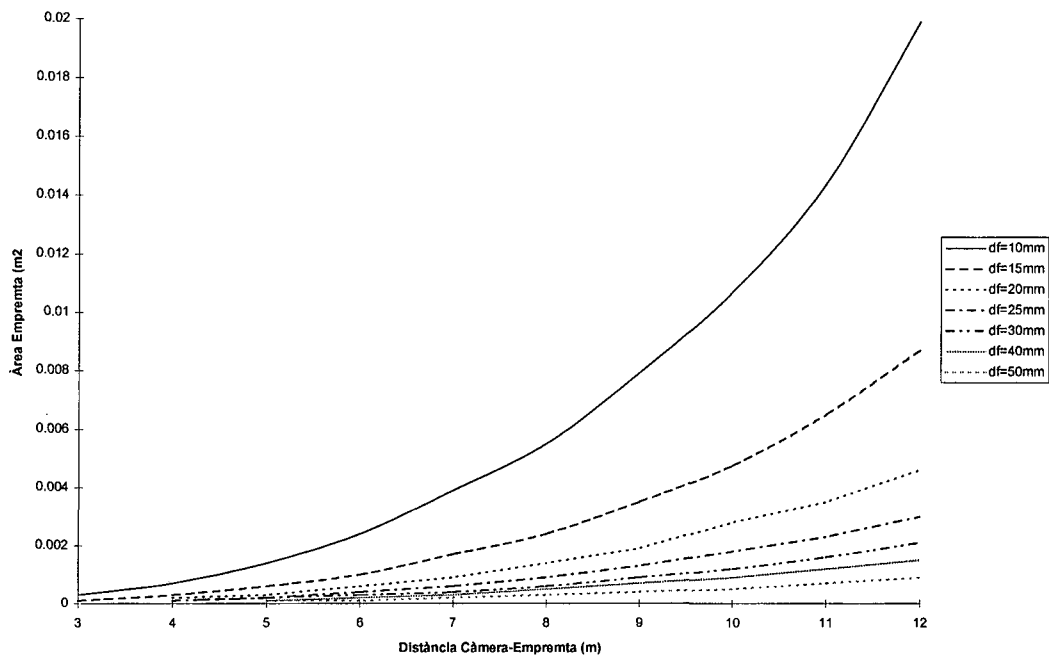
b) Detall de la figura 3.5.a. per a distàncies de 2 a 12 metres.

Imatge Digital 256x256



a)

Imatge Digital 256x256



b)

Figura 3.6. Relació entre l'àrea de l'empremta, la distància càmera-empremta i la distància focal de la càmera per a una imatge de 256x256 pixels.

a) Gràfica per a distàncies de 2 a 25 metres.

b) Detall de la figura 3.6.a. per a distàncies de 2 a 12 metres..

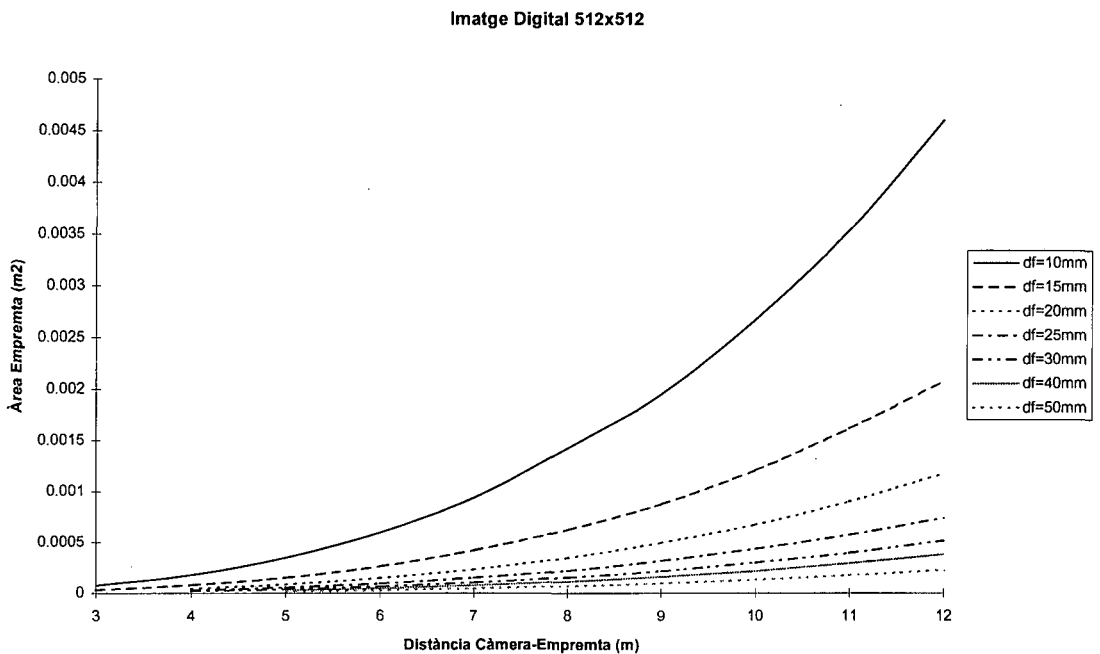
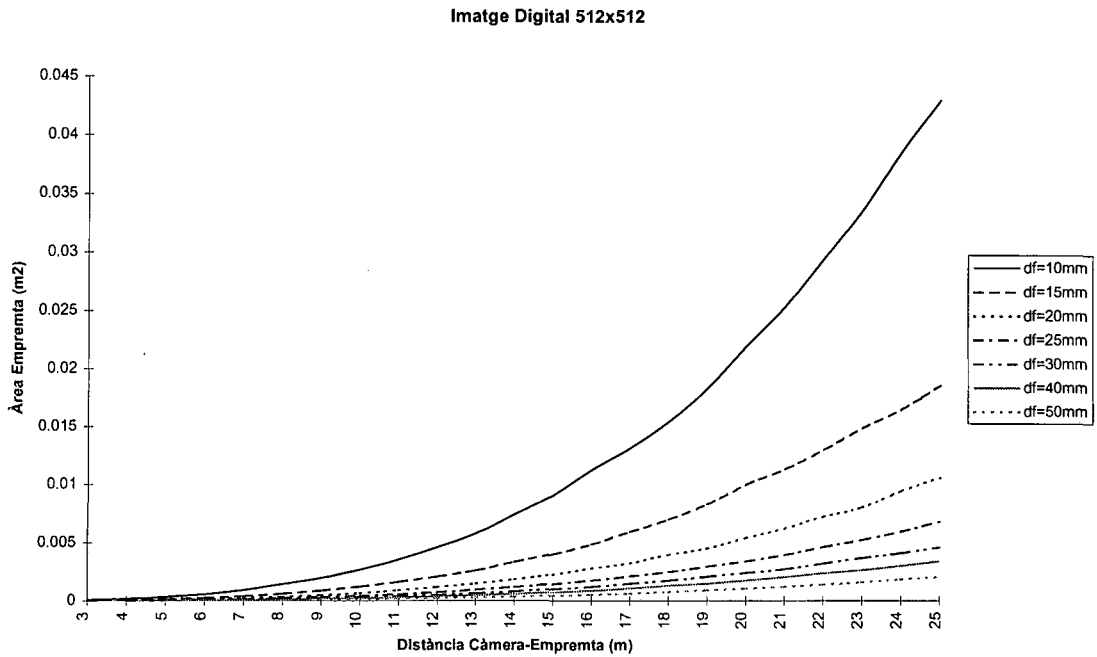


Figura 3.7. Relació entre l'àrea de l'empremta, la distància càmera-empremta, i la distància focal de la càmera per a una imatge de 512x512 pixels.

a) Gràfica per a distàncies de 2 a 25 metres.

b) Detall de la figura 3.7.a. per a distàncies de 2 a 12 metres.

El mateix anàlisi que s'ha realitzat anteriorment, permet definir quina és la mida de la regió de la imatge associada a un objecte de l'entorn. Siguin P_i un conjunt de punts que delimiten l'objecte O , i p_i els seus punts imatge (que queden definits amb les equacions A.1 i A.2). La regió de la imatge associada amb l'objecte O queda delimitada pels punts p_i .

Un altre aspecte a tenir en compte a l'hora de determinar les característiques del sistema de visió, és el fet que el sistema sensorial ha de permetre detectar l'objecte de l'entorn més petit que pugui suposar un perill a una distància superior a la d'aturada, i en particular cal detectar els objectes que puguin suposar un obstacle. La figura 3.8 mostra, per diferents resolucions de la imatge digital i diferents distàncies focals de l'òptica, el nombre de píxels que defineix a la imatge un cilindre de 0.5 metres de diàmetre i 0.5 metres d'alçada, situat a 20 metres de la càmera. Aquesta mesura ens dóna una idea, fixada una configuració del sistema d'adquisició d'imatges, de quina és la distància màxima a la que el cilindre (obstacle) és distingible a la imatge. Els valors presentats a la figura 3.8 s'obtenen definint els quatre punts de l'espai 3D que delimiten el cilindre $-P_1=(X-0.25,0,20.25)$, $P_2=(X+0.25,0,20.25)$, $P_3=(X-0.25, 0.5, 20.25)$ i $P_4=(X+0.25,0.50,20.25)$, i calculant l'àrea que delimiten a la imatge digital els seus punts imatges p_1, p_2, p_3 i p_4 .

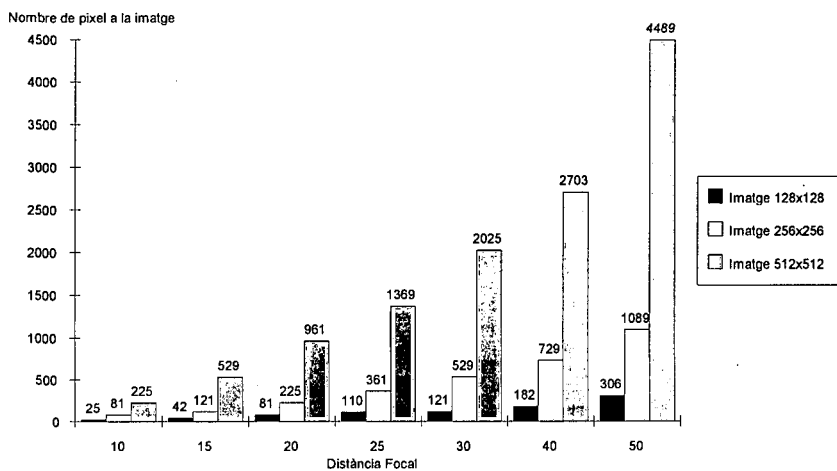


Figura 3.8. Nombre de píxels a la imatge, en funció de la resolució i de la distància focal, associats a un obstacle amb 0.25 m^2 de superfície visible, situat a 20 metres.

Per finalitzar aquest estudi, en la figura 3.9 es compara la resolució amb la que s'observa l'entorn (mida de la empremta), a diferent distàncies càmera-entorn (5, 10, 15 i 20 metres), i el cost computacional en funció de la resolució de la imatge digital¹.

¹ Els valors de la figura 3.9 s'han calculat mantenint constants la resta de paràmetres de sistema de visió, amb una distància focal de 20 mm.

Com es pot observar, el cost computacional creix ràpidament amb la resolució, però la mida de la empremta no decreix al mateix ritme. Passar d'una imatge de resolució de 128x128 pixels a 256x256 pixels comporta una disminució de l'empremta del pixel que pot resultar d'interès. En canvi l'augment de la resolució de la imatge deixa de tenir sentit en el moment en que s'observa l'entorn amb la resolució desitjada.

Com s'ha pogut veure, les característiques del sistema de visió fixen la resolució amb la que s'obté la informació de l'entorn, i sota certes condicions, es pot deduir la posició i la mida dels objectes de l'entorn. A l'annex A es presenta com, a partir del coneixement del procés de formació de la imatge, es pot deduir informació molt útil per navegar de forma autònoma.

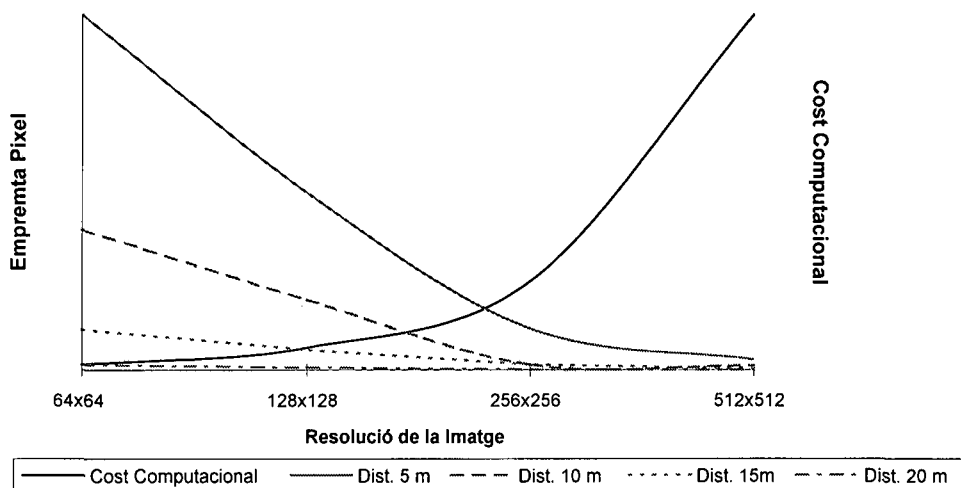


Figura 3.9. Relació entre el cost computacional i la resolució amb la que s'observa l'entorn en funció de la resolució de la imatge.

Així doncs, si es fixa la velocitat màxima desitjada del vehicle, el temps de reacció, la resolució amb la que és necessari localitzar els elements presents a l'entorn i la mida de l'objecte més petit que pot suposar un perill, aquests paràmetres permeten, utilitzant les equacions 3.1 i 3.2, i el coneixement que es té del procés de formació de la imatge, determinar quins han de ser els valors d'altres característiques del sistema, com ara la resolució de la imatge digital, la distància focal de l'òptica, la distància mínima a la que s'ha de detectar un obstacle o el temps de cicle. En l'annex B es presenta el procediment per determinar les característiques del sistema fixades unes condicions d'operació.

No tant sol és necessari un sistema sensorial que subministri prou informació per garantir la seguretat del mòbil i dels elements de l'entorn, sinó que l'estratègia de navegació té una importància clau. De poc serveix tenir informació de l'entorn, sinó

s'en fa un bon ús. Tenint en compte les característiques dels camins feblement estructurats, especialment el fet que sovint siguin estrets i el reduït nombre de vehicles que hi circulen, una estratègia que maximitza la seguretat, és desplaçar-se per la línia central de l'espai lliure del camí, és a dir, per la trajectòria equidistant entre els límits del camí o dels obstacles.

Una vegada satisfetes les condicions de seguretat en la conducció, els altres requeriments importants són oferir millors prestacions (major velocitat, major fiabilitat, etc.) i minimitzar el cost del sistema del sistema de navegació autònom. Aquests requeriment són oposats, ja que normalment, l'augment de les prestacions del sistema implica un increment de la seva complexitat i el seu cost.

3.2. *Mètode Proposat per a la Descripció d'Entorns Feblement Estructurats*

La metodologia que es proposa per a la determinació de camins navegables en entorns naturals, es basa en l'anàlisi d'una seqüència d'imatges color subministrades per una càmera situada en el vehicle, per localitzar els límits del camí i detectar la presència d'obstacles, assumint que el vehicle es troba inicialment a l'interior del camí i que disposa de sensors odomètrics que permeten conèixer el desplaçament relatiu del vehicle.

La detecció i localització dels límits del camí i dels obstacles ens permet construir una descripció de l'entorn en la que s'indica quin és l'espai transitable de l'entorn, apte per al guiatge de mòbils en aquest tipus de vies.

La majoria dels sistemes de navegació autònoms fixen un conjunt de restriccions a partir de les característiques de l'entorn on opera. Tenint en compte les característiques dels camins feblement estructurats transitables, s'assumeix que aquests presenten les següents restriccions:

1. L'amplada del camí és continua. Encara que un camí pot presentar diferents amplades, la variació de l'amplada del camí s'assumeix que és inferior a un valor prefixat. Sigui $A(t)$ l'amplada del camí a la posició t , llavors

$$\left| \frac{dA(t)}{dt} \right| \leq \text{Variació amplada màxima}$$

2. La direcció del camí és continua. Els camins estan formats per trams rectilinis i curvilinis, però no presenten variacions brusques, és a dir, la variació de la

direcció del camí s'assumeix que és inferior a un valor prefixat. Sigui $D(t)$ la direcció del camí a la posició t , llavors

$$\left| \frac{dD(t)}{dt} \right| \leq \text{Variació amplada màxima}$$

3. El pendent del camí és localment constant. No es produeixen variacions importants del pendent en l'àrea captada en una única imatge.
4. La superfície del camí, en l'àrea captada en una única imatge, està formada per un nombre petit de matèries diferents que defineixen zones d'àrea significativa.

Aquestes assumpcions són les que s'utilitzen per definir el model genèric de camí feblement estructurat, i de les que es farà ús a la metodologia amb l'objectiu de reduir el temps de procés i de garantir que la descripció de l'entorn generada presenta les característiques d'un camí transitable. Les restriccions considerades no resulten cap limitació important ja que són condicions que es satisfan, en la majoria dels casos, en els entorns d'operació considerats. En els casos on el camí que es segueix no presenti les característiques del model genèric, la descripció generada no indicarà de forma exacta quina és la zona ocupada pel camí a l'entorn (per exemple si l'amplada del camí és discontinua en un punt, la variació de l'amplada del camí quedarà reflectida a la descripció de l'entorn de forma contínua i progressiva), la qual cosa no implica que la descripció, malgrat la seva inexactitud, no permeti determinar una trajectòria adequada per al vehicle.

El fet que els objectes situats al marge d'un camí traçat en un entorn natural limitin la visibilitat, fa que quan hi ha un canvi important de la direcció del camí, la zona del camí posterior no sigui, generalment, visible. Per aquesta raó, la detecció de cruïlles i bifurcacions, en molts casos, només és possible amb un anàlisi de la zona del marge del camí on es creu que es troba (o on es busca si ja es disposa d'un mapa de l'entorn) la cruïlla o bifurcació. La resolució d'aquest problema passa per la utilització de varies càmeres o per la disposició d'una càmera sobre un suport giratori que permeti capta imatges en diferents direccions, i una estratègia per decidir quan s'ha d'analitzar les diferents imatges, en el primer cas, o quan s'ha de canviar la direcció d'observació de la càmera en el segon cas. La resolució d'aquest problema no ha estat abordat en aquesta tesi.

En la metodologia proposada es distingeixen dues parts (figura 3.10), la primera, la segmentació de la imatge, en la que es defineix quina és la zona de la imatge associada al camí, i la segona, l'anàlisi de la seqüència d'imatges, en la que es detecten els possibles obstacles presents a l'interior del camí, es posicionen el camí i els obstacles

al món tridimensional, i es verifica la coherència de la posició de camí i obstacles al llarg de la seqüència d'imatges. Com a resultat d'aquests processos, s'obté una descripció de l'entorn en la que s'indica quina àrea de l'entorn es travessable (camí) i quines no ho són (marge o obstacle).

Tant el procés de segmentació de les imatges, en regions corresponents al camí, els obstacles i els marges, com la generació i actualització de la descripció de l'entorn, es basen en el coneixement a priori que es té de l'escena, que està disponible en el model genèric, i en la descripció del camí pel qual es circula. L'anàlisi de la seqüència d'imatges permet d'una banda garantir la coherència en el temps de la descripció del camí obtinguda, i d'una altra, la detecció d'obstacles.

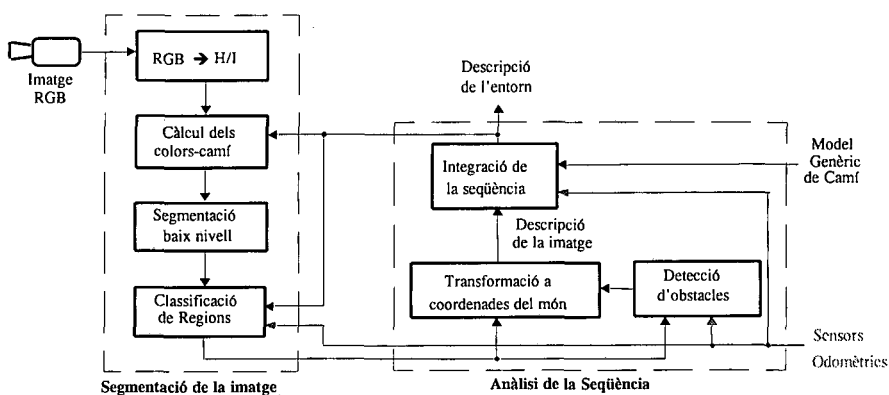


Figura 3.10. Procés de determinació de camins navegables en entorns feblement estructurats.

Aquesta descripció de l'entorn, en la que s'indica la presència i posició del camí i dels obstacles, s'obté bàsicament en cinc etapes, que són:

1. *Segmentació de la imatge per anàlisi del color.* La segmentació de les imatges es realitza en tres passos: a) transformació de les imatges RGB subministrades per la càmera a l'espai de representació del color H/I, que proposem amb l'objectiu de minimitzar la influència de la condicions d'il·luminació en l'escena i reduir el volum d'informació a processar, b) determinació dels colors de les matèries que formen la superfície del camí en l'àrea analitzada, calculant quins són els colors més freqüents en la zona del camí més propera al vehicle, i c) segmentació de baix nivell de la imatge, utilitzant un algorisme de creixement de regions sobre la imatge H/I, que s'ha adaptat a les característiques de l'escena que s'està analitzant.
2. *Classificació de les regions de la imatge,* tenint en compte el seu color i la seva posició a la imatge respecte la posició esperada del camí a la imatge actual. Les regions es classifiquen en tres categories: camí, obstacle potencial i marge. El resultat d'aquesta etapa és una primera aproximació a la descripció de l'entorn.

3. *Detecció d'obstacles*. Càlcul de l'alçada dels objectes associats a les regions classificades com obstacles potencials. Per a la detecció d'obstacles proposem un mètode que es basa en l'anàlisi de l'evolució de la mida de les regions en la seqüència d'imatges. A partir d'aquesta anàlisi s'obté una estimació de l'alçada de l'objecte que ha generat la regió analitzada en la seqüència d'imatges, que permet classificar la regió com obstacle, si l'alçada estimada de l'objecte sobrepassa un llindar, o com camí, si l'objecte té una alçada inferior al llindar i per tant resulta ser un altre tipus de material que també forma part de la superfície del camí.
4. *Descripció de la imatge*. Representació en un sistema de coordenades referenciat al món, de la informació obtinguda de l'anàlisi de l'última imatge captada. La descripció de la imatge s'obté a partir del posicionament respecte un sistema de coordenades referenciat al món (que normalment està associat a la posició actual del vehicle), de les regions de la imatge classificada i dels obstacles detectats.
5. *Descripció de l'entorn*, a partir de la combinació de les descripcions de les imatges generades durant l'anàlisi de la seqüència d'imatges captades mentre el mòbil es desplaça al llarg del camí. En aquest pas s'integra tota la informació present a la seqüència d'imatges, i es verifica la coherència de la posició del camí i dels obstacles a l'entorn en la seqüència d'imatges.

Les dues primeres restriccions del model genèric de camí feblement estructurat, ens han de permetre determinar la posició dels límits del camí en aquelles zones on la seva situació és poc clara o ambigua (degut a la similitud entre el camí i el marge en aquella zona), la tercera restricció permet conèixer l'error màxim en el procés de posicionament al món de les regions de la imatge, i la quarta s'utilitza per limitar durant el procés de segmentació el nombre màxim de regions, i indicar la mida mínima de les regions que són d'interès per a l'anàlisi de la imatge.

Als capítols 4 i 5 es descriu cada una de les etapes de la metodologia proposada, introduint i comentant les possibles alternatives en cada etapa i justificant les opcions i solucions triades. En el quart capítol discutirem sobre el tipus d'informació més idònia per segmentar imatges captades en entorns naturals exteriors, els algorismes de segmentació adequats per aquestes escenes i finalment, es presenta com es classifiquen les regions de la imatge per obtenir una primera aproximació d'on es troba el camí en la imatge analitzada i quines regions poden estar associades a obstacles.

En el capítol 5, es presenta i discuteix el procés de detecció d'obstacles i la generació de la descripció de l'entorn a partir de l'anàlisi d'una seqüència d'imatges. Finalment, en el capítol 6 es realitza l'avaluació de la metodologia proposada i es presenta els resultats que s'obtenen en l'anàlisi de seqüències d'imatges captades en condicions reals d'operació.