



Generación de Comportamiento Complejo en Robots Autónomos

Tesis Doctoral

Departamento de Inteligencia Artificial
Facultad de Informática - U.P.M.
Departamento de Sistemas
Instituto de Automática Industrial - C.S.I.C.

Pablo Bustos García de Castro



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Facultad de Informática

Departamento de Inteligencia Artificial

TESIS DOCTORAL

**GENERACIÓN DE COMPORTAMIENTO
COMPLEJO EN ROBOTS AUTÓNOMOS**

Pablo Bustos García de Castro

Director: Domingo Guinea Díaz

Madrid, 1998

Resumen

El objetivo de esta tesis es el estudio de la relación entre autonomía, comportamiento inteligente y percepción del espacio en agentes autónomos. Estos tres factores se estudian a menudo desde perspectivas muy diferentes, pero su relación es tan estrecha que debe existir una estructura conceptual que los una.

Los esfuerzos por construir robots inteligentes desde los paradigmas dominantes del Cognitivismo, primero, y la Inteligencia Artificial basada en comportamientos, después, no han dado los frutos esperados. Actualmente, dos nuevas corrientes exploran el terreno intermedio buscando recuperar, desde nuevas perspectivas, las intuiciones desarrolladas en los últimos cuarenta años. Por un lado, las Arquitecturas Híbridas buscan suavizar la interfaz entre lo reactivo y lo reflexivo mediante flujos de información, ascendentes y descendentes, más densos. Alternativamente y desde una posición más alejada de los métodos ya validados, la Teoría de Sistemas Dinámicos se está empezando a aplicar en un número creciente de áreas relacionadas con la Inteligencia Artificial, típicamente tratadas desde una perspectiva estrictamente computacional. Este trabajo es un esfuerzo en esta última dirección.

Nos planteamos abordar el problema de la percepción del espacio en agentes autónomos desde dos puntos de vista complementarios: la generación de un modelo conceptual que explique un conjunto de propiedades y observaciones deseables e inspiradas en la percepción animal; y la validación experimental de los aspectos básicos del modelo sobre un robot móvil construido para este fin.

El modelo propuesto se denomina *espacio perceptivo* y está formado por una estructura dinámica -su estado evoluciona en el tiempo- que interacciona con módulos específicos de proceso: el módulo visual y el módulo motriz. Esta estructura está organizada en tres niveles: el espacio interno, que mantiene un modelo directo de la cinemática, dinámica y estado propioceptivo del agente; el espacio externo, donde se da la percepción directa del entorno cercano; y el espacio extendido, cuya estructura de encapsulamiento recursivo permite retener, de forma ordenada y codificada, cantidades arbitrarias de información espacial. La dinámica del espacio perceptivo busca mantener un estado de equilibrio, que se ve continuamente desestabilizado por la interacción de los módulos visual y motriz. El resultado de esta dinámica genera, simultáneamente, comportamiento y representación.

El robot es una plataforma móvil dotada de una cámara orientable. Dispone, además, de una arquitectura de control de motores modular como soporte de proceso de un computador situado a bordo. Todo el procesamiento se realiza en el robot y permite, mediante una conexión por red, la monitorización en tiempo real y su reprogramación desde una estación remota.

Summary

The goal of this dissertation is to study the relationship among autonomy, intelligent behavior and the perception of space in autonomous agents. These three factors are usually explored from quite different perspectives, but their relationship is so deep that a conceptual structure joining them must exist.

Efforts aimed at developing intelligent robots that have adopted the main paradigms: Cognitivism and Behavior-Based Artificial Intelligence, have not offered the expected results. However, two new approaches are exploring the middle land in an effort to recover, from a new perspective, the insights developed during the last forty years. On one side, Hybrid Architectures try to soften the interface between reactive behavior and deliberative reasoning, through increasingly dense bidirectional information flows. From a different departure point, Dynamical Systems Theory is beginning to be applied to a wide variety of problems related to Artificial Intelligence, which have been traditionally approached from a straightforward computational point of view. This work is an effort in this last direction.

Here, we face the problem of spatial perception in autonomous agents from two complementary viewpoints: the development of a conceptual model that is able to explain desirable properties and facts, inspired in animal and human perception; and the experimental validation of basic aspects of the model on a mobile robot built for this purpose.

The proposed model is called *perceptual space* and consists of a dynamical structure -its state evolves with time- that interacts with specific processing modules: the visual module and the motor module. This structure is organized in three levels: the inner space, which keeps an updated copy of the kinematics, dynamics and proprioceptive state of the agent; the outer space, where direct perception of proximal environment is carried out; and extended space, whose recursive encapsulated structure keeps, coded and ordered, unbound amounts of spatial information. The inner dynamics of the perceptual space try to continuously reach an equilibrium point, while it is perturbed by inputs from visual and motor modules. The outcome of this interaction becomes, simultaneously, behavior and representation.

The robot used in the experimental research is a mobile tank-like platform endowed with a vision head. It uses a modular control architecture that connects to the main computer on board. All the processing is carried out on board and, at the same time, it can communicate with remote workstations through an Ethernet network.

Agradecimientos

A Domingo Guinea, director de esta tesis, la paciencia y confianza que ha mostrado a lo largo de estos años, especialmente cuando parecía que el fin no llegaba nunca.

A Darío Maravall el apoyo y ayuda en los eternos momentos finales.

A todos los compañeros del Instituto de automática Industrial que han estado ahí desde el principio y que han sufrido, de una forma u otra, este pequeño calvario. De todos ellos, los “outliers” se merecen más que agradecimientos.

A J. Vicente, padre y niñera de la electrónica de Acai y siempre dispuesto a discutir cualquier idea relacionada con la inteligencia.

A los amigos, que han sabido esperar las ausencias y celebrar los reencuentros.

A L.A. Fragua las largas noches de orujo y el envidiable clima de discusión.

A mi familia que siempre me recibe con los brazos abiertos.

A Lola que me ha apoyado siempre; a Félix, generador incansable de ideas; y a Alberto, que desde Murcia es siempre una referencia a seguir.

Finalmente a Marta, por haberme dejado atravesar el infierno de su mano.

Indice

Capítulo 1	<i>Inteligencia y Comportamiento</i>	7
	Inteligencia y Comportamiento.	10
	Cognitivismo.	12
	Teorías de la Acción Situada.	22
	Reflexiones sobre Inteligencia y Comportamiento.	29
Capítulo 2	<i>Visión no homogénea y atención visual</i>	37
	Teorías de la Visión.	38
	Visión activa.	40
	Visión no homogénea	43
	Atención Visual y Movimientos Oculares	52
Capítulo 3	<i>Percepción del espacio</i>	57
	La necesidad de representaciones espaciales.	59
	Espacio perceptivo	68
	Una visión del espacio perceptivo	88
	Objetivos en el espacio perceptivo.	89
	Trabajos relacionados	94
	Análisis del modelo.	97
Capítulo 4	<i>Diseño y Construcción del Robot Móvil</i>	103
	Modelo cinemático y control del robot.	106
	Medida de distancias	113
	Control de los motores y subsistemas.	113
	Software de control e interfaz	114
Capítulo 5	<i>Modelado del espacio perceptivo</i>	117
	Módulo Visual.	118
	Módulo Motriz	128

	Generación del espacio perceptivo	128
Capítulo 6	<i>Experimentos con el robot Acai</i>	145
	Segmentación en fovea y periferia	145
	Activación en el espacio externo.....	147
	Dinámica de zonas en el espacio externo: atención visual	148
	Translación	151
Capítulo 7	<i>Conclusiones y Perspectivas</i>	155
	<i>Bibliografía</i>	161

"A vista de pájaro, la historia de la Filosofía de la Mente aparece como un paisaje con dos ríos que en diferentes estadios de su descenso, aumentan su caudal, se bifurcan formando islas, se represan formando lagos, se ocultan bajo la tierra para luego emerger estrepitosamente y ocasionalmente se acercan, llegando incluso a intercambiar sus aguas por pequeños canales. Esta es la constante del dualismo que siempre ha marcado al pensamiento occidental y que tiene su reflejo claro en las teorías sobre la inteligencia" P. Morao.

Esta tesis recoge los resultados de un estudio sobre el problema de generar comportamiento complejo en robots autónomos. Para definir con mayor precisión el ámbito del problema comenzaremos delimitando el uso que haremos de los términos: comportamiento, complejidad, autonomía y generación. Por *comportamiento* entendemos la interpretación que un observador externo hace de la interacción de un sistema con su entorno. La noción de interpretación, aquí, tiene una connotación fundamentalmente cualitativa, a diferencia de los análisis cuantitativos del conductismo clásico. Por *complejidad* hacemos referencia a la frontera de lo explicable y realizable dentro de las teorías y tecnologías actuales. En el contexto de esta tesis, complejidad e inteligencia son conceptos próximos que denotan la relación estrecha entre lo local y lo global en el funcionamiento de un sistema. Entendemos *autonomía* como la capacidad de desplazamiento por medios propios. Este sentido limitado excluye, en principio, otras acepciones, como la autonomía energética, la autonomía en la consecución de objetivos impuestos externamente o la autonomía respecto de órdenes remotas de control que dirijan el comportamiento del agente¹. Finalmente, el término *generación* hace referencia a los procesos y estructuras internas del sistema causalmente conectadas con su comportamiento.

El problema de la generación de comportamiento complejo en robots autónomos es, por tanto, el problema de *explicar los principios de funcionamiento y las estructuras constitutivas que regulan la interacción que un agente móvil puede mantener con su entorno*. Dentro de este marco de estudio tan extenso, esta tesis se sitúa en el problema de la relación entre la percepción del espacio y la generación de comportamiento. Por *percepción del espacio*

1. Utilizaremos el término "agente" en un sentido genérico de sistema autónomo, robot o ser vivo. Cuando el término se utilice con otro significado lo haremos explícito, como en el caso de "agente de comportamiento".

entendemos los procesos de asimilación de información interna -proveniente del propio agente- y externa -del entorno- que tienen una implicación causal en el comportamiento generado por el agente. Para abordar este estudio es necesario precisar el criterio de inteligencia que utilizaremos como marco de referencia para situar los diferentes problemas y propuestas que iremos haciendo. Hablaremos de la inteligencia de un agente como su *capacidad para hacer depender flexiblemente su comportamiento de factores locales y globales del contexto en que está situado*. Por factores de contexto entendemos la información sobre el estado y la evolución del estado del agente y del entorno que sea accesible en el momento de la generación del comportamiento. Es importante ver que esta noción de inteligencia es independiente de las facultades cognitivas tradicionales como la memoria, el aprendizaje o el razonamiento y, también, del criterio evolutivo clásico de adaptación. La razón de proponer esta definición aquí responde a la necesidad de agrupar en un marco común los diferentes problemas conceptuales surgidos a lo largo del desarrollo de este trabajo. En diversos estudios y experimentos sobre visión artificial, integración sensorial y navegación en robots móviles, así como al analizar las diferentes teorías vigentes en el campo de la inteligencia artificial, hemos llegado sistemáticamente al mismo punto de conflicto: la relación entre lo local y lo global. Cada posición en este espectro ofrece unas ventajas propias y, en consecuencia, los enfoques reactivos y deliberativos terminan por reclamar parcelas independientes de la inteligencia que todos buscan explicar. Sólo cuando lo local y lo global se analizan desde una relación dinámica conjunta y se abandona la idea de elegir un compromiso predeterminado entre ambos, desaparece el punto de conflicto y se abren nuevas posibilidades teóricas y prácticas en la comprensión y construcción de máquinas inteligentes.

Desde un punto de vista diametralmente opuesto, recientemente se ha reforzado la idea de que el comportamiento inteligente sólo puede explicarse en relación a un objetivo previamente definido. Supongamos, por ejemplo, que se construye un robot cuyo fin es circular a una distancia predefinida de las paredes, sin colisionar con los obstáculos que puedan aparecer en su camino. El robot será inteligente respecto de este objetivo en la medida en que sea capaz de llevarlo a cabo sin ayuda externa. Del mismo modo, un avión de transporte comercial altamente automatizado que sea capaz de realizar un vuelo transatlántico, partiendo de un conjunto de datos iniciales mucho menor que la información que él mismo procesa durante el trayecto, debe ser calificado como una máquina inteligente en relación al transporte de viajeros. A pesar de la sofisticación tecnológica implicada, la noción de comportamiento inteligente que hay detrás de estos ejemplos no tiene un fin explicativo, de la misma manera

que hablar de la supervivencia como objetivo en los seres vivos tampoco explica cómo se genera el comportamiento que exhiben. La propuesta de utilizar un criterio como la relación entre el contexto local y el global no exige un objetivo a priori frente al cual evaluar la inteligencia, sólo sugiere la existencia de principios más básicos comunes a cualquier problema que podamos plantear y que queramos abordar desde una perspectiva inteligente.

Una vez fijado el marco del problema, resumimos brevemente la propuesta central de este trabajo. En el Capítulo 3 se plantean y discuten los requerimientos para una arquitectura computacional que permita a un agente autónomo percibir de forma predictiva el espacio con el que interacciona. Esta arquitectura está compuesta por módulos de proceso -un módulo visual y un módulo motriz- y por una estructura dinámica denominada *espacio perceptivo* que está organizada en tres niveles adyacentes: el *espacio interno*, donde se representa el estado cinemático, dinámico y de otros aspectos sensoriales internos del agente; el *espacio externo*, que se corresponde con la percepción directa de lo inmediatamente accesible; y el *espacio extendido*, que recoge percepciones pasadas del entorno que ha dejado de ser accesible a los sensores. Los módulos de proceso se sitúan entre el espacio perceptivo y los sensores y actuadores del agente. Podemos ver el espacio perceptivo como una memoria espacial activa que interacciona con los módulos manteniendo una representación en los diferentes espacios mencionados y generando, simultáneamente, el comportamiento necesario para mantener esta representación. Las propiedades que se derivan de una estructura articulada de esta forma permiten analizar la relación entre el contexto local y el global desde diferentes puntos de vista: la disponibilidad simultánea de información espacial a diferentes escalas organizada bajo un sistema de referencia egocéntrico común, la predicción continua del efecto de las acciones en la percepción del espacio a diferentes escalas, la generación de comportamiento como consecuencia de las expectativas generadas internamente o la existencia simultánea de múltiples cursos de acción posible que compiten entre sí por llegar a realizarse.

Para exponer ordenadamente estas ideas hemos estructurado la tesis en dos bloques diferenciados. El primero reúne el resto de este capítulo, el Capítulo 2 y el Capítulo 3, donde se plantean los antecedentes teóricos y conceptuales de la Inteligencia Artificial y de la Visión Artificial que hemos utilizado y se desarrolla la idea del espacio perceptivo. En el segundo bloque se recoge la parte experimental del trabajo y se describen en sucesivos capítulos: el diseño y construcción de un robot móvil dotado de un sistema de visión artificial; los

algoritmos desarrollados como modelo computacional del espacio perceptivo; y los experimentos realizados con el robot.

1.1 Inteligencia y Comportamiento.

A partir de la segunda mitad de este siglo, el estudio de la inteligencia ha contado con una herramienta de extraordinaria utilidad: la computación. Los hitos iniciales que condujeron a este concepto, tal y como lo entendemos hoy día, son de sobra conocidos: la formalización del concepto de máquina universal por Alan Turing [Turing 1937]; la demostración de equivalencia entre este concepto y una formalización matemática de las estructuras neuronales del sistema nervioso por Warren McCulloch y Walter Pitts [McCulloch & Pitts 1947]; y la concepción, por parte de von Neumann, de un diseño lógico físicamente realizable de una arquitectura de computación.

Una vez que estuvo disponible toda esta maquinaria teórica, el Materialismo encontró tierra firme donde pisar y en poco tiempo se convirtió en el sustrato filosófico dominante en el estudio de lo mental- las excepciones son contadas y bien conocidas [Eccles 1989] -para una revisión ver [Bechtel 1991]. En los años setenta se dio el nombre de Ciencia Cognitiva a la disciplina que aunaba al conjunto de las áreas de investigación cuyo objetivo era el estudio de los fenómenos relacionados con el conocimiento y su uso. La Ciencia Cognitiva se apoya, fundamentalmente, en dos pilares básicos: el funcionalismo y en la interpretación, más o menos literal dependiendo de las corrientes internas, de la Tesis de Church-Turing sobre la equivalencia entre lo computable y lo calculable.

Aunque la Ciencia Cognitiva es la corriente general, no todo el Materialismo es computacional y no toda la Ciencia Cognitiva es Funcionalista. En el primer caso, el ejemplo más representativo es R. Penrose y sus intentos por encontrar un sustrato cuántico, biológicamente plausible y con propiedades no locales al que finalmente se puedan reducir los fenómenos mentales [Penrose 1991][Penrose 1994]. El caso del rechazo al Funcionalismo viene representado por el Materialismo Eliminativo [Churchland 1990][Malcolm & Smithers 1992] que, a diferencia de las teorías no computacionales, está teniendo una penetración muy importante en el debate sobre las líneas a seguir en el estudio de la Inteligencia.

“El objetivo de la Inteligencia Artificial es el estudio de la inteligencia natural con medios artificiales”. Así definió Herbert Simon el programa de esta disciplina y, en gran medida, ésta sigue siendo la línea general de trabajo hoy día. Muchas de las ideas del periodo clásico de la Inteligencia Artificial siguen siendo vigentes y defendidas, pero el grado de consenso actual en relación a la naturaleza y propiedades de un sistema inteligente ha descendido notablemente. Podemos atribuir al menos tres causas a este estado de cosas. En primer lugar, ha transcurrido tiempo suficiente para que se estén realizando análisis críticos sobre las promesas y expectativas del programa cognitivo. La revisión más optimista de los logros conseguidos, tanto en realizaciones prácticas como en el desarrollo de las hipótesis iniciales, revela que lo que entonces se planteó como un marco general y suficiente en los aspectos fundamentales, tan solo es una parte del misterio que se encierra tras la noción de Inteligencia. En segundo lugar, la participación cada vez más intensa y, sobre todo, técnicamente instruida por parte de los filósofos en la Inteligencia Artificial, fuerza a una reflexión continua sobre la validez e implicaciones de los principios comúnmente aceptados. Finalmente, un buen número de disciplinas, tradicionalmente independientes, han comenzado a reconocer la naturaleza común de las cuestiones que les preocupan. Desde una perspectiva común se están buscando soluciones más generales que recojan e integren los resultados obtenidos de forma aislada. Algunas de las áreas implicadas son la Psicología, la Lingüística, la Etología, la Neurociencia, la Biología y la Física.

Nuestro objetivo en este Capítulo será situar los ejes de referencia de este espacio de discusión y explorar una región que está tomando forma recientemente y que constituye, desde nuestro punto de vista, la dirección más prometedora desde la que abordar el estudio del comportamiento inteligente. En líneas generales, lo que se está llevando a cabo actualmente es, en gran parte, una reestructuración y reordenación de conceptos ya existentes tales como la formación de imágenes mentales desde descripciones lingüísticas, la ubicación anatómica de estas imágenes en los cortex sensoriales y motores, la doble función de estas estructuras en la percepción y en la planificación, la cuestión del encapsulamiento de los sistemas periféricos, los sistemas de referencia egocéntricos y el carácter *situado* de la cognición de alto nivel, o la relación entre los mecanismos de atención y la cognición.

Para abordar estos temas comenzaremos situando los polos extremos del debate de la representación. Las posiciones que esbozamos aquí han sido simplificadas deliberadamente con el fin de establecer un marco de referencia claro. El espectro real de posturas, corrientes y

escuelas es muy variado -ver por ejemplo [Bechtel 1991][Churchland 1990][Bajo & Cañas 1991]. No pretendemos, por tanto, ser exhaustivos con esta exposición y dejamos deliberadamente de lado enfoques que han tenido una enorme relevancia en el estudio de la inteligencia y del comportamiento, como las teorías de Piaget, la Cibernética de Wiener, Shannon y von Neumann, las aportaciones desde la neurofisiología de Rosenblatt y Hebb o el Control Jerárquico de Albus, Meystel y Saridis.

1.2 Cognitivismo.

Cognitivismo, mentalismo, psicología cognitiva, representacionalismo, son todos términos relacionados doblemente por su oposición al conductismo y por sostener la existencia de procesos mentales causalmente conectados con el comportamiento. La Inteligencia Artificial Simbólica se sustenta en esta teoría para modelar el conocimiento y sus mecanismos de inferencia.

1.2.1 La Teoría Computacional de la Mente (TCM) de Fodor.

Tras la introducción del concepto de máquina universal por Turing y el descubrimiento de que una variedad de construcciones matemáticas pertenecían a la clase de los sistemas con capacidad universal de computación [Davies 1982], H. Putnam propuso la idea de Funcionalismo de Máquina de Turing como una concepción abstracta y por tanto no dependiente de una materialización concreta, de las condiciones necesarias y suficientes que debía poseer un sistema para que se le pudiese atribuir la propiedad de inteligencia [Bechtel 1991]. A partir de esta idea Fodor [Fodor 1983] desarrolló la Teoría Computacional de la Mente (TCM), junto a otros filósofos como Pylyshyn [Pylyshyn 1973]. Esta teoría intenta formalizar los conceptos que utiliza la psicología popular en su explicación causal de la conducta humana. Estos conceptos son términos mentales como *desear* y *creer* y se interpretan como estados mentales acerca de otros estados u objetos. Esta propiedad de ser sobre algo es lo que les confiere el estatus de intencionalidad. Cuando se forman oraciones que usan estos verbos, éstas suelen tomar la forma: “Juan cree que está lloviendo”, en la que el verbo está seguido por una proposición. Este tipo de estructuras se utilizan para especificar el contenido de estados mentales y se las denomina *actitudes proposicionales*. En este sentido, puede verse que se está sugiriendo una conexión fuerte entre el análisis del lenguaje y de la mente. Esta

relación es uno de los ejes centrales de esta teoría y trasciende a los modelos de la Inteligencia Artificial simbólica.

La Teoría Computacional de la Mente interpreta las actitudes proposicionales como relaciones entre organismos y proposiciones. Estas proposiciones son instancias de objetos lógicos que se representan internamente. En la oración del ejemplo anterior “está lloviendo” es una instancia del objeto “Estar lloviendo”. Estas representaciones internas constituyen un lenguaje computacional que Fodor denomina Mentalés o lenguaje del pensamiento [Fodor 1984]. Este lenguaje, como tal, tendría una sintaxis y una semántica: en virtud de qué propiedades sus fórmulas están bien formadas y qué relación existe entre las fórmulas y las cosas del mundo, respectivamente. De esta forma, la cognición es la manipulación sintáctica de los símbolos de este lenguaje según las reglas lógicas que se observan en las inferencias que usamos habitualmente -modus ponens, etc. Como arquitectura mental, esta teoría propone una división en tres niveles: transductores, que permiten la entrada de información desde el exterior, módulos de entrada específicos -visión, lenguaje, etc.- que realizan computaciones sobre esta información de forma encapsulada -estrictamente ascendente- y un sistema central no encapsulado donde reside el Mentalés.

Los módulos se definen en relación a una lista de propiedades [Fodor 1984]:

- Específicos de dominio, por ejemplo la visión o el lenguaje como facultades verticales frente a las tradicionalmente consideradas horizontales como memoria, aprendizaje, o razonamiento.
- De ejecución obligada, indica que no es posible bloquear intencionadamente el procesamiento que realizan los módulos.
- El sistema central tiene un acceso limitado a los niveles de representación de los módulos. Esta capacidad de acceso es progresivamente menor cuanto más interno-cercano a los transductores- sea el nivel de representación.
- Son rápidos de ejecución, en el sentido de que la información que proporcionan no está sujeta a procesos deliberativos de duración arbitraria.
- Están encapsulados informativamente o, dicho de otro modo, las computaciones que el módulo realiza no pueden depender del conocimiento general disponible. Se prohíbe, por tanto, una realimentación descendente que pueda alterar la forma en que los módulos procesan la información.

- La salida que generan está constituida por objetos simples, frente a una inferencia elaborada de los datos. El tipo de objetos serían categorías conceptuales básicas como “perro” y no construcciones complejas como “el recuento de fotones es X”.
- Están asociados con una arquitectura neuronal fija.
- Cuando fallan producen patrones característicos y específicos, que se pueden identificar con el dominio al que pertenecen. Los ejemplos aquí son afasias o agnosias.
- Presentan un desarrollo ontogenético característico, como sería el caso del lenguaje o la visión que tienen unos periodos críticos y predeterminados fuera de los cuales el módulo no alcanza su potencial característico.

El sistema central es muy diferente en cuanto a que no es modular y, por lo tanto, no está informativamente encapsulado ni restringido endógenamente a un dominio de utilidad. Su forma de operar es “mirar a lo que proporcionan los módulos de entrada, mirar lo que hay en la memoria y con esta información restringir la computación de las *mejores hipótesis* sobre cómo es el mundo” -[Fodor 1983], pag. 104. Estas operaciones se llevan a Mentalés cabo utilizando el Lenguaje del Pensamiento o Mentalés. Mediante este proceso el organismo *fija creencias* de forma no demostrativa, esto es, en lugar de una reducción a axiomas, el sistema opera seleccionando hipótesis y confrontándolas con datos. Este es el esquema de abducción [McDermott 1987] habitual donde si A implica B y sabemos que B, entonces hacemos la hipótesis de A. Fodor lo denomina confirmación científica y utiliza dos propiedades para caracterizar al sistema central:

- Isotrópico, establece que los hechos relevantes para la confirmación de una hipótesis pueden provenir de cualquier hecho -verdad- previamente establecido.
- Quineano¹, establece que el grado de confirmación asignado a cualquier hipótesis depende de las propiedades globales del sistema de creencias.

Ambas propiedades están relacionadas pero no son iguales. Tomando los ejemplos de Fodor sería posible que un dato acerca de la fotosíntesis pudiera ser relevante en la confirmación de alguna hipótesis en astrofísica, por la propiedad de isotropía. Sin embargo, ser quineano implica que podríamos tener dos teorías sobre astrofísica, ambas realizando las

1. Del filósofo W. Quine.

mismas predicciones pero una de ellas se confirma mejor que la otra, basándose en criterios globales como simplicidad, plausibilidad o conservadurismo.

El procesamiento que se da en los módulos también es del tipo no demostrativo y, por lo tanto, la percepción también es un mecanismo de selección y evaluación de hipótesis. La diferencia en este sentido entre el sistema central y los módulos está en que el primero no tiene limitaciones específicas en cuanto al conocimiento que puede integrar en la validación de sus hipótesis, mientras que los módulos computan en un contexto limitado y la información que pueden integrar es específica del dominio en el que están definidos.

La TCM es claramente un exponente del racionalismo. Como tal, parte de que tanto la percepción, el aprendizaje y el razonamiento son procesos de inferencia. De esta condición se deriva el carácter innato de los símbolos y mecanismos que permiten estas inferencias, ya que para empezar a percibir y aprender el sistema debe contar desde un principio con la maquinaria necesaria. No es posible, por tanto, aprender los símbolos iniciales o el lenguaje -Mentalés- que los maneja y estos constituyen necesariamente nuestra herencia genética. Esta propiedad contrasta fuertemente con las corrientes empiristas modernas -el conexionismo, por ejemplo- que proponen, en el límite, una vuelta a la *tabula rasa* [Fodor 1997].

Un sistema central no acotado, isotrópico y quineano tiene esencialmente un carácter no local. Por lado, dados unos hechos, todas las hipótesis compatibles pueden potencialmente llegar a confirmarse. Además, cada hipótesis que eventualmente llegue a confirmarse abre nuevas posibilidades de evaluación y, al mismo tiempo, podría descartar otras que se hubiesen confirmado anteriormente. Finalmente, los criterios de evaluación no sólo son criterios locales de confirmación de los datos, sino que también intervienen propiedades globales que miden lo que podríamos llamar compatibilidad entre la hipótesis en cuestión y el conjunto del conocimiento. Si se intentan abordar estos problemas mediante una formalización lógica en una máquina de Turing, aparecen inmediatamente los problemas conocidos de la IA *dura*, como el problema del marco, la explosión combinatoria o el razonamiento no monótonos. Comentaremos estas cuestiones en el siguiente apartado, dedicado a la Teoría del Sentido Común.

Lo más importante de la teoría de Fodor en relación con el estudio y construcción de máquinas autónomas es la propuesta estructural de sistemas periféricos modulares conectados a través de un sistema central. De hecho, las distintas áreas de investigación que giran

alrededor del comportamiento inteligente están, a grandes rasgos, estructuradas en torno a esta idea. Así, la Visión Artificial, el Lenguaje, la teoría de Control en Robótica y la IA Simbólica ocupan los huecos que la TCM parece haberles asignado. Parece que cualquier alternativa a esta teoría debe pasar por un replanteamiento profundo de esta estructura modular. En el segundo bloque de teorías, que hemos agrupado bajo el nombre genérico de Teorías de la Acción Situada, veremos que aunque es posible partir de principios muy diferentes, cuando se quiere alcanzar un cierto nivel de generalidad es difícil no recurrir a un nuevo sistema central.

Antes de terminar con la discusión sobre la TCM, comentaremos un aspecto especialmente controvertido y que afecta directamente a la construcción de sistemas sensoriales y perceptivos. Nos referimos al encapsulamiento informativo de los módulos periféricos. Entre los argumentos de Fodor podemos encontrar cuatro tipos de criterios: criterios físicos como la velocidad de procesamiento del módulo, la localización neuronal o los efectos de lesiones; criterios psicológicos basándose en observaciones del tipo: “saber que lo que voy a ver es una ilusión no me permite dejar de verla” como ocurre con las flechas de Müller-Lyer o “conocer las intenciones de mi interlocutor no cambia mi criterio de gramaticalidad al evaluar sintácticamente una oración”; criterios de principio que exigen una estabilidad mínima necesaria para que el sistema pueda funcionar, frente a una flexibilidad ilimitada que le permitiría a uno poder llegar a inventarse completamente la realidad de su entorno; y criterios metodológicos que reconocen una necesidad de modularizar para que la ciencia pueda tener una mínima posibilidad de éxito en su estudio de la mente.

Todos estos criterios son más o menos convincentes dependiendo de cómo se mire el problema y del tipo de experimentos neurológicos y psicológicos que se consideren válidos [Hofstadter 1995][Farah 1993] frente a los que Fodor elige en [Fodor 1983]. En la visión de bajo nivel, que sería la región más impenetrable según la idea de los módulos, están apareciendo un número creciente de evidencias que incluyen las interacciones con otros módulos, la penetración cognitiva descendente y la realimentación dentro del propio módulo visual. Los modelos de visión activa [Aloimonos et al. 1987][Aloimonos et al 1993][Bajcsy 1988] muestran como un sistema visual con movimiento controlado, y no sólo el ocular, puede simplificar drásticamente los problemas de inversión que aparecen en la reconstrucción de ciertos parámetros que relacionan al observador con la escena. En experimentos de seguimiento visual de objetivos en movimiento, Kower [Kower 1995] ha mostrado la dependencia de las trayectorias seguidas con el conocimiento previo, por parte del sujeto, del

comportamiento del objetivo a seguir. Un resultado experimental clásico muestra cómo afecta la co-ocurrencia de un estímulo auditivo y uno visual en la percepción del movimiento [Gregory 1979]. Un experimento reciente sobre sujetos en distintas condiciones de horizontalidad y gravidez y expuestos a una tarea de discriminación básica -un segmento vertical entre varios inclinados- muestra cómo los tiempos de reconocimiento dependen de factores no visuales [Marendaz 1997]. Las teorías de Kosslyn [Kosslyn 1994] sobre imágenes evocadas en el cortex visual primario tienen una aceptación cada vez mayor -a pesar del clásico y encendido debate entre Kosslyn y Pylyshyn sobre la naturaleza de las representaciones [Fodor & Pylyshyn 1981]- y sugieren una reutilización de la maquinaria visual perceptiva por parte de los procesos cognitivos como soporte de su propia representación. Finalmente, hay una aceptación casi total por parte de los neurofisiólogos en el papel fundamental que juegan las conexiones reafuentes entre las diferentes zonas del cortex visual -no sólo primario- en la percepción y cognición visual [Munford 1995][Zeki 1995][Desimone 1995 et al.][Jeannerod 1994].

En definitiva, lo que es discutible es el grado de encapsulamiento o penetrabilidad hacia abajo y lateral en los procesos de percepción. Desde luego, sería más fácil el estudio si el encapsulamiento fuese total como propone Fodor y, sobre todo, si no hubiese teorías alternativas, pero los resultados experimentales, la dificultad de encontrar los principios de funcionamiento de los módulos -especialmente el visual [Marr 1982]- y la existencia de teorías cada vez más sólidas sugieren, al menos, un acercamiento diferente a esta estructura rígida.

Finalmente, una crítica hacia la poca relevancia que generalmente se atribuye a los supuestos módulos motores. En general, la discusión de la TCM y de las otras teorías que veremos más adelante, también de corte racionalista, parecen olvidarse del papel esencial que juega el movimiento en la percepción y en el razonamiento abstracto. El tema es aún más grave si pensamos que la percepción en los seres vivos, que normalmente consideramos inteligentes, no se daría sin movimiento. Existen experimentos clásicos que confirman este dato [Gregory 1979], aunque normalmente se atribuyen únicamente a características del proceso de maduración biológico. Quizás sea necesario eliminar el movimiento para que una teoría representacionalista tenga sentido, o dicho de otro modo, quizás al introducir el movimiento desde el principio y con todas sus consecuencias deje de tener sentido una teoría donde lo importante es el conocimiento explícito atemporal. En el estudio del comportamiento

en agentes autónomos el problema del movimiento es ineludible desde el primer momento. Esta es, posiblemente, una de las razones por la que la Robótica Inteligente se está distanciando de la TCM y, también, uno de los temas centrales de esta tesis.

1.2.2 La Teoría del Sentido Común (TSC) de McCarthy.

La idea de formalizar el sentido común mediante la lógica tiene su origen en los años cincuenta a raíz de un artículo de John McCarthy, "Programs with Common Sense" [McCarthy 1958]. De todas las formas de entender la Inteligencia Artificial, la TSC es la que mejor caracteriza a la denominada *IA dura o lógica*. La tesis de McCarthy, que ya aparece en ese artículo y todavía la mantiene [McCarthy 1996], gira en torno a los siguientes puntos:

- El concepto de sentido común: *"Diremos que un programa tiene sentido común si es capaz de deducir automáticamente y por sí mismo una clase suficientemente amplia de consecuencias inmediatas de cualquier cosa que se le diga y de lo que ya sabe"*.
- "El conocimiento de sentido común incluye los hechos básicos sobre eventos y sus acciones, hechos sobre el conocimiento y cómo se obtiene, hechos sobre objetos materiales y sus propiedades y hechos sobre deseos y creencias", [McCarthy 1996].
- La distinción entre situaciones informativamente acotadas o con un contexto predefinido, en el mismo sentido que los módulos de Fodor, y situaciones informativamente de sentido común, en las que no se conoce a priori qué hechos son los relevantes y, por lo tanto, carecen de un contexto predefinido -como el sistema central discutido anteriormente.

Un sistema lógico de este tipo presenta dos tipos de problemas diferentes: problemas epistemológicos y problemas heurísticos. Los primeros hacen referencia al conocimiento que un agente inteligente necesita y a cómo lo representa. Los segundos a cómo este conocimiento se utiliza para decidir, resolver problemas y alcanzar objetivos.

Una diferencia importante entre TCM y la TSC es que esta última es deductiva, frente al sistema abductivo que propone Fodor. Sin embargo, los problemas que se derivan de la propiedad de no acotamiento son similares en ambos. El programa del TSC es lógico-matemático y su objetivo prioritario es encontrar formalismos que resuelvan los problemas epistemológicos. Al problema de los heurísticos se ha dedicado relativamente poca atención y el propio McCarthy reconoce un progreso casi nulo en este sentido. El planteamiento del papel

de los heurísticos en la TSC sigue siendo el mismo que se introdujo en 1959. Estos deben ser explícitos y deducibles del propio conocimiento del sistema. Esta posición separa definitivamente a la TSC del programa de Newell y Simon donde la arquitectura de representación y control predomina sobre el contenido.

Los intentos de formalizar el sentido común han conducido al concepto de razonamiento no monótono y al problema del marco. El razonamiento no monótono ocurre cuando se admite que al añadir nuevos hechos, algunas de las conclusiones pueden dejar de ser válidas. El ejemplo estándar es el siguiente:

Si te digo que Calimero es un pájaro tú puedes deducir que vuela. Pero si a continuación te digo que es un pingüino, la deducción que hiciste deja de ser válida.

La TSC asume que, en gran parte, el razonamiento de sentido común humano es no monótono. Otra observación es que al pasar de una situación informativamente acotada a otra no acotada o de sentido común, conlleva una forma de razonamiento no monótona. En síntesis, una lógica no monótona debe permitir avanzar en el razonamiento asumiendo por defecto lo que ya se sabe, mientras no haya evidencia de que algo ha cambiado. En general, estas lógicas son no decidibles [McDermott 1987] y la opción operativa suele ser recurrir a aproximaciones heurísticas.

Otro de los grandes problemas de la formalización lógica es cómo expresar las consecuencias de las acciones y otros eventos sin necesidad de hacerlo explícitamente para cada caso. Este problema se conoce como el *problema del marco*¹. Dennett -en [Boden 1989]- ha descrito este problema con suma claridad mediante la historia de un robot imaginario, R_1 , al que sus diseñadores le fijaron el objetivo de recuperar su batería de repuesto. La batería se encontraba dentro de un carro en una habitación cerrada en la que había una bomba de relojería programada para estallar en poco tiempo. R_1 hizo la hipótesis de que una cierta acción "SACAR(CARRO,HABITACION)" le permitiría materializar su intención. Poniéndola en práctica logró entrar en la habitación y sacar el carro con su batería de repuesto. Desafortunadamente, la bomba iba en el carro y a los pocos segundos estalló por lo aires. Sus diseñadores crearon un segundo robot R_1D_1 , con el objetivo de que su sistema cognitivo

1. En general hay toda una familia de problemas del marco dependiendo del aspecto técnico en concreto que se considere. Así en [Harnard 1993] se citan: el problema de la persistencia, el problema de la proyección temporal, el problema de la inercia, el problema de la cualificación, el problema de la ramificación, el problema de la predicción extendida, el problema de la planificación, el problema de la relevancia y otros. Algunos autores sugieren que el problema del marco es un caso especial de otros más generales como el problema de la descripción completa o el problema de la inducción.

tuviese en cuenta no sólo las implicaciones de sus actos, sino también las de sus efectos laterales. R_1D_1 elaboró enseguida la misma hipótesis que su antecesor y, como estaba previsto, comenzó a evaluar las implicaciones de seguir esa acción. Había terminado de deducir que el sacar el carro fuera de la habitación no cambiaría el color de las paredes y estaba enfrascándose en delucidar la implicación que tendría el que, al sacar el carro de la habitación, las ruedas girarán a más revoluciones que el número de ruedas del carro, cuando estalló la bomba. El cuento se puede resumir en la siguiente pregunta genérica: dado que creo todo *esto*, ¿qué *tengo* que creer también?

Los esfuerzos más recientes de este programa apuntan hacia la formalización del contexto dentro de la lógica y hacia la construcción de lógicas que puedan ser extendidas sin necesidad de una reelaboración completa. En definitiva, la IA lógica busca una formalización completa del conocimiento general -datos-, independientemente del método en particular que se utilice para inferir -programas. Al igual que la TCM, la TSC apuesta por una estructura lógica interna, un Lenguaje del Pensamiento innato, que computa creencias y deseos sobre modelos del mundo para generar el comportamiento que observamos en los agentes inteligentes.

Drew McDermott, siendo uno de los pioneros de la IA lógica, en su artículo “A Critique of Pure Reason” [McDermott 1987] analiza los diferentes argumentos a favor de la representación declarativa del conocimiento y termina concluyendo:

“... ahora podemos ver que no importa cuántos axiomas se escriban sobre un dominio, la mayoría de las inferencias que quieren obtener no se seguirán de ellos. Para que esto ocurra se debe especificar un programa”

1.2.3 La Hipótesis del Sistema de Símbolos Físicos (HSSF) de Newell y Simon.

En 1976 H. Simon y A. Newell propusieron la hipótesis del Sistema de Símbolos Físicos como condición necesaria y suficiente para que un sistema exhiba comportamiento inteligente general [Newell & Simon 1976]¹. Un sistema de símbolos físicos es una máquina universal que existe en un mundo físico. Este era también el punto de partida de la TCM y de la TSC. Sin embargo, Newell y Simon no se comprometen con la lógica como soporte necesario del conocimiento, sino que únicamente exigen un sistema de símbolos, expresiones que estructuran símbolos y procesos que generan expresiones. Al dar este paso, el mecanismo de

1. Este trabajo es la continuación de dos famosos programas anteriores: “The Logic Theorist” [Newell et al. 1957] y “The General Problem Solver” [Newell et al. 1963].

manipulación de símbolos pasa a tener una importancia central. La solución que proponen, en forma de una segunda hipótesis es la búsqueda heurística. A partir de este momento, la resolución de un problema consiste en encontrar la secuencia de transformaciones que conducen de un estado inicial a un estado objetivo, dados unos heurísticos que acotan el espacio de posibilidades.

El problema que aparece al introducir los heurísticos como parte fundamental del sistema es que en principio se pierde la propiedad de isotropía de Fodor o de sentido común de McCarthy. Un heurístico acota la búsqueda y, por lo tanto, impide que todo el conocimiento esté disponible en la evaluación de cada hipótesis. En el mejor de los casos un heurístico puede garantizar una solución óptima, si existe, en un problema, contexto o dominio concreto. Pero en la situación ideal en que se dispusiese de un heurístico óptimo para cada uno de los problemas posibles -algo irrealizable- el sistema seguiría sin exhibir sentido común o sin ser un sistema central genuino. Estas propiedades no exigen optimalidad respecto de los problemas, sino sensibilidad respecto del conjunto global de conocimiento.

La opción de la HSSF es en este sentido más pragmática y durante los años que siguieron a su introducción, el grueso del esfuerzo se centró en la construcción de sistemas específicos de un dominio. Los sistemas expertos llegaron a exhibir una capacidad de resolución de problemas equivalente y en algunos casos superior a la de los mejores expertos en el campo [Brachman et al. 1995].

Newell, al plantearse la cuestión de si las intenciones, deseos y otros elementos de la psicología popular están o no físicamente en el sistema, propone la noción de Nivel de Conocimiento [Newell 1982] como la forma en que un agente inteligente describe propiedades de otro agente inteligente. El Nivel de Conocimiento es, por tanto, descriptivo y existe en tanto que alguien lo utilice para referirse al comportamiento inteligente. Su soporte es el sistema de símbolos físicos pero no requiere de un lenguaje que lo implemente. Esto supone, al menos en teoría una nueva desviación del programa de la IA fuerte y del TCM. Un sistema será más inteligente en la medida en que utilice su conocimiento para acotar sus búsquedas en el espacio de representación.

Para abordar el problema de la utilización de un conocimiento arbitrariamente extenso en la resolución de un problema arbitrariamente específico -el problema del sentido común- Newell y otros colaboradores han desarrollado sobre las ideas anteriores una arquitectura

general de resolución de problemas: SOAR [Newell 1994]. Esta arquitectura es un ejemplo de lo que Newell denomina Teorías Unificadas de la Cognición, caracterizadas por su objetivo de explicar un rango amplio de los datos psicológicos disponibles del comportamiento cognitivo humano. SOAR es un sistema de símbolos físicos que utiliza dos principios básicos: la generación universal de subobjetivos y el empaquetamiento. El primero toma la forma de un mecanismo que permite generar subespacios de representación de problemas, cada vez que se produce una indecisión en la aplicación de operadores de transformación simbólica - esto es, cada vez que el sistema no sabe qué operador emplear para aproximarse al objetivo; el segundo principio es el mecanismo único y general de aprendizaje. Cada vez que se encuentra una solución a un problema, SOAR almacena y empaqueta esta solución junto con el contexto y las restricciones necesarias incorporándola al conocimiento general. Con esta estrategia, a medida que el sistema resuelve más problemas dispondrá de más conocimiento para aplicarlo en situaciones nuevas.

De esta forma, en SOAR el contexto no está en principio acotado ya que sus mecanismos de búsqueda le permiten explorar espacios de representación arbitrariamente grandes. En la práctica el sistema tiene que llegar a un compromiso entre el tiempo empleado en la búsqueda y la bondad del resultado. Es en este sentido donde entra la utilización inteligente ideal del conocimiento: imponiendo un contexto tal que el resultado sea indistinguible del resultado que se habría obtenido de no haberlo impuesto.

1.3 Teorías de la Acción Situada.

Pasamos ahora a analizar el segundo bloque de teorías. Aquí, los planteamientos de partida son radicalmente distintos a los que se estaban defendiendo en el apartado anterior. En general el conocimiento declarativo se sustituye por procesos, como los elementos básicos que soportan la cognición.

1.3.1 La Arquitectura de Subsunción de Brooks y la IA basada en comportamientos.

La más conocida de estas teorías, especialmente en Robótica, gira en torno a una arquitectura de control propuesta por R. Brooks [Brooks 1986][Brooks 1987][Brooks 1989]. Esta teoría tiene antecedentes claros en la Cibernética y la Teoría de Sistemas de los años 40 y 50, con los trabajos de Walter y Ashby. En su libro “El cerebro viviente” [Walter 1975],

Walter cita tres máquinas capaces de moverse en un entorno limitado persiguiendo algún objetivo: *Machina labyrinthea* construida por Wallace en 1952 que buscaba la salida de un laberinto; *Machina sopora* construida por Ashby y descrita en su libro "Proyecto para un cerebro" [Ashby 1952] que sólo se mueve cuando se le molesta y lo hace para buscar una nueva posición confortable y volverse a dormir; finalmente, *Machina speculatrix*, construida por él mismo y que ha pasado a la historia como la *tortuga de Walter*.

De estos trabajos pioneros se recogen, fundamentalmente, los conceptos de realimentación y arco reflejo realimentado y de control homeostático, como conjunto de reflejos que mantienen, de forma distribuida, las variables vitales del sistema dentro de sus rangos de supervivencia. Otro aspecto que se considera detonante en el surgimiento de la IABC (Inteligencia Artificial basada en el comportamiento- es la reacción contra el paradigma dominante de la Inteligencia Artificial Clásica y la Teoría Representacional que la acompaña. Los modelos computacionales asociados a los sistemas representacionales resultan ser extremadamente inapropiados para la construcción del más simple de los robots que exhiba un cierto grado de autonomía. Una revisión actual del libro clásico de robótica "Robotics: control, percepción e inteligencia" de Fu y Gonzalez [Fu 1987] revela inmediatamente este problema. La propia estructura del libro se corresponde con el modelo cognitivo al uso: sensación-representación-planificación-control-actuación. Obtener implementaciones operativas de cada uno de estos pasos sobre una máquina real y conseguir que el conjunto funcione ha resultado ser una tarea imposible, dados unos criterios mínimos de generalidad, robustez y flexibilidad. Sin embargo, se observa que los animales *no representacionales* se desenvuelven perfectamente en entornos complejos, e incluso exhiben patrones de interacción con el entorno con una estructura secuencial no trivial. En muchos casos, casi se podría decir que estas conductas tendrían que provenir de un mecanismo de planificación [McFarland et al 1994][Lorenz 1978][Walker 1987].

Otra influencia importante que se recoge en esta teoría proviene de la Psicología Ecológica de J.J. Gibson [Gibson 1986]. En su interpretación de la percepción visual, Gibson parte de la coevolución del agente y su entorno como escenario necesario para el estudio de los fenómenos visuales. En esta situación, el entorno ofrece invariantes al sistema perceptivo que éste detecta y los transmite al sistema de control de movimientos. Así, la información necesaria para el agente no se construye dentro a partir de una secuencia de proyecciones en la retina, sino que se extrae directamente mediante un procesamiento específico. La Óptica

Ecológica se sigue de la Física Ecológica, como interpretaciones psicológicas de los fenómenos físicos habituales. Esta idea de extraer aquello directamente necesario para satisfacer un comportamiento, aparece en la teoría de Brooks, en la IA basada en comportamientos y en algunas corrientes de la visión activa.

La Arquitectura de Subsunción de Brooks propone una división en niveles de competencias, donde cada competencia hace referencia a una cierta interacción entre el robot y su entorno, que satisface un objetivo implícito. Estos objetivos -por ejemplo evitar obstáculos, recargar las baterías, encontrar un camino libre, etc.- tienen distintos niveles de prioridad en función de su relevancia para la supervivencia de la máquina. Se rechazan las representaciones centrales donde confluye toda la información sensorial para codificarse simbólicamente, así como las búsquedas en estos espacios simbólicos. En su lugar, se define una arquitectura de lazos de control con acceso directo a los sensores y actuadores que funcionan concurrentemente y reaccionan de forma inmediata a cualquier situación desfavorable que se les presente [Maes 1993][Mataric 1994][Payton 1991][Steels 1993]. El diseño cuidadoso de esta estructura hace que el robot interaccione dinámicamente con su entorno utilizando sólo aquella información relevante para su objetivo y tomando ventaja de las regularidades que existen en esta interacción. Eventualmente, y con el desarrollo futuro de estos principios de diseño, emergerán los fenómenos mentales que la Teoría Representacional postula como explícitos en la arquitectura cognitiva.

Brooks, en su último trabajo [Brooks 1996], sintetiza su punto de partida en torno a tres principios: recapitulación de la evolución como metodología de diseño mediante la incorporación sucesiva de capas funcionales, mantener la actuación y la percepción lo más próximas posible en todo momento y minimizar la interacción entre capas. En estos principios hay un trasfondo de *no-quineanismo* metodológico proveniente de la ingeniería, donde el diseño desacoplado es fundamental para el desarrollo tecnológico. No es obvio hasta qué punto criterios de este tipo tienen que llevarse a una teoría de la mente.

1.3.2 Teoría de la Acción Situada: P. Agre y D. Chapman.

La teoría de Brooks y las ideas en las que se apoya han sido desarrolladas en diferentes direcciones por investigadores estrechamente relacionados con su trabajo. P. Agre y D. Chapman [Agre 1990][Agre & Chapman 1987][Chapman 1994][Agre & Chapman 1990] han incorporado conceptos de sociología [Suchman 1989] en la elaboración de una teoría de la

acción cuyo objetivo es explicar el comportamiento de los agentes inteligentes desde los patrones de interacción dinámica que los ligan al entorno. La teoría que proponen tiene como base la discusión de tres conceptos clave: la noción de interacción dinámica en el comportamiento, la reinterpretación de la noción clásica de planes como programas [Miller et al. 1969] y el concepto de representaciones deíctico-funcionales.

La primera de estas ideas hace referencia al hecho de que un agente está continuamente interaccionando con su entorno. Al estudiar esta interacción en diferentes configuraciones de agente-entorno, se observa que hay una estructura implícita que tiende a simplificar la carga cognitiva del agente involucrado. Por ejemplo¹, si en la cocina disponemos únicamente de un pequeño hueco para guardar las tazas de desayuno es más que probable que las coloquemos una encima de otra. El hecho de apilarlas hace que las que más se usan tiendan a acabar en la cima de la pila y, al reordenarse, desaparece el problema de buscarlas. Este efecto tan útil no surge de una planificación meticulosa. Por un lado la estructura del entorno limita las acciones posibles y, por otro, está la tendencia a elegir las acciones más económicas. La conjunción de estos factores en una interacción dinámica genera una ordenación que nosotros aprovechamos directamente.

La vida cotidiana, estudiada desde esta perspectiva, aparece repleta de estos efectos simplificadores que aprovechamos o podemos aprovechar de forma directa. El objetivo de esta teoría es entender cuál es la estructura de los mecanismos que permiten sacar partido de estas situaciones, detectarlas y, eventualmente, contribuir a generarlas en un ciclo continuo de interacción.

El segundo aspecto que Agre y Chapman plantean es la interpretación de planes como programas frente a planes como recursos². Los planes como programas responden a la idea clásica de representación y búsqueda en el espacio del problema. Estos autores cuestionan que la planificación, entendida así, pueda ser lo que organice y controle nuestras acciones cotidianas. El argumento básico se articula en torno a la observación de que la actividad cotidiana es extraordinariamente flexible y oportunista. Si el comportamiento resultante del sistema proviene exclusivamente de un mecanismo predictivo, necesariamente acotado en sus detalles y que se limita a dar una lista de precondiciones y acciones a tomar, se elimina la

1. Este ejemplo está tomado de la tesis doctoral de P. Agre, "The Dynamic Structure of Everyday Life"[Agre 1990].

2. En [Serradilla 1997] este mismo término se ha traducido como "planes expresados como sugerencias". Consideramos que ambas traducciones recogen la misma idea y no introducen confusión en la explicación del concepto.

posibilidad de sacar partido de situaciones nuevas, no previsibles, que se encuentran en la propia dinámica de interacción entre el sistema y su entorno. Un ejemplo ilustrativo que aparece en [Agre 1990] parte de un plan que elaboramos en el salón de casa y cuyo fin es traer la mermelada de la cocina. Al avanzar por el pasillo que conduce a la cocina y en la que encontraremos la nevera, vemos el bote de la mermelada en una estantería del pasillo pero nuestra obediencia al plan nos impide cogerlo y, posiblemente reconocerlo como útil, ya que no se dan las precondiciones necesarias. Los planes, argumentan, no pueden ser secuencias de órdenes a un programa ejecutivo tonto. La alternativa que proponen es tomar los planes como recursos, en el sentido de recomendaciones, a los que se recurre cuando hay problemas o como guión orientativo del objetivo general en curso. Desde este punto de vista, los mecanismos simbólicos habituales son un recurso más del sistema y no el motor de su comportamiento. Este recurso se interpreta de acuerdo a la situación concreta en que se halle el agente.

En la elaboración de esta idea, proponen que las representaciones que utilice el sistema hagan referencia a aspectos funcionales de la situación en que se encuentra y de la tarea en curso. Por ejemplo, *la-abeja-que-me-persigue* -el ejemplo está tomado de un juego de ordenador en el que unas abejas asesinas persiguen a un pingüino que es controlado por un programa- es una configuración del entorno directamente apreciable por el sistema perceptivo del agente y que contribuye a una acción inmediata. A estas representaciones las denominan deícticas o indexadas ya que el objeto al que se ligan no es una entidad única y objetiva del entorno como *abeja1*, *abeja2*, *etc.*, sino dependiente de la situación en ese momento. Los objetos se definen desde la interacción con ellos y, así, muchas abejas diferentes del juego pueden instanciar esa representación. Estos símbolos deícticos se procesan en el sistema periférico senso-motor, al que se accede desde un sistema central. El sistema central, que hace las veces de nivel cognitivo, es un circuito combinacional sencillo que al activarse liga unos símbolos con otros generando rutinas de interacción. El sistema puede verse como una red de pequeños procesos de percepción o actuación, en la que unos son precondiciones de otros. En la construcción de esta red, está implícito el “plan como recurso” ya que la mayor parte del conocimiento se encuentra en los símbolos deícticos y las posibles actuaciones. La estructura secuencial de la tarea puede expresarse de forma muy flexible dejando que gran parte de los detalles los resuelva la propia interacción del agente con el entorno. En las implementaciones que los autores han hecho de esta teoría puede verse cómo en el comportamiento que genera el sistema aparecen elementos típicos de una planificación “inteligente” como la secuenciación de acciones, la selección jerárquica de acciones o la resolución de objetivos que interaccionan.

Las implicaciones de estos trabajos son muy importantes. Por un lado se plantea la necesidad de revisar el concepto de planes como listas exhaustivamente detalladas de reglas que se dan a un módulo ejecutivo tonto. La objeción no es, como algunos sostienen, contra la representación del conocimiento sino contra determinada forma de representarlo muy anclada en un paralelismo directo con el lenguaje y sus connotaciones de secuencialidad. También en este sentido, los formalismos de representación objetiva del mundo y de razonamiento lógico que han utilizado habitualmente, no parecen teorías adecuadas para la generación efectiva de acción en agentes que interaccionen en un entorno que pretenda ser realista. La necesidad de situar al agente en su entorno es, un muchos aspectos una respuesta a los problemas clásicos del marco y del significado de los símbolos. La situación, en el sentido que se trata aquí, del agente, el entorno y la tarea en curso debe generar un contexto en el que sólo un subconjunto de las posibilidades del agente sean apropiadas sin que al mismo tiempo restrinja en exceso la forma en que estas acciones se llevan a cabo.

1.3.3 Teoría de la Cognición Situada: W. Clancey.

La teoría que W. Clancey propone pretende ir aún más lejos en la crítica del representacionalismo [Clancey 1995][Clancey 1997]. Al extender la idea de acción situada a la de cognición situada, esta teoría sugiere que incluso las representaciones más estables que un agente usa, como las que articulan el espacio físico conocido, son recreaciones continuas de los procesos perceptivos y motores. Las estructuras simbólicas no están dentro del agente esperando ser activadas por algún mecanismo perceptivo de comparación. Se encuentran en el exterior en forma de mapas, libros o señales de tráfico y permanecen ahí. El agente cognitivo situado interacciona con ellas en secuencias de procesos senso-motores que acaban activándose unos a otros en un aprendizaje continuo [Clancey 1996].

En un ejemplo de esta idea, el autor describe la utilización de un programa de correo electrónico en el que cada envío supone la activación de una ventana en la pantalla. Al ir a enviar un mensaje a una persona y una vez abierta la ventana correspondiente, recuerda que debe enviar otro mensaje a un segundo destinatario. En ese momento, abre otra ventana y comienza a escribir los datos necesarios. La primera ventana, parcialmente visible en la periferia actúa como puntero al proceso inicial que quedó suspendido pero activo. Un simple cambio de atención entre las ventanas es suficiente para traer a un primer plano el proceso

asociado con todos sus parámetros relevantes. Además, la relación que se establece entre ellos hace que al concluir uno, inmediatamente se conmute al que quedó pendiente.

La idea recuerda a la teoría de esquemas de Arbib -ver [Arbib 1995] para una síntesis- aunque, en este caso, no se especifican las estructuras computacionales que puedan soportar una implementación directa. Por otro lado, la idea de una reorganización continua de la estructura de procesos es muy atractiva, aunque en su estado actual es poco más que una sugerencia.

1.3.4 Autopoyesis Cognitiva: Agre y Horswill.

El último enfoque que comentaremos es el que más lejos lleva la idea de interacción agente-entorno. La idea de Agre y Horswill [Agre & Horswill 1997] es explorar la propia estructura de esta interacción en actividades cotidianas. Para desarrollar esta teoría parten de los estudios sobre acción situada del primer autor, de trabajos del segundo [Horswill 1993] y de la idea de autopoyesis de Matarían y Varela [Varela 1992]. Un sistema aupoyético es aquél que, al interaccionar con su entorno, mantiene su propia estructura.

Desde esta idea, Agre y Horswill estudian cómo una cantidad importante de la actividad diaria está dirigida a mantener ciertas regularidades en nuestro entorno. A su vez, esas regularidades simplifican drásticamente la complejidad de las tareas que llevamos a cabo. Uno de los ejemplos que estudian es la actividad en un modelo simplificado de cocina. Si se comienza la elaboración de varios platos simultáneamente, es muy fácil que se den situaciones de conflicto entre subobjetivos. Por ejemplo, si no se limpian los cubiertos cuando se utilizan se corre el riesgo de quedarse sin ninguno disponible. Cuando esto ocurre, lavarlos pasa a ser un objetivo que puede interaccionar con otras tareas en marcha. El objetivo de su estudio es analizar las condiciones en que es posible reestructurar planes complejos intercalando acciones de reordenación, para que eventualmente desaparezca la necesidad misma de planificar. Un algoritmo de planificación complejo que requiere una representación sofisticada del entorno se sustituye por un autómata de estados, en el que la percepción inmediata de ciertas situaciones conlleva directamente la acción óptima.

El estudio de la posibilidad de transformación entre un mecanismo y otro es matemático y no pretende reflejar aspectos del aprendizaje humano. La cuestión de cómo se llega a estas estructuras simplificadas sin recurrir a planificaciones prohibitivas es un tema abierto. Los

autores sugieren, en este sentido, la transmisión cultural como depósito de soluciones disponibles e inevitablemente accesibles a los nuevos agentes que se incorporan a ella. Esta idea de trasladar las fronteras de lo cognitivo al entramado socio-cultural está recibiendo una atención creciente en los últimos años [Hutchins 1995].

1.3.5 Funcionalismo Homuncular (FU) de Denett.

El FU es una teoría propuesta por Dennet como alternativa a las teorías que sostienen la existencia de un sistema central [Dennett 1992]. En esta teoría la región central común que él denomina, Teatro Cartesiano, y donde localiza al homúnculo clásico se sustituye por una sistema distribuido de entidades, ninguna de las cuales requiere las propiedades del sistema central. El conjunto de estos elementos interacciona continuamente, resolviendo problemas locales y comunicándose entre sí. Como producto de esta interacción se obtiene el nivel de inteligencia que las otras teorías pretenden explicar, sin recurrir a características globales o alusiones al sentido común. Como teoría filosófica ha sido inspiradora para la IA. Una teoría similar es la propuesta por Minsky en su libro “La Sociedad de la Mente” [Minsky 1986]

1.4 Reflexiones sobre Inteligencia y Comportamiento.

La división que hemos planteado para exponer los dos paradigmas dominantes en Inteligencia Artificial y Robótica Inteligente prepara el terreno para abordar el problema de la autonomía en el diseño y construcción de robots. Partiendo de este punto, exploraremos algunas simetrías, diferencias y similitudes buscando obtener conclusiones sobre las que estructurar el resto de este trabajo.

1.4.1 Dualidad: Representación vs Interacción.

Cada uno de los enfoques comentados parte de conceptos opuestos en su explicación de la noción de inteligencia o comportamiento inteligente. En consecuencia, aparece una dualidad constante que se puede interpretar con diferentes matices: datos vs procesos, representación vs interacción, sistema central vs agentes distribuidos, razonamiento vs actuación, modelos directos vs modelos inversos, planificación vs control, conocimiento explícito vs conocimiento implícito, etc.

Lo que parece estar detrás de esta dualidad es la metáfora del computador y la separación en datos y procesos que ésta conlleva. A esta separación hay que añadir la eliminación del tiempo en el concepto de máquina abstracta. Ambos aspectos aparecen implícitamente y de forma sistemática en las diferentes críticas que a lo largo del tiempo se han hecho a cada una de estas teorías. En concreto, las dificultades para entender el carácter no acotado del sistema central y el problema del marco, en uno de los extremos, y la inadecuación de las teorías basadas en actividades funcionales para explicar fenómenos perceptivos complejos, en el otro.

Al intentar poner la mayor parte del peso en uno de estos extremos, aparecen problemas de gran dificultad que señalan hacia el extremo abandonado. Sin embargo, se llega a una situación tal que las aportaciones que pudiesen venir de ese extremo no solucionan los problemas creados. Un ejemplo típico es la división que McCarthy hace de problemas epistemológicos y heurísticos, elaborando su teoría en torno a los primeros y afirmando que los segundos deben ser deducibles lógicamente de los primeros. Después de cuarenta años, él mismo admite que no se han hecho avances significativos en los problemas heurísticos, aunque muchos de los problemas de la TSC parecen estar relacionados con su carácter fundamentalmente estático [McDermott 1987]. Otro ejemplo es la referencia que hace Fodor a ciertos *heurísticos generales* que podrían solucionar el problema de una computación no acotada en el sistema central. También en este orden de cosas se encuentran propuestas todavía más radicales, en las que la única opción posible para solucionar el problema de las búsquedas no acotadas es la computación cuántica [Penrose 1994].

En el otro extremo, las teorías de la acción situada parten de un contexto a priori, aquél donde el agente interacciona con su entorno. En este contexto el agente evoluciona maximizando su capacidad de supervivencia, bien biológica o artificial. Al definir un tipo de función externa desaparece el problema de adquirir una representación objetiva, central y simbólica sobre la que decidir el curso de sus acciones, con todos los problemas que esto conlleva. Es suficiente con adquirir la información mínima, si es posible invariante, que permita establecer lazos de control locales. La satisfacción simultánea de estos lazos maximiza la función global y el sistema se adapta, de forma máximamente eficiente, a su entorno. Sin embargo, el precio que se paga es alto. Si el sistema no representa¹ y, en concreto

1. Las representaciones a las que nos referimos aquí no tienen por que ser simbólicas. Un modelo directo del tipo que se utiliza en control predictivo es un sistema dinámico implementado computacionalmente y representa al sistema que modela.

no se representa a si mismo, no podrá predecirse y no será capaz de aislar su propio comportamiento del comportamiento conjunto que resulta de su interacción con el entorno. La cuestión que surge inmediatamente es ¿para qué necesita un sistema representarse y aislar su propio comportamiento si puede sobrevivir sin ello? El problema con esta objeción es que, quizás, sobrevivir no sea la única causa por la que los sistemas cambian. Si se acepta esto, al menos en alguna medida, entonces el fin último de las cosas deja de ser lo único importante. En su lugar se pueden plantear otras cuestiones como el interés que puede tener una aproximación general frente a una colección de soluciones particulares; la posibilidad de aceptar un medio representacional para entender fenómenos más complejos como el lenguaje natural, la analogía o la imaginación, que quedan claramente fuera del alcance de una teoría neoconductista; el problema de acceder a estructuras complejas del entorno si no se dispone de un mecanismo constructivo y que exigiría la existencia de una teoría de invariantes todavía desconocida; o el problema, más directo, de entender el espacio que nos rodea de una forma que no puede estar limitada a la simple memorización de balizas.

Nuestra intuición es que al abordar cualquiera de estos problemas aparece la noción de predicción a diferentes niveles y en diferentes contextos. La predicción del movimiento propio es necesaria para la estabilización y continuidad perceptivas y para el control preciso de elementos con retardo. La predicción de la dinámica de objetos animados del entorno es necesaria para interaccionar con ellos. Ambos tipos de predicciones tienen que estar estrechamente relacionados si se quiere que operen simultáneamente. El argumento por el cual sostenemos que es necesario aislar el comportamiento propio de la interacción con el entorno y llegar a una representación de uno mismo es porque, en última instancia, creemos que entender es una forma de proyectar lo interno sobre lo externo reproduciendo en ese proceso la sensaciones propias equivalentes. Si esto es aproximadamente acertado, el punto de partida hacia el comportamiento inteligente recoge gran parte de las intuiciones a ambos lados del dualismo actual. Las representaciones son necesarias no para predicar sobre ellas, o no únicamente para ello, sino para modelar el comportamiento propio y utilizarlo como herramienta de interpretación del espacio, de los objetos, de otras criaturas y así sucesivamente en una escala de complejidad creciente. Esta conjetura tiene un caracter marcadamente Piagetiano aunque intenta recoger teorías y técnicas más recientes que han aportado nuevas vías de solución a problemas tradicionalmente abiertos.

1.4.2 La estructura conceptual.

La Inteligencia Artificial se ha organizado históricamente en torno a facultades verticales como el lenguaje, la visión o la motricidad, y horizontales como el aprendizaje, el razonamiento, la memoria o la adaptación. Todas estas facultades se sustentan en una noción general de concepto, como entidades estables -objetos, procesos, patrones de actividad, etc.- que permiten al agente inteligente asimilar ordenadamente su entorno¹. Esta fragmentación de la adquisición y asimilación de la información aparece en todas las teorías de una u otra manera. En la IA simbólica, la conceptualización se ha orientado fundamentalmente hacia los mecanismos inductivos de extracción de regularidades en los datos y los deductivos que explican la pertenencia o no de los datos a las categorías. En la IABC es el comportamiento el que se divide a priori en clases separadas o se aprende inductivamente por optimización de un refuerzo externo.

Los conceptos se explican, en general, desde dos posturas enfrentadas: el conexionismo, que representa a la vertiente empirista y defiende mecanismos generales de aprendizaje que no requieren conocimiento específico a priori; y el innatismo que parte de una dotación innata de primitivos conceptuales y de una maquinaria de inferencias². Dentro de esta última posición hay una división clásica entre el *atomismo* de Fodor, donde los conceptos no forman un sistema generativo y la única posibilidad de relación es a través de postulados de significado, y el esquema inferencial de Jackendoff [Jackendoff 1995] que parte de unos hipotéticos *rasgos de significado* articulables entre sí, que permiten la generación de un número infinito de conceptos.

La idea de concepto que defenderemos aquí y que expondremos brevemente es el resultado de investigaciones que se están llevando a cabo dentro de un grupo interdisciplinar en el que participa el autor³ [Uriagereka 1996][Fragua 1997a][Fragua 1997b]. Los esfuerzos por buscar una estructura coherente en el espacio conceptual humano dieron ya frutos en la época de los griegos y desde entonces se han planteado diversas ontologías. Desde el punto de

1. Esta idea de asimilación ordenada proviene de Kauffman [Kauffmann 1995] en una reflexión sobre la importancia e implicaciones del proceso de digestión en los seres vivos. El hecho de que necesitemos descomponer el alimento en componentes básicos para luego reconstruirlos según nuestra propia estructura, sugiere una analogía con procesos como la percepción o la cognición.

2. Esta división es perfectamente compatible con la que hemos planteado al comienzo del Capítulo. Utilizamos aquí el término "conexionismo" por su relación más directa con el aprendizaje y en contraposición a lo innato.

3. Mi agradecimiento a Alfredo Bujosa, Félix Monasterio, Juantxo Romero, Alberto Ruiz y Juan Uriagereka por las sugerencias y comentarios sobre estas ideas que provienen del trabajo común de todos ellos.

vista lingüístico hay evidencias claras de que distintos tipos de elementos del léxico se comportan sintácticamente de forma diferente. Esta variabilidad se puede ordenar según una estructura de niveles dimensional, en la que un nivel superior incluye necesariamente a todos los niveles inferiores a él. Lo que expresan estas dimensiones es una idea de complejidad que aunque todavía no está formalmente definida, es intuitivamente simple. Un ejemplo de lo que podrían representar en relación a los nombres del léxico sería: abstracto - como rojo o esperanza, masa, forma, animado y posiblemente alguna más. Respecto a los verbos habría una ordenación análoga con estado, actividad, logro, etc. Lo importante de esta clasificación no es lo que represente cada dimensión, sino la estructura implicativa que predice que si algo es animado va a tener, necesariamente, propiedades de forma, masa, etc. Los principios que rigen la construcción sintáctica de frases se muestran, hasta donde se ha podido observar, sensibles a esta dimensionalidad.

A partir de aquí es posible plantear una hipótesis: si otros componentes de la estructura mental que podamos considerar como módulos en el sentido de Fodor¹ como el visual o el motriz, son también sensibles en el procesamiento que realizan a esta dimensionalidad de los conceptos, y si esta dimensionalidad es compatible entre los distintos módulos, entonces habría evidencias razonables para sugerir que esta característica es una propiedad intrínseca del sistema conceptual humano. Como propuesta tentativa de trabajo hemos sugerido una posible división para el módulo visual: texturado -que presenta algún componente frecuencial distinguible- agrupación, forma, articulación y animación². Para el módulo motriz habría una clasificación análoga que podría articularse en torno a nociones como postura, movimiento coordinado y ritmo.

Esta hipótesis, de verificarse, podría tener implicaciones importantes, ya que define un marco puramente estructural para el espacio de conceptos, matemáticamente simple y coherente con los principios de organización biológica que se plantean actualmente. Las investigaciones experimentales de algunos neuropsicólogos como A. Damasio y sus propias propuestas teóricas son compatibles con un esquema mental de este tipo [Damasio 1994][Damasio et al.1995].

-
1. No todas las propiedades expuestas al principio del capítulo son necesarias para considerar un criterio de modularidad. En concreto, las relacionadas explícitamente con el encapsulamiento de la información son discutibles en este contexto, aunque no entraremos aquí a discutir este aspecto.
 2. Esta clasificación es independiente de que el fenómeno sea bidimensional o tridimensional y estático o dinámico.

Un concepto básico, en definitiva, reúne aspectos de los distintos módulos que configuran el repertorio de posibilidades perceptivas, motrices y lingüísticas, y quizás otros más. Para que un concepto reúna todas estas facetas y el acceso a ellas sea inmediato y automático, es necesario que estos módulos se comuniquen entre sí, al mismo tiempo que con el exterior. La sugerencia aquí es introducir la noción de *modularidad porosa*, donde el encapsulamiento informativo justificado en gran medida por un sistema central, se reemplaza por una interconectividad organizada según la estructura dimensional. La comunicación entre módulos da lugar a un sistema dinámico cuyo comportamiento en el tiempo articula la propia formación de los conceptos.

Aunque estas ideas son muy provisionales, permiten mantener una visión de conjunto desde la que planificar estrategias concretas y objetivos en la investigación aplicada sobre robots móviles. Esto se hace especialmente relevante cuando se pretende utilizar sistemas sensoriales complejos, como son los sistemas de visión artificial, en actividades intrínsecamente dinámicas como las tareas más simples de navegación. Si además se pretende que las soluciones no sean estrictamente específicas de un problema concreto, entonces, se hace imprescindible disponer de un marco teórico general.

1.4.3 La construcción del espacio como prerequisite para la inteligencia.

Una teoría de los conceptos sirve para restringir la clase de *materia prima* con la que *asimilamos* nuestro entorno. Sin embargo, hacen falta otras teorías para entender cómo estructuramos aquello que asimilamos en nuestra interacción con el entorno. Desde el punto de vista de la robótica móvil, resulta evidente que este problema está en la base de cualquier marco teórico que pretenda explicar lo que habitualmente entendemos como autonomía. La complejidad de integrar la percepción con la acción, el aprendizaje con la memoria, los conceptos, el tiempo y el espacio han hecho de esta tarea un reto casi inalcanzable.

A grandes rasgos, la investigación sobre la relación de un agente con el espacio que le rodea ha seguido, en Robótica, tres caminos diferentes que guardan una estrecha relación con las líneas teóricas planteadas al comienzo del capítulo. El enfoque que podríamos llamar clásico, utiliza el soporte matemático de la teoría de grafos, las formas geométricas regulares y la estimación de distancias para la construcción de modelos precisos del entorno. Estos modelos cumplen la función de ser representaciones apropiadas para el razonamiento simbólico y las búsquedas heurísticas [Lozano-Pérez 1987][Brooks 1983][Gasós et al. 1997].

En clara contraposición y fuertemente anclados en las teoría de la acción situada, están los sistemas basados en comportamiento. En ellos, los robots aprenden a construir superficies de control, que ligan estados sensoriales con direcciones de movimiento maximizando alguna función objetivo [Zimmer 1996]. Finalmente, y como estrategia intermedia, se encuentran las técnicas de *rejilla*, que discretizan el espacio cercano en celdas a las que se atribuyen estados como “ocupada”, “libre” o “desconocida”. Esta estructura se pueden tratar como un mapa donde no es necesario identificar objetos y aplicar algoritmos de difusión que simulan la propagación de un fluido por una superficie canalizada y permiten encontrar caminos libres de obstáculos entre dos puntos. Alternativamente, esta estructura puede interpretarse como una memoria sensorial a corto plazo menos sensible al ruido y que permite estrategias de control directo más eficientes [Elfes 1987][Schneider 1996].

Dependiendo de los presupuestos del marco teórico correspondiente, cada enfoque reinterpreta el problema de la localización espacial de un modo diferente. En el primer caso, la necesidad de una conceptualización espacial de origen lingüístico y la influencia de teorías perceptivas como la de Marr imponen una interpretación geométrica de un mundo divisible en formas platónicas. En el extremo opuesto, las ideas de psicología ecológica de Gibson se combinan con la etología de los insectos para ver al entorno, al agente y a su objetivo como un todo dinámico, donde sólo se percibe aquello que está justificado por un criterio adaptativo inmediato.

Siendo ambiciosos, esperaríamos de una teoría de la percepción del espacio que predijera propiedades relacionadas con el reconocimiento de lugares habituales, la facilitación progresiva en la elección de caminos conocidos, la sorpresa ante cambios no esperados, la estabilidad y continuidad perceptiva en el entorno cercano, los sistemas de referencia relativos, las dificultades en la reconstrucción precisa de lo que no es directamente perceptible, la no homogeneidad en la adquisición y almacenamiento de la información espacial, la predicción continua de la entrada perceptiva a diferentes escalas espaciales, la cooperación de los distintos sistemas sensoriales en la discriminación de localizaciones y con una dependencia estrecha entre la estructura conceptual y la organización y contenido de la memoria espacial. Obviamente estamos muy lejos de poder acercarnos a estas pretensiones, ni tan sólo de poder articularlas de una forma coherente. A pesar de ello, creemos que éste es un problema básico que hay que abordar en su conjunto para mejorar nuestra comprensión de la inteligencia a través de la construcción de robots autónomos.

El problema que se plantea al relacionar todos estos aspectos en una estructura común, que sea compatible con las diferentes aproximaciones teóricas a la inteligencia y con las tecnologías disponibles para la construcción de robots móviles, es el origen de esta tesis.

Visión no homogénea y atención visual

Movimientos oculares (Yarbus 1967)



De todas las modalidades sensoriales, la visión es la que más se ha investigado a todos los niveles, desde la variedad evolutiva en la formación de ojos -más de cuarenta tipos diferentes- hasta la filosofía de la percepción visual, pasando por la neuroanatomía y fisiología del cortex visual en los mamíferos, la óptica fisiológica, el análisis matemático de las señales visuales, los movimientos oculares y los modelos computacionales en visión artificial. La posibilidad de adquirir información sobre el entorno captando la luz reflejada en él ha dado lugar a diferentes teorías sobre la interpretación y uso de esta información. Las teorías más influyentes de este siglo se enmarcan en paradigmas de la Psicología y, en mayor o menor medida, han contribuido a moldear el área de investigación que conocemos como visión artificial.

Más recientemente, esta disciplina ha comenzado a recuperar conceptos y técnicas de la visión biológica que nunca llegaron a alcanzar a la corriente cognitiva dominante en las dos últimas décadas. Lo más importante es la relación fundamental entre el movimiento y la percepción visual a la que se ha dado un nombre recuperado de los años setenta, *visión activa*. También se han comenzado a estudiar las ventajas computacionales de la configuración *no homogénea* de conos y bastones en las retinas de muchos animales, incluido el hombre. Finalmente y, en parte como producto lateral de ambas, el fenómeno de la *atención visual*. Si a la conjunción de estos factores añadimos la influencia de las teorías de la acción situada en detrimento del enfoque representacionalista, nos encontramos con una ausencia total de consenso en la propia definición del objeto de investigación en visión artificial. Esta situación, aún siendo bastante habitual en las áreas relacionadas con el estudio de la inteligencia, es especialmente problemática para el diseño y construcción de robots móviles que basen buena parte de su autonomía en la visión.

La línea que seguimos en esta tesis pretende ser sensible a esta situación y, por ello, nos hemos centrado en un problema básico, la percepción del espacio. La hipótesis es que esta actividad subyace a otros fenómenos más complejos como el reconocimiento de objetos, formas animadas o el razonamiento espacial, entendido como una recuperación selectiva de información previamente adquirida.

En el resto del capítulo se sintetizan ideas provenientes de las teorías generales de visión y de las incorporaciones más recientes relacionadas con la visión activa, la visión no-homogénea, los movimientos oculares y la atención visual. De una forma u otra hemos incorporado aspectos de estas áreas en el desarrollo de las ideas que proponemos y en la construcción del robot móvil.

2.1 Teorías de la Visión

Las tres teorías sobre la percepción visual que más influencia han tenido a lo largo de este siglo son la Gestalt, la Psicología Ecológica y la Teoría de D. Marr. De todas ellas hay aportaciones vigentes en el campo de la visión artificial y cada vez, en mayor medida, se tiende hacia modelos de integración donde las viejas incompatibilidades históricas puedan verse como casos particulares de un fenómeno más general.

La Psicología de la Forma (Gestalt) sostiene que la organización es intrínseca al sistema perceptivo y se rige por un principio de minimización que hace que la respuesta perceptiva ante una situación determinada sea lo más económica posible. La búsqueda de este principio condujo a la formulación de una serie de criterios de agrupamiento como los de proximidad, semejanza, simetría, buena continuación, destino común, cierre y desarrollo reciente. La percepción de formas se entiende como un proceso termodinámico -en terminología más reciente- de transición a estados de equilibrio mínimamente energéticos. Las formas se perciben de una determinada manera porque se corresponden con un estado estable, dentro del sistema perceptivo. Quizás, la sugerencia más importante de esta escuela haya sido llevar la noción de interacciones dinámicas entre partes, al campo de la percepción. La implicación directa se sitúa en el problema de la separación entre figura y fondo, como una propiedad global que no es reducible a una combinación estática de las propiedades de los elementos constituyentes. Estos elementos constituyentes no pueden ser absolutos, sino relativos al nivel de descripción del proceso dinámico que se analiza [Köhler 1967].

La segunda teoría es la Psicología Ecológica¹ propuesta originalmente por J.J. Gibson. Desde esta teoría se niega la validez de los conceptos físicos de espacio y tiempo como sistema de referencia absoluto para la percepción. El espacio y el tiempo perceptivos se crean desde la percepción de la permanencia y el cambio, relativos a la interacción entre el individuo y el entorno. El campo visual se analiza como una colección de ángulos sólidos con un vértice común en el observador. La delimitación de estos ángulos viene dada por las propiedades del entorno que refleja la luz. La compleja disposición de estas propiedades, relativas al observador, hace que estos ángulos formen una estructura anidada donde unas regiones caen dentro de otras. Cuando hay movimiento relativo entre el observador y el entorno se producen cambios en la disposición de estos ángulos pero, al mismo tiempo, aparecen invariantes de duración variable, que el sistema perceptivo detecta y el individuo utiliza en la coordinación de sus acciones. Gibson utiliza el dicho "Cuanto más cambia más parecido es" para recalcar esta idea de invarianza percibida dinámicamente. Al movernos la estructura que percibimos cambia suavemente y en este transitar progresivo captamos lo que no cambia: el invariante que subyace en la estructura que se proyecta [Gibson 1986].

La tercera teoría se debe en gran parte a D. Marr y se sitúa en el marco de la Teoría Computacional de la Mente. Es, sin duda, el paradigma actual dominante en el estudio de la Visión. El objetivo de la visión según Marr es la reconstrucción tridimensional de la estructura del entorno desde la imagen retinal. El problema se formula geoméricamente: dada una proyección bidimensional de intensidades luminosas, ¿cuál es la estructura del entorno que la generó?. El problema está mal caracterizado ya que existen infinitas configuraciones del entorno que generarían esa proyección. Para abordarlo se plantea un sistema modular, dividiendo el problema según diferentes aproximaciones geométricas. Así, los módulos toman nombres como: recuperación de la estructura a partir del movimiento, de la estereoscopia, de las sombras, etc. Las soluciones parciales en cada módulo, deben luego reunirse en una solución global y coherente. En general, el enfoque se conoce como "Structure from X". El proceso reconstructivo pasa por tres etapas que definen las correspondientes representaciones intermedias: la representación 1D, 2^{1/2}D y 3D. La primera recoge la estructura de bordes o regiones de cambio abrupto de intensidad debidas a discontinuidades en la superficies que reflejan la luz; la segunda es una composición de planos orientados en el espacio, similar a una estructura reticular; y la tercera es el resultado de asociar a esta rejilla elementos

1. Actualmente el centro neurálgico de la psicología ecológica es el Departamento de Psicología de la Universidad de Michigan. <http://ione.psy.uconn.edu>

volumétricos generalizados según información proveniente de una memoria o base de datos. Esta representación interna constituye la entrada visual a la "zona cognitiva" donde se llevan a cabo los procesos interpretativos y de toma de decisiones.

Las tres teorías, tradicionalmente estancas entre sí, han comenzado a reinterpretarse en propuestas más integradoras. La situación más interesante ha comenzado con la disponibilidad de tecnologías de proceso y control más rápidas y económicas. Esto ha supuesto una transición desde el análisis estático de una imagen y los problemas relacionados con el reconocimiento de patrones, la identificación de objetos, etc., a la visión en movimiento en la que intervienen múltiples objetivos perceptivos y no perceptivos en la generación de comportamiento autónomo. La recuperación de algunos aspectos de la teoría de Gibson dentro de la visión activa ha llevado a cuestionar la propia naturaleza del proceso reconstructivo que sugiere Marr. En su lugar, se están dedicando esfuerzos a la investigación de invariantes visuales, entendidos como procesos específicos capaces de suministrar información directamente utilizable en el control del movimiento, la navegación o la manipulación [Young et al. 1998]. Por otro lado, también la teoría de la Gestalt está recibiendo una atención importante con las recientes formulaciones dinámicas no lineales del Espacio de Escala [Caselles et al. 1996]. En este marco, el procesamiento visual temprano se modela como un proceso de difusión que evoluciona en el tiempo. En la versión lineal este proceso se corresponde con la ecuación de difusión del calor. Durante la integración de la ecuación se van obteniendo versiones de la imagen en las que se han filtrado componentes de alta frecuencia. Al introducir no linealidad en la ecuación se pueden preservar ciertas características de interés para la extracción de formas.

2.2 Visión activa

En los últimos años el campo de la visión artificial se ha volcado en un esfuerzo por entender la percepción visual como un proceso activo, estrechamente ligado a las funciones motrices y de control. Una de las últimas definiciones, propuesta por Pahlavan es:

Un sistema visual activo es aquél capaz de manipular sus parámetros visuales de una forma controlada para extraer información útil sobre la escena en el tiempo y el espacio [Pahlavan 1993].

El término activo se toma en contraposición a la idea de observador pasivo que no es capaz de elegir cómo quiere ver la escena. Habitualmente se identifica esta última posición

con la gran mayoría de los trabajos realizados en visión artificial en los últimos veinte años. Desde el trabajo de Gibson y su teoría de la visión ecológica, la acumulación de evidencias por numerosos estudios posteriores sobre el papel de los movimientos de los ojos [Steinman 1995][Carpenter 1988][Kower 1995] en la percepción visual y las propuestas computacionales de [Ballard 1989][Bajcsy 1988][Aloimonos et al. 1987][Ullman 1984] se ha hecho patente la necesidad, por un lado, y los beneficios, por otro, de tratar al sistema visual como un elemento oportunista capaz de utilizar, en cada momento, los mecanismos más apropiados para completar la tarea en curso.

La visión activa incorpora y enfatiza tres factores básicos frente a su versión pasiva:

- La utilización de mecanismos de control de los parámetros visuales y del entorno, tales como el zoom, el enfoque, el diafragma, la posición de la cámara, su velocidad o la posición de un manipulador del robot para obtener referencias locales.
- El conocimiento a priori de qué es lo que se espera ver y en el contexto de qué tarea se va a desarrollar el procesamiento visual.
- La relación de predicción entre la actividad motora y la actividad visual.

El primer factor abre la posibilidad de convertir el ideal de la reconstrucción global en instancias eficientes de este problema, utilizando todos los grados de libertad disponibles en el sistema. En este sentido, la distancia de acomodación o enfoque proporciona información sobre la distancia a la que se encuentra el estímulo. El iris también se ha utilizado con este objetivo al modificar la profundidad de campo aunque su uso controlado más habitual es regular la cantidad de luz que entra a la cámara. El seguimiento, permite estabilizar la imagen de un objeto en la retina el tiempo suficiente para llevar a cabo un análisis detallado de éste. Además, permite cancelar la componente rotacional del movimiento relativo entre el objeto y la cámara simplificando la estimación de la componente traslacional [Aloimonos et al 1993].

El segundo factor introduce la posibilidad de seleccionar distintas estrategias de control y criterios de procesamiento, en función de la tarea en curso. En contraposición a una visión estrictamente “reconstruccionista”, en la cual el flujo de información es ascendente, desde el sensor hacia las estructuras de representación, la incorporación de objetivos desde la primeras etapas transforma al proceso visual en algo fundamentalmente dinámico. Bajo este enfoque, un flujo descendiente originado por la tarea en curso en que está involucrado el sistema visual interacciona continuamente con la información proveniente del entorno y modifica o sintoniza

los mecanismos de procesamiento correspondientes. El alcance de esta interacción parece ser mayor de lo que se pensaba hasta hace poco [Kower 1995]. Esta autora sugiere que esta interacción puede ser responsable de diferentes fenómenos observados experimentalmente: la selección del objetivo a seguir con movimientos suaves -smooth pursuit- en entornos con muchos objetos; algunos de los criterios de predicción que intervienen en el seguimiento y planificación de secuencias de movimientos sacádicos; y la selección de los objetivos para éstos. En un modelo de visión artificial para la conducción automática de vehículos en autopista [Dickmanns 1992] utiliza el conocimiento de lo que el sistema espera ver -líneas de la carretera en una posición y orientación determinada- para seleccionar la dirección y posición de los filtros de extracción de bordes sobre la imagen de niveles de gris. Este aspecto “descendente” del sistema visual no es en absoluto nuevo en Visión Artificial ya que es uno de los puntos de partida de la visión basada en el conocimiento [Cabrera 1994]. Sin embargo, la confluencia de elementos *reactivos* que respondan de forma refleja a los cambios del entorno, con elementos *de tarea* que representen objetivos posiblemente cambiantes del sistema es lo que cambia cualitativamente la metodología de estudio y construcción de sistemas artificiales de visión.

El tercer punto es mucho menos evidente que los dos anteriores y, de hecho, no suele aparecer en las diferentes caracterizaciones de la visión activa. Por *relación de predicción* nos referimos al flujo de información suministrado por los sistemas de control de los actuadores que permite anticipar, en el espacio visual, el resultado de las acciones. Este flujo puede combinarse con representaciones visuales a diferentes niveles de abstracción para permitir que el sistema perceptivo siempre esté anticipando el curso de los acontecimientos. De esta forma, se dispone de un criterio para evaluar la novedad de las situaciones. Intuitivamente, podemos ver esta relación de predicción como: *dado que estoy viendo esto y voy a hacer este movimiento, ¿qué voy a ver a continuación?* Este tipo de expresión recuerda a los operadores de STRIPS ya que en ambos casos se intenta predecir el curso de los acontecimientos utilizando un modelo directo. Sin embargo, en visión el efecto de un mecanismo de este tipo no es la generación de un plan, sino *la validación continua del propio plan motor frente al flujo de información entrante, dado un modelo de la cinemática, geometría proyectiva, etc*. Lo que hace activa a la visión en este contexto es la capacidad de restringir dinámicamente el universo de lo percible y permitir, en el caso de rupturas de predicción, disparar otros mecanismos internos para resolver el conflicto.

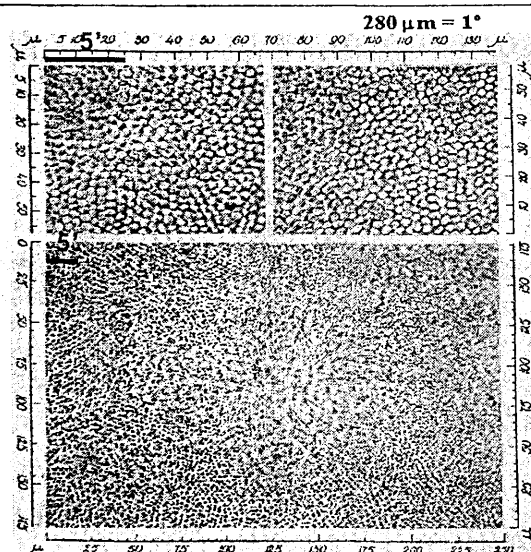
Otro aspecto relacionado con la predicción y el carácter activo de la visión es la clara tendencia que tenemos a imitar muchas de las cosas que vemos. En cierto sentido, podemos interpretar esta actividad como la situación inversa a la que acabamos de comentar. En lugar de utilizar el conocimiento de la acción para facilitar la percepción, en este caso es la percepción la que genera movimiento. La conjetura es que se requiere la realización física del movimiento propio o, al menos, la utilización de los sistemas motores aunque no se llegue a efectuar el movimiento, para entender el movimiento percibido. Para ilustrar esta idea utilizaremos el siguiente ejemplo¹. Supongamos que vemos una escalera por la cual tenemos intenciones de subir. Lo que proponemos es que la percepción visual de la escalera genera una predicción sobre la configuración de esfuerzos necesaria en nuestras articulaciones para afrontar esa tarea. En un sentido muy real, ver una escalera es intentar subirla mentalmente, a través de una propuesta cinemática y dinámica interna equivalente, en todos sus detalles, al hecho físico de subirla excepto en que la acción puede realizarse finalmente, o no. Esta idea está siendo explorada en colaboración con F. Monasterio. La propuesta sugiere un concepto de *interpretación* mucho más cercano a lo sensorial y a lo motriz y, en este sentido, perceptivamente activo que el utilizado habitualmente en las teorías de la semántica que se adoptan en la Inteligencia Artificial.

2.3 Visión no homogénea

Un sensor visual espacialmente variante es aquel cuya disposición de elementos fotosensibles no es uniforme. El sistema visual de los primates, muchos vertebrados y aves tiene esta característica. Aunque la razón última no es conocida y posiblemente no sea única, sí existen argumentos por los que esta no-linealidad presenta importantes ventajas para un dispositivo que tenga que interactuar con su entorno utilizando información visual. Precisando más, si el objetivo de este dispositivo exigiese mantener la atención sobre una zona amplia de su entorno -un gran campo visual- a la vez que distinguir los pequeños detalles de los objetos que le rodean -una alta resolución visual-, pero con unos recursos limitados de procesamiento, las opciones empiezan a escasear. Aparentemente, parte de la solución biológica ha consistido en *diseñar* una retina espacialmente variante soportada por un mecanismo de posicionamiento de alta precisión. La Figura 2.1 muestra una fotografía en vivo de una retina humana.

1. Este ejemplo ha sido propuesto por F. Monasterio (U.P.M.)

Figura 2.1 Fotografía de una retina humana en vivo (R. Navarro. Instituto de Optica. CSIC)



En la retina humana la mayor concentración de conos se encuentra en la fovea, un área que abarca aproximadamente 2 grados de campo visual. Hacia la periferia de la retina la densidad de conos decrece fuertemente con la distancia. Estas células están especializadas en la visión diurna y el color. Sin embargo, el rango dinámico se extiende a situaciones con poca luz gracias a otras células más sensibles y mucho menos abundantes, los bastones. Estos se distribuyen de forma aproximadamente inversa a los conos.

Con esta disposición el ojo sólo ve con alta resolución en una zona muy pequeña pero, a cambio, puede seguir viendo con menor resolución a lo largo de un campo visual muy extenso. Por otro lado, la frecuencia de muestreo es también espacialmente variante con la distancia a la fovea. Esto hace que la periferia del ojo sea más sensible al movimiento.

La cantidad de información que registra un sensor con estas características es de órdenes de magnitud inferior a la de un sensor uniforme de igual área, resolución equivalente a la de la fovea y una frecuencia de muestreo promedio. Como dato anecdótico, [Schwartz 1977] ha estimado el peso del cerebro humano en el caso de un dimensionamiento proporcional del cortex visual a una retina de este tipo obteniendo un valor de varios miles de kilos. Estos cálculos están basados en una *compresión* estimada de entre 3500:1 y 10000:1. En cierto sentido se puede pensar que el ancho de banda se adecúa a los recursos computacionales. Sin embargo esto no tiene porqué ser del todo así. La capacidad de movimiento del ojo y los mecanismos de memoria visual inmediata permiten restablecer, en cierta medida, el ancho de

banda no comprimido. Para ello, basta con utilizar estrategias de adquisición secuenciales que *capturen selectivamente la información relevante y la almacenen durante un periodo suficiente de tiempo* en una memoria que *mantenga la relaciones de orientación*. Los fragmentos en cursiva son algunos de los conceptos que se desarrollan en el Capítulo 3. La falta de potencia se puede suplir con un trabajo continuado y selectivo, siempre y cuando las restricciones de tiempo no sean muy estrictas y haya sitio para almacenar las cosas.

2.3.1 Mapas topográficos en el cortex visual

En los años 40 se llevaron a cabo los primeros experimentos electrofisiológicos orientados a demostrar la existencia de un mapa topográfico bien definido del espacio visual en el cortex visual primario -región V1. A partir de este momento y de forma más o menos espaciada se fueron realizando más experimentos utilizando las tecnologías disponibles para determinar la transformación precisa que convierte el casquete esférico de la retina en una región plana asociada al cortex visual. La idea de región plana viene de proyectar la región V1 sobre un plano, bien por métodos mecánicos presionando entre dos cristales, o generando la proyección en un ordenador mediante métodos numéricos.

En los años setenta se propuso un modelo matemático de la transformación que se ajustaba sorprendentemente bien a los datos empíricos. Este modelo es una transformación definida por el logaritmo complejo [Schwartz 1977][Weiman & Chaikin 1975]:

$$w = k \cdot \log(z + a) \quad (2.1)$$

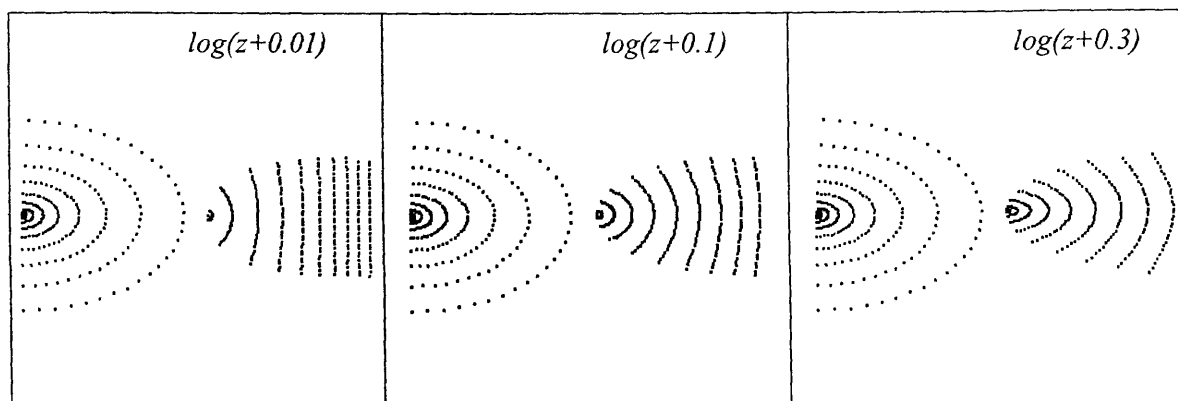
donde z representa un punto de la región original -el plano complejo- y a y k son constantes. Derivando esta función y obteniendo su magnitud se obtiene:

$$|w'| = \left| \frac{k}{z + a} \right| \quad (2.2)$$

Esta relación indica cómo varía el espaciamiento en la región destino en función de la posición en la región origen. Lo que se obtiene es una compresión en el sentido en que a mayor coordenada del elemento origen, menor es el incremento de posición en el elemento destino. El parámetro k actúa como un valor de normalización, mientras que a define el alcance del régimen lineal de la transformación. Cuando $z < a$ la forma asintótica de la transformación se puede aproximar por $\log(a)$, y cuando $a > z$ por $\log(z)$. El valor de a puede interpretarse como el correspondiente a la extensión anatómica de la fovea. La Figura 2.2

muestra ejemplos de esta transformación para distintos valores de a . A medida que aumenta el valor de a , más tarda en hacer efecto la compresión logarítmica y mayor es la región de sujeta a una transformación lineal.

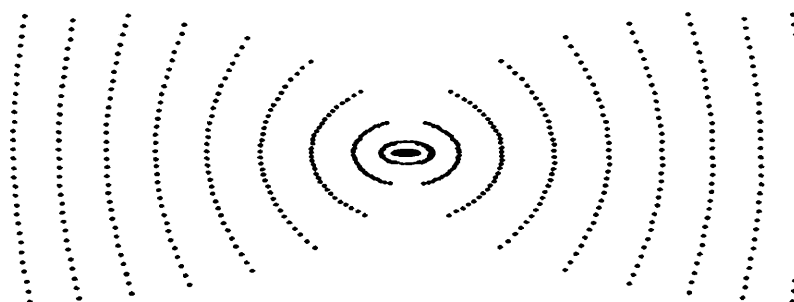
Figura 2.2 Transformación por el logaritmo complejo del semi-disco unitario



Al tomar la retina como espacio original y dada su particular distribución no homogénea de células, la compresión se *compensa* y se obtiene un reordenamiento de tal forma que círculos concéntricos de células en la retina pasan a ser líneas paralelas de igual longitud en el cortex. Cualitativamente, se pasa de media semiesfera a un rectángulo, aprovechando la no homogeneidad en la primera, para mantener toda la información después de la transformación. Se puede decir que el cortex *copia* la información de la retina reorganizando su geometría para ocupar el mínimo espacio posible.

Cuando la transformación se hace sobre un disco completo se obtienen dos proyecciones, una por cada mitad y unidas por la fovea como muestra la Figura 2.3.

Figura 2.3 Transformación del disco unitario completo



La propiedad más importante de esta transformación es que es, por definición, *conforme* lo que equivale a decir que es localmente isotrópica y, por tanto, un elemento de área

infinitesimal se magnifica igualmente en todas direcciones. Esto ocurre cuando la transformación no involucra deformaciones -shear- en las que se da una expansión en una dirección y una contracción en la otra. Además de esta propiedad, la transformación presenta otros invariantes, potencialmente útiles, que serán discutidos más adelante.

El problema concreto de la estructura precisa de los mapas retinotópicos está lejos de concluir con estos modelos. En algunas capas de la región V1 del cortex visual, las conexiones correspondientes a cada ojo se entrelazan en bandas finas formando columnas de dominancia ocular. Adicionalmente, existen otros sistemas de columnas que codifican información sobre la respuesta del estímulo visual a diferentes orientaciones espaciales. Todos estos sistemas se entrelazan formando el cortex observable real. Lo sorprendente de la aproximación basada en transformaciones conformes es que, aparentemente y según Schwartz, se puede construir un modelo *compuesto* de tal forma que cada sistema de columnas -p.e. el correspondiente a cada ojo o a cada orientación específica- es, tomado de forma aislada, un mapa retinotópico conforme de la retina completa y todos ellos se *entrelazan* entre sí formando el mapa global de la retina, también conforme. De esta forma, cada *posición* en el cortex codificaría topográficamente el valor de activación de la región correspondiente en la retina y la respuesta de esa región a un conjunto de filtros direccionales.

2.3.2 Retinas de Silicio

Estos datos biológicos han sido el punto de partida para la construcción de modelos simplificados de uso práctico en la visión artificial. Estos modelos se han orientado en dos direcciones diferentes: por un lado, la construcción de circuitos integrados de adquisición de imágenes que se denominan habitualmente *retinas de silicio*; alternativamente, se han desarrollado algoritmos para realizar estas transformaciones por software utilizando cámaras convencionales. Las retinas de silicio tienen todo el potencial para convertirse en una tecnología asentada en un futuro cercano [Pardo 1997]. Es necesario que tanto la tecnología de fabricación como las teorías del sistema visual converjan en diseños y productos de mayor funcionalidad incluyendo, quizás, versiones en silicio del cortex visual primario. Un prototipo actualmente en desarrollo por el Instituto de Microelectrónica de Sevilla, el Instituto de Óptica y por nuestro grupo de investigación en el Instituto de Automática Industrial es especialmente interesante en este sentido porque incluye elementos de proceso asociados directamente a los elementos sensibles (Bustos et al. 1997). El diseño del chip prevé una configuración de 64x64

elementos de captura y proceso que permitirían el cálculo local de estructuras complejas, como un espacio de escala lineal o multitud de algoritmos derivados de los estudios sobre autómatas celulares.

2.3.3 Generación de una representación visual espacialmente variante

El modelo de Schwartz, antes expuesto, no es particularmente apropiado para su uso computacional en un sistema de visión artificial. El resultado de la transformación del logaritmo complejo genera una imagen que no está uniformemente espaciada lo que plantea problemas para un tratamiento algorítmico eficiente. Si el objetivo es procesar en tiempo real estas imágenes *corticales*, lo deseable es obtener una única representación rectangular sin celdas vacías y que incluya al disco completo de la imagen original, esto es, el disco máximo inscrito en una imagen cartesiana convencional. Este mismo autor y posteriormente otros han desarrollado una *discretización computacionalmente apropiada* que resuelve estos problemas. Esta transformación se denomina Log-Polar [Sandini 1990].

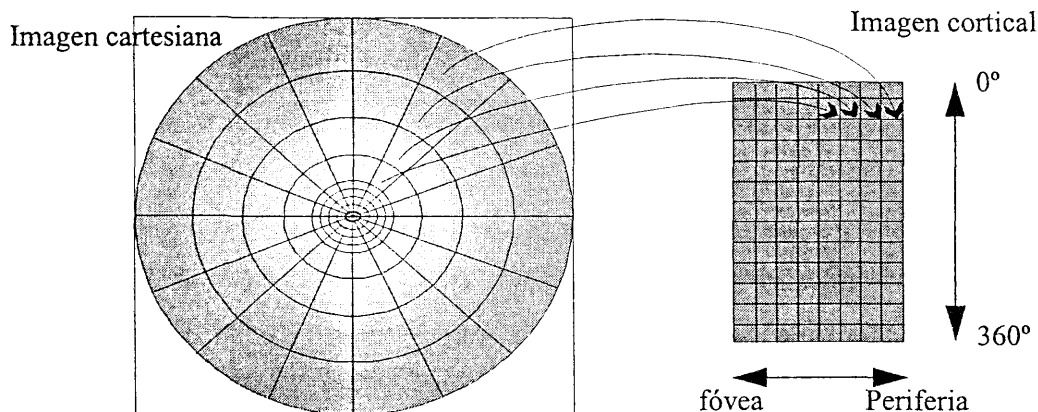
La forma de proceder es partiendo de la expresión: $w = \log(z)$ con $a=0$. Esto introduce una discontinuidad en $z=0$ y se pierde la *fóvea anatómica* que es la región con régimen de transformación lineal. A efectos prácticos se puede descartar el punto central de la imagen para evitar la discontinuidad, y generar una fóvea independiente con una transformación identidad que se maneja de forma separada. Esta última opción introduce una complejidad innecesaria en el sistema si la máxima resolución no es indispensable para el tipo de aplicaciones y experimentos que se vayan a realizar. En nuestro caso hemos obviado esta fóvea independiente para mantener únicamente el resultado de la transformación logarítmica. En términos anatómicos esta elección supone trabajar únicamente con la periferia de la retina aunque, como veremos en las imágenes, la resolución disponible incluso en este caso sigue siendo aceptable y suficiente para muchas tareas relacionadas con la navegación de robots.

$\text{Log}(z)$ puede expresarse como:

$$\log(z) = \log(|z|) + \log(e^{wj}) = \log(|z|) + wj \quad (2.3)$$

Si ahora representamos este resultado en coordenadas polares y asociamos a z las coordenadas cartesianas de un píxel, podemos representar esta transformación gráficamente como se muestra en la Figura 2.4.

Figura 2.4 Transformación Log-Polar.



Para obtener una estructura de datos rectangular se elige un rango para las coordenadas corticales (ζ, η) (excentricidad y ángulo) y con estos valores se obtienen los factores de compresión del módulo y de la fase. Al forzar una representación discreta regular habrá regiones de la imagen cartesiana que serán expandidas, mientras que otras serán comprimidas:

Partiendo de las coordenadas polares de la imagen cartesiana:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad , \quad \theta = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.4)$$

y, aplicando el logaritmo al módulo y un cambio de escala al ángulo, obtenemos las expresiones:

$$\xi = \log_a \rho \quad \text{y} \quad \eta = m \cdot \theta + n \quad (2.5)$$

que se conocen como Transformación Log-Polar. El valor a de la base del logaritmo se calcula igualando el valor de la excentricidad máxima al logaritmo en base a del módulo máximo. Este corresponde con el radio del disco máximo inscrito en la imagen cartesiana. Los valores m y n determinan el cambio de rango deseado para el ángulo. Para valores típicos de 64 excentricidades y 128 ángulos sobre una imagen cartesiana de 512x512, tendríamos que:

$$64 = \log_a 256 \quad ; \quad a^{64} = 256 \quad ; \quad a = e^{\frac{\log(256)}{64}} = 1,09051 \quad (2.6)$$

$$\text{y} \quad m = \frac{128}{2 \cdot \pi} \quad ; \quad n = 64 \quad (2.7)$$

La elección de los rangos de la imagen cortical determina las relaciones de compresión radial y angular. La compresión radial se obtiene directamente como la derivada del logaritmo

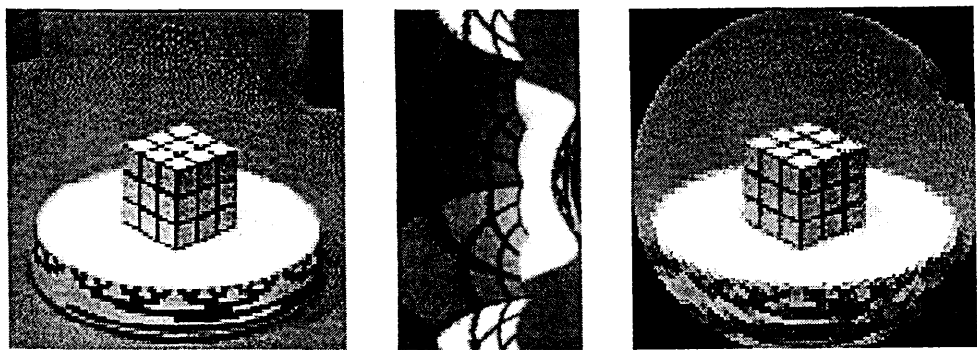
del módulo en la base obtenida: $\frac{1}{\rho \cdot \log(a)}$. La compresión angular se calcula como el cociente entre la longitud de la circunferencia correspondiente a cada radio y el número máximo de ángulos definido para la representación cortical: $\frac{MaxAng}{2 \cdot \pi \cdot \rho}$.

Ambas relaciones son independientes y, por tanto, la variación de uno de los rangos - excentricidad o ángulo- no afecta a la compresión en el otro. La transformación log-polar aplicada sobre una imagen cartesiana convencional produce primero un sobremuestreo y luego un submuestreo hasta el final de la imagen. Esto implica que primero expande y luego comprime la imagen original y en proporciones diferentes en cada eje dependiendo de los valores máximos elegidos para ellos. Se puede forzar a que las proporciones sean iguales fijando una valor máximo y obteniendo el otro mediante la relación:

$$\frac{EccMax}{\log(256)} = \frac{AngMax}{2 \cdot \pi} \quad (\text{para una imagen cartesiana de } 512 \times 512) \quad (2.8)$$

En la Figura 2.5, se muestra un ejemplo de la transformación log-polar sobre una imagen cartesiana de 256x256 píxels obteniéndose su representación *cortical* de 64_{exc} x 128_{áng} (8KB) y la reconstrucción de ésta a un plano cartesiano de 128x128 en el cual se han interpolado 58KB de los 64KB de que consta.

Figura 2.5 Imágenes cartesianas y corticales



2.3.4 Propiedades de la transformación log-polar

Trabajar con una representación visual en coordenadas polares tiene inconvenientes y ventajas. En una arquitectura de niveles para visión no es necesario mantener el mismo tipo de

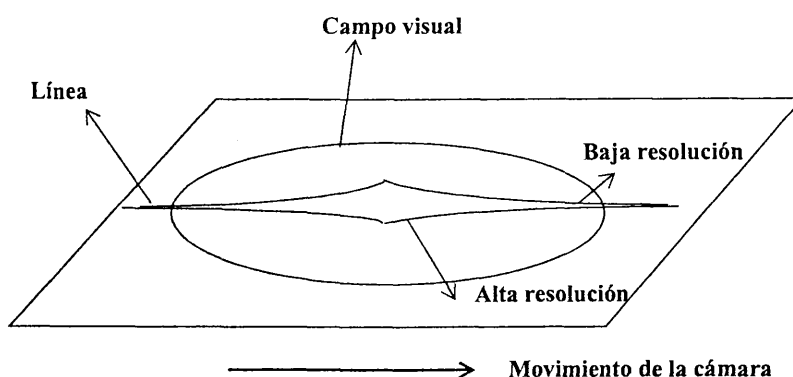
representación en todos los niveles. Si bien una representación con un sistema de referencia centrado en la retina puede ser ventajosa en los niveles más básicos de preprocesamiento y control, en una siguiente etapa puede ser conveniente un sistema de referencia centrado en la cabeza. De esta forma se puede mantener en una memoria visual más objetos de los que son visibles directamente. Estos aspectos serán tratados en más profundidad en el Capítulo 3.

En este apartado se da una relación de ventajas e inconvenientes de la representación log-polar, siempre en el contexto de un nivel básico de procesamiento y control. En este trabajo los algoritmos de segmentación utilizados explotan las ventajas de esta representación. La exposición detallada de éstos se relega al Capítulo 5.

Ventajas:

- Dos características de especial interés para la construcción de un robot móvil que debe funcionar con fuertes restricciones de tiempo real son, la *resolución de la imagen y la amplitud del campo visual*. La transformación log-polar ofrece un compromiso razonable como se ha argumentado en el apartado anterior.
- Otra característica importante de la transformación log-polar es la representación multirresolucional que genera en cada imagen. Como consecuencia del submuestreo, la periferia del campo visual corresponde a un filtrado paso bajo de la zona correspondiente en la imagen cartesiana. La utilidad de disponer de representaciones a diferentes escalas espaciales se conoce desde hace mucho tiempo y se extiende naturalmente a las imágenes log-polar.

Figura 2.6 Escenario de seguimiento de una línea



Cada imagen es una representación multiescala computacionalmente económica sobre la que es posible diseñar algoritmos de posicionamiento de la cámara que aprovechen eficientemente esta información. La Figura 2.6 muestra un ejemplo sobre un hipotético escenario de seguimiento de una línea.

En el centro del campo visual -fóvea- la línea se percibe con la máxima resolución del sensor permitiendo un posicionamiento preciso. A partir de ahí y en dirección a los extremos la línea se percibe a través de un filtro paso bajo con frecuencia de corte variable en función de la distancia. Con esta información se puede diseñar un algoritmo de seguimiento que trabaje a varias escalas de tiempo, utilizando la información suavizada de la periferia para predecir el curso general de la trayectoria y la información detallada del centro para decidir el posicionamiento efectivo final.

- Un aspecto que se ha recalcado mucho en la bibliografía es la *invarianza a translaciones y rotaciones* que proporciona la geometría polar. Para un objeto centrado en el campo visual, un aumento de tamaño se traduce en una translación en el eje de los radios y, una rotación, en una translación en el eje de los ángulos.
- Finalmente, existen otras propiedades relacionadas con la extracción del flujo óptico que permiten obtener expresiones muy compactas para el cálculo del foco de expansión y el tiempo al impacto [Sandini 1990].

Inconvenientes:

- El tratamiento clásico de bordes, segmentos y líneas -p.e. la transformada de Hough- debe ser adaptado a la geometría polar o realizarse en etapas posteriores en las que se utilice un dominio cartesiano.
- La resolución no homogénea presenta problemas aún no resueltos en cuanto al comportamiento de los filtros derivativos y al aliasing temporal y espacial [Danieliidis et al. 1995][Martínez et al. 1996].

2.4 Atención Visual y Movimientos Oculares

El estudio moderno de la atención comienza con von Helmholtz y James, quienes caracterizan este fenómeno como una combinación de dos influencias: una externa, dependiente de la estructura del entorno; y una interna relacionada con la expectación que mantiene el sujeto hacia lo que se va a percibir. Más tarde Gibson introdujo una tercera

influencia relacionada con la intención del sujeto. Este factor influye en si el sujeto reacciona al estímulo y, en caso de que lo haga, en cómo lo hace. A partir de la segunda mitad de este siglo se desarrollaron varias teorías dentro del marco del procesamiento de la información. Las que más influencia han tenido son las teorías de Broadbent, Deutsch y Deutsch y Treisman. Desde este nuevo punto de vista, el factor que sirvió para definir la atención era la capacidad de procesamiento del sistema perceptivo. Esta capacidad podía ser limitada, por lo que la atención debe ser responsable de un filtrado previo, o ilimitada, en cuyo caso todo es procesado pero la atención determina qué cosas se memorizan o generan actividad motriz [van der Heijden 1992].

Los dos tipos de factores pueden verse como los ejes de un sistema de referencia: selección temprana o precategórica vs selección tardía o postcategórica; y capacidad limitada vs capacidad ilimitada, más el componente intencional de Gibson.

La tendencia actual es interpretar esta clasificación como una actividad continua, donde la *variable* atención toma dinámicamente valores en este espacio a medida que transcurre la tarea en curso. De esta forma, el comportamiento puede conmutar suavemente entre una actividad dirigida hacia la adquisición de información y otra, más selectiva, dirigida hacia la consecución de algún objetivo [Henderson et al. 1997].

Un aspecto diferente que es especialmente relevante en la percepción visual es la diferencia entre atención central que se produce sin movimientos oculares, y la atención periférica que involucra cambios de orientación en el ojo. El primer caso puede verse como una selección de un área del campo visual, mientras que el segundo implica centrar el estímulo en la fovea mediante un movimiento sacádico. La atención central es más rápida y parece estar relacionada con una pre-selección de los estímulos que precede a la reorientación del sensor.

2.4.1 Movimientos Oculares

El estudio de los movimientos oculares es una pieza clave para entender el fenómeno de la percepción visual. La variedad de movimientos, la compleja interacción entre ellos que configura un sistema de reflejos orientado a facilitar las funciones perceptivas y la relación de todo el conjunto con la atención y la intención han hecho de este problema un área de investigación en sí misma.

Los movimientos oculares se clasifican habitualmente según las siguientes categorías:

- Movimientos que **cambian** la dirección de la mirada. En este grupo se distinguen dos tipos: **rápidos**, que incluyen los *sacádicos* que pueden alcanzar velocidades de 1000°/s y que juegan un papel fundamental en la atención periférica y en el seguimiento de estímulos, los *microsacádicos* que pueden tener una función correctiva y el *nystagmus*¹ *de fase rápida*; y **lentos**, como el seguimiento suave que tiende a acoplar la velocidad de rotación del ojo que la velocidad percibida del estímulo y la *vergencia*, cuyo fin es hacer que los dos ojos converjan en el estímulo de interés.
- Movimientos que **mantienen** la dirección de la mirada. En este grupo están los reflejos *vestibular* y *optocinético*. Estos movimientos permiten fijar la mirada relativa a un marco de referencia externo. El reflejo optocinético actúa cuando se detecta movimiento en un área extensa del campo visual. Este reflejo es lento al estar sujeto a los tiempos de adquisición y procesamiento de la información visual. Como compensación, el reflejo vestibular permite estabilizar la imagen utilizando la información más rápida y precisa suministrada por el aparato vestibular -el órgano del equilibrio- sobre las aceleraciones rotacionales y traslacionales de la cabeza.
- Movimientos de **fijación** de la mirada. Son movimientos de alta frecuencia dirigidos a corregir pequeñas desviaciones y mantener un posicionamiento preciso, aunque no hay un consenso amplio sobre su función última.

Los diferentes tipos de movimientos funcionan, en algunos casos, de forma acoplada como fuerzas antagónicas que compiten por el control. Por ejemplo, el reflejo optocinético y el seguimiento suave entran en conflicto, ya que es lo mismo seguir a un objeto pequeño sobre un fondo, que mover el fondo con la misma velocidad y en el sentido opuesto. En general, el seguimiento suave domina sobre el reflejo optocinético, aunque el flujo continuo de información desde el sistema vestibular permitiría, en principio, resolver este conflicto. Una ilusión clásica asociada a este fenómeno ocurre cuando se mira por la noche a una luna rodeada de nubes en movimiento. El observador percibe a menudo que es la luna la que se

1. Nystagmus es un patrón de movimientos con forma de diente de sierra y que aparece como consecuencia de una sucesión de movimientos compensatorios y anticompensatorios. Cuando giramos la cabeza fijando la mirada en un estímulo, el reflejo vestibular genera los movimientos compensatorios. Cuando el ojo no puede girar más en la órbita se genera un movimiento anticompensatorio que permite continuar el movimiento cambiando el punto de fijación externo. Este efecto también se da cuando actúa el reflejo optocinético -por ejemplo, cuando miramos a través de la ventanilla de un tren.

mueve. La ilusión se produce cuando el seguimiento suave toma el control sobre el reflejo optocinético y la cabeza se mantiene fija.

Los movimientos sacádicos hacen llegar a la fovea una región nueva del campo visual. En un sentido estricto son movimientos voluntarios, al menos si se comparan con movimientos de carácter reflejo como los que dan lugar al nystagmus. Los sacádicos se ejecutan en lazo abierto, ya que su duración es menor que el retardo introducido por la adquisición y procesamiento visual. El objetivo se fija de antemano y durante el transcurso del movimiento se inhibe la adquisición de información visual. En condiciones normales de observación, este ciclo de actividad se repite en torno a cuatro veces por segundo [Carpenter 1988].

De todos estos tipos de movimientos, los que se están empezando a utilizar en visión activa son los movimientos sacádicos y el seguimiento suave o control en velocidad [Pahlavan 1993]. La combinación de ambos permite realizar tareas de seguimiento y localización en robots móviles. En el Capítulo 3 se presenta un modelo de control visual que utiliza estos principios.

Conocer es recordar algo que los griegos tenían claro: no hay nada nuevo, todo es como una reposición, una gigantesca reposición televisiva programada para una entidad metafísica ininteligible, cuarentona y aburrida, sedienta de nostalgia.

Alex de la Iglesia, Payasos en la Lavadora, 1997.

En este Capítulo presentamos una propuesta sobre la adquisición y representación del espacio en sistemas autónomos. La motivación proviene del estudio y análisis de las diferentes corrientes existentes en el campo de la Inteligencia Artificial que expusimos en el primer capítulo y en parte del segundo. Un robot móvil autónomo interacciona continuamente con su entorno, interpretando el espacio que percibe. Esta interpretación del espacio se ha planteado tradicionalmente como algo necesario para el desarrollo de otras funciones más específicas del agente, pero rara vez se ha abordado como el soporte, sin el cual, esas funciones no serían posibles. En unos casos, el espacio se ha planteado como colecciones de objetos geométricos, tal y como los entendemos matemáticamente; en otros, como configuraciones sensoriales aisladas que disparan respuestas motrices para satisfacer objetivos internos del agente.

La evolución reciente de las distintas disciplinas relacionadas con la robótica y la inteligencia artificial sugieren una integración y, quizás, una síntesis de las diferentes ideas que se han ido elaborando en los últimos años. El concepto de representación simbólica y las implicaciones que de ella se derivan quedan lejos de la realidad de la robótica móvil actualmente. Al margen de los aspectos filosóficos que conlleva, simplemente no se entiende cómo un sistema perceptivo artificial puede llegar a generar el tipo de representaciones simbólicas que se requieren en esta teoría. En el sentido inverso se da la misma situación. Los resultados de una inferencia simbólica están lejos de poder materializarse en comportamiento coherente. Por otro lado, la arquitectura de subsunción y el control reactivo han tenido que prescindir de una teoría de la percepción en aras de la generación eficiente y directa de comportamiento. Si bien es necesario entender los mecanismos directos de percepción que permiten a un sistema reaccionar rápidamente, no es obvio que la historia acabe ahí,

especialmente si junto a lo reactivo tenemos que explicar fenómenos de carácter intrínsecamente reflexivo como la imaginación, la conceptualización o el lenguaje.

Esta divergencia de ideas y la falta de propuestas alternativas nos ha llevado a plantearnos el estudio de la percepción del espacio como un fenómeno común a todas las facetas de la inteligencia y que parece reflejar, al menos bajo un primer análisis, propiedades que normalmente se consideran incompatibles.

El objetivo que nos hemos propuesto puede sintetizarse en la siguiente pregunta: dado un agente autónomo dotado de unos sistemas sensoriales y motrices, ¿cómo puede este agente acceder a la estructura de su entorno de tal forma que lo percibido tenga una continuidad espacial y temporal, a la vez que una permanencia a largo plazo que le permita estar permanentemente localizado? En este capítulo buscamos una caracterización precisa del problema y proponemos una arquitectura de percepción espacial compuesta por módulos de procesamiento en interacción con una estructura dinámica activa. La relación entre estos elementos genera simultáneamente representaciones y comportamiento, en una relación causal que le lleva a mantener un cierto nivel de coherencia con el entorno.

El resto del capítulo está organizado en cuatro secciones diferenciadas. En primer lugar se plantea la cuestión de la existencia de representaciones desde el punto de vista de la percepción del espacio. Como punto central de esta discusión se presenta y analiza una arquitectura de control visual reactivo que hemos desarrollado con el fin de estudiar las implicaciones teóricas y prácticas de los sistemas basados en agentes de comportamiento. A continuación se presenta una propuesta sobre la organización de la percepción del espacio en agentes autónomos. Esta segunda sección se expone a un nivel de descripción conceptual, haciendo especial énfasis en las propiedades y en las relaciones que articulan los diferentes elementos constitutivos. La tercera sección recoge una revisión de algunos trabajos especialmente relacionados con los temas planteados. Finalmente, en la última sección se exploran algunas implicaciones adicionales del modelo y sus relaciones con otros aspectos de la Inteligencia Artificial.

3.1 La necesidad de representaciones espaciales.

Las recientes discusiones sobre la necesidad y naturaleza de las representaciones han dado lugar a un debate muy activo que, curiosamente, puede parecer superfluo dependiendo de la posición de partida que se adopte. Sin embargo, es justo en la frontera de estas posiciones y en la aceptación de premisas comunes donde los argumentos son más discutibles. En el caso de la representación del espacio el problema se simplifica algo, pero sigue siendo de la misma naturaleza. Nuestra posición es que sí es necesario representar el espacio aunque sobre una noción de representación que difiere sustancialmente de las representaciones simbólicas tradicionales.

Sobre la existencia de representaciones, queremos evitar argumentos cognitivistas del tipo: dado que razonamos, resolvemos problemas, hablamos, somos conscientes, etc. entonces utilizamos representaciones. Estos son argumentos de peso y difíciles de rebatir si se aceptan las premisas, pero dado que no tenemos una teoría concluyente sobre cómo razonamos, resolvemos problemas, hablamos o somos conscientes, es la propia implicación la que se puede poner en duda. También evitaremos el argumento evolutivo clásico. La razón es que no creemos que tenga en este contexto un poder explicativo relevante. Para ilustrar esto con un ejemplo, supongamos que queremos analizar los requerimientos para que un agente pueda utilizar eficientemente un sensor orientable de gran ancho de banda y de campo espacial limitado. La razón de que esa situación sea interesante de analizar es que hay muchas evidencias de que numerosos animales los utilizan, incluidos nosotros mismos. Argumentar que un sensor de estas características es una ventaja evolutiva y que para su gestión eficiente es necesaria una memoria perceptiva que, en definitiva, mantiene representaciones sobre el mundo susceptibles de ser manipuladas, no es un argumento explicativo. La cuestión de si es o no una ventaja evolutiva es más un problema de investigación que una razón que justifique la importancia de la situación. Por ese motivo, resulta delicado plantear la necesidad de representaciones como una ventaja respecto de algún objetivo. Esta sería la interpretación funcionalista. Por otro lado, no disponemos actualmente de una teoría que explique la generación de estructuras y sus transiciones desde unos principios físicos, aunque ésta es la prometedora línea de investigación de la Mecánica Computacional [Crutchfield et al. 1994].

Optamos por partir de la conjetura de A. Newell sobre el *Gran Salto*:

"En lugar de adaptaciones hacia materiales más especializados con dinámicas especializadas para soportar una variedad cada vez mayor de demandas representacionales, es posible un

giro completamente diferente. Es un salto hacia el uso de un medio neutral y estable capaz de registrar la variedad y luego componer las transformaciones necesarias para satisfacer las leyes de representación necesarias" [Newell 1994], pag. 61.

Aunque Newell toma esta posibilidad como una ventaja generalizadora frente a los llamados *cuentos evolutivos*, donde cualquier comportamiento se explica como una composición ingeniosa de recursos específicos, la idea de un medio neutral es sumamente atractiva. Encontramos, sin embargo, dos problemas en ella que exigen una reinterpretación: por un lado, no creemos que el medio neutro reemplace a la solución anterior, en el sentido de una transición, sino más bien *se añade a* lo que ya había como un mecanismo más; en segundo lugar, el Gran Salto, tal y como lo plantea Newell, tiene una connotación muy mentalista. Las representaciones son simbólicas y su manipulación está a cargo de reglas de transformación cuyo fin es resolver problemas. Podemos interpretar la idea de forma diferente al incorporar, desde el principio, la actividad perceptiva y motriz del agente.

La idea del Gran Salto se replantea como: *la capacidad de un agente para desconectarse eventualmente del mundo externo*. Grush lo ha descrito recientemente como el fenómeno de poner en marcha todos los mecanismos para hacer algo, pero sin llegar a materializar físicamente la acción final [Grush 1995][Grush 1996] -ver también [Stein 1996] en relación a lo que ella denomina "imaginar". La idea de desconexión es, en definitiva, una versión generalizada de la noción de predicción, donde los modelos están tan articulados que es posible activarlos y manejarlos de forma casi arbitraria. Lo interesante de esta interpretación es que los mecanismos de predicción son necesarios en el sistema de control de un agente, por razones muy diferentes a las que normalmente se atribuyen a las representaciones. El ejemplo típico son los sistemas con retardo en la transmisión de las señales de error. Como elucubración, esperaríamos esta característica en criaturas de un cierto tamaño capaces de movimientos rápidos. En estos casos, las señales nerviosas tienen que recorrer distancias considerables sobre un medio de transmisión lento. Esto supone una limitación en la estabilidad de un control realimentado que se puede suplir con señales adicionales provenientes de un modelo directo en paralelo. En [Grush 1996] se discute este tema con mayor profundidad.

En definitiva, resumimos esta breve discusión en dos puntos: por un lado el interés de explorar lo que Newell denomina un *medio neutral* como un mecanismo añadido a la articulación ad hoc de soluciones parciales; y por otro, la posibilidad de entender la

incorporación del medio neutro como una generalización de un fenómeno posiblemente anterior, que es la predicción.

En cuanto a la naturaleza de las representaciones, las que son de interés para la corriente cognitivista son aquellas *sobre las que se puede predicar algo*, esto es, son símbolos internos relacionados a través de la percepción con algún fenómeno físico y que son utilizados por la maquinaria de razonamiento para hacer inferencias. Las representaciones que aquí defendemos no tienen este carácter. Son estructuras dinámicas, que se crean y mantienen para permitir al agente asimilar la estructura espacial de su entorno. No compartimos, por tanto, las reivindicaciones mentalistas sobre el fin interpretativo de las representaciones, al menos no como fin único. Exploraremos la idea de un sustrato representacional previo vinculado a las relaciones espaciales y de naturaleza no simbólica, cuyas propiedades dinámicas permiten la generación de comportamiento no trivial.

Una vez delimitado el marco del problema, proponemos una hipótesis de trabajo que iremos desarrollando a lo largo del Capítulo: *la Percepción en la frontera del Gran Salto se articula en torno a un espacio perceptivo interno, innatamente determinado en sus características geométricas que continuamente se actualiza por la actividad de los mecanismos perceptivos y motrices del agente. Este espacio perceptivo comienza en el agente asimilando su propia cinemática, dinámica y estado propioceptivo y, a partir de ahí, se extiende hacia el exterior para incorporar la estructura del espacio que le rodea y con el que interacciona.* Aunque esta hipótesis puede resultar obvia desde muchas disciplinas relacionadas, sólo recientemente en el campo de la Inteligencia Artificial se ha planteado la necesidad de una integración entre áreas tradicionalmente separadas. La aproximación clásica al reconocimiento de formas y su interpretación perceptiva como objetos tridimensionales ha dejado de lado el problema más básico de la relación entre un agente autónomo y su espacio. El reconocimiento de objetos como entidades aislables con unas características determinadas puede darse una vez que el agente *entiende* su espacio y las diferentes formas que tiene de interactuar con él. Alternativamente, las recientes teorías de control reactivo interpretan el espacio como una transformación directa entre estados sensoriales y acciones posibles. Esta transformación puede verse como una superficie de control diseñada para satisfacer una referencia u objetivo. Desde este punto de vista, no es obvio cuál es el camino hacia la desconexión y, mucho menos, cómo el agente puede llegar a entender su espacio

independientemente de un objetivo concreto o, lo que sería lo mismo, desde cualquiera de sus objetivos posibles.

3.1.1 Un experimento en control visual reactivo

Una parte del trabajo realizado con el robot Acai -que describimos en detalle en el capítulo siguiente- ha consistido en diseñar e implementar un sistema de control visual basado en la arquitectura de subsunción de Brooks, con el objetivo de estudiar las posibilidades de aplicación de esta teoría a la percepción visual [Bustos et al. 1995]. El fin era dotar al robot de la capacidad de buscar, detectar y seguir estímulos visuales utilizando conjuntamente la movilidad de la torreta y de la plataforma. Algunos experimentos similares se pueden encontrar en [Kosecka et al. 1995][Riekki & Kuniyoshi 1995].

Los estímulos se caracterizan visualmente por dos parámetros que pueden ser fijados externamente: el tamaño, medido como el área del contorno de una región visual y el nivel de gris medio de los pixels encerrados en ese contorno. Para diseñar la arquitectura de control según esta metodología buscamos una descomposición del comportamiento global, tal como lo acabamos de definir, en elementos simples interconectados que cumplan un cierto criterio de ortogonalidad [Mataric 1994]. La idea es encontrar un conjunto de controladores o comportamientos suficiente y excluyente. Suficiente, en el sentido de que el conjunto cumpla el objetivo -estén todos los que hacen falta- y, excluyente, en el sentido de que no haya solapamientos entre ellos -estén sólo los que hagan falta. Los elementos del conjunto, así definido, deben funcionar concurrentemente y tener acceso a la información sensorial y a las órdenes de actuación que cada uno requiera. Cuando sus activaciones comparten un actuador, su selección se hace mediante un criterio de prioridades o línea de inhibición. En la descripción de la arquitectura utilizaremos las características del sistema visual descritas en el Capítulo 2. En concreto, las nociones de visión no homogénea y de fovea y periferia.

Los comportamientos que componen el sistema son:

- **ALINEAR**: mantiene alineados la plataforma y la torreta mediante un control proporcional que toma como referencia el ángulo horizontal que forman ambos. Su salida son órdenes a los controladores de velocidad de los motores de la plataforma.

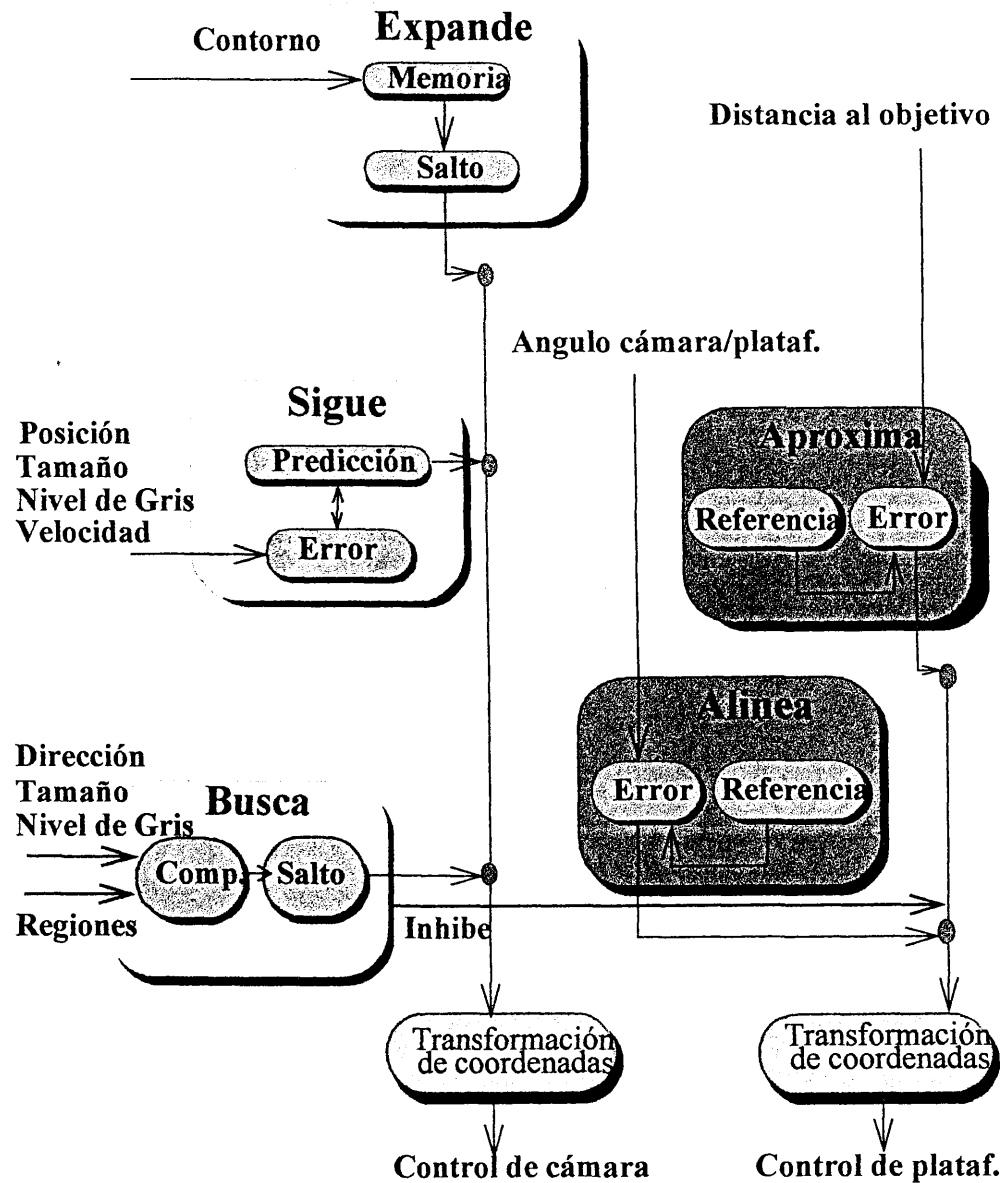
- **APROXIMAR:** mantiene una distancia fija entre el objetivo y la plataforma. Toma como entrada la distancia al objetivo y actúa sobre los controladores de velocidad de los motores de la plataforma. La estimación de la distancia puede venir del sensor ultrasónico ubicado en el cámara o, en algunos experimentos, del ángulo vertical de la torreta medido respecto de una posición de referencia.
- **BUSCAR:** explora la periferia del campo visual en busca de regiones que satisfagan el objetivo actual. Su entrada es una región variable de la imagen, dependiendo de que exista o no un contorno compatible con el objetivo y centrado en la fovea. En el primer caso la búsqueda se realiza sobre la región delimitada por el contorno y los bordes de la imagen. En el segundo caso la búsqueda se realiza sobre toda la imagen. El efecto de su activación sobre la torreta es generar un movimiento sacádico -movimiento rápido preprogramado- que orienta a la cámara en la dirección del estímulo.
- **EXPANDIR:** genera movimientos sacádicos, normalmente de corto alcance, a puntos del interior del contorno objetivo -centrado en la fovea. Su función es permitir al sistema abarcar regiones de un tamaño mayor al del campo visual. Se activa cuando los límites del contorno objetivo están próximos a los límites de la imagen. Su entrada es el contorno objetivo centrado en la fovea.
- **SEGUIR:** mantiene la cámara alineada con el contorno objetivo mediante un control predictivo de velocidad -smooth pursuit. Su entrada es el contorno objetivo centrado en la fovea.

Los algoritmos de procesamiento visual que generan las entradas perceptivas necesarias son análogos a los que describimos en el Capítulo 5 dentro del apartado “Módulo visual”. Por este motivo no los incluimos aquí.

En la Figura 3.1 se muestra la interconexión de los controladores según las líneas de inhibición que ordenan la activación de sus salidas. Las flechas azules de entrada a las cajas son los requerimientos perceptivos de cada elemento de la arquitectura. Sus salidas se ordenan según la distancia a los controladores -en verde- y pueden recibir inhibiciones laterales -flecha roja- desde otros elementos. La lógica del esquema es la siguiente: se especifica un objetivo para BUSCA mediante una combinación de dirección y nivel de gris. Si hay alguna región con estas características, BUSCA genera un salto para centrarla en la fovea. A partir de ahí deja de activar su salida, forzando a SIGUE a utilizar esta región como objetivo actual. SIGUE pasa a controlar en velocidad la orientación de la torreta si detecta movimiento relativo entre ella y el

objetivo. El objetivo se considera perdido cuando hay una ruptura de expectativa, esto es, cuando lo que se ve es muy diferente de lo que se espera ver en términos de posición, velocidad, nivel de gris y tamaño. Cuando esto ocurre SIGUE se inhibe y BUSCA vuelve a activarse para llevar a cabo una búsqueda en la periferia del campo visual.

Figura 3.1 Arquitectura de control visual reactivo.



La combinación de BUSCA Y SIGUE permite una velocidad de seguimiento muy superior a la que se obtendría únicamente con SIGUE. Si no hay movimiento relativo entre la torreta y el objetivo, EXPANDE toma el control para recorrer internamente el contorno del

objetivo. Si EXPANDE pierde el objetivo por un error en el salto o porque se reanuda el movimiento relativo, el control vuelve a tomarlo BUSCA para solucionar el problema.

En paralelo a la rama izquierda del dibujo - en amarillo- los elementos que controlan la plataforma se activan siguiendo una lógica idéntica, cuyo objetivo es minimizar el ángulo entre la torreta y la plataforma -ALINEA- y la distancia al objetivo -APROXIMA. La combinación de ambas fija los dos grados de libertad del controlador de la plataforma que obtuvimos en el capítulo anterior. ALINEA establece un diferencial de velocidad proporcional al ángulo medido, respecto de la velocidad de avance determinada por APROXIMA. Ambos se inhiben cuando BUSCA está activo para desacoplar la torreta de la plataforma y facilitar la recuperación del objetivo perdido.

Al analizar este experimento llegamos a conclusiones, en cierto sentido, contradictorias: por un lado, sorprende la eficacia en la consecución del objetivo. La torreta del robot es capaz de seguir la evolución de un coche de radio control realizando trayectorias muy irregulares, con velocidades angulares cercanas a los 90°s^{-1} , durante minutos. Esto se consigue gracias a la combinación de las búsquedas en periferia con el seguimiento en fovea. A esto hay que añadir los limitados recursos computacionales -un único procesador Pentium más los procesadores de control; como contrapartida, encontramos dos problemas, uno específico de la arquitectura y otro, más general y complejo:

- El primero se identifica con una de las críticas más contundentes que tiene esta teoría, el problema de la *escalabilidad* [Tsotsos 1990]. Esta crítica ataca directamente la suposición de que es posible un diseño incremental en un sentido que recuerda al proceso supuestamente constructivo de la evolución. La realidad es que una vez conseguido el objetivo inicial de la arquitectura resulta cada vez más complejo ampliar su funcionalidad. Para ilustrar esto con un ejemplo supongamos que el robot debe pasar entre dos objetos, pero no puede ver los dos simultáneamente. La solución *reactiva* sería: “configura el sistema de control para evitar todos los objetos que se detecten”. Esta estrategia permitiría solucionar el problema dadas unas condiciones iniciales apropiadas, como situar al robot aproximadamente delante de los objetos. Sin embargo, en ningún momento el robot puede percibir el espacio libre y el que ocupan los objetos, como una estructura continua con la que se está relacionando. Ante esta objeción la respuesta *reactiva* sería: “¿para qué hace falta tal cosa si el robot consigue no colisionar?”. El problema está en que “no colisionar”, así definido, es una actividad

demasiado general que no admite matices y que obligaría a modificar la arquitectura si quisiéramos introducirlos. Hay al menos dos ejemplos donde ocurriría esto: el primero, en el caso de tener que pasar entre los objetos estando éstos peligrosamente juntos. Un esquema que se basa en la ordenación estricta de comportamientos por prioridades básicas y en unos canales de comunicación entre ellos estrictamente limitados, no admite fácilmente influencias descendentes. ¿Cómo hacer llegar a los niveles inferiores la sugerencia de relajar sus umbrales de peligro? En la tesis doctoral de M. Schneider [Schneider 1996], ésta fue una de las motivaciones que le condujeron a introducir el concepto de *modulación* en la arquitectura de subsunción. Los agentes de comportamiento debían ser sensibles a objetivos externos a su propia conducta. Una solución diferente, basada en canales de comunicación de banda más ancha y una organización jerárquica de los agentes ha sido propuesta en [Guinea et al. 1996]. Aceptamos, por tanto, estas modificaciones a la arquitectura reactiva como una solución a este primer problema. Sin embargo, dejan sin resolver el que se plantea con el segundo ejemplo; suponiendo que podamos modular la activación de los comportamientos, ¿quién decide que esa configuración del espacio puede ser atravesada aún a costa de un cierto peligro? De nuevo obtendríamos una respuesta *reactiva*: “si el sensor no puede verlo, entonces no existe para el robot”. La cuestión es que sí podría verlo pero habría que introducir un agente de comportamiento especial, que integrase selectivamente información del entorno para determinar la existencia de esa configuración espacial. “No hay problema, creamos un agente que represente localmente lo que necesite”, sería una posible respuesta. Pero aquí llegamos, de nuevo, al problema de añadir más interacciones entre agentes, ya que para integrar información espacial mediante los movimientos secuenciales de la cámara y desde una plataforma en movimiento se requiere conocer en todo momento el estado cinemático propio. Intuitivamente, para poder adquirir y mantener actualizada esa información hace falta que gran parte de la capacidad de generar comportamiento del robot se *vuelque* en el proceso de representación. Cuando se utilizan sensores orientables -y un robot móvil con un sensor fijo también lo es- aparece la necesidad de mantener y actualizar información en memoria si se quiere evitar, o al menos retrasar, el problema de la escalabilidad. Para conseguir esto hace falta la cooperación de los diferentes elementos de la arquitectura en una tarea común e interna. El desacoplamiento de los agentes de comportamiento es incompatible con una percepción compleja.

- El segundo problema está relacionado con la noción de *cambio*. En la arquitectura de control visual que hemos descrito aparece el concepto de *rotura de expectativa*, que tuvimos que introducir para solucionar el problema del seguimiento. ¿Cómo saber cuándo se ha perdido el objetivo que se está siguiendo? La única opción es mantener en memoria ciertas características del objetivo para poder compararlas con la información proveniente de los sensores. Esto se traduce en una predicción de lo que se va a ver, que en el caso en que no se cumpla, se interpreta como una rotura de la expectativa. Esta noción se ha considerado, desde hace mucho tiempo, un aspecto fundamental de la percepción y del comportamiento. Sin embargo, en la arquitectura de subsunción tiene un papel claramente secundario o inexistente. No es de extrañar que en las arquitecturas híbridas, la predicción se asocie normalmente con el nivel cognitivo. El argumento que hemos desarrollado en el punto anterior se puede aplicar aquí directamente. Cuanto más compleja es la representación requerida, mayor importancia tiene la predicción en su actualización a lo largo del tiempo y más intensa tiene que ser la relación entre el conocimiento del movimiento propio, lo representado y las acciones futuras. En el ejemplo del seguimiento de objetos simples que hemos expuesto, la predicción se limita a unas cuantas variables escalares pero en el caso de una figura animada el problema sería más complejo. Sin predicción todo sería siempre nuevo y el único contexto donde esto no genera problemas es cuando el entorno es estático -esquivar un objeto inmóvil- o cuando, aún siendo dinámico, se interpreta como estático -esquivar a una persona moviéndose si se dispone de una realimentación continua de la distancia a ella. Pero si la tarea del robot requiere *entender* la dinámica externa, como es el caso del seguimiento de algo cuando puede perderse, ocultarse, etc., entonces es necesario adquirir un modelo de esa dinámica y utilizarlo internamente para generar comportamiento de forma eficiente.

La conclusión obtenida tras la realización de este experimento es que la información perceptiva en un esquema reactivo se disgrega entre los elementos de control, perdiéndose la posibilidad de que ésta sea un elemento más, con una estructura, unas restricciones y unos requerimientos de actualización propios. Sin esta posibilidad el agente queda anclado por su diseño a una partición del espacio sensorial prefijada. Además, la hipótesis de que el diseño puede evolucionar adquiriendo nuevas competencias que se *apilan* sobre las anteriores no ha recibido el soporte experimental esperado en los últimos diez años. Si bien es cierto que hay que buscar nuevas formas de entender la relación entre percepción y acción, la arquitectura de

subsunción toma una posición extrema en el lado del control y la generación de comportamiento. La percepción del espacio exige una representación dinámica que genera su propio comportamiento y que requiere de una gran conectividad entre los elementos de la arquitectura.

3.2 Espacio perceptivo

Introducimos en este apartado la noción de espacio perceptivo como una propuesta de organización de la percepción del espacio en agentes autónomos. El *espacio perceptivo* es una construcción innata del agente con actividad de proceso propia que, en conexión con un módulo perceptivo -en este contexto hablaremos de módulo visual- y un módulo motriz mantiene información sobre el agente, su entorno y la relación que ambos mantienen cuando interaccionan. Los módulos son sistemas de procesamiento específico dedicados a la transformación de los flujos de información que reciben, mientras que el *espacio perceptivo* es un sistema de memoria activa que almacena, integra y organiza el producto de los módulos interaccionando con ellos de diversas formas.

Los módulos no forman parte del *espacio perceptivo* aunque están en interacción continua con él. En el Capítulo 5 detallamos el tipo de procesamiento que llevan a cabo en la implementación desarrollada sobre el robot. Para proseguir esta exposición sólo necesitamos comentar, en términos generales, sus propiedades y el tipo de función que realizan. El concepto clásico de módulo fue descrito en el Capítulo 1, dentro de la Teoría Computacional de la Mente y allí discutimos, especialmente, las propiedades relacionadas con el encapsulamiento informativo. Adoptaremos una noción de módulo donde se relaja esta condición de encapsulamiento permitiendo un mayor flujo de información entrante y saliente. Denominaremos a estos elementos modificados *módulos porosos*¹.

En términos generales, la función del módulo visual biológico es, si aceptamos esta terminología aquí, en su mayor parte desconocida. La función que le asignamos en este modelo es extremadamente simplificada. Supondremos, simplemente, que toma como entrada sensorial una imagen proveniente de una cámara y extrae de esta información un conjunto de regiones homogéneas. El resultado de este procesamiento alcanza el *espacio perceptivo*

1. Esta noción está estrechamente relacionada con los trabajos sobre estructura conceptual discutidos en el Capítulo 1.

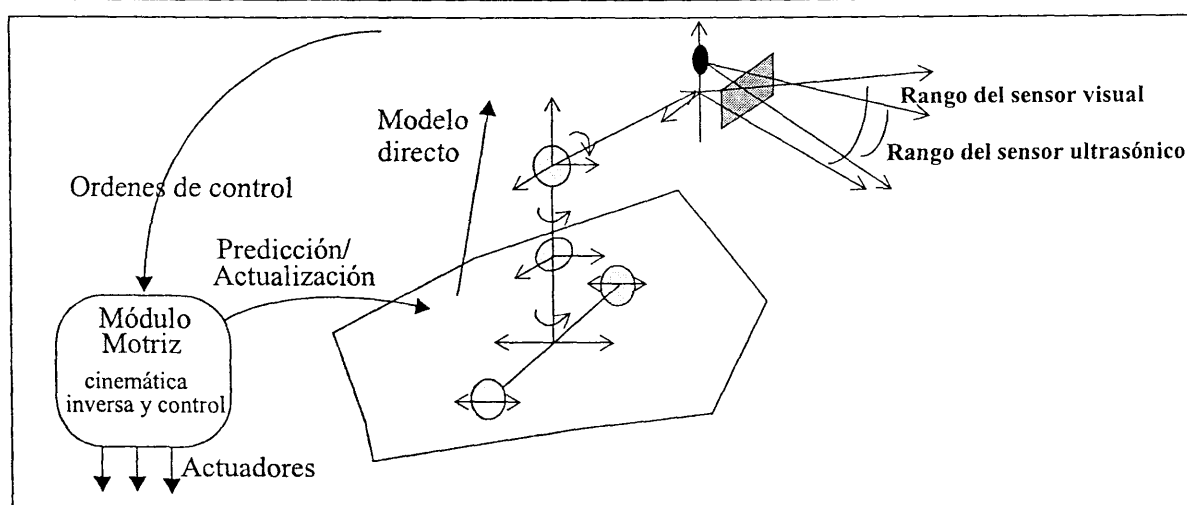
modificando su dinámica. En el sentido inverso, cierta información de carácter predictivo y selectivo puede llegar al módulo visual afectando su estado de procesamiento. En el módulo motriz se estructuran los algoritmos de control y la cinemática inversa del robot. Su función es doble: por un lado convertir en acciones físicas las nuevas referencias que le llegan sobre cambios en los actuadores; y por otro, adelantar el resultado de esas acciones para su utilización como información predictiva.

En los siguientes apartados iremos articulando el *espacio perceptivo* en relación a sus propiedades básicas y a los diferentes elementos que lo componen.

3.2.1 Organización del espacio perceptivo

La estructura que proponemos tiene como fin, permitir al agente asimilar el espacio de su entorno. La primera conclusión a la que llegamos, y a la que ya hemos hecho referencia en diferentes ocasiones a lo largo del texto, es que para que sea posible entender el *espacio exterior*, es primero necesario entender el espacio propio, el espacio que ocupa el mismo agente. Llamaremos a este espacio, *espacio interno*. Podemos verlo como una copia interna de la estructura física articulada del propio agente. En cierto sentido, recuerda al homúnculo que suele aparecer en los libros sobre Percepción representando la distribución de áreas asociadas a la propiocepción en el cortex somatosensorial. En un robot, el modelo cinemático actualizado por los codificadores de posición, junto con el modelo de los sensores, constituye el esqueleto de esta copia interna. En el robot Acai, el espacio interno corresponde al esquema cinemático que aparece en el Capítulo 4 y que reproducimos en la Figura 3.2 con los flujos de actividad generados por la interacción con el módulo motriz.

Figura 3.2 Espacio interno en el robot Acai.



El *espacio perceptivo* tiene un segundo nivel de organización que llamaremos *espacio exterior* y que está relacionado con la percepción directa y el rango efectivo de los sensores. Esta estructura dota de continuidad y estabilidad a la percepción, permitiendo la integración homogénea de diferentes fuentes sensoriales. Hemos hecho referencias en las discusiones anteriores a partes y funciones de este espacio con términos como memoria visual o memoria inmediata. El concepto de *espacio exterior* es más general y no se limita a un sensor específico, sino a la estructura interna donde se interpreta el conjunto de las sensaciones directas en términos de espacio. Llamaremos a este conjunto *percepción directa*, para reflejar la idea de que esta información perceptiva debe actualizarse continuamente para garantizar la correspondencia con la estructura del entorno.

El último nivel lo ocupa la estructura que denominamos, *espacio extendido*, cuyo fin es permitir la permanencia de la información espacial que no es directamente accesible. Puede verse como una memoria a largo plazo aunque juega un papel más activo que el que normalmente se atribuye a este concepto. En concreto, permite que el robot esté continuamente situado en un espacio arbitrariamente extenso. A diferencia de los espacios anteriores, donde el volumen abarcable es acotado -el cuerpo del robot, en un caso, y el espacio directamente accesible, en el otro-, el *espacio extendido* requiere mecanismos de reorganización que acoten el crecimiento de recursos necesarios para su mantenimiento.

En la Figura 3.3 se puede ver una representación gráfica de esta estructura. Los tres niveles de organización aparecen en una disposición concéntrica con diferentes tonos de color.

Figura 3.3 Organización del espacio perceptivo. Ver texto.



En el espacio interno, que ocupa la esfera del centro, hemos proyectado la forma física del robot como una *copia virtual*. El *espacio exterior* comienza inmediatamente a continuación para dar cabida a la percepción directa. Finalmente, el *espacio extendido* ocupa el resto del espacio posible, sin cota exterior, y se organiza en las estructuras recursivas que llamamos *cápsulas*. Estas cápsulas permiten acumular cantidades arbitrarias de información sin interferir en los recursos necesarios para la percepción directa y la actualización del modelo interno.

La división en tres niveles de organización no implica que estas estructuras sean estancas entre sí o requieran de una interfaz de comunicación. El conjunto funciona como una única estructura dinámica, en la que lo ubicado en la zona expandida pasa continuamente a la zona exterior, como consecuencia del movimiento del agente. Cuando un agente se desplaza, lo que antes no era accesible pasa a serlo y viceversa. Por ejemplo, una simple rotación del cuerpo o el atravesar una puerta hacen visible una región diferente del espacio que reconocemos inmediatamente. Lo que estaba almacenado de forma aparentemente pasiva pasa al dominio de la percepción directa siguiendo la propia estructura del espacio. La percepción de una región nos anticipa la percepción de la siguiente en un orden determinado que sólo puede provenir de una asimilación interna coherente con la experiencia espacial.

En síntesis, el *espacio perceptivo* tiene las siguientes propiedades:

- Es una construcción obligatoria y automática del agente, en el mismo sentido que Fodor propone para los módulos. Esto indica que el espacio interno se construye y actualiza siempre que el sistema perceptivo del agente esté activo o, dicho de otro modo, el agente no puede evitar mantener su *espacio perceptivo* incluso sin entradas sensoriales. No desarrollaremos más esta propiedad aquí ya que su justificación se hará evidente a lo largo del resto de la exposición.
- Se define sobre un sistema de referencia interno egocéntrico desde el que se generan marcos externos.
- Las características cualitativas de su geometría son fijas y predeterminadas.
- Mantiene una conexión bidireccional con el sistema motriz. En un sentido, se comporta como una superficie de control que puede activar a los diferentes actuadores; en el inverso, genera una predicción continua sobre observaciones futuras.
- No está, en principio, acotado en la cantidad de información que puede incorporar cuando deja de ser directamente percibible. La forma de organizar esta información confiere al agente la capacidad de autolocalización continua.

Pasamos ahora a argumentar y analizar estas propiedades.

3.2.2 Sistemas de referencia

Estos tres niveles de organización se articulan sobre un sistema de referencia común centrado en el robot, con sus ejes orientados según sus direcciones principales. Podemos decir que, físicamente, un espacio comienza donde acaba el anterior. Esta disposición refleja la necesidad de extraer la estructura espacial del entorno como algo estático observado por un agente que interactúa con él. Así, el espacio interno recoge continuamente el movimiento propio actualizando, en cada cambio, el origen de referencia de los espacios externo y extendido.

De esta configuración se derivan las siguientes implicaciones:

- La orientación de los sensores articulados del robot en el espacio interno determina el campo accesible en el *espacio exterior*. Si hubiese otros elementos articulados, como un manipulador, éste podría intersectar el campo accesible de algún sensor. Esta

situación es predecible en todo momento y debe reflejarse en el comportamiento del agente, reconociéndolo como propio. El conocimiento de situaciones como ésta está implícito en esta estructura de espacios.

- La transferencia de información desde el *espacio extendido* al *espacio exterior* y en el sentido contrario depende implícitamente, por el mismo motivo que antes, de la configuración en el espacio interno. Lo que deja de percibirse y lo que se va a percibir dependen de la orientación del agente en relación a las estructuras espaciales que mantiene.
- Si al ejecutar un movimiento en el robot, el módulo motriz suministra una estimación de la configuración geométrica final que se va a alcanzar, entonces, en base a los dos puntos anteriores se dispone de parte del mecanismo necesario para generar una predicción perceptiva del resultado de la acción.
- La actualización de la información espacial que haya en los espacios externo y extendido debe provenir conjuntamente de la estimación de movimiento propio y de otros mecanismos de reconocimiento. Ambos se complementan para aumentar la precisión y evitar la acumulación de errores.
- Para que el reconocimiento de un objeto en el entorno permita calcular la posición relativa de muchos otros, se requiere conocimiento de las relaciones espaciales de todos ellos. El *espacio perceptivo* permite mantener esta información estructurada y hacer un uso eficiente de ella.

Un aspecto importante del *espacio perceptivo* es que no tiene carácter métrico, en el sentido habitual de *levantar un mapa del entorno* con unidades de distancia absolutas. La información que se adquiere se refiere, en última instancia, a las coordenadas cinemáticas del espacio interno. En el caso del *espacio extendido* donde las distancias no están acotadas, esto es aun más relevante. La estructura a gran escala del espacio que asimilamos no puede tener el aspecto de un mapa tradicional. Esta idea tan intuitiva ha sido defendida desde hace tiempo en el área del Razonamiento Espacial Cualitativo [Hernández 1996][Kuipers 1996] aunque una parte de la investigación en robótica móvil sigue asumiendo la noción clásica de mapa como estructura de representación espacial. Si las distancias no se asimilan como centímetros, sino en relación a otras distancias y a las dimensiones propias, la capacidad que tenemos de entender el espacio métrico debe ser una facultad adicional. La interacción entre esta facultad

y el sistema natural de representación del espacio nos permite interpretar la información en los dos dominios.

Otro aspecto del uso de los sistemas de referencia en la percepción está siendo objeto de recientes investigaciones en visión artificial. Nos referimos a sistemas de referencia o marcos externos creados internamente con carácter temporal, para facilitar el acceso a la información del entorno. Esta fue una de las reivindicaciones de Ballard para la visión activa [Ballard 1989] y que se ha seguido desarrollando desde entonces [Rao et al. 1996][Rao & Ballard 1996]. En el caso más sencillo, el marco externo define una escena o región externa donde se centra la atención de la tarea en curso. Desde este sistema de referencia, se localizan todos los objetos relevantes en esa región. Este marco externo se mantiene en referencia a un marco interno. En [Rao & Ballard 1996] el marco externo se define en coordenadas retinales que se actualizan en el sistema de referencia egocéntrico a partir de los movimientos oculares, de la cabeza, etc.

La utilización de marcos externos simplifica el análisis espacial al delimitar regiones de interés. Normalmente, estos marcos se definen en torno a objetos fácilmente reconocibles, de gran tamaño o con otras propiedades relevantes que los hagan destacar. Una vez fijada la escena, la búsqueda de otros objetos, de los cuales se conoce su relación con el principal, se simplifica notablemente. Los marcos externos pueden anidarse en mayores niveles de profundidad. Un ejemplo sería el análisis geométrico de formas, donde se fija un nuevo marco en el centro del objeto de interés para luego acceder ordenadamente -con movimientos oculares que recorran los bordes, por ejemplo- a las distintas regiones que configuran su geometría.

Un aspecto importante del proceso de generación de marcos externos es que debe ser lo suficientemente flexible como para permitir una reorganización continua. Dada la variabilidad de formas y funciones que pueden darse en el espacio externo, no parece razonable pensar que la asignación de marcos sea siempre y en primera instancia correcta. Un ejemplo sería el caso de regiones que ocupasen un espacio mayor del accesible por el sensor -el campo visual de una cámara. En este caso habría que proceder fijando marcos provisionales desde los que organizar el movimiento para acceder, finalmente, a la región completa. Otra situación sería la de haber identificado erróneamente un objeto completo, para darse cuenta luego que formaba parte de otro mayor. Este tipo de reorganizaciones abren la ventana hacia terrenos más complejos donde el reconocimiento de objetos o situaciones se interrelacionan con los

mecanismos de atención y, por tanto, con el papel de los marcos de referencia externos en el acceso al entorno.

Dentro del *espacio perceptivo*, los marcos externos aparecen como una herramienta de organización del acceso a la información. Son estructuras temporales que se crean en el *espacio exterior* y, por lo tanto, en referencia al espacio interior, para cumplir una función. La estructura creada puede pasar al *espacio extendido* y formar parte así de los *recuerdos* del agente o eliminarse cuando ya no es relevante para la tarea en curso. El problema de determinar qué información persiste después de la percepción directa es un tema abierto. En el último apartado del capítulo planteamos algunas posibilidades en este sentido.

3.2.3 Geometría del espacio perceptivo

En este apartado abordamos la cuestión de qué es lo que se puede representar en el *espacio perceptivo*. Dado lo que hemos visto en los apartados anteriores, los tres niveles de organización tienen que tener una naturaleza común o, al menos, muy próxima ya que la condición de interno, externo o expandido cambia continuamente con los movimientos del agente. En el ejemplo del manipulador, cuando éste entra en el campo visual también lo hace en el espacio externo, comportándose en muchos sentidos como una región más del entorno. Una situación, en cierto modo inversa, se daría cuando el manipulador coge un objeto. En este caso, el movimiento del objeto pasa a depender de la cinemática y la dinámica del espacio interno. Entre el espacio externo y el expandido es obvio que las transiciones ocurren continuamente, aunque la información que hay en el primero es mucho más rica que la que puede haber en el segundo, simplemente por cuestión de cantidad.

Desde el cognitivismo, los esfuerzos se han orientado tradicionalmente hacia la generación de representaciones simbólicas, como una *copia* en el lenguaje interno del sistema de la disposición de los objetos que nosotros podemos reconocer. Para las teorías de la acción situada los objetos no son, en principio, entidades absolutas que existen independientemente del agente y de su estado. Lo importante es la relación que se establece entre el entorno, el agente y los objetivos del agente. La inteligencia es, desde este punto de vista, estar situado en un mundo cuyo significado se construye continuamente desde la interacción. La posición que adoptaremos aquí recoge, en parte, aspectos de los dos enfoques y, también en parte, se distancia de ambos. Veamos primero las diferencias.

La máxima por la cual *estar situado* es la condición fundamental para la inteligencia es, desde nuestro punto de vista, incorrecta. M. Jordan ha recordado en una conferencia reciente el carácter situado del clásico programa de IA, Eliza. El hecho de que lo directamente percible tenga siempre una interpretación en el sistema de control del agente, no es una condición definitiva de nada. Incluso si el resultado de la ejecución sistemática de los bucles percepción-actuación satisface un cierto objetivo, bien de supervivencia, bien evaluable externamente, tampoco es en si mismo una medida de que se haya avanzado en la comprensión del fenómeno que llamamos inteligencia. Claro está que no podemos definir este término, pero casi todo el mundo estaría de acuerdo en distinguirlo de *supervivencia*. “Estar situado” es, en definitiva, algo necesario para un agente autónomo. Necesario para su supervivencia y necesario para desarrollar su capacidad de interpretación de lo que le rodea y de él mismo, pero sólo necesario.

En segundo lugar, el debate entre empiristas y racionalistas sobre la naturaleza y cantidad de la dotación innata está lejos de aportar resultados definitivos. La plasticidad del cortex y las etapas de desarrollo cognitivos¹ se contraponen a la teoría matemática del aprendizaje y los argumentos sobre el origen innato de la competencia lingüística [Chomsky 1995]. Si se lleva este debate al terreno de la percepción las cosas son todavía menos claras. ¿Qué es lo innato del sistema perceptivo? En la visión de los primates podemos tomar como innata la estructura de proceso que se desarrolla sistemáticamente bajo condiciones normales de estimulación, ya que aún sin estar claros los detalles anatómicos y funcionales de muchas zonas del cortex visual, ésta es la región del cerebro que mejor se conoce [Zeki 1995][Koch & Devis 1995]. Suponiendo que una aproximación global razonable al procesamiento en las primeras áreas del cortex visual sea la construcción de un espacio de escala², esto todavía no dice nada de cómo se articulan, o incluso de si se articulan, las formas de objetos tridimensionales a los que habitualmente hacemos referencia en el lenguaje. Se pueden plantear formas geométricas canónicas tridimensionales, como los geones de Biedermann o los conos generalizados de Marr [Marr 1982], a partir de los cuales se reconstruyen todos los objetos, pero no hay evidencia empírica de que esto sea así. De hecho, está comúnmente aceptado por la comunidad de visión artificial que no es posible extraer de forma coherente los objetos de una escena, utilizando únicamente un procesamiento guiado por los datos.

1. Para un manifiesto constructivista reciente ver [Quartz et al. 1996]

2. Un espacio de escala es una estructura jerárquica donde los datos se representan en niveles crecientes de resolución [Haar Romeny, 1996]

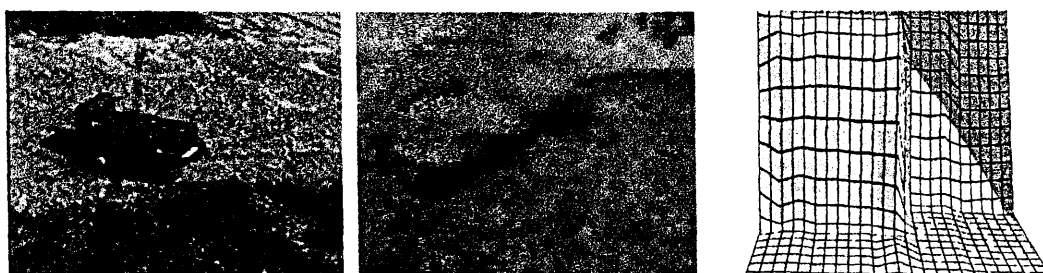
Actualmente es posible extraer colecciones de puntos tridimensionales métricamente precisos desde secuencias de imágenes [Agapito 1996][Baumela et al. 1997]. Sin embargo, la agrupación de esos puntos en objetos, en el sentido en que normalmente entendemos este término, sigue siendo un problema abierto. En este sentido es interesante ver como dos de los laboratorios de visión geométrica más importantes de Europa, el de la Universidad de Oxford y el del INRIA en Francia, están reorientando las aplicaciones de sus modelos de autocalibración y reconstrucción hacia el campo de la realidad virtual, a pesar de que ambos han tenido proyectos importantes sobre robótica móvil. Un ejemplo adicional que sirve para introducir todavía más incertidumbre en cuanto a la naturaleza de lo innato en la percepción, es la asombrosa sensibilidad que muestran los niños de pocas semanas a gestos, tono de voz y, en general, actitud de las personas que interaccionan con ellos. Desde el punto de vista de la reconstrucción tridimensional cabría preguntarse ¿qué es componer un gesto desde primitivas volumétricas?

El modelo que proponemos reúne aspectos de la noción habitual de objetos tridimensionales y de la percepción directa de rasgos útiles para un objetivo. La idea de la que partimos es considerar que el espacio externo -como nivel organizativo del *espacio perceptivo*- tiene una geometría intrínseca predeterminada que restringe el universo de posibles interpretaciones del espacio. Esta es la restricción innata más fuerte. Sobre esta geometría actúan los diferentes elementos de procesamiento del sistema perceptivo en coordinación con el sistema motriz, produciendo deformaciones locales que reflejan la relación espacial entre el agente y su entorno. El término “reflejar” indica que no es un proceso de reconstrucción métrica preciso cuyo fin es *traer dentro lo que hay fuera*, sino una interpretación particular, acorde con el estado de coevolución entre el agente y su medio -en un sentido similar al que da Gibson a este término [Gibson 1986], capítulo 1-. Lo interesante de este planteamiento es que el espacio no se percibe, en un principio, desde el filtro de objetos platónicos que tienen una existencia independiente y cuya relación con el fondo de la escena es siempre problemática, sino desde una superficie continua que abarca siempre todo el espacio percible. Lo que se pueda extraer de la información sensorial, del movimiento, etc. van a ser modificaciones sobre esta superficie sujetas a las restricciones de su geometría, que acaban determinando en última instancia lo que el agente percibe del espacio que le rodea.

Para ilustrar esta idea utilizaremos unas imágenes del robot Pebbles, construido por Liana Lorigo en el MIT [Lorigo 1996]. Pebbles puede navegar utilizando una cámara situada a bordo

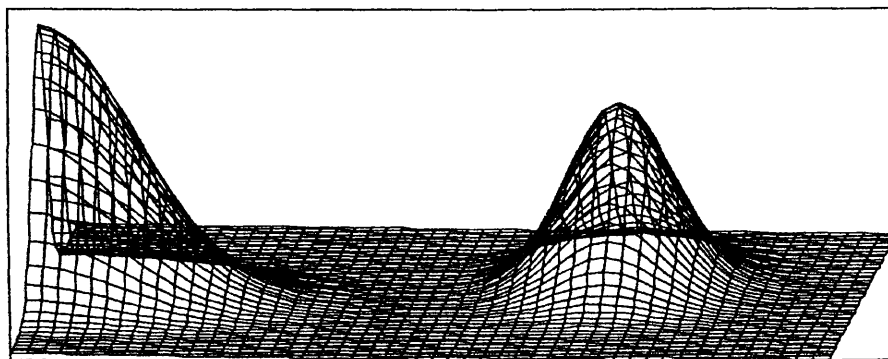
en una posición y orientación fija. Para ello parten del siguiente supuesto: comenzando por la parte inferior de la imagen, el espacio se interpreta como suelo plano hasta la aparición de la primera discontinuidad. A partir de ahí, el espacio se interpreta como una pared vertical. En el robot Pebbles la interpretación se hace exclusivamente en términos de control y no en el sentido de un *espacio perceptivo*. En la Figura 3.4 se puede ver una fotografía del robot, la línea de discontinuidad extraída de un fotograma y una posible reconstrucción tridimensional hecha por nosotros. Lo interesante de esta idea, desde nuestro punto de vista, es combinar lo que se percibe con lo que no se percibe, dentro de una geometría predeterminada. La imagen del centro muestra la línea de discontinuidad y la de la derecha, una superficie bidimensional en el espacio 3D. En la interpretación que estamos haciendo del trabajo de Lorigo, esta superficie es inicialmente plana -su vector normal en cada punto es paralelo a la vertical del robot- pero admite un pliegue a lo largo de una línea arbitraria longitudinal. A partir del pliegue, la normal a la superficie en cada punto se hace paralela a la horizontal del robot.

Figura 3.4 El robot Pebbles y una interpretación del espacio. Ver texto.



Una superficie bidimensional puede tomar formas más variadas que se adapten mejor a la estructura del entorno, si el módulo visual es capaz de procesamiento más sofisticados. En la Figura 3.5 se muestra esta posibilidad. En el Capítulo 5 desarrollamos esta idea sobre el robot Acai.

Figura 3.5 Ejemplo de superficie bidimensional. Ver texto.



La mayoría de las cosas con las que estamos acostumbrados a relacionarnos no se podrían percibir si el sistema perceptivo está restringido a una superficie bidimensional. Sin embargo, el procesamiento necesario para ajustar apropiadamente esta superficie podría ser muy simple, especialmente si se introducen lo que podríamos llamar *hipótesis por omisión*. La verticalidad o la posición relativa del agente respecto del suelo y la geometría del sensor -proyectiva en el caso de una cámara- se pueden utilizar para limitar la incertidumbre en la interpretación de las señales sensoriales. Estas hipótesis se complementan con estrategias senso-motoras. Para ilustrar esto con un ejemplo, supongamos que, en un determinado momento, la verticalidad del agente determina la orientación de la superficie perceptiva en el área que le soporta. La textura del suelo real puede ser suficientemente compleja como para que un método de detección de bordes, como el de Lorigo, no funcione en absoluto. Bastaría con hacer un pequeño desplazamiento, comprobando el cambio de verticalidad y la evolución visual de la textura, para poder relacionar mediante una hipótesis, el gradiente de textura observable y la extensión del suelo en un área cercana. Esta forma de interpretar dinámicamente lo que se ve en cada momento, desde estrategias que combinan información y conocimiento heterogéneo, es una alternativa más realista a los métodos clásicos de reconocimiento y clasificación basados en enormes baterías de ejemplos adecuadamente seleccionados. La interpretación, en este sentido, encaja correctamente con el criterio de *estar situado*. La parte más básica de la interpretación sensorial está innatamente articulada por la anatomía del agente.

En esta discusión sobre la geometría del *espacio perceptivo* hemos propuesto un soporte homogéneo para que sea posible la percepción del espacio. La percepción directa en el *espacio externo* aparece como deformaciones en una superficie continua. Esta construcción tiene que complementarse con una teoría sobre el contenido de lo que se percibe, esto es, sobre qué rasgos perceptivos, además de la forma, son relevantes en la percepción directa y en el *espacio extendido*. Este problema es complejo y no tenemos una propuesta cerrada para abordarlo, ni es el objetivo de esta tesis. A pesar de esto, la fenomenología más básica de nuestra propia percepción sugiere una línea de acercamiento. Lo que es percibible directamente se caracteriza por ser vívido, en el sentido de que contiene todo los detalles de color, sombra, reflejos, movimiento, etc. Por otro lado, al recuperar algo que recordamos, que en este modelo corresponde al *espacio extendido*, muchas de estas propiedades no aparecen. El espacio imaginado no es vívido en el sentido que acabamos de exponer. Pero basta con que lo imaginado se confronte a la percepción directa adecuada para que ambas informaciones se relacionen coherentemente. La sugerencia es que *aquello que se almacena tiene la propiedad*

de ser parcialmente reconstruible o proyectable sobre el espacio exterior, generando una sensación aproximada del estado sensorial original. Una forma simple para que esta relación entre lo inmediato y lo recordado tenga esta característica es la reutilización física de la maquinaria de percepción directa en la reconstrucción de lo recordado. Con esto estamos diciendo que la recuperación del recuerdo de una región del espacio es equivalente a percibirla directamente, exceptuando los rasgos que producen la sensación de vividez. Por ejemplo, la acción de imaginar el despacho contiguo es una acción, a todos los efectos, perceptiva pero procedente de una reconstrucción en lugar de provenir de una sensación directa. Lo importante es que el proceso se efectúa en el espacio donde se dan las percepciones directas y no en un espacio lógico de proposiciones y símbolos. En los últimos años se ha acumulado numerosas evidencias de que algo así ocurre en el cortex visual, donde se ha detectado actividad metabólica utilizando técnicas PET -Tomografía por Emisión de Positrones. En estos experimentos se pide al sujeto que fiscalice mentalmente objetos. Al cabo de un cierto tiempo se observan patrones de actividad en las mismas áreas visuales que cuando el objeto se percibe directamente [Kosslyn 1994].

Del fenómeno de asimilar el espacio y sus detalles, en extensiones como las que sabemos que nosotros somos capaces de recordar, se deriva que tiene que haber algún mecanismo de codificación que reduzca la cantidad de información. Desde el punto de vista de la estructura del espacio, el modelo que proponemos incorpora este mecanismo en lo que hemos llamado *encapsulamiento*. En relación a los rasgos de vividez y los detalles que acaban caracterizando a objetos concretos, la única propuesta es que éstos deben ser invertibles en el módulo visual. El problema plantea desafíos importantes ya que las técnicas habituales de procesamiento de imágenes carecen de esta propiedad. Por ejemplo, una imagen de bordes no es invertible a una imagen de niveles de gris, a menos que se almacene información sobre el color de las superficies, se sitúe un punto de luz externo y un punto de vista del observador. La conclusión más importante de esta discusión es que la recuperación de información espacial es un proceso reconstructivo, que genera información perceptiva de la misma naturaleza que la que se obtiene por percepción directa, y que gran parte de esa información es *inventada* por los mismos mecanismos que nos permiten percibir. De éstos, los más relevantes son, quizás, los relacionados con la predicción.

3.2.4 Acción y Predicción

A lo largo del texto hemos procurado asociar siempre la percepción y la acción, o el módulo perceptivo con el módulo motriz. La frase que recoge de forma más contundente la estrecha relación entre percepción y acción es la que afirma que *no hay percepción sin movimiento*. Existen numerosos argumentos que soportan esta idea. Algunos de ellos son los experimentos clásicos sobre la influencia decisiva del movimiento propio en la correcta formación de las estructuras del cortex visual [Gregory 1979], la extracción de invariantes en la teoría de Gibson o las propiedades de regularización que el movimiento controlado aporta en las teorías de reconstrucción tridimensional [Aloimonos et al. 1987]. El aspecto que nos interesa aquí es el tipo de relación que debe establecerse entre la percepción y la acción para que sea posible la construcción de un espacio interno. Comentamos a continuación tres características de esta relación:

- *El movimiento de orientación* en sensores de campo restringido o sensibilidad no homogénea, por ejemplo la visión foveatizada, un sensor ultrasónico o de infrarrojos, un micrófono direccional, las orejas de una liebre, etc. Casi cualquier sensor que muestre propiedades del espacio externo cae dentro de esta categoría. El acceso eficiente a este espacio requiere mecanismos de atención -a diferencia del barrido continuo de un radar, por ejemplo- que, a su vez, dependen del mantenimiento de un *espacio perceptivo*. Los mecanismos de atención tienen como objetivo básico permitir el acceso eficiente al medio externo, garantizando la incorporación de aquellos cambios que sean relevantes para el estado del agente. La construcción y mantenimiento de este *espacio perceptivo* requiere la coordinación entre los mecanismos de control de movimiento y el flujo de información sensorial.
- *Distinción entre movimiento relativo y movimientos debidos al agente y propios del entorno*. Es obvio que un agente en movimiento induce cambios en su propia percepción. Lo mismo ocurre si el entorno es dinámico. Un sistema perceptivo que no pueda separar ambas fuentes de movimiento, sólo puede percibir el cambio relativo. La distinción se puede hacer con diferentes estrategias que varían en cuanto a la complejidad de los mecanismos utilizados y a la flexibilidad que se puede esperar de ellos. Una opción es estimar el movimiento propio desde las medidas sensoriales. En visión esto se puede hacer resolviendo el problema de la correspondencia o calculando el flujo óptico y suponiendo un modelo de movimiento. Si este modelo se calcula contra un fondo estático, un objeto con movimiento independiente se puede detectar

porque genera un flujo que no es explicable en ese modelo. La coordinación entre la acción y la percepción está implícita en el acuerdo entre el tipo de movimiento del agente y el modelo elegido para explicarlo. Por ejemplo, movimientos que localmente se puedan aproximar por traslaciones puras o restringidos en ciertos grados de libertad. Otra alternativa es utilizar los modelos cinemático y dinámico del agente y actualizarlos con las medidas de posición y velocidad en cada articulación. De esta forma el movimiento propio siempre se conoce y puede sustraerse del movimiento percibido. En la práctica pueden existir problemas en la precisión con que se pueden obtener estas medidas en relación a la resolución del sensor. Esta opción, aún requiriendo mecanismos más sofisticados de coordinación, es mucho más flexible ya que no está restringida por la elección a priori de modelos de movimiento y permitiría, además, la simulación interna o imaginación de movimientos sin necesidad de ejecutarlos físicamente. Es importante ver que esta habilidad puede conducir a la posibilidad de imaginar las escena desde puntos de referencia no centrados en el agente y a lo que normalmente se conoce como manipulación de imágenes mentales [Kosslyn 1994]. También son posibles estrategias mixtas en las que el sistema motriz determine un tipo de modelo y perceptivamente se ajustan los parámetros libres.

- *Anticipación a los cambios inducidos por el movimiento propio o externo.* En un mundo dinámico la predicción es el mecanismo básico de estabilización. Habitualmente, la predicción se ha utilizado para cancelar retardos en el seguimiento de objetos, estimando un modelo de movimiento para el objetivo a seguir y combinándolo con el sistema de control interno. Desde el punto de vista perceptivo, la predicción desde el movimiento propio es la clave para el funcionamiento de los mecanismos de atención y, en general, para la adquisición eficiente de la estructura espacial externa. Un sistema que pueda predecir el cambio perceptivo inducido por sus acciones dispone de una medida de lo *nuevo*, como diferencia entre lo esperado y lo percibido. Sin esta medida todo es siempre nuevo y candidato a requerir atención. La opción situada o reactiva aquí es que el sistema perceptivo sea selectivo a priori, esto es, sólo sea sensible, y además siempre lo sea, a aquellos rasgos de su entorno asociados a patrones de comportamiento. Esto nos sitúa de nuevo en las criaturas de Brooks. La alternativa que defendemos aquí es un sistema perceptivo en el que la asociación estímulo-comportamiento pueda *retardarse* arbitrariamente en favor de una adquisición prolongada de información. Para ello, lo *nuevo* debe poder estar desligado

de un objetivo prefijado o, dicho de otro modo, debe poder ligarse a cualquier objetivo del repertorio del agente. Lo nuevo es, en definitiva, una medida de cambio frente a lo conocido y ello incluye tanto los efectos del movimiento propio como lo predecible del movimiento externo.

Tradicionalmente, el estudio de la acción y el movimiento se ha desligado en gran medida de la percepción. Las posturas, los movimientos coordinados y rítmicos y la relación de todos ellos con el medio externo, dadas las restricciones morfológicas del agente, constituyen un campo de estudio tan complejo como el de la percepción. Pero esto es sólo el principio si se acepta que ambos están tan estrechamente relacionados que uno no se puede entender sin el otro. Aquí, únicamente hemos querido destacar la importancia de esta relación para extraer algunas conexiones básicas que consideramos imprescindibles en la construcción de un *espacio perceptivo*. Los sistemas visual y motriz son modulares en el sentido de agrupar facultades básicas bien diferenciadas pero al mismo tiempo requieren de una interrelación continua a través del *espacio perceptivo* para permitir que el agente *entienda* su entorno e interaccione eficientemente con él.

Sería muy útil poder situar el momento en que la relación de predicción entre ambos módulos se hace necesaria. Un argumento clásico que hemos comentado anteriormente se basa en los retardos de propagación de las señales de posición, velocidad, etc. frente a los tiempos de respuesta efectivos en ciertos lazos de control de percepción-actuación. La solución teórica de este problema apunta hacia la utilización de modelos directos de predicción [Carpenter 1988]. Sin embargo, el argumento que buscamos debe basarse en la propia relación espacial que el agente mantiene con su entorno. Aun sin datos etológicos suficientes nos aventuramos a proponer una hipótesis: *la relación de predicción a gran escala entre los módulos motriz y perceptivo es necesaria en agentes que mantienen una relación recurrente y estructurada con su entorno próximo y que no construyen y mantienen ese entorno con medios propios*. Con esta idea queremos diferenciar el tipo de relación espacial que mantiene, por ejemplo, una hormiga con el entramado de caminos que constituyen el hormiguero y su entorno, o una araña tejedora con la estructura espacial que define su tela, y un perro o un gato, para los cuales el espacio tiene que reinterpretarse continuamente respecto de un conocimiento previo del mismo. No queremos decir con esto que estos animales no dejen marcas en su entorno, pero no es obvio que estas marcas tengan la misma función que los caminos, telas, etc. creados para ser el único espacio donde son posibles los desplazamientos. Es precisamente en este caso

donde la afirmación de Brooks “el mundo es su mejor representación”, tiene pleno sentido. Pero a medida que el espacio deja de ser físicamente creado para que el agente lo *lea* directamente, se pasa gradualmente a una situación menos *intervencionista* donde la estructura, que deja de estar en el medio, se reemplaza por una estructura interna. A esta estructura la hemos denominado *espacio perceptivo* y, en la medida en que exista, requiere de una predicción continua que mantenga simultáneamente la coherencia con el medio externo y la eficiencia en la gestión de recursos de proceso.

En resumen, la vinculación entre el módulo perceptivo y el motriz permite dos flujos de información básicos: la generación de acciones guiadas por la percepción; y la anticipación de la percepción a la ejecución de movimientos. Ambos contribuyen a la construcción y mantenimiento de un *espacio perceptivo* estable y continuo que se actualiza eficientemente. Desde este punto de vista, la noción de *estar situado* debería extenderse para reflejar la actividad predictiva. Como comentamos en el apartado anterior, si queremos caracterizar el comportamiento inteligente en términos de la interacción agente-entorno, diremos que un agente está situado si, *además de ser capaz de asociar sensaciones con acciones, es también capaz de ponerlas en relación a sus propios movimientos*.

3.2.5 Asimilación del espacio percibido.

La última propiedad que atribuimos al *espacio perceptivo* hace referencia a su capacidad de asimilar información espacial de forma no acotada cuando deja de ser directamente accesible. Por *no acotado* entendemos que no haya una limitación a priori sobre la extensión del espacio asimilable. Esta noción no debe interpretarse en el sentido de almacenar toda la información perceptiva, lo que da lugar a un problema diferente como ya argumentamos en el apartado "Geometría del espacio perceptivo".

El *espacio exterior* permite dar continuidad y estabilidad a la percepción directa. En una aproximación muy simplificada, este espacio sería suficiente si el agente sólo efectuase movimientos rotacionales respecto del origen de su sistema de referencia. Por ejemplo, para una torreta con una cámara convenientemente situada, esta aproximación es razonable. En esta situación, el *espacio exterior* se puede ver como una esfera centrada en un punto de la torreta. La información percibida se sitúa en esta esfera interna y cada vez que se genera una rotación en la torreta, sus nuevas coordenadas esféricas determinan el cono visible del volumen total. Este es el mecanismo básico que articula al espacio interno con el externo,

dentro del *espacio perceptivo*. El problema aparece cuando se producen translaciones. Cuando el agente o el robot con su torreta se desplaza, la información de la esfera también lo hace. Los movimientos hacia delante del agente se traducen en desplazamientos hacia atrás de la información percibida. Al cabo del tiempo, la información que va quedando detrás se acumula y aunque, en teoría, sería posible mantener referencias de posición actualizadas a toda esta información, en la práctica es más que dudoso que esto sea así por varios motivos: en primer lugar, se necesitaría una precisión odométrica virtualmente infinita; además, el coste de actualización o los recursos dedicados a esta tarea crecerían sin límite a medida que se explora espacio nuevo; finalmente, todas las evidencias sobre la forma en que los animales interaccionan con el espacio y nuestra propia sensación de autolocalización, indican que el problema se resuelve de forma diferente.

La información que deja de ser accesible a la percepción directa tiene que organizarse de tal forma que:

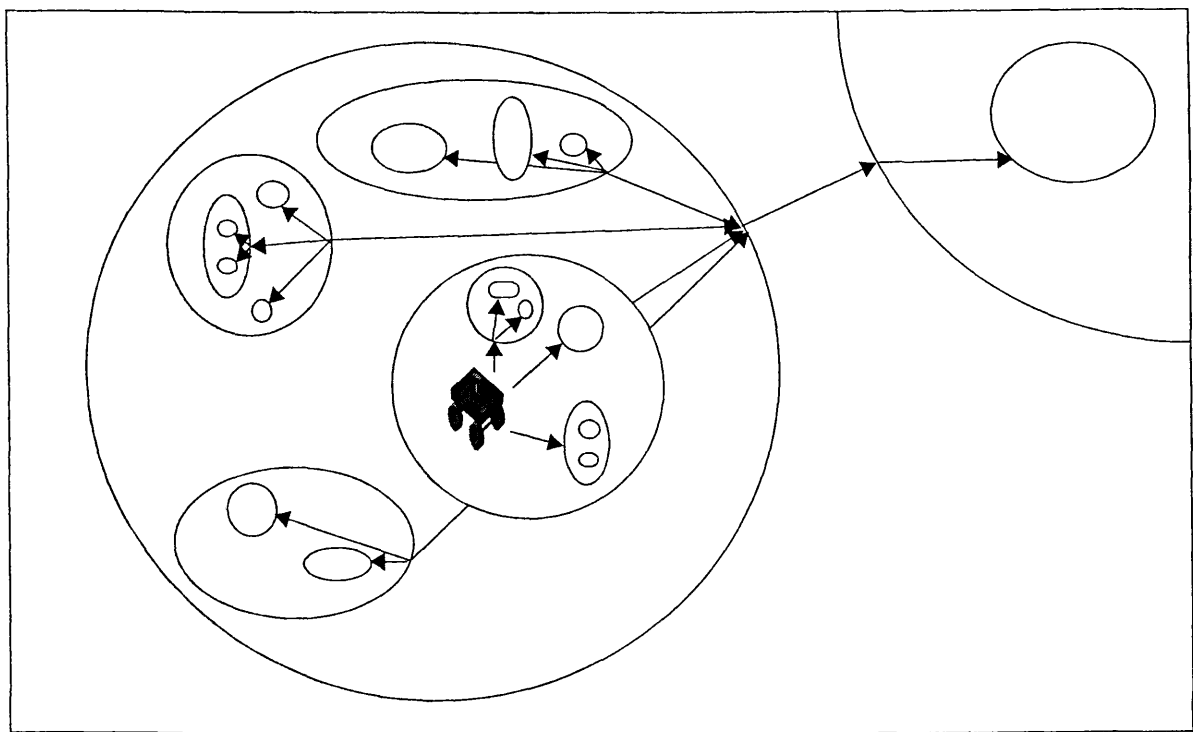
- minimice la necesidad de una elevada precisión odométrica y de que ésta propiocepción tenga un carácter cuantitativo.
- minimice los recursos dedicados al mantenimiento de referencias espaciales, a la vez que asegure la localización del agente en escalas de espacio arbitrariamente grandes.
- permita reconvertir la información almacenada en una predicción inmediata cuando el agente vuelve a sitios ya visitados.
- permita combinar el reconocimiento con la odometría para facilitar una autolocalización estructural. Este sería el caso de reconocer un determinado lugar y ser capaz de reconstruir el espacio circundante a partir de esa información. La situación complementaria consistiría en ser capaz de la misma reconstrucción sabiendo que se ha realizado un determinado desplazamiento.

Nuestra propuesta es organizar esta información en base a un mecanismo de encapsulamiento recursivo de las zonas percibidas en el *espacio externo*. Las zonas, en la geometría bidimensional que hemos descrito, son deformaciones del espacio que adquieren un carácter relevante. No tenemos una definición precisa del concepto de relevancia pero asumiremos dos tipos de criterios: de agrupación que serían análogos a los propuestos por la teoría de la Gestalt; y de interacción, que seleccionan zonas en función de la relación que

tienen con los objetivos del agente. Un ejemplo típico es el recuerdo predominante de los objetos que impiden o marcan las trayectorias de desplazamiento del agente.

Dado un conjunto de zonas relevantes en el espacio externo, la operación de encapsulamiento establece un punto de referencia común y sitúa a cada zona en relación a ese punto. A la estructura así construida la llamamos *cápsula*. Es fácil ver que una cápsula reduce el número de referencias a mantener en una cantidad que es igual al número de zonas encapsuladas menos una -la que corresponde a la propia cápsula. Una vez realizada la operación, sólo es necesario mantener actualizada la posición del punto de referencia y tratarla como una zona más. Aplicando recursivamente esta operación sobre las zonas ya encapsuladas se obtiene una estructura en árbol que puede crecer arbitrariamente, a la vez que mantiene un número acotado de referencias activas. En la Figura 3.6 se puede ver esta idea. Las flechas que parten directamente del robot son las únicas referencias que deben actualizarse. El resto del espacio está encapsulado y, en virtud de esta propiedad, la información estructural de una región del entorno queda *congelada* en relación al punto de cierre o apertura de la cápsula.

Figura 3.6 Estructura del espacio extendido



La estructura de cápsulas se extiende hacia las escalas grandes del espacio y hacia las pequeñas. El mismo mecanismo permite agrupar la información estructural del edificio donde estamos y la del montón de papeles y libros de la mesa que tenemos a nuestro lado. Como señalamos al describir la estructura general del *espacio perceptivo*, lo que queda fuera de la percepción directa debe poder volver a ella cuando se produce un cambio de orientación o desplazamiento. La operación necesaria en este caso es el *desencapsulamiento*. En la figura anterior, si el robot mira lateralmente hacia una de las cápsulas a las que tiene acceso directo, ésta se desencapsula para convertirse en elementos del *espacio externo*. De la misma forma, si sale de la cápsula que le rodea, ésta se cierra dando paso al contenido de la inmediatamente exterior. Esta operación es fundamentalmente predictiva ya que se realiza internamente antes de que concluya la acción física de reorientación de la cámara. Pero, por construcción del *espacio perceptivo* y la articulación de sus tres niveles de organización, es lo que esperamos que ocurra. La orden de movimiento de la torreta llega antes al *espacio interno* donde se actualiza lo que denominamos *copia virtual*. Esta actualización hace accesible la región correspondiente del *espacio exterior* que, a su vez, lo hace sobre el *espacio extendido*, desencapsulando la información que allí hubiese. La operación de desencapsular es, como ya hemos comentado, una reconstrucción sobre el *espacio externo* de la información codificada en la cápsula, dado el estado actual del agente. Desde el punto de vista de la percepción directa del agente, la estructura de cápsulas no existe como tal, sólo se manifiesta en cuanto a que genera un estado predictivo continuo que le hace saber qué es lo que espera percibir antes de ejecutar sus propias acciones. La reconstrucción que permite esto no es un proceso exacto, como ya hemos comentado, por lo que la predicción siempre se ve enfrentada a una confirmación sensorial. Cuando ésta falla se produce una *ruptura de expectación*. Intuitivamente, esperamos que estas *rupturas* se produzcan continuamente produciendo diferentes efectos. Aunque no entraremos aquí en el análisis de estas situaciones, algunas posibilidades siguiendo una hipotética escala creciente de tiempo son: reajuste de los modelos internos o autocalibración selectiva, elaboración de hipótesis alternativas y utilización de movimientos controlados para su verificación, creación de nuevas cápsulas, relocalización mediante el reconocimiento de rasgos perceptivos concretos, recuperación de un estado previo de autocalibración y reelaboración del objetivo -la noción de objetivo en este modelo se discute en el apartado "Objetivos en el espacio perceptivo".

Además de la dinámica de encapsulamiento y desencapsulamiento que se da en la frontera de los espacios *exterior* y *expandido*, la estructura de cápsulas está sujeta a una evolución en

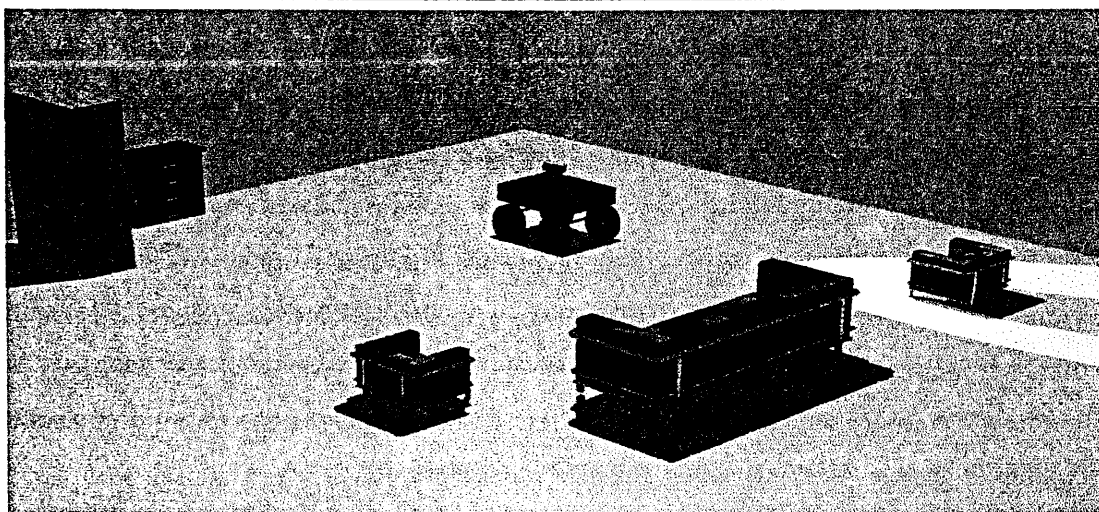
el tiempo según una dinámica de refresco y olvido. Las diferentes frecuencias de acceso a determinadas regiones de la estructura de cápsulas quedan reflejadas en la estructura y esto, a su vez, influye en el comportamiento de navegación del agente. Trataremos esta cuestión con mayor detalle en el último apartado del capítulo.

En síntesis, la estructura del *espacio perceptivo*, el espacio físico asimilado por el agente, está sujeta a una dinámica con diferentes escalas de tiempo: lo inmediato representa el espacio físico que ocupa el propio agente; lo próximo representa el espacio cercano, accesible por los sensores; y lo lejano, aquello que ya no es percible directamente. Estas tres escalas se entremezclan continuamente en virtud de la posición cambiante que el agente ocupa en el mundo.

3.3 Una visión del espacio perceptivo

El objetivo de este apartado es combinar los diferentes puntos que hemos expuesto hasta el momento en una reconstrucción gráfica que ofrezca una visión de conjunto. Con este fin hemos diseñado dos imágenes tridimensionales: la primera es un escenario virtual con algunos objetos donde situamos al robot, Figura 3.7 El haz de luz amarilla indica el campo visual efectivo de la cámara desde su posición y orientación actual.

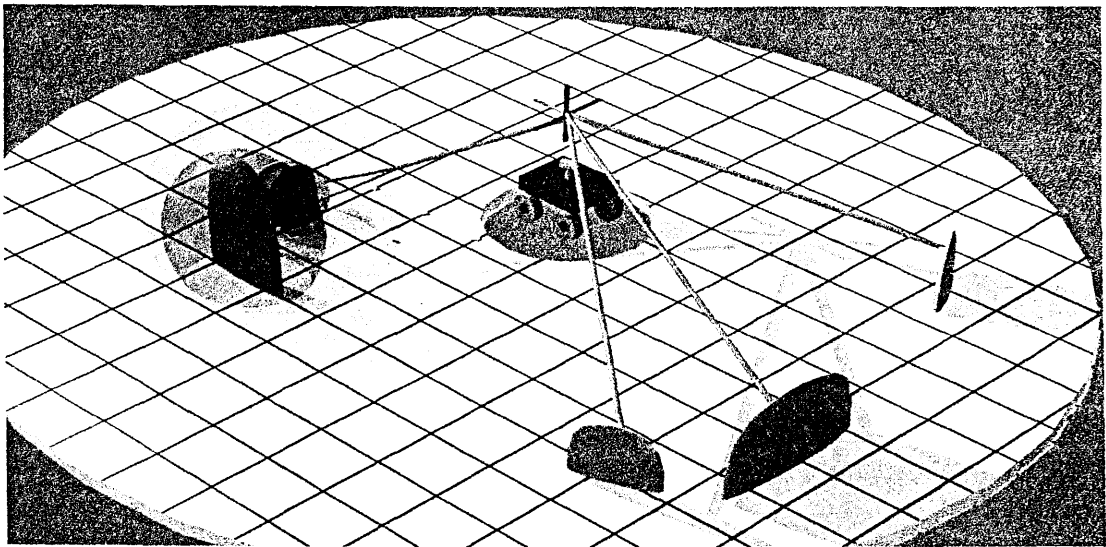
Figura 3.7 Escenario tridimensional -ver texto.



De esta figura pasamos a otra reconstrucción donde ilustramos los conceptos desarrollados hasta el momento.

La Figura 3.8 representa el *espacio perceptivo* correspondiente a la situación anterior con los diferentes elementos y niveles de organización: el sistema de referencia egocéntrico -ejes ortogonales en colores-, la propia forma del robot como el espacio interno, el espacio externo que recorre el suelo y recoge las deformaciones debidas al mobiliario y sus referencias de posición -elevaciones amarillas unidas al robot por líneas naranjas-; y el encapsulamiento de regiones lejanas en burbujas transparentes anidadas con el sistema de referencia local.

Figura 3.8 Relaciones espaciales construidas en el espacio perceptivo -ver texto.



3.4 Objetivos en el espacio perceptivo

Un agente que interactúa con su entorno se encuentra, normalmente, involucrado en diferentes actividades como esquivar obstáculos, explorar, buscar energía o misiones más complejas que pueden alternar en el tiempo o ejecutarse en paralelo. Llamaremos a este tipo de actividades, *objetivos*. La dinámica del espacio perceptivo es consecuencia del conjunto de objetivos activos sobre él. Es importante entender esta noción de objetivo como una etiqueta arbitraria que crea y utiliza un observador externo, y no como algo preprogramado en todos sus detalles. En los ejemplos citados de esquivar obstáculos o explorar, no esperamos que tales objetivos tengan una localización precisa en la arquitectura del agente. Tampoco, en el caso de buscar energía esperamos un correlato del objetivo, más allá de una señal eléctrica causalmente conectada con algún proceso químico. La cuestión de cómo se alcanza un objetivo o, incluso, de cuándo al agente comienza a intentar satisfacerlo dependerá siempre de

multitud de otros factores. Programar explícita o casi explícitamente los objetivos en la arquitectura de control es, a nuestro modo de ver, uno de los grandes errores de la Inteligencia Artificial basada en el comportamiento.

Entendiendo así el término, un objetivo básico al que ya hemos hecho referencia es un tipo de atención dirigida a la adquisición y mantenimiento de información visual en el *espacio exterior*. Los movimientos oculares que intervienen predominantemente en esta actividad son los denominados sacádicos. Al hablar de atención en el *espacio externo* dejamos sin aclarar qué tipo de mecanismos generan la actividad y cómo se produce la interacción con los módulos visual y motriz. Parece razonable pensar que para que se dé una percepción directa del entorno inmediato, el módulo visual debe detectar ciertas regiones e incorporarlas al *espacio externo*. A medida que el número de regiones aumenta, los cambios de atención deben repartirse entre la actividad de refrescar las zonas existentes y detectar las nuevas que vayan apareciendo. Dados unos recursos limitados, esta actividad *asimiladora* debe contrarrestarse con una tendencia a perder información, de tal forma que, en conjunto, se obtenga la representación continua y estable buscada.

Junto a esta actividad atencional deben coexistir otros objetivos que amplíen el repertorio conductual del agente. El problema al que nos enfrentamos es, por tanto, el de combinar y arbitrar distintos comportamientos sobre el medio común que constituye el agente. Hay aún otro problema más complejo que son la adquisición, activación y organización de nuevos comportamientos. No entraremos en este problema aquí, aunque de la propuesta que hacemos para abordar el primero, se derivan algunas vías interesantes para continuar la investigación.

Para facilitar la exposición de la propuesta que queremos plantear comenzamos con un ejemplo de cómo solucionar el problema de la actividad atencional. Hemos obtenido un modelo matemático de este ejemplo y una implementación sobre el robot Acai, que se detalla en el capítulo siguiente. Aquí, explicaremos brevemente la idea general. El objetivo que buscamos es adquirir y mantener actualizada la información visual relevante que se encuentre en el entorno próximo para construir el *espacio exterior*. Supongamos una zona de éste que ya lleve cierto tiempo fuera del campo visual. Cuanto más tiempo pase en este estado, menores garantías habrá de que esa zona se siga correspondiendo con la región original del entorno. El objetivo propuesto se puede alcanzar si hacemos que las distintas zonas compitan entre sí para generar un sacádico que las sitúe en la fovea. Una forma de conseguirlo es hacer que la fuerza con que compiten esté en relación creciente con el tiempo que lleven fuera y, en relación

decreciente, con el tiempo que lleven dentro. La zona ganadora genera una inestabilidad dentro del espacio perceptivo. Podemos verlo como un deseo de querer estar en un sitio diferente al actual. Cuando esto ocurre se genera un evento cuyo fin es solucionar la inestabilidad creada. En este caso el evento se traduce en una interacción con el módulo motriz que ejecuta un movimiento sacádico.

Con este esquema disponemos de un criterio interno al espacio perceptivo que genera un cambio en su dinámica y que hemos llamado *inestabilidad*. Pero, la situación que produce una inestabilidad es, prácticamente la *misma*, que la que a lo largo de este capítulo hemos denominado *ruptura de expectativa*. Dijimos que una ruptura de expectativa se generaba cuando había un error de predicción. La situación que planteábamos era la siguiente: antes de ejecutar una orden de movimiento, el módulo motriz proporciona, de forma anticipada, el estado cinemático y dinámico futuro del agente. Esta información actualiza al *espacio interno* que, dada la estructura articulada conjunta de los otros dos espacios, permite conocer lo que va a entrar en el rango efectivo de los sensores. De esta forma, dentro del *espacio perceptivo* siempre se conoce lo que se va a percibir antes de que lleguen las consecuencias de la acción. Cuando la predicción falla, hay una situación de ruptura que tiene que resolverse. Dependiendo de cómo se evalúe esta ruptura se pueden plantear dos posibilidades inmediatas: una recalibración del *espacio interno*; o la incorporación de una nueva zona, en el caso de que se detecte una región bien definida donde, por omisión¹, se predecía no encontrar ninguna. Esta dicotomía es, obviamente, una simplificación del espacio de posibilidades, pero nos sitúa en el punto al que queríamos llegar: por un lado, estamos ya en condiciones de asimilar la inestabilidad con la ruptura de expectativa, como veremos a continuación; por otro, hemos hecho explícito el problema de la ambigüedad en el tratamiento de las rupturas de expectativa, que dejaremos para el apartado siguiente.

Hemos visto que una ruptura de expectativa se produce cuando la predicción del curso de una acción no es correcta. Pero, ¿quién determina la acción? En la actividad atencional, las zonas compiten por *centrarse* en la fovea. Para ello, la ganadora genera una inestabilidad que resuelve el módulo motriz. La propuesta que hacemos es *considerar estas inestabilidades como rupturas de expectativa generadas internamente* o, dicho de otra forma, *considerar los objetivos como cambios inducidos internamente en el espacio perceptivo que generan*

1. Recordemos la discusión sobre la geometría innata del espacio perceptivo y las hipótesis por omisión en el apartado "Geometría del espacio perceptivo".

rupturas de expectativa. De esta propuesta se deduce un principio de funcionamiento: *cada acción genera una expectativa y cada ruptura de expectativa genera una posible acción*. Si permitimos que las rupturas de expectativa puedan generarse internamente, como el resultado de múltiples dinámicas simultáneamente activas en el espacio perceptivo, entonces tenemos ya una forma de combinar homogéneamente lo procedente del entorno y los objetivos del agente.

Para ilustrar esta idea, veamos ahora cómo podemos ampliar la actividad atencional con otro objetivo. Supongamos que el agente debe avanzar hacia delante esquivando los obstáculos que vayan apareciendo. Esta actividad debe coexistir con la actividad atencional anterior e interaccionar con ella. Partimos, por tanto, de una dinámica inicial del *espacio perceptivo*, desde la que se generan movimientos atencionales de la cámara guiados, únicamente, por la distribución de regiones de intensidad de luz homogénea en la escena. Estos movimientos actualizan el *espacio externo* generando una representación estable y continua que hemos llamado percepción directa. Para conseguir el desplazamiento del agente, introducimos la siguiente modificación: las zonas del *espacio externo* compiten por acortar su distancia al origen de referencia interno, con una fuerza mayor cuanto mayor sea esta distancia. Aquellas que ganan la competición generan una expectativa interna que se traduce en una ruptura de expectativa y, finalmente, en un evento de resolución. Este evento es detectado por el módulo motriz que calcula la acción necesaria para cancelar la inestabilidad creada: el agente comienza a desplazarse. Para evitar colisionar durante este desplazamiento introducimos una nueva modificación: las zonas del *espacio externo* compiten por mantenerse alejadas del origen del sistema de referencia interno, con mayor fuerza cuanto menor es la distancia u otro parámetro relacionado como el tiempo al impacto. La zona ganadora genera una ruptura de expectativa con consecuencias opuestas a la actividad de acercamiento anterior.

Como vemos, las mismas zonas del *espacio externo* contribuyen, dependiendo de la situación, a diferentes actividades del agente. En general, todas las zonas promueven un cambio potencial de actividad, que se materializará en una o un conjunto simultáneamente realizable de acciones -desplazamientos y reorientaciones de la torreta-, dependiendo del estado global del *espacio perceptivo*. Intuitivamente, en todo momento hay una colección de acciones posibles, de las cuales algunas se realizan, generando una secuencia aparentemente ordenada y dirigida. Sin embargo, el origen de este orden no procede de una secuencia

precalculada, sino de la satisfacción simultánea de múltiples restricciones. Estas restricciones se originan desde el entorno percibido y desde los objetivos internos y, ambas, comparten un medio representacional común.

En este esquema el comportamiento reflexivo aparece cuando el número de restricciones a satisfacer es muy elevado. Para que esto suceda deben darse dos condiciones: que la arquitectura perceptiva lo permita; y que sea posible generar internamente estas restricciones. En un agente de naturaleza reactiva, las restricciones se solucionan siempre sobre la marcha. No hay, por construcción, posibilidad de llegar a un estado de *duda*. Si se dan las condiciones que acabamos de mencionar este estado sí es posible, especialmente si se dispone de un mecanismo adicional que permita generar un gran número de restricciones internas, como podría ser la capacidad del lenguaje.

3.4.1 El problema del contexto

El problema que dejamos pendiente en la discusión anterior hace referencia a la incertidumbre para determinar la causa de las rupturas de expectativa. La razón de que esto ocurra es que las rupturas no son clasificables localmente, esto es, no es posible establecer la causa del fallo de predicción con información de una única escala temporal o espacial. Conceptualmente este problema es uno de los más complejos a los que se enfrenta la Inteligencia Artificial y todas las disciplinas relacionadas. También se conoce como el *problema del contexto* o de *asignación de crédito*. Podemos verlo intuitivamente de la siguiente forma: dado que ocurre algo nuevo, ¿qué hacemos a continuación? Es fácil ver que, en el problema que nos ocupa, si se produce un fallo de predicción, por ejemplo al mover la cabeza y encontrar que hay algo diferente a lo que esperábamos, hay un conjunto de posibles causas atribuibles al evento -el modelo cinemático no es correcto, un desajuste mecánico, la región del entorno se ha desplazado, ha aparecido una nueva región en el campo visual, un error en la autolocalización, etc. A esto hay que añadir las rupturas de expectativa generadas internamente. Si el agente está programado para reaccionar siempre de la misma forma, como en el caso de los controladores reactivos, a un observador humano le resultará difícil considerar su comportamiento como inteligente. La misma situación se daría si el agente tratase de evaluar cada situación utilizando todo el contexto posible, bien almacenado, bien obtenido mediante un mecanismo generativo. En este caso el agente rara vez llegaría a tomar una decisión.

Esta dualidad se corresponde esencialmente con la discusión del Capítulo 1. La vía de aproximación que sugerimos aquí propone entender este dualismo como posiciones extremas de un proceso dinámico. De la naturaleza de este proceso se derivan dos consecuencias complementarias: por un lado, permite situar lo inteligente del comportamiento en la capacidad de transitar continuamente entre posiciones reactivas, donde se genera una acción desde un contexto inmediato y, posiciones reflexivas, donde la acción se hace depender de un contexto arbitrariamente grande; por otro, sugiere un origen común y dinámico para ambas posiciones y, en este sentido, abre una vía hacia una explicación más general de aspectos que se han mostrado difíciles de compatibilizar.

3.5 Trabajos relacionados

Uno de los trabajos pioneros en el estudio del conocimiento espacial es “Modeling Spatial Knowledge” de B. Kuipers [Kuipers 1978] donde se realiza un estudio teórico sobre la representación y utilización del conocimiento sobre el espacio que nos rodea. Aunque sujeto a los formalismos del momento, el trabajo de Kuipers ha dado lugar a toda una escuela que sigue manteniendo su actividad. En trabajos posteriores [Kuipers 1983][Kuipers 1996] este autor ha propuesto un modelo de representación del espacio que denomina “Spatial Semantic Hierarchy- SSH”. Esta estructura se define como una jerarquía ontológica con los siguientes niveles: el sistema senso-motor, el nivel de control, el nivel causal, el nivel topológico y el nivel métrico. En un artículo reciente [Pierce & Kuipers 1997] se han propuesto técnicas de auto-aprendizaje de estos niveles sobre un robot simulado. Para ver las diferencias entre nuestra propuesta y la SSH, comentamos brevemente cada uno de los niveles:

- El sistema senso-motor relaciona la entrada sensorial con las variables de actuación utilizando una formalización con funciones continuas. No hay acceso a las variables de estado del agente, sólo a la información sensorial a medida que se desplaza por el entorno.
- El nivel de control agrupa comportamientos como el seguimiento de trayectorias o volver a una posición determinada. Esto se realiza interpretando estados sensoriales distinguibles como referencias de una ley de control, por ejemplo, mantenerse a una determinada distancia de la pared, donde la distancia a la pared es el estado sensorial relevante y conocido.

- El nivel causal está organizado en *vistas*, que definen imágenes sensoriales en estados relevantes, y *acciones*, que representan trayectorias de las leyes de control mediante las cuales el agente se desplaza de una vista a otra. Estos elementos se estructuran en un grafo causal que relaciona vistas, acciones y vistas que resultan de estas acciones.
- El nivel topológico reúne *lugares*, *caminos* y *regiones*, mediante relaciones de conectividad y de inclusión.
- El nivel métrico extiende las relaciones topológicas anteriores con propiedades métricas, como distancia, dirección, forma, etc. Estas características geométricas se extraen de la información sensorial y se representan como anotaciones en la red topológica.

Los dos primeros niveles son de naturaleza dinámica y continua y los tres restantes de naturaleza algorítmica o lógica y discreta. Del mismo modo, los tres primeros se definen sobre un sistema de referencia egocéntrico y los dos últimos sobre un sistema de referencia absoluto. El conjunto refleja una arquitectura híbrida donde el esfuerzo está dirigido a encontrar una transición suave entre los elementos numéricos y los simbólicos. Las diferencias conceptuales más importantes que encontramos son las siguientes: el esquema defiende un profundo carácter cognitivista, donde la información senso-motora tiene que alcanzar los niveles simbólicos de representación para que sean aplicables las técnicas de razonamiento lógico y heurístico; los niveles inferiores se limitan a una agrupación de los espacios sensorial y motriz en comportamientos atómicos que se activan según los resultados del razonamiento simbólico; la representación egocéntrica del espacio se limita a un grafo del tipo estado-acción-estado, que en el siguiente nivel pasa a un sistema de referencia absoluto; la información descendente sigue siendo de tipo *ejecutivo*, frente a una de tipo *predictivo* como la que aquí sugerimos; finalmente, los aspectos relacionados con la percepción, el movimiento y la estrecha relación entre lo reactivo y lo reflexivo, ocupan un plano secundario frente los objetivos de representación simbólica y de razonamiento. En síntesis, en el modelo SSH, la representación sigue siendo un medio para el razonamiento simbólico y éste es el motor último del comportamiento del agente.

El trabajo de Levitt y Tod “Qualitative navigation in Autonomous Robots” es una aproximación detallada al problema de la auto-localización y el razonamiento espacial utilizando información cualitativa [Levitt & Todd 1990]. Estos autores muestran propiedades matemáticas de un sistema de representación del espacio basado en referencias relativas al

agente -conjuntos de puntos reconocibles desde su posición- y cómo es posible planificar trayectorias con esta información. Los resultados obtenidos y los métodos matemáticos utilizados -propiedades topológicas del espacio- son de especial interés para la evolución de nuestro trabajo.

Desde el punto de vista de las arquitecturas reactivas, el trabajo de M. Schneider [Schneider 1996] muestra claramente, en nuestra opinión, el límite real de esta aproximación. En él encontramos una síntesis de casi todos los avances que se han generado dentro de esta corriente, incluyendo la combinación de sistemas sensoriales diferentes -ultrasonidos y visión-, la flexibilización de los mecanismos de inhibición originales a través del concepto de *modulación*, varios niveles de competencia y una interfaz para interpretar como consejos o recursos planes expresados simbólicamente. Quizás lo único que falte sea un modo de control hormonal del tipo desarrollado en [Ferrell 1993]. Esta arquitectura, denominada MAgDA, ha sido implementada sobre un robot móvil demostrando ser extremadamente robusta. Este estudio exhaustivo de las posibilidades del control reactivo ha sido especialmente inspirador para nosotros en el desarrollo de una alternativa donde la representación, la sensación y el movimiento se combinan en una estructura dinámica.

En relación a trabajos sobre las diferentes aproximaciones para generar mapas del entorno, razonar sobre ellos y generar comportamiento de navegación, además de la revisión que hicimos en el Capítulo 1, encontramos en el reciente trabajo de F. Serradilla [Serradilla 1997] una propuesta especialmente interesante. Las ideas que definen la arquitectura híbrida desarrollada constituyen un esfuerzo de acercamiento entre el universo reactivo y el reflexivo que compartimos plenamente. La arquitectura de este trabajo está fundamentada en niveles de memoria generados desde la información sensorial y controlados por procesos relacionados con la toma de decisiones. Nuestra propuesta sugiere una interacción senso-motora más estrecha que mantiene su coherencia a través de la asimilación del espacio. En este sentido, los procesos de predicción, proyección o desencapsulamiento son más importantes que los de extracción, encapsulamiento o planificación ya que determinan la medida en que el agente entiende su entorno desde su interacción con él.

En [Gasós et al. 1997] se sigue una aproximación diferente pero que tiene un gran interés desde el punto de vista de la interpretación perceptiva, motora y lingüística del espacio. Se propone la idea de combinar, en tiempo de ejecución, una descripción lingüística del espacio con información ultrasónica, visual y motriz. La combinación de estas fuentes de información

se lleva a cabo en el marco de una representación borrosa del entorno. En este trabajo, el objetivo está dirigido hacia un reconocimiento eficiente y activo del entorno, que permita la ejecución de tareas descritas lingüísticamente. El trabajo de J. Gasós y el nuestro se complementan en la medida en que abordan dos aspectos necesarios para el comportamiento inteligente: el reconocimiento del espacio percibido; y la percepción y asimilación de la estructura del entorno.

3.6 Análisis del modelo

En este último apartado queremos comentar aspectos del modelo que lo relacionan con otras capacidades cognitivas tradicionalmente tratadas en la Inteligencia Artificial.

3.6.1 Implementación

Tal y como hemos concebido el *espacio perceptivo* y los diferentes tipos de actividad que se dan en él, su implementación requiere algunas consideraciones. En primer lugar, los módulos visual y motriz deben ser procesos independientes y con unas interfaces de entrada y salida bien definidas. Los distintos niveles de organización del *espacio perceptivo* requieren una implementación que refleje el carácter anidado y articulado que los une. Al mismo tiempo, cada uno de ellos debe funcionar como un proceso independiente con tiempo computacional propio para poder respetar las diferentes escalas de tiempo. Finalmente, dado el carácter dinámico de la información que se crea y mantiene en los diferentes *espacios*, cada elemento de información, como lo que hemos llamado *deformaciones* en la geometría del *espacio interno* o las cápsulas del *espacio extendido*, deberían a su vez ser también procesos o, al menos, emulaciones de éstos mediante objetos. De esta forma, cada uno de ellos puede mantener su propio código de actualización con información sensorial directa, de desencapsulamiento, etc. así como variables de estado que evolucionen en el tiempo para reflejar, por ejemplo, la dinámica de olvido.

En conjunto, el esquema de implementación debe recoger la idea de que el agente *vive* en el centro de su *espacio perceptivo*, de tal forma que su estado cinemático sea el estado del *espacio interno* y lo que percibe directamente sea el estado de su *espacio exterior* con la dinámica de encapsulamiento como un mecanismo de fondo, invisible y automático, que le genera continuamente una expectación sobre lo que va a percibir.

3.6.2 Aprendizaje

La dinámica de funcionamiento del *espacio perceptivo* implica un aprendizaje continuo a través de los diferentes niveles de organización. El *espacio interno* es un modelo del propio agente y, como tal, está sujeto a una adaptación continua de sus parámetros. Un caso típico es la autocalibración del sistema de visión para la que existen actualmente algoritmos que pueden funcionar en tiempo real. En máquinas con más elementos articulados la información visual y motriz pueden combinarse a través del *espacio exterior* para ajustar otros parámetros cinemáticos y dinámicos.

En el *espacio interno* se da un fenómeno de adquisición, actualización y olvido que podríamos ver como un aprendizaje a una escala temporal muy corta. La información nueva se compara con la que ya existe para diferenciar una actualización de una incorporación. Las zonas del *espacio interno* que no se actualizan tienden a desaparecer o a pasar al *espacio expandido* en forma de cápsulas.

El *espacio extendido* se crea y modifica continuamente en un proceso de aprendizaje de la estructura de espacio. La creación de elementos se da con información procedente del *espacio exterior* en situaciones de ruptura de expectativa, por ejemplo cuando percibe algo diferente a lo que se espera. La combinación de creación de nuevas cápsulas con el mecanismo de predicción permite que el aprendizaje sea selectivo. Se aprende algo si, además de ser relevante, no se conoce.

3.6.3 Atención

La actividad del *espacio exterior* está fundamentalmente relacionada con la atención. Hay dos razones por las que la dinámica del *espacio exterior* genera cambios atencionales:

- En primer lugar, este espacio recoge internamente el volumen inmediato que rodea al agente, por lo que su extensión es, en general, mayor que el rango efectivo de los sensores en una orientación determinada. En este sentido, no toda la información almacenada procede de un flujo sensorial directo y se hace necesario refrescarla continuamente para mantener los criterios de continuidad, estabilidad y para garantizar una coherencia entre lo que se percibe y la estructura del entorno. Esto se consigue

generando movimientos atencionales dirigidos desde la propia representación interna que recorren selectivamente la escena en una actividad que podríamos llamar de *comprobación*, en el sentido de verificar que esté todo lo que se cree que hay.

- El segundo motivo es la necesidad de adquirir selectivamente la información del entorno. Cuando el módulo visual detecta una región relevante en algún punto del campo visual que no estuviese ya en el *espacio exterior*, esa región pasa a ser candidata a incorporarse y, posiblemente, a un examen más detallado de la misma que debe realizarse en la fóvea.

Los movimientos atencionales dirigidos a la adquisición selectiva de información se intercalan con los dirigidos al mantenimiento de la información existente. Podemos identificar los primeros con la atención guiada por los datos y, los segundos, con la atención guiada por la expectación. Esta actividad conjunta constituye parte del carácter dinámico que atribuimos a las estructuras del *espacio perceptivo* y da soporte a la idea de identificar el comportamiento dirigido a la representación con la representación dirigida al comportamiento.

3.6.4 Planificación

Un aspecto muy interesante de este modelo es que permite incorporar fenómenos típicamente simbólicos como la planificación de forma casi directa. Supongamos que el modelo que hemos descrito es implementable a un cierto nivel y que funciona, según esperaríamos, sobre un robot móvil. Este robot percibiría el espacio de forma continua y estable, sujeto a la geometría innata de su *espacio perceptivo*. A medida que fuese explorando el entorno, su *espacio expandido* iría recogiendo la estructura de los lugares visitados, creciendo así su conocimiento del medio. Supongamos ahora que añadimos a la motivación de explorar, la necesidad de recargar sus baterías y un sensor específico para detectar punto de carga. El problema que se plantea es, dado que encuentra fortuitamente un cargador en algún lugar de su entorno, recarga sus baterías y luego sigue explorando, ¿cómo recupera el camino a ese lugar la próxima vez que su sensor de carga requiera energía?

Para resolver este problema en el *espacio perceptivo* sólo hay que incluir dos modificaciones. En primer lugar, necesitamos recuperar un concepto que ya introdujimos en el apartado "Geometría del espacio perceptivo", el *contenido* de las cápsulas. Lo que proponemos es ampliar la funcionalidad del *espacio perceptivo* para que, además de recoger aspectos estructurales del entorno, incluya junto a esta información rasgos propioceptivos del

agente. Intuitivamente, la idea consiste en empaquetar juntos en una cápsula, un lugar y las sensaciones propias que ocurrieron cuando se visitó ese lugar. En el caso del momento de la carga de baterías, estas sensaciones incluyen la información del estado de descarga previo, la información de estar cargándose y la información de estar cargado.

La segunda modificación consiste en crear una actividad continua en la red de cápsulas que *propague la información instantánea del espacio interno -el estado propioceptivo del robot- radialmente hacia el espacio exterior y de ahí al extendido*. Podemos verlo como una transmisión de paquetes de información que parte del centro de la estructura y avanzan por el árbol de cápsulas. De esta forma, cuando uno de estos paquetes alcanza una cápsula que contiene una información similar, se genera tráfico en el sentido inverso y el camino *marcado* para ser recorrido. Esta selección de caminos funciona según una dinámica sencilla: los paquetes parten con una cantidad de energía inicial relacionada con la intensidad del estado propioceptivo del agente en ese momento. A medida que recorren nodos van perdiendo parte de su energía hasta que finalmente desaparecen. Si uno de ellos encuentra una cápsula *afín* recibe energía adicional para emprender el camino de vuelta. Durante este recorrido inverso va liberando parte de su energía a los paquetes que encuentra en su camino lo que, a su vez, aumenta las posibilidades de que éstos alcancen el nodo fin, generándose una realimentación positiva similar a la que ocurre cuando las hormigas crean sus caminos. El estado de actividad creado es un camino solución en el árbol del *espacio extendido* que puede ser utilizado por el agente para encontrar el punto de carga remoto. Si el robot no lo utiliza y sigue su exploración acabará cambiando su estado propioceptivo y, con él, el envío de paquetes relativos a ese estado a través de la red, rompiéndose la realimentación positiva y con ella el camino marcado.

Toda esta construcción es, en el resultado final, equivalente a un algoritmo tradicional de búsqueda en grafos. Sin embargo, de esta forma se obtienen tres propiedades importantes para el planteamiento global que perseguimos: por un lado, esta planificación se está dando siempre y no requiere, en principio, un criterio de activación externo -un problema, en el sentido de la planificación simbólica-; por otro lado, tiene un carácter predictivo en relación al comportamiento del robot, esto es, su propia maquinaria perceptiva anticipa soluciones compatibles al estado de cada momento; finalmente y utilizando terminología cognitiva, el robot mantiene simultáneamente multitud de estados mentales, sólo uno de los cuales llega a realizarse efectivamente. La decisión de cuál de ellos se hace efectivo proviene del estado global interno del agente -el estado del *espacio perceptivo*, los caminos activados, etc.- y de la

interacción que esté manteniendo con el entorno. Se elimina, por tanto, la necesidad de un elemento centralizado de decisión, tan habitual en los modelos cognitivos¹.

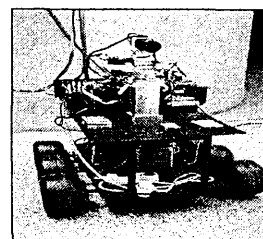
Este mecanismo predice, además, que en el ejemplo utilizado de recarga de baterías, el robot se dirigirá con mayor probabilidad al cargador más cercano, simplemente por la estructura arborescente del *espacio expandido*. Podemos verlo intuitivamente como el fenómeno de no poder evitar recordar aquellos lugares donde se ha vivido una experiencia similar a la que se tiene en este momento. De esta actividad *subconsciente* se deriva otra implicación que analizamos a continuación.

3.6.5 Asociación

Siguiendo con el ejemplo de la carga de baterías en nuestro robot, supongamos ahora que hay varios cargadores diseminados en distintos lugares. Cuando el robot necesite recargarse, su estado interno disparará la actividad de búsqueda radial y, eventualmente, se encontraran varios puntos de carga posibles. La realimentación positiva garantiza que el camino al punto más cercano adquirirá antes un nivel de tráfico mayor y, por lo tanto, quedará marcado con mayor fuerza. Mientras el robot se dirige a él, el resto de los caminos seguirán activos durante el tiempo que dure la operación. Lo importante de esta situación es que en el *espacio perceptivo* habrá simultáneamente diferentes lugares activos que responden al mismo estado interno del robot. Todos ellos tienen el mismo significado conductual para el robot, y es inevitable que todos ellos se activen durante un cierto tiempo cuando el robot está preparado para llevar a cabo ese comportamiento. Lo que tenemos es una base suficiente para desarrollar un mecanismo de asociación entre estos lugares comunes. No profundizaremos aquí en esta idea pero sí sugerimos que es una vía abierta para estudiar los fenómenos de conceptualización léxica que comentamos en el Capítulo 1.

1. Para un análisis filosófico detallado de esta propuesta ver (Fragua 1997a)

Diseño y Construcción del Robot Móvil



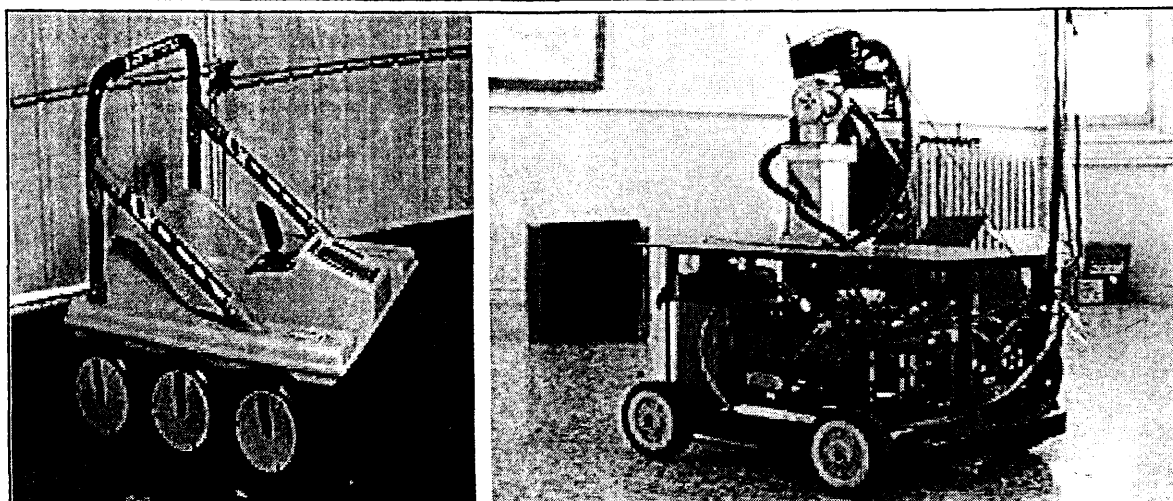
Acai

En este Capítulo presentamos un robot móvil construido como parte de los objetivos de esta tesis. El criterio que ha llevado al desarrollo de esta máquina es la necesidad de disponer de una plataforma de investigación abierta sobre la que incorporar y validar los distintos resultados teóricos en las áreas de visión artificial, navegación ultrasónica y navegación visual, así como, varios prototipos de controladores de motores y arquitecturas de procesamiento.

En su diseño y construcción se han perseguido tres objetivos: la simplicidad, la modularidad y un coste contenido. A lo largo de su desarrollo se han utilizado distintas arquitecturas de procesamiento, configuraciones de sensores, software y hardware de control y acceso a periféricos, motores, reductores, chasis y multitud de otros detalles. La evolución de este proceso de construcción ha estado guiada hacia un compromiso entre las prestaciones y la facilidad de modificación.

La plataforma original a partir de la cual se comenzó la construcción del robot es un pequeño vehículo propulsado con baterías y motores eléctricos que se vende comercialmente como juguete para niños. Esta base se fue transformando en una plataforma de dos pisos con la suficiente superficie libre como para colocar los distintos dispositivos de control y procesamiento. El chasis se sustituyó por una estructura rectangular de acero más rígida y que permite el acoplamiento directo de los motores. Los motores originales se reemplazaron por unos Faulhaber de 70 watios con una caja reductora de relación 43:1 y codificadores ópticos de posición HP. Se ha mantenido, sin embargo, la transmisión por cadena a las ruedas delantera con el fin de situar el eje de giro del robot en el centro geométrico del mismo.

Figura 4.1 Plataforma original y estado actual del robot Acai.



Para el trabajo en Visión Artificial, se ha construido una torreta de 2 grados de libertad con geometría Fritz, mecanizada en aluminio y dotada de dos motores Maxon de 40 watios y reductoras con relación 30:1. Esta va situada en el piso superior de la plataforma. La cámara utilizada es un modelo de la casa Mitshubishi 300E con objetivo motorizado y un microcontrolador interno al que se accede a través de un puerto serie. A través de este enlace se pueden programar distintos modos de funcionamiento como enfoque e iris automático o manual, posición del zoom, ganancia, balance de blancos, obturador electrónico, etc.

En cuanto a los elementos de proceso, se comenzó con una placa base Intel con procesador Pentium y una configuración en pipeline de 9 Transputers T800 encargados de la adquisición y preprocesamiento visual. Algunos de estos procesadores incorporaban coprocesadores matemáticos de la marca Zoran y convolucionadores de imagen IMS A110. A esto hay que añadir las tarjetas basadas en microcontroladores que se diseñaron como módulos de control de motores. Finalmente, todo el sistema de a bordo se conectaba vía Ethernet a una estación de trabajo SPARC 10. En total, contábamos con 15 procesadores de 6 tipos diferentes. Teniendo en cuenta que cada uno de ellos requiere un sistema de desarrollo propio, que muchos de ellos no disponen de sistema operativo y que el software que se fuese desarrollando debía estar convenientemente distribuido, comunicado y sincronizado a través de los diferentes elementos de la arquitectura, la complejidad resultante en términos del ciclo de vida software del sistema se hizo inabordable. Los tiempos necesarios para realizar cambios comenzaron a superar con creces los tiempos necesarios para idear estos cambios. Esta situación se hace especialmente grave sobre un prototipo de investigación cuyo fin es, precisamente, ser el soporte de continuos cambios y modificaciones.

A esta situación hay que añadir el hecho de que la capacidad de proceso del sistema, aunque inicialmente alta, no permitía una evolución asequible en términos económicos. Al tener algunos de los componentes una distribución comercial limitada, su actualización a versiones más potentes se reducía sistemáticamente a las promesas de los fabricantes. Finalmente, algunos de los microprocesadores involucrados habían dejado de fabricarse con el consiguiente riesgo de no poder encontrar elementos de reemplazo en caso de accidentes o envejecimiento prematuro.

Este cúmulo de circunstancias nos condujo a un replanteamiento de la arquitectura de proceso con el objetivo de definir una configuración lo mas simple y barata posible, con mayores facilidades para el desarrollo del software¹ y proveniente de fabricantes con el suficiente volumen comercial como para garantizar una evolución tecnológica constante y compatibilidad entre sus diferentes versiones.

La configuración final está basada en una placa multiprocesador Intel con dos microprocesadores P6 a 200 MHz, una tarjeta de adquisición de imágenes de bajo coste y sin procesadores específicos de la casa Matrox, modelo Meteor, sistema operativo Linux y comunicaciones sobre Ethernet y canales serie. Los tiempos de proceso después del cambio son claramente inferiores y el coste del material un orden de magnitud menor, a lo que se añade de la posibilidad de reemplazar tarjetas y de actualizar fácilmente todo el sistema en caso de que sea necesario. Otros componentes del robot, como las tarjetas de control de motores y las de comunicación con éstas y otros periféricos, desarrolladas por miembros del laboratorio, permanecen fieles a su diseño original manteniendo su utilidad y operatividad.

Finalmente, en cuanto a la alimentación del robot, se comenzó montando un juego de baterías y una fuente de alimentación con cargador incorporado. De nuevo, las limitaciones de potencia y el coste de las fuentes, unido al hecho de que ya estábamos utilizando un cable de red para comunicar al robot con las estaciones de trabajo, nos ha hecho decantarnos por mantener un cable de alimentación a 220V e incorporar un cargador de baterías comercial de 16A con salidas a 12V y 24V. La alimentación del hardware se hace con las fuentes comerciales que se suministran con los ordenadores personales. Esto garantiza la alimentación para los motores, sensores y equipos actuales, y para los que se pudiesen incorporar en el futuro. El problema de la autonomía energética está, por un lado, fuera del ámbito de este

1. Esto suele implicar sistemas operativos, comunicaciones y compiladores lo más eficientes y amigables posible.

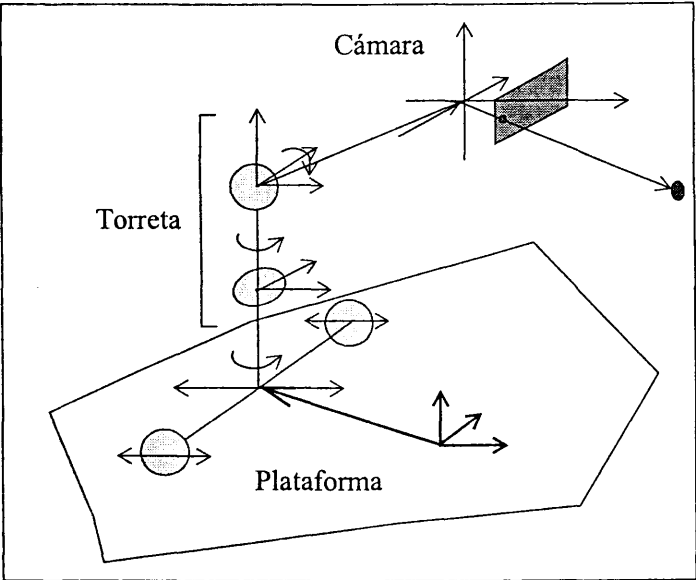
trabajo y, por otro, muy ligado a las disponibilidades tecnológicas actuales y futuras de los acumuladores. En definitiva, si fuese necesario, no sería técnicamente problemático incorporar baterías, conversores DC/DC y sustituir el cable de red por un radio enlace Ethernet.

El resto del Capítulo se divide en tres partes. En la primera se describe brevemente la cinemática directa del robot. La cinemática inversa se ha obtenido, únicamente, para la torreta ya que la plataforma se controla en lazo cerrado de velocidad desde consignas generadas por el sistema visual. En la segunda parte se describe el control de los motores y subsistemas torreta y plataforma- y su realización en tarjetas de proceso dedicadas. Finalmente, en la tercera parte, se muestra el software de control de estas tarjetas, el software de interfaz con ellas desde el procesador central y los mecanismos de comunicación.

4.1 Modelo cinemático y control del robot

La siguiente figura muestra un esquema con los distintos grados de libertad del robot. Puede verse que, de los 4, sólo 3 son independientes. En la esquina superior derecha aparece el modelo de proyección de la cámara.

Figura 4.2 Esquema del robot

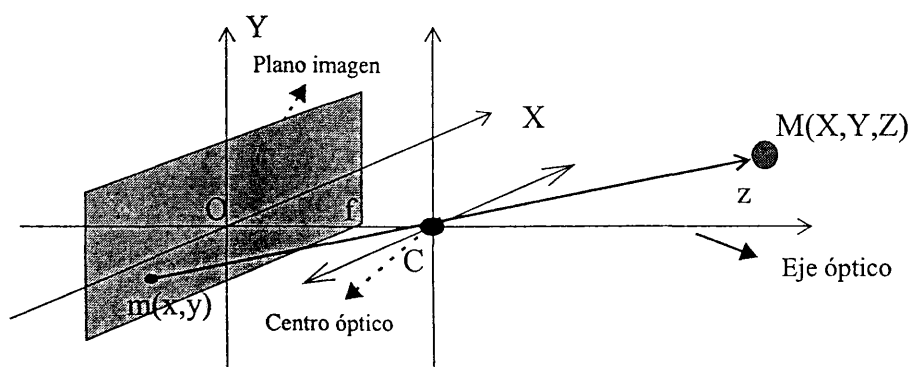


Comenzamos con el modelo de formación de imágenes para continuar con la torreta y finalizar con la plataforma.

4.1.1 Modelo de formación de imagen

Utilizamos el modelo “pinhole” como modelo de formación de la imagen. Definimos un sistema de referencia, OXYZ asociado a la cámara de tal forma que el eje óptico esté alineado con el eje Z y los ejes X e Y definen el plano imagen. El centro óptico se sitúa a lo largo del eje Z a una distancia f del centro de coordenadas. De esta forma, la proyección de un punto M externo sobre el plano imagen aparece como el punto de corte m con el plano imagen de la línea que une M con C .

Figura 4.3 Modelo de proyección perspectiva



Suponiendo que todos los puntos de la escena están delante de la lente, esto es $Z > f$, y observando la relación de semejanza entre triángulos se obtiene la igualdad:

$$\frac{f}{Z} = -\frac{x}{X} = -\frac{y}{Y} \quad (4.1)$$

despejando:

$$x = -\frac{f \cdot X}{Z} \quad y = -\frac{f \cdot Y}{Z} \quad (4.2)$$

De estas expresiones se observa:

- la no linealidad de la transformación al aparecer la coordenada Z en el denominador.
- todos los puntos situados sobre la recta $\overline{CM}$ se proyectan sobre el mismo punto del plano imagen m .

Estas ecuaciones se pueden reescribir de forma lineal utilizando coordenadas homogéneas:

$$P = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

donde:

$$x = \frac{u}{w} \quad y = \frac{v}{w} \quad \text{si } w \neq 0 \quad (4.4)$$

A esta matriz la llamaremos P .

A continuación se introducen dos transformaciones más: por una lado, la que modeliza el proceso de muestreado y digitalización como una homotecia en los ejes del plano de imagen,

$$M = \begin{bmatrix} \eta_x & 0 & 0 \\ 0 & \eta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

donde los coeficientes η_x y η_y representan el número de píxeles por unidad de longitud en los ejes ox y oy , respectivamente y el cociente $\frac{\eta_x}{\eta_y}$ representa la relación de aspecto de la cámara;

y, por otro, la que permite trasladar el centro de coordenadas del plano imagen al píxel superior izquierdo:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Componiendo estas tres matrices se obtiene:

$$P_{Imag} = T \cdot M \cdot P \quad (4.7)$$

que es la matriz que modeliza el proceso de formación de imágenes. Al multiplicarlas se obtiene:

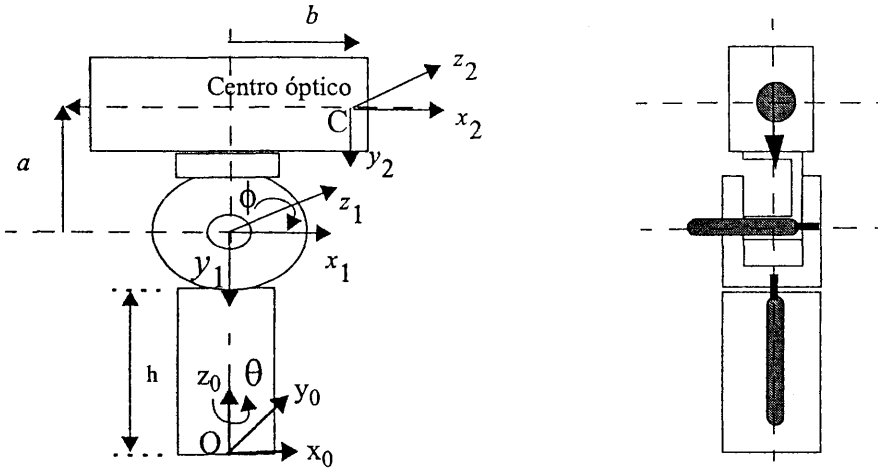
$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot \eta_x & 0 & -x_0 f \cdot x_0 \\ 0 & f \cdot \eta_y & -y_0 f \cdot y_0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

donde $(X, Y, Z, 1)$ son las coordenadas homogéneas de un punto de la escena y (u, v, w) las coordenadas homogéneas de la proyección de dicho punto sobre el plano imagen.

4.1.2 Modelo cinemático de la torreta

La torreta que se ha construido consta de tres piezas mecanizadas en aluminio según una estructura en U que proporciona dos grados de libertad, como se muestra en la Figura 4.4

Figura 4.4 Esquema de la torreta



Planteamos las matrices homogéneas de la cinemática de la torreta tomando el punto de intersección O de los dos ejes como origen de coordenadas $OX_0Y_0Z_0$. Siguiendo el esquema de la Figura 4.4 construimos directamente las dos matrices de rotación

$$T_{torr} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & -1 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 & b \cdot \cos\phi + a \cdot \sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 & b \cdot \sin\phi - a \cdot \cos\phi \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

(4.10)

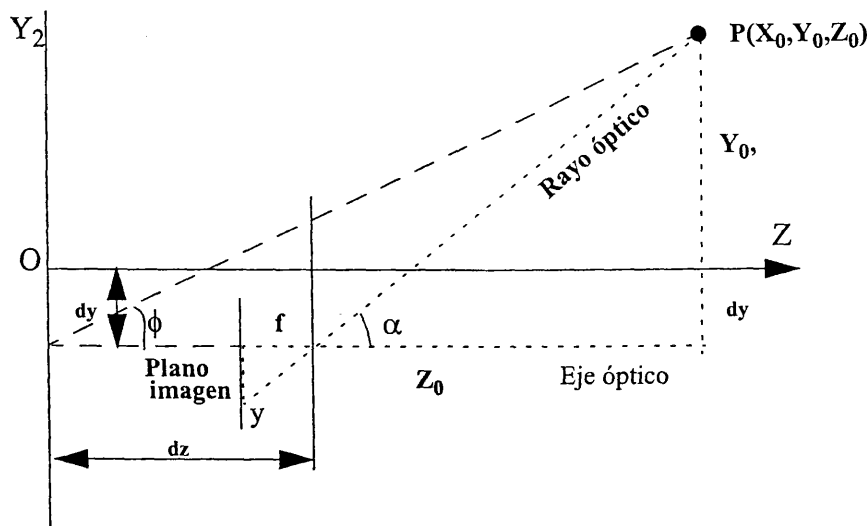
Podemos ahora combinar la matriz de proyección T_{proj} con T_{torr} para obtener el modelo cinemático del conjunto:

$$T = T_{proj} \cdot T_{Torr} \quad (4.11)$$

4.1.3 Alineamiento de la torreta con un punto externo

Alinear o fijar la cámara sobre un punto externo es hacer que ese punto se proyecte sobre el centro de la imagen. El problema es, dadas las coordenadas de imagen de un punto, encontrar los ángulos de rotación de la torreta que hacen que ese punto pase al centro de la imagen. L. Baumela ha estudiado este problema encontrando que cuando el centro óptico de la cámara no está situado sobre el centro de giro de la torreta, es necesario conocer las coordenadas del punto exterior. En la Figura 4.5 se muestra esta situación para el giro horizontal. El esquema está tomado de [Baumela 1995].

Figura 4.5 Proyección del giro en torno al eje OZ_2



En la figura anterior puede verse que para alinear el eje óptico con el rayo óptico hay que hacer $\alpha=0$. Sin embargo, el ángulo de giro de la torreta es ϕ . La solución más usual a este problema es tomar el valor de ϕ por el de α y proceder de forma análoga para el giro vertical, suponiendo por lo tanto que $d_x=d_y=d_z=0$. El mismo autor ha estudiado el error cometido en esta sustitución encontrando que éste es suficientemente pequeño en relación a la resolución de la imagen como para que sea asumible en las tareas que vamos a realizar con el robot.

Al hacer esta aproximación, los valores de α y β –para el giro vertical– pueden utilizarse como consignas de control en el posicionamiento de la cámara. Sus valores se obtienen directamente de las coordenadas visuales (x, y) y del valor de f .

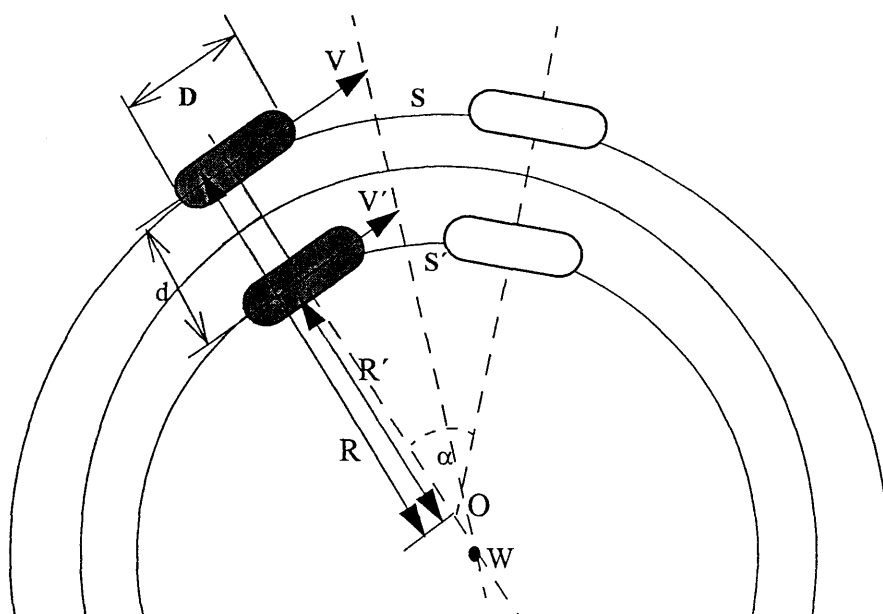
$$\tan \alpha = \frac{-y}{f} \text{ y } \tan \beta = \frac{-x}{f \cdot \cos \phi - y \cdot \cos \phi} \tag{4.12}$$

Estas expresiones definen la cinemática inversa aproximada que permiten controlar la posición de la torreta respecto de las coordenadas de imagen.

4.1.4 Modelo cinemático y control de la plataforma

La transmisión por cadena en cada una de las hileras de ruedas laterales de la plataforma, hace que el conjunto pueda ser aproximado por un par de ruedas centradas en el eje longitudinal y con movimiento diferencial. En el esquema de la Figura 4.6 se representa el modelo geométrico de esa configuración. Modelamos el desplazamiento de la plataforma para una trayectoria circular. D es el radio de la rueda y d la distancia entre ruedas. R el radio de giro de la rueda exterior y R' el de la rueda interior. S y S' son los arcos recorridos exterior e interior, respectivamente, para un ángulo de giro α .

Figura 4.6 Cinemática de la plataforma



V y V' son las velocidades lineales de cada rueda, que podemos expresar en función de la velocidad angular $\dot{\alpha}$ como:

$$V = R \cdot \dot{\alpha} \quad \text{y} \quad V' = R' \cdot \dot{\alpha} \quad (4.13)$$

donde $R' + d = R$. Sustituyendo esta relación en las ecuaciones anteriores:

$$\begin{aligned} V &= (R' + d) \cdot \dot{\alpha} \\ V' &= R' \cdot \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Operando obtenemos el radio de giro de la plataforma respecto a la rueda exterior en función de la distancia entre ruedas y las velocidades lineales de cada una:

$$R' = d \cdot \frac{V'}{V - V'} \quad (4.15)$$

Según la relación de velocidades obtenemos los siguientes casos:

- Si $V = V'$, R se hace infinito y la trayectoria rectilínea.
- Si $V = -V'$, $R = \frac{d}{2}$ sitúa el punto de giro en el punto medio del eje de las ruedas.
- Si $V' = 0$, $V \neq 0$, $R' = 0$, sitúa el punto de giro en la rueda exterior.
- Si $V = 0$, $V' \neq 0$, $R' = d$, sitúa el punto de giro en la rueda interior.

En la figura anterior se puede ver que el radio de giro es el punto de corte de la recta que une ambas ruedas con la recta punteada que une las velocidades de cada rueda. De esto se deduce geométricamente que la velocidad de traslación del punto medio del eje es la media aritmética de las velocidades lineales de las ruedas; y que la velocidad de rotación del eje respecto a su punto medio es el cociente entre la diferencia de velocidades y la longitud del semieje.

El controlador de la plataforma debe establecer las consignas de velocidad para el controlador de cada rueda. Dado que el modelo tiene dos grados de libertad es necesario imponer una restricción adicional. La velocidad de avance en línea recta viene determinada por un control proporcional realimentado con la distancia al objetivo. Tomamos V_a como la velocidad de avance y D_o la distancia medida:

$$V_a = k \cdot D_o \text{ con } V_a = V = V' \quad (4.16)$$

Queremos que la plataforma gire con un radio mayor cuanto mayor sea V_a . Podemos obtener este comportamiento si imponemos la restricción de que la suma de V y V' sea igual al doble de V_a . Lo que se consigue es crear un diferencial de velocidad simétrico relativo a V_a :

$$V' + V = 2 \cdot V_a \quad (4.17)$$

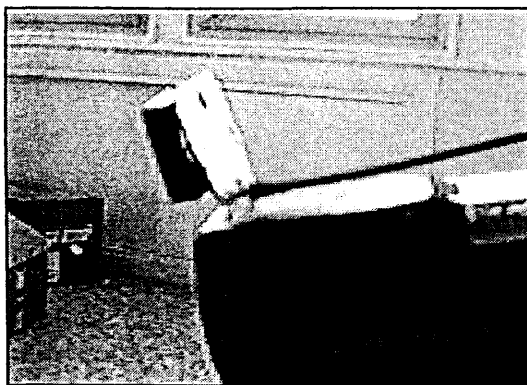
El radio de giro depende, por tanto, de la velocidad de avance que, a su vez, depende de la distancia al objetivo. En la implementación del controlador hay que tener en cuenta los

rangos máximos de V y V' . Cuando se alcanza el valor máximo V_a debe disminuir para evitar perder la relación diferencial.

4.2 Medida de distancias

Para estimar la distancia a los estímulos visuales hemos montado sobre la cámara un sensor ultrasónico comercial Polariod. El sensor se ha situado de forma ligeramente convergente con el eje óptico para asociar la medida de distancia a la región central del campo visual. En la Figura 4.7 se muestra una fotografía de esta configuración.

Figura 4.7 Detalle del montaje del sensor ultrasónico sobre la cámara.



El control de disparo y lectura de este dispositivo lo realiza un microcontrolador que se integra en la arquitