

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

2. Antecedents

Els primers sistemes de transport automatitzats van aparèixer a la indústria pel desplaçament de peces entre els punts que formen una cadena de fabricació, alguns d'ells són les cintes transportadores, les línies tansfers, etc. Aquests sistemes resulten molt rígids, de recorregut petit i el tipus d'objectes que poden transportar està molt limitat. Cap a l'any 1950 l'empresa nord-americana Barrett Electrònics, va desenvolupar el primer vehicle guiat autònomament -en anglès Automated Guided Vehicle o AGV-. Un AGV està format per un sistema de locomoció -normalment anomenat vehicle-, un conjunt de sensors que subministren informació de l'entorn en que es troba l'AGV i un sistema de control que s'encarrega de guiar el vehicle pel camí desitjat a partir de la informació sensorial. Els AGV es poden considerar com el primer sistema de transport autònom, donada les seves prestacions en terme de flexibilitat, distància recorreguda i diversitat d'objectes que poden transportar.

No va ser fins els anys 70, quan la nova tecnologia de circuits integrats va permetre construir controladors per AGV prou sofisticat, que no es va produir una difusió notòria a la indústria dels AGV. Els primers AGVs eren només autònoms des del punt de vista que no necessiten una persona per la seva conducció, però la seva autonomia és molt limitada, ja que només són capaços de seguir els camins preestablert i s'aturen quan es detecta una situació anòmala, com ara trobar-se amb un obstacles en el seu camí, fent en aquests casos necessària l'actuació humana. Segons la tècnica utilitzada per a la definició de les rutes fixes que pot seguir l'AGV, els sistemes es classifiquen en:

- Optoguiats. Es marquen línies al terra amb pintura o altre tipus de material que presenti un gran contrast amb el terra. En aquests sistemes, els sensors són un conjunt de fotodetectors, que donada la diferent reflectància del terra i la línia, s'encarreguen de detectar la posició de la línia. El control consisteix en variar la direcció del vehicle amb l'objectiu de fer-lo avançar sempre sobre la línia de referència.
- Filoguiats. En aquest cas s'utilitza un fil conductor, normalment soterrat, pel que es fa passar un senyal elèctric. El vehicle està equipat amb sensors magnètics per a la detecció del fil. L'estratègia de control és la mateixa que en el cas anterior.

Les aplicacions més habituals dels AGV són el transport de material entre els magatzems i els punts de producció d'una fàbrica.

Una evolució dels AGV són els sistemes que utilitzen balises (punts o zones de l'entorn que permeten localitzar el vehicle), que poden ser detectats de forma remota, i un mapa per navegar de forma autònoma. En aquest cas, la ruta que ha de seguir el vehicle no està prefixada. Aquests sistemes no requereixen d'una modificació significativa de l'entorn on s'ha d'operar (alguns sistemes requereixen únicament de la disposició a l'entorn de balises artificials com poden ser reflectors de llum o elements amb un codi identificador). Les aplicacions més habituals d'aquests sistemes són la distribució de correu per oficines, la neteja d'espai públics (andanes de tren i metro, aeroports, etc.) o la distribució de menjar i roba en hospitals.

Poc després es va començar a pensar en la possibilitat de realitzar sistemes més complexos com vehicles militars autònoms, vehicles per transport de materials perillosos, vehicles d'exploració planetària o automòbils amb un sistema de "pilot automàtic". En aquests casos, o bé l'entorn no és modificable, o bé no es vol o no es poden definir unes rutes fixes que el vehicle haurà de seguir. Aquests sistemes ja es poden considerar totalment autònoms ja que a partir de la percepció de l'entorn, han de triar el camí que han de seguir, evitant els possibles obstacles presents, tot això sense cap tipus d'intervenció humana. Aquests sistemes es basen necessàriament en un coneixement més ampli i actualitzat de l'entorn que els AGV, la qual cosa implica la utilització de sensors més sofisticats, com ara els sensors d'abast per ultrasons, els lectors làser, la visió per ordinador o sensors de telemetria làser.

Va ser a la dècada dels 80 quan diverses institucions públiques van finançar un bon nombre de projectes pel desenvolupament de vehicles autònoms. Els projectes més rellevants són:

- ALV -Autonomous Land Vehicle- i UGV -Unmanned Ground Vehicle-, finançat pel ARPA, EE.UU.
- PROMETEUS, VOILA i SKIDS, finançats per la Comunitat Europea.
- PSV finançat pel govern Japonès.

Ha estat en el marc d'aquests projectes que es van obtenir els resultats més espectaculars i esperançadors, encara que no es van assolir uns sistemes prou complets i fiables, com per pensar que el problema de la navegació autònoma havia estat resolt.

Per tant, la recerca en el camp de la navegació autònoma continua activa, havent avui en dia un gran nombre de grups treballant en aquest camp, d'una forma menys ambiciosa, ja que es continuen perseguint els objectius que s'havien marcat als anys

80, però d'una manera molt més pragmàtica, ja que es busquen solucions viables en el marc de la tecnologia actual i prou fiable per a la seva utilització en entorns concrets, i sota unes restriccions de funcionament imposades.

Els mètodes i recursos que s'han utilitzat per assolir la navegació autònoma, depenen bàsicament de les característiques de l'entorn en el que s'ha de desplaçar el mòbil, de la tasca que ha de realitzar i de les característiques del mòbil. Així doncs, es troben avui en dia una gran quantitat d'enfocaments per resoldre el problema del guiatge de mòbils, on cada un dels quals està dissenyat i implementat per treballar en unes condicions determinades, amb més o menys restriccions.

Les solucions proposades fins ara, les podem classificar en les següents categories :

Guiatge en Entorns Interiors Estructurats

- Ruta fixada (filoguiat, optoguiat)
- Guiatge a partir de referències (balises situades a l'entorn o anàlisi de l'estructura de l'entorn)

Guiatge en Entorns Exteriors Estructurats

- Zones urbanes
- Carreteres i autopistes

Guiatge en Entorns Exteriors No Estructurats

- Tot terreny (també referenciats com Cross-country, Cross-Rover o vehicles militars)
- Exploració planetària
- Exploració submarina

A continuació es presenten els treballs més rellevants que s'han realitzat pel desenvolupament de vehicles autònoms en aquest tres tipus d'entorns, i especialment aquells que són més propers a la metodologia que es proposa, vehicles que es basen principalment en la visió per ordinador per obtenir informació de l'entorn on s'ha de desplaçar el vehicle.

2.1. Entorns Interiors Estructurats

En els últims 15 anys, s'han desenvolupat un gran nombre de sistemes de navegació autònoms per entorns molt ben estructurats (anomenats en anglès indoor) -navegació en edificis i plantes industrials- capaços de satisfer moltes aplicacions. Aquests sistemes són els que es coneixen avui en dia amb el nom de AGV. Els entorns interiors es caracteritzen per ser d'extensió limitada, i construïts per l'home amb una

certa organització, la qual cosa fa viable el coneixement a priori amb prou detall de l'entorn i/o la incorporació a l'entorn de senyals de referència. D'aquesta forma, dos dels problemes més complexos -la localització del mòbil i la determinació del camí que ha de seguir- són de relativament fàcil resolució. Les tècniques de navegació més utilitzades pels AGV són el filoguiat o l'optoguiat, on el vehicle només pot seguir una trajectòria definida mitjançant per un cable soterrat pel que es transmet un senyal de referència o un línia marcada sobre el terra. Una opció més flexible és la localització del vehicle en l'entorn mitjançant la detecció remota de marques amb lectors làser i la disposició d'un mapa de l'entorn. En aquest cas, la trajectòria que ha de seguir el mòbil no està prefixada.

Aquests sistemes es basen en el coneixement previ del món on ha de desplaçar-se el vehicle (mapa del món i/o coneixement d'algunes de les seves característiques) i en la identificació de referències que permeten localitzar el mòbil en el món i planificar la seva trajectòria fins la posició objectiu, utilitzant sensors simples (sensors ferromagnètics, ultrasons, sensors òptics) i tècniques de baix cost computacional.

Avui en dia, hi ha un bon nombre d'empreses que comercialitzen AGV de característiques i prestacions diverses [CR 96], amb l'objectiu de solucionar les diferents aplicacions, al cost més ajustat. Aquests sistemes requereixen d'un coneixement de l'entorn on s'ha de desplaçar el mòbil i de la seva adaptació o instal·lació específica per fer possible el guiatge autònom.

D'altre banda, hi ha un bon nombre d'Universitats que treballen en el desenvolupament de sistemes de navegació més flexibles, amb capacitat de percepció visual per reconèixer, construir i actualitzar el mapa de l'entorn dinàmicament i detectar els obstacles que puguin aparèixer en la seva trajectòria. Aquests sistemes, a diferència dels anteriors, no exigeixen cap instal·lació i/o modificació de l'entorn on s'ha de desplaçar el vehicle.

Un dels primers sistemes de navegació autònoma en entorns interiors va ser realitzat a la Universitat de Stanford [Moravec 83]. El Stanford Cart està equipat amb una càmera montada sobre un suport mòbil, que li permet mitjançant la tècnica d'estereovisió, localitzar els objectes que es troben al seu voltant (en un espai 3D centrat a la posició del mòbil) i dedueix el seu propi moviment. El primer pas a realitzar amb el mòbil és la calibració del sistema de visió a partir d'una escena patró. Posteriorment, durant el funcionament, el sistema pren nou imatges per diferents posicions de la càmera. A la imatge central s'extreuen uns punts d'interès -pixels que

en el seu veïnat 6x6 presenten un gran contrast-, que posteriorment són relacionats amb les altres vuit imatges mitjançant la tècnica de correlació, amb l'objectiu de determinar la posició 3D de cada un d'aquests punts de l'escena. La correlació es realitza inicialment sobre les imatges reduïdes 16 vegades per disminuir el temps de procés. Per aquestes imatges, es memoritzen les posicions dels píxels que en les vuit imatges restants donen la millor correlació amb la finestra 6x6 que conté cadascun dels punts d'interès de la imatge central. Aquestes posicions s'utilitzen per indicar l'àrea on s'haurà de realitzar la correlació sobre les imatges reduïdes 8 vegades. Aquest procés es realitza de forma repetida fins la realització de la correlació sobre les imatges originals, obtenint d'aquesta forma una bona resolució espacial a l'hora d'establir la correspondència entre els punts d'interès de les diferents parelles d'imatges. El mòdul Navegador planeja un camí fins el destí que eviti els obstacles percebuts amb un cert marge de seguretat, i posteriorment genera les comandes als motors per desplaçar el mòbil una distància d'un metre. L'única informació que utilitza el Navegador és la subministrada pel sistema de visió, assumint que tot l'espai observat és navegable tret dels llocs on apareix un núvol de punts d'interès, que es considera un obstacle. Com aquest moviment no és molt acurat, el desplaçament real del vehicle es calcularà a partir de l'anàlisi de nou noves imatges captades a la nova posició, observant com han variat les posicions dels punts d'interès en les dues darreres escenes captades, podent així determinar a partir de la visió el desplaçament realitzat pel mòbil.

HILARE és un robot mòbil desenvolupat al *Laboratoire d'Automatique et Analysis de Systemes* (LAAS) de Toulouse [Robert 86]. En aquest cas la descripció de l'escena s'obté integrant la informació subministrada per un mòdul d'estereovisió, un làser per mesura de distància (Laser Range Finder, LRF), un anell de sensors d'ultrasons i un mòdul de visió monocular dinàmica. Els autors justifiquen la redundància de sensors per la complexitat dels entorns en que es desplacen els robots mòbils, i a la diversitat de tasques que han de realitzar, a més de fer possible l'eliminació de les ambigüitats que es produeixen quan només es fa servir un únic sensor. El sistema de visió fa servir els segments rectilinis com element base. Mitjançant la tècnica d'estereovisió, aparellant els segments rectilinis que apareixen a les dues imatges, es calcula la posició 3D de les cantonades dels objectes de l'escena associades al segments rectilinis de la imatge. A partir de la transformada de Hough, s'aparellen aquells segments rectilinis que són coplanars i amb l'ajuda de la telemetria làser, que analitza la profunditat dels plans 3D delimitats pels segments coplanars, es dedueix la posició i l'orientació de les superfícies dels objectes presents a l'escena. A partir d'aquesta informació, es construeix una descripció de l'entorn que permeti trobar els espais

lliures per on es pot desplaçar el mòbil. El mòdul de visió dinàmica analitza la seqüència d'imatges captades (una cada 20 centímetres de recorregut) amb l'objectiu de corregir les derives, respecte de la consigna, que es generen en el moviment del vehicle. El sistema funcionarà correctament, si en l'entorn apareixen un gran nombre de segments rectilinis que permetin l'obtenció d'una descripció prou detallada de l'escena i, d'aquesta forma, la possibilitat de calcular una trajectòria adequada pel mòbil.

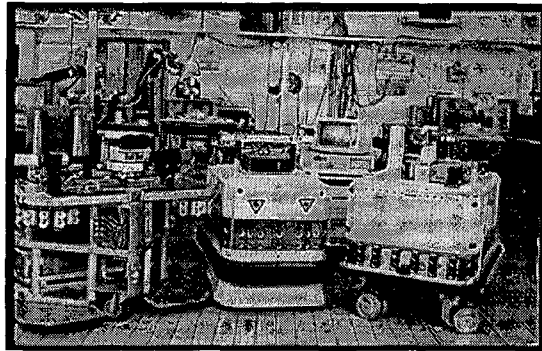


Figura 2.1. Aspecte actual del robot mòbil HILARE.

Amb posterioritat a aquests treballs pioners que tenen com a característica comú l'elevat temps de procés, i com a conseqüència una velocitat de desplaçament del mòbil lenta, s'han desenvolupat altres sistemes molt més eficients que operen sota unes condicions determinades de l'entorn, vàlides en molts entorns interiors. Entre ells podem incloure dos treballs realitzats al Departament d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica Industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Martínez i altres [Martínez 92] proposen un sistema de navegació per entorns interiors que utilitza l'odometria com sensor que ens indica la posició aproximada del mòbil, i l'anàlisi mitjançant visió dels elements estructurats presents al sostre (florescents, tubs, conduccions elèctriques o d'aire condicionat, etc.) per eliminar els errors de posició i orientació inherents a l'odometria. Així mateix, el sistema fa servir un sensor d'ultrasons per a la detecció d'obstacles en la trajectòria que segueix el mòbil. El guiatge del mòbil consisteix en el seguiment de l'estructura present al sostre, la qual indica la trajectòria i l'orientació de referència al mòbil. El posicionament absolut es realitza mitjançant la identificació de patrons presents al sostre amb posició coneguda, que han estat memoritzats prèviament. Quan el vehicle es desplaça entre dos d'aquests patrons, la seva posició s'estima mitjançant la informació subministrada per l'odometria. Els autors proposen una implementació en temps real basada en l'extracció de línies rectes utilitzant un "convolver" de 7x7 píxels. Amb l'objectiu que la convolució sigui el més sensible possible a les rectes d'una determinada orientació, els valors dels coeficients de la convolució es modifiquen dinàmicament.

En un altre treball d'interès [Pagès 93], els autors proposen un sistema de navegació autònoma per entorns industrials a baix cost. La generació d'un model de l'entorn es basa en un sistema d'estereovisió i en l'assumpció que els límits dels elements que formen l'entorn i els obstacles són ortogonals. La informació tridimensional de l'entorn s'obté mitjançant la disparitat de les línies rectes verticals presents en dues imatges. El nombre reduït de segments verticals que apareixen en les imatges, simplifica el procés d'aparellament de característiques, un dels problemes més importants de l'estereovisió. A partir de la posició 3D dels límits dels elements que formen l'entorn (parets, màquines, cintes transportadores, etc.) es construeix un model de l'entorn si aquest no existeix, o s'actualitza, si cal, en cas d'existir. En aquest últim cas, la informació subministrada pel sistema de visió es pot comparar amb el model ja existent, per així posicionar de forma absolut el vehicle en l'entorn.

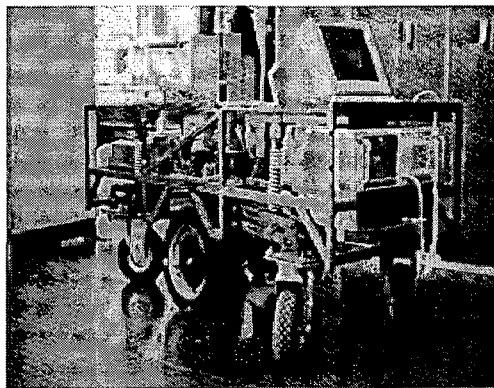


Figura 2.2. Eixerit, vehicle autònom desenvolupat a la Universitat Politècnica de Catalunya.

En [Lebègue 92] els autors presenten un sistema d'extracció i classificació de segments rectilinis a la imatge associats a línies paral·leles en l'espai 3D. Aquesta tècnica es basa en que totes les línies paral·leles de l'espai 3D tenen un mateix punt de fuga a la imatge. Si es calibra el sistema de visió, es pot determinar la posició a la imatge dels punts de fuga associats a unes direccions determinades de l'espai 3D, que els autors fan coincidir amb la direcció vertical i les dues horitzontals que són les predominants en els entorns interiors (corredors, sales, etc.). Amb l'objectiu de simplificar el processament, només s'extreuen aquells segments rectilinis de la imatge que passen per un dels punts de fuga definits per les tres direccions que es consideren. A partir de la posició 3D de les línies detectades, es pot definir l'espai lliure de l'entorn per on es pot desplaçar el vehicle.

Chenavier i Crowley proposen en [Chenavier 92] un mètode de navegació, per a entorns conegut a priori, basat en visió i odometria. Aquest mètode combina

l'estimació de la posició del vehicle mitjançant els sensors odomètrics amb la búsqueda de referències en l'entorn conegudes a priori per a corregir els errors inherents a l'odometria. En tot moment, el sistema coneix la posició aproximada del vehicle en l'entorn i modifica l'orientació de la càmera per a captar en la imatge un conjunt de referències de les quals es coneix la seva posició. La localització del vehicle es fa utilitzant un filtre extès de Kalman, que combina el desplaçament relatiu del vehicle -subministrat pels sensors odomètrics- i la localització absoluta obtinguda mitjançant l'anàlisi de les imatges. Els resultats experimentals d'aquest mètode permeten localitzar el vehicle en una habitació de 15x15 metres utilitzant 5 referències amb un error de 3 centímetres en la posició i 1° en l'orientació.

Brady, Wang i Li de la Universitat d'Oxford proposen un algorisme [Wang 92] [Li 95], anomenat DROID, per a la navegació basada en la visió. El sistema es basa en dues càmeres monocromàtiques muntades sobre el robot. El primer pas del processament de les imatges és l'extracció de punts singulars, a partir de la detecció de vèrtexs en la seqüència d'imatges binoculars. La informació 3D s'obté a partir de la disparitats dels punts singulars que s'aparellen fent servir les tècniques de correlació normalitzada i el gradient de la disparitat. Finalment, el moviment del vehicle i l'estructura de l'escena es calculen seguint els punts singulars en la seqüència, utilitzant un filtre de Kalman. Aquest algorisme ha estat implementat de forma paral·lela.

En el LAAS de Toulouse han continuat desenvolupant nous sistemes de percepció per a la construcció de models i la navegació autònoma en entorns interiors. Un d'ells es basa en la utilització d'un làser de mesura de distància (en anglès Laser Range Finder - LRF-) i un anell de 32 sensors ultrasònics [Bulata 94]. La modelització de l'entorn consisteix en una matriu d'ocupació (que indica si una àrea de grandària $n \times m$ de l'entorn està lliure o ocupada) que es genera i actualitza a partir dels sensors d'ultrasons. El LRF s'utilitza per detectar referències que es troben de forma natural a l'entorn (cantonades, portes, parets) per a la seva inclusió al model. Aquestes referències són utilitzades posteriorment per a la localització del mòbil a l'entorn.

Alguns treballs més recents [Yagi 95] [Delahoche 97], proposen la utilització d'un sistema de visió omnidireccional, consistent en la disposició sobre l'eix òptic de la càmera d'un mirall cònic que permet projectar en el pla imatge un camp de visió de 360° al voltant de l'eix òptic. En aquest tipus de sensor, les línies verticals de l'entorn, que són utilitzades com referències, es veuen transformades en línies radials que passen pel centre de la imatge; d'aquesta forma, a cada línia vertical detectada a la imatge se li associa un angle d'azimut. La localització del mòbil en l'entorn es fa

comparant l'angle associat a les referències detectades respecte un mapa de l'entorn construït a priori, i de la informació subministrada pels sensors odòmetrics. Aquestes informacions són fusionades utilitzant un filtre extès de Kalman.

Com es pot veure tots aquest sistemes es basen en l'assumpció de que en la informació obtinguda de l'entorn es pot extreure unes característiques (vèrtexs, segments rectilinis, cantonades i/o parets, etc.) que estan associades als elements d'interès de l'entorn, com són els límits de l'espai navegable (parets, maquinària, etc.) i els obstacles. Així mateix, aquests sistemes, donat els requeriments de les tasques que realitzen, no requereixen desplaçar-se a grans velocitat, admetent d'aquesta forma temps de processament més llargs.

2.2. Entorns Exteriors Estructurats

Els primers treballs en entorns exteriors (anomenat en anglès outdoor environments) es van centrar en el desenvolupament d'un sistema de navegació autònoma per carreteres i autopistes. Aquests sistemes de navegació autònoms es basen en l'existència d'un espai/estructura -la carretera o autopista- amb característiques molt peculiars, quasi constants i conegudes a priori, que permeten proposar solucions, com ara les anomenades "*road following*" (seguiment de la carretera) i "*obstacle avoidance*" (*evasió d'obstacles*), amb bones prestacions (s'han desenvolupat vehicles autònoms que es desplacen a velocitats de fins els 130Km/h [Dickmanns 90,92]) i implementacions de cost moderat. Va ser a l'any 1979 que es va publicar el primer treball [Tsubawa 79], en el qual un cotxe equipat amb un sistema d'estereovisió es va desplaçar de forma autònoma per una autopista a 30 Km/h.

La segmentació en una imatge d'una carretera és una tasca simple, si tenim la imatge memoritzada i prou temps per experimentar i modificar els paràmetres que defineixen la segmentació. Per contra, la segmentació en temps real, necessària pels vehicles autònoms, resulta molt complexa degut a la gran variabilitat de les condicions del mòbil i de l'entorn, com ara, diferents condicions meteorològiques, hora del dia, canvis no esperats en l'entorn, variació de la resposta cromàtica de les càmeres, el funcionament del sistema de control o altres canvis en el vehicle.

A la Universitat de Maryland [Andersen 85][Waxman 86][Davis 89] proposen un sistema de navegació a tres nivells:

1. Gran abast -*identificació del punt de sortida i punt objectiu i determinació d'una ruta a baixa resolució entre ells-*.
2. Mig abast -*recerca de direccions segures (navegables) en la ruta subministrada pel nivell anterior, anomenades corredors d'espai lliure-*.
3. Curt abast -*anàlisi topogràfic detallat de l'entorn més immediat, per tal de desplaçar-se de forma segura, dintre dels corredors, al voltant dels obstacles-*.

Els dos últims nivells es realitzen mitjançant visió per ordinador i el resultat que generen és una representació 3D de l'escena, amb la que el planificador pot generar la trajectòria que ha de seguir el mòbil. Encara que la presentació inicial del projecte descriu un sistema que permet al mòbil desplaçar-se en diferents tipus d'entorns, només s'han trobat referències de la implementació del sistema de navegació en carreteres. El seguiment de la carretera es realitza a partir de la detecció i seguiment dels seus límits a l'interior d'unes finestres a la imatge. Els límits de la carretera es localitzen mitjançant un gran contrast de color en la imatge. Els contorns son agrupats a partir de l'anàlisi de la transformada de Hough que determina la millor aproximació al límits de la carretera. El sistema disposa d'un sensor làser pel càlcul de la profunditat, un processador VICOM per l'anàlisi de les imatges color i un conjunt de VAX's per la navegació, podent assolir velocitats de fins 10 Km/h.

Des de 1984 es desenvolupa al *The Robotics Institute* de la Universitat Carnegie-Mellon el projecte NavLab (Navigation Laboratory) [CMU-RI 87]. Aquest projecte esta orientat a la implementació dels diferents components necessaris per assolir la navegació autònoma en entorns exteriors, com ara, els sistemes de percepció, l'anàlisi i interpretació de la informació sensorial, la modelització de l'entorn, la planificació i el control. El vehicle NavLab I és una autocaravana adaptada per poder ser comandada automàticament. Esta equipada amb una càmera color utilitzada per localitzar i seguir la carretera en les imatges i un sistema d'escombrat làser utilitzat per a la detecció d'obstacles i la modelització del terreny.

En una primera versió del sistema del navegació autònoma [Wallece 87][Thorpe 88, 91], el guiatge es realitza dintre de carreteres a partir de la informació subministrada per dos mòduls: *seguiment de la carretera* a partir de l'anàlisi de la textura i del color de les imatges que permet segmentar l'escena en carretera i marges, i *detecció d'obstacles* a partir d'un LRF.

La segmentació de la imatge en dues zones -carretera i marges- es realitza a partir de l'anàlisi de la informació color i la informació textura. Primer cada pixel d'una imatge

de baixa resolució, de 30x32 píxels obtinguda mitjançant un amonjament iteratiu en una finestra de 2x2 píxels, s'assigna a una de les classes de carretera o no carretera mitjançant la classificació per màxima versemblança de color. Per a cada píxel es calcula les probabilitats P_i^C de que pertanyi a cada una de les quatre classes carretera o cada una de les quatre classes de marge. En un segon pas, es realitza la classificació dels píxels de la imatge textura, recolzant-se en la idea que les zones pavimentades són més "suaus" que les que no ho són (gespa, troncs d'arbres, etc.). En aquest cas s'utilitza l'operador de Roberts per determinar el nombre de píxels, que en una finestra de 8x8 píxels, presenten un gradient alt. Finalment, cada un dels 30x32 texels de la imatge textura es classifiquen en la regió carretera, si el texel té menys de 35 píxels amb gradient alt, o marge, en cas contrari, obtenint un valor P_i^T . El resultat de les dues classificacions es combina per generar una nova imatge on cada un dels seus píxels es classifica com carretera o marge a partir de la suma ponderada P_i de les dues probabilitats obtingudes ($P_i = (1 - \alpha)P_i^T + \alpha P_i^C$). A partir d'aquesta nova imatge es calculen els nous representants de les quatre classes carreteres i de les quatre classes marge, que seran utilitzats en l'anàlisi de les posteriors imatges, d'aquesta forma el sistema s'adapta als possibles canvis de color que es puguin produir.

A partir de la imatge de profunditat obtinguda amb un LRF -amb resolució de 64 files per 256 columnes subministrada cada mig segon-, es calcula el vector normal de cada punt de la carretera. Les superfícies travessables (planes o quasi planes) es caracteritzen per tenir una normal vertical a la superfície, mentre que els obstacles produeixen normals que apunten en altres direccions. Aquest sistema de navegació utilitza un computador sistòlic Warp per a l'anàlisi de les imatges i 2 workstation Sun-3 pel processament de les imatges de profunditat i la planificació del moviment. La velocitat assolida en aquesta implementació del sistema era de 18 Km/h.

Posteriors sistemes de navegació han utilitzat una xarxa neuronal anomenada ALVINN (Autonomous Land Vehicle Neural Net) [Pomerleau 91] [Jochem 96] per a l'aprenentatge de les accions que ha de realitzar el conductor d'un vehicle per seguir una carretera. ALVINN està formada per 3 nivells; el d'entrada té una estructura bidimensional format per 30x32 neurones, el nivell intermig està format per 4 elements i el de sortida per 30 (la capa de sortida és una representació lineal de la direcció en la que ha d'avançar per continuar en la carretera). Durant la fase d'aprenentatge de la xarxa, mentre una persona condueix el vehicle, les imatges captades per la càmera i reduïdes a 30x32 píxels són presentades a l'entrada i es llegeix la posició actual del volant. L'algorisme de "*back-propagation*" modifica els pesos de les connexions de les neurones amb l'objectiu que la xarxa generi la mateixa sortida (mateixa direcció del volant) que la indicada pel conductor. Després d'observar

durant 3 minuts com condueix la persona, ALVINN és capaç de conduir el vehicle tot sol.

En cada situació diferent, és la mateixa xarxa la que decideix quines són les característiques importants de la imatge per conduir en un tipus determinat de carretera, i és per aquesta raó que cal entrenar la xarxa en cada tipus de carretera diferent. ALVINN ha conduït amb èxit al NavLab-I en autopistes, carreteres i pistes asfaltades per a bicicletes. Els autors proposen el desenvolupament de MANIAC, una xarxa neuronal que s'encarregaria de detectar el tipus de carretera en que es troba el vehicle i donar el control a la xarxa adequada.

En els últims experiments realitzats (finals de 1996), ALVINN ha conduït de forma autònoma en una autopista durant 144 quilòmetres amb una velocitat màxima de 110 Km/h. Actualment estan treballant en la implementació d'un sol xip que integri el CCD del sensor i la xarxa neuronal ALVINN.

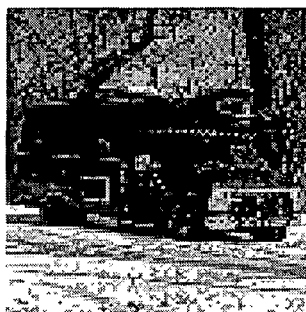


Figura 2.3. El NavLab I.

El vehicle autònom ALVIN del Martin Marietta Denver Aerospace [Turk 88] realitza el seguiment de la carretera mitjançant un mètode que consta de tres passos:

- 1) segmentació de la imatge en dues regions -carretera/no carretera-,
- 2) extracció dels límits de la carretera a partir del seguiment del contorn de la imatge binària i
- 3) transformació de punts 2D del límit de la carretera a coordenades 3D i construcció d'un model de l'escena.

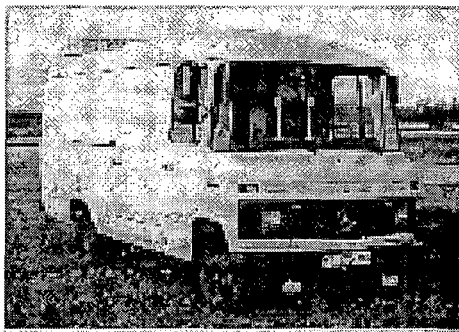
La segmentació es realitza mitjançant la classificació dels pixels de la imatge color en dues classes a l'espai RB (no fan servir la component G, ja que afirmen que experimentalment han trobat que no aporta més informació). Aquesta classificació es realitza a partir d'un llindar calculat en l'anàlisi d'una part de la imatge que s'assumeix que és carretera. La regió de la imatge utilitzada per realitzar aquest càlcul es defineix dinàmicament en funció de l'orientació relativa entre càmera i carretera. En el segon pas realitzen l'extracció dels límits de la carretera a partir del seguiment, en el veïnat

8x8, del contorn de la segmentació obtinguda, per després triar un nombre petit de punts (menys de deu) per aproximar amb una polilínia el límit dret i esquerra de la carretera. Aquests punts de la imatge són projectat al món 3D al tercer pas -assumint que el terra davant del mòbil és pla- per construir una descripció tridimensional de la carretera mitjançant una aproximació polilínia de com a màxim deu punts dels límits dret i esquerra de la carretera. La implementació del sistema de navegació autònoma consta d'una placa de processament d'imatges VICOM i 3 processadors (un 8086 pel control del vehicle, un 80186 per la navegació i un 80286/80287 que realitza la supervisió del sistema). Els autors han primat més la velocitat que la generalitat del sistema, obtenint velocitats de 20 Km/h al seu circuit de proves, però és molt dubtós que el sistema funcioni correctament en altres condicions ja que la projecció de l'espai de color està dissenyada de forma que doni la millor discriminació en el seu circuit de prova. Per a la detecció d'obstacles fan servir un LRF fent servir una tècnica molt similar a la del NavLab I del CMU.

Una altra tècnica desenvolupada [Morgan 90] aborda el problema creant i modificant una representació de la carretera basada en quatre paràmetres que descriuen l'amplada, la direcció i la curvatura dels límits de la carretera en un sistema de coordenades centrat a la posició del vehicle. El model de la carretera, que consisteix en dos arcs de radi R_{esquerra} i R_{dret} centrats a la posició (X_0, Z_0) -els autors assumeixen que el terra és pla-, es construeix a partir del seguiment, imatge darrera imatge, d'un conjunt de punts dels límits de la carretera, assumint que el desplaçament del vehicle és conegut, i utilitzant la mitjana quadràtica per calcular els quatre paràmetres del model. Aquests algorismes s'executen sobre una xarxa de Transputers T-414 i T-800, obtenint una velocitat de 32 Km/h. Aquest sistema no permet tractar les situacions on hi ha creuament de carreteres, ja que el model de quatre paràmetres és insuficient per descriure la gran diversitat de situacions que es presenten en aquests casos.

A la Universitat Federal de les Forces Armades (Munic-Alemanya) [Dickmanns 90,92,95][Maurer 94] han desenvolupat un sistema de navegació per automòbils en autopistes. El sistema es basa en dues càmeres muntades sobre un suport mòbil (*pan & tilt*), una de elles amb un gran angle de visió, amb la que es realitza l'extracció de les línies pintades a la calçada i el seguiment d'aquestes en un conjunt de finestres, i l'altre amb un camp de visió més reduït, que és utilitzada per a la detecció d'obstacles en la trajectòria prevista del mòbil. Els límits de la carretera s'estableixen per una estimació per mínims quadrats i garantint la coherència dels contorns detectats en el conjunt de les finestres. A partir de la informació obtinguda construeixen un model de la carretera, format únicament per un paràmetre: la seva curvatura. La curvatura es

calcula mitjançant un filtre de Kalman en combinació amb un model dinàmic del moviment del vehicle, assumint que el terra és pla, que els límits de la carretera són paral·lels i d'amplada constant i que la curvatura de la carretera és localment constant. La implementació es basa en una arquitectura MIMD amb 13 processadors (des de 8086 fins 80386) que permet desplaçar el vehicle a una velocitat de fins a 120Km/h. Una posterior implementació del sistema [Dickmanns 95] amb 60 transputers T-222 pel processament d'imatges i comunicacions, 1 T-800 per a la construcció del model i la planificació de la trajectòria i un PC com a "host" dels transputers, ha permès desplaçar un vehicle fins a 130Km/h en condicions normals de tràfic durant la demostració final del projecte europeu Prometheus.



a)



b)

*Figura 2.4. Les dues generacions de vehicles autònoms desenvolupats a la Universitat Federal de les forces Armades de Munic.
a) VaMoRs (Any 1987). b) VaMP (Any 1995).*

El sistema de navegació autònom en entorns exteriors proposat en [Maeyama 97] es basa en la repetició d'una ruta que ha estat apresada. En una primera fase, l'operador desplaça el vehicle per la ruta desitjada, al llarg d'una carretera asfaltada destinada a la circulació de vianants i ciclistes, i el sistema de forma automàtica identifica referències naturals (arbres, parets o tanques) per construir el que anomenen un mapa de la ruta percebut (PRM) a partir de la informació sensorial. Posteriorment, el vehicle navega de forma autònoma reproduint el mapa obtingut durant la primera fase. El PRM es genera a partir dels sensors interns (codificador dels motors i un giroscopi) i els externs (un sensor d'ultrasons i una càmera montats en un suport rotatori). Aquest sistema requereix d'un guiat previ per la ruta que s'ha de desplaçar que posteriorment es repetirà de forma fixa, i segons indiquen els autors, presenta problemes quan el nombre de referències naturals és petit, en certes situacions d'il·luminació i si l'entorn es veu modificat.

De tots aquests sistemes, els únics que han demostrat el seu funcionament en condicions reals amb bon resultat són els desenvolupats a les Universitats de Carnegie-Mellon i la de Munic.

2.3. Entorns Exteriors No Estructurats

El primer sistema de navegació autònom tot terreny [Daily 88] va ser desenvolupat pel centre *Hughes Artificial Intelligence Center*, obtenint els primers resultats a l'any 1987. La navegació autònoma en entorns no estructurats presenta una major problemàtica, ja que no es té la certitud de l'existència d'una superfície travessable. A més en el cas de la navegació per carreteres, com que la superfície condicionada per a la navegació compleix unes certes propietats (com ara la continuïtat de color o tipus de material de la superfície, d'amplada i de pendent) la seva localització en l'entorn i el control de la trajectòria del mòbil resulten molt més fàcils. En els entorns no estructurats no es pot esperar treure profit de l'ajut que suposa l'existència a priori d'una superfície navegable, la qual cosa fa necessària la utilització de sensors més complexa per la mesura de distàncies (els més utilitzats són els que es basen en la telemetria làser i l'estereovisió), la utilització de models de l'entorn molt més detallat i una posterior planificació complexa, que ha de permetre trobar una trajectòria adequada segons uns criteris seleccionats (mínima distància, màxim desnivell acceptable, seguretat en els desplaçaments, etc.). Tots aquests sistemes també s'han caracteritzat per les baixes velocitats (inferiors a 1Km/h) que poden assolir. Com podem veure, la no existència d'una estructura condicionada per a la circulació de vehicles, complica enormement en cost i temps la navegació autònoma.

El sistema construït al Hughes Artificial Intelligence Center [Daily 88] es basa en un conjunt de processos paral·lels independents que aconsegueixen un comportament coherent i una resposta ràpida a partir de la informació subministrada pels sensors de profunditat. El mòbil disposa d'un LRF que proporciona informació de les distàncies a les que es troben els objectes més pròxims (fins 20 metres amb una resolució de 7.6 centímetres) cada mig segon i un LNS (sistema de navegació terrestre) que subministra la posició i orientació del vehicle cada 40 milisegons. La descripció de l'entorn s'obté fusionant un conjunt de mapes d'elevació cartesià (CEM) obtinguts durant el moviment del vehicle. Aquests mapes són una representació de tipus topogràfic, on per a cada posició (x,y) de l'entorn s'indica la seva elevació (z) respecta

del punt d'observació. La planificació de la trajectòria que ha de seguir el mòbil es fa mitjançant un sistema de control jeràrquic de quatre nivells:

1. Planificació de la missió. Definició dels objectius i restriccions de la missió.
2. Planificació de la ruta. Búsqueda en mapes digitalitzats d'un camí que satisfaci les restriccions de la missió i predicció de quines referències es trobarà el mòbil en el seu camí per a localitzar-lo i confirmar que segueix el camí correcte.
3. Planificació local. Selecció i monitorització de l'estratègia de control més adequada per a les condicions actuals de l'entorn on es troba el mòbil.
4. Control reflexa. Control del moviment del vehicle en temps real a partir de la informació sensorial, seguint l'estratègia indicada pel planificador local.

Aquest tipus de disseny permet un control en temps real del vehicle i aconsegueix la flexibilitat necessària per operar en entorns reals. La implementació requereix de 4 ordinadors (2 Sun-3, 1 Vicom i 1 LISP machine).

Un sistema tot terreny molt més recent, anomenat ADAM, s'està desenvolupant en el LAAS de Toulouse [Lacroix 94][Nashashibi 94]. A partir de les imatges de profunditat obtingudes amb un LRF construeixen un mapa d'elevació (una representació cartesiana discreta on per a cada porció al pla (X,Y) s'indica la seva elevació Z). Aquest mapa és utilitzat per a calcular la posició del mòbil a l'entorn i per un planificador adaptatiu que en funció de la complexitat orogràfica del terreny fa servir l'estratègia més adequada, a l'entorn on es troba, a l'hora de determinar la trajectòria que ha de seguir el mòbil. Aquesta descripció de l'entorn es completa amb la informació subministrada per 12 codificadors (2 per motor) i dues cameras color. El planificador adaptatiu, treballa de forma diferent d'entre tres possibles, en funció de les característiques del terreny:

1. *Navegació 2D* (si el terreny és quasi pla). Es fa una descripció binària de l'entorn -travessable/no travessable- a partir de la qual es calcula una trajectòria 2D.
2. *Navegació 3D* (si el terreny és molt irregular). Es requereix una descripció tridimensional molt detallada de l'entorn, sobre la qual es calcula una trajectòria 3D que permeti assolir la posició objectiu travessant grans desnivells.
3. *Navegació reflexa* (per entorns plans quasi lliures d'obstacles). El mòbil té una posició objectiu a assolir, per tant el planificador només s'ha d'encarregar d'evitar els obstacles que puguin aparèixer mentre el vehicle es desplaça en línia recta.

La implementació del sistema ADAM requereix, per a l'adquisició i processament de la informació sensorial i el control de la trajectòria, d'un sistema multiprocessador format per dos 68030, dos 68040, tres targetes de processament d'imatges DataCube i varies targetes d'entrades/sortides, i per a la planificació a alt nivell dels moviments d'una Sparc-Station 10-41. En els darrers experiments realitzats, ADAM triga 20 minuts en recórrer una distància de 30 metres en un entorn molt irregular.

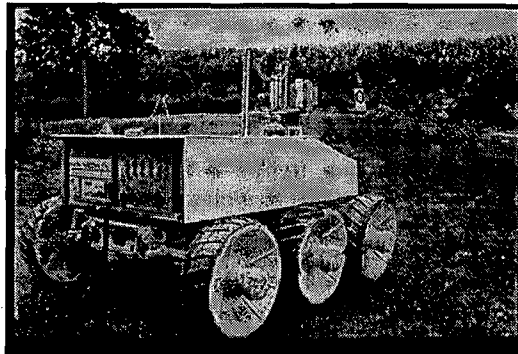


Figura 2.5. Adam, vehicle autònom tot terreny del LAAS-CNRS

Una evolució del projecte NavLab és l'anomenat NavLab II [Langer 94], un vehicle militar tot terreny que serveix com plataforma pel desenvolupament de sistemes de navegació autònoms en entorn no estructurats. El sistema que proposen els autors, està compost de tres parts: un mòdul de percepció -que a partir de les imatges de profunditat obtingudes amb un LRF, s'identifiquen les regions del terreny no travessables-, un mòdul gestor del mapa local -que crea i actualitza una representació de l'entorn pròxim al vehicle- i un mòdul planificador -que genera la trajectòria per al controlador del vehicle-. El primer mòdul s'encarrega d'analitzar cada imatge de profunditat individualment. Per a cada cel·la de 20x20 centímetres es calculen la variació màxima de l'alçada del terreny a l'interior de la cel·la i la normal a la superfície de la cel·la per classificar-la com travessable o no travessable. A partir de les successives sortides generades pel mòdul de percepció durant el desplaçament del vehicle, el gestor del mapa local manté una descripció de l'entorn del mòbil (de 20 metres per 20 metres) en termes de travessable o no. Finalment la planificació es realitza a partir de tres processos independents: 1) *assoliment de la posició objectiu* - que assigna un valor entre +1 i -1 de les diferents direccions possibles, en funció de si aquesta porta al vehicle a la posició objectiu-, 2) *evasió d'obstacles* -que assigna a les diferents direccions un valor entre +1 i -1 en funció de si la direcció defineix o no, una trajectòria lliure d'obstacles-, i finalment, 3) *un àrbitre* que combina els dos resultats dels mòduls anteriors i tria la direcció amb el valor més alt per desplaçar el mòbil. La

implementació requereix de tres estacions de treball Sparc-II i permet assolir una velocitat de fins a 10Km/h.

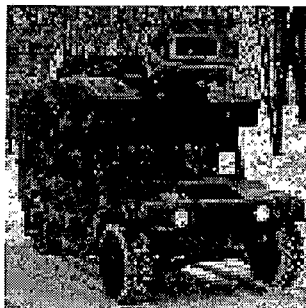


Figura 2.6. El NavLab-II del Robotics Institute de la Universitat Carnegie-Mellon.

La Carnegie-Mellon University també està desenvolupant un mòbil de característiques ben diferents. AMBLER és un mòbil autònom dissenyat per realitzar exploracions planetàries [Hoffman 93]. Les seves sis cames, li permeten desplaçar-se per terrenys molt irregulars. El mòbil disposa d'un làser d'amplitud modulada muntat en la seva part superior per obtenir imatges (de 256x256 pixels, 12 bits per pixel) de profunditat (de 2 a 40 metres) i de reflectància, cada 0.5 segons. Amb la seqüència d'imatges de profunditat s'obté un mapa d'elevació del terreny al voltant del mòbil, amb una resolució de 10 centímetres. El sistema de planificació utilitza els mapes d'elevació per determinar una ruta lliure d'obstacles i seleccionar les posicions on han de trepitjar els peus del mòbil. Així mateix, el sistema de navegació minimitza els errors de derives del subsistema de percepció a partir de la diferència entre la posició del terra prevista al mapa i la posició real del terra, obtinguda a partir dels sensors de contacte present als peus del mòbil. Ambler, equipat amb un Sparc II, ha realitzat amb èxit una missió de 500 metres de recorregut en un temps de 21 hores.

El Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA està desenvolupant un sistema [Matthies 95] per a la detecció d'obstacles i la classificació del tipus de material que formen les superfícies captades mitjançant tècniques de visió per ordinador. El mètode proposat per a la detecció d'obstacles es basa en el càlcul d'una imatge de profunditat en una finestra de 256x45 pixels en un temps comparable amb els sistemes basats en làser. El passos que segueixen són: adquisició de dues imatges, rectificació de les imatges per eliminar la disparitat vertical entre les dues imatges (calibrat dinàmic), càlcul de la profunditat per disparitat horitzontal entre les imatges, filtrat per a l'eliminació del soroll i els errors generats als passos anteriors. La detecció dels obstacles es realitza sobre la imatge de profunditat, buscant si es troba una diferència d'alçada en els pixels veïns verticalment superior a un llindar H. La implementació d'aquests processos requereixen d'una targa d'adquisició i processament d'imatges DataCube MV-200, una targeta amb un 68040 a 25 Mhz i un ordinador Sparcbook II

a 40 Mhz, obtenint un temps de cycle de només 0.6 segons. En l'última prova realitzada el vehicle és capaç de desplaçar-se a més de 10Km/h.

Per a la navegació nocturna el mateix sistema ha estat utilitzat, en aquest cas, processant imatges subministrades per dues càmeres d'infraroig. Els resultats assolits són comparables als del cas anterior. Els autors consideren que la geometria dels objectes no és l'únic paràmetre important per a la detecció d'obstacles, per la qual cosa també s'interessen en la classificació del tipus de material o terreny present a l'escena. L'interès es centra en la utilització d'imatges en l'infraroig pròxim (que permeten distingir la vegetació i el terra) i d'imatges amb filtres polaritzats (per detectar les reflexions especulars sobre masses d'aigua), que fan possible realitzar la classificació en temps real.

2.4. Entorns Exteriors Feblement Estructurats

Com s'ha presentat en aquest capítol, al llarg dels últims anys s'han proposat diferents solucions a la navegació autònoma en diferents tipus d'entorns, principalment edificis i plantes industrials, carreteres i autopistes, i entorns no estructurats. Resulta sorprenent la quasi no existència de projectes que abordin el problema de la navegació en camins de muntanya, pistes forestals o entorns de característiques similars (camins mal definits o feblement estructurats).

Els únics treballs que tracten el tema de la navegació autònoma en camins feblement estructurats, són de fet adaptacions de sistemes que han estat dissenyats per la navegació en carreteres i autopistes.

Així el grup de la Universitat Federal de les Forces Armades (Munic-Alemanya) presenta en [Dickmanns 92], el comportament del sistema de navegació per carreteres (veure secció 2.2), en una carretera asfalta en un entorn rural. La carretera no té cap tipus de senyalització vertical ni horitzontal, presenta un límits distingibles en la imatge i la superfície de la calçada és força constant. El sistema presentat, calcula l'amplada i les curvatures horitzontal i vertical de la carretera.

En [Pomerleau 91] i [Jochem 96] es presenta el sistema de navegació MANIAC que es basa en un conjunt de xarxes neuronals entrenades per navegar en diferents tipus d'entorns, més una xarxa supervisora que decideix, en funció de les característiques

observades de l'entorn, quina de les xarxes de navegació s'ha d'encarregar de guiar el vehicle. En el treball es presenten resultats de navegació en carreteres locals (vies pavimentades però sense senyalització ni vertical ni horitzontal).

Cap d'aquests treballs no contempla la possibilitat de camins amb superfície formada per diferents matèries o amb límits poc clars i ambigus, situacions que caracteritzen els camins mal o feblement estructurats.

2.5. Conclusions

Encara que la complexitat dels camins mal o feblement estructurats la podem situar entre la de les carreteres i la dels entorns no estructurats, els mètodes de navegació utilitzats en aquests casos no són adequats pels entorns tipus "camí de muntanya".

El fet que un camí feblement estructurat no tingui característiques similars a les de les carreteres i autopistes, no permet la utilització de les mateixes tècniques que en aquest cas, tot i que els problemes essencials són els mateixos: la detecció, localització i seguiment d'un camí, amb la detecció i evasió dels obstacles presents. Les tècniques, per a la detecció del camí, utilitzades en els sistemes de navegació per carreteres i autopistes, es basen majoritàriament en la detecció de línies rectes a la imatge (les línies pintades sobre la calçada o el límit de la calçada) [Dickmanns 90,92,95] [Morgan 90] o en la segmentació cromàtica de la imatge en carretera/marge, assumint que el color de la calçada és constant o quasi constant i diferent al color dels objectes que formen el marge de la carretera [Waxman 86] [Wallace 87] [Thorpe 88]. Atès que aquestes restriccions no es donen en un camí de muntanya, aquests mètodes no subministrarien resultats correctes en aquests entorns.

Donada la complexitat i generalitat del que anomenen entorns no estructurats, un camí de muntanya no és més que un cas particular, més simple, d'aquest tipus d'entorn. Per tant, els sistemes de navegació tot terreny permeten navegar en entorns feblement estructurats, això sí, sense aprofitar-se del coneixement a priori de l'existència d'un camí condicionat per l'home per a la navegació de vehicles, amb el consegüent cost en la complexitat del sistema i en el temps de resposta. Per tant, des del punt de vista d'eficiència, els sistemes de navegació per entorns no estructurats tampoc són adequats per a la navegació per camins de muntanya.

Afortunadament, encara que els sistemes descrits anteriorment no són adequats per a la navegació autònoma en camins de muntanya, el seu estudi resulta molt profitós, ja que existeixen conceptes i tècniques que sí poden ser utilitzades en el nostre cas.

Com s'ha vist, la majoria de sistemes de navegació autònoms assumeixen que en l'entorn, es donen un conjunt de restriccions que són utilitzades a l'hora d'analitzar-los. D'aquesta forma un sistema de navegació dissenyat per treballar en un tipus d'entorn no funcionarà correctament (o en el millor cas òptimament) en un entorn de característiques diferents. Per tant estem ben lluny de construir un sistema de navegació autònom amb la capacitat d'adaptació a l'entorn com la que disposa l'ésser humà.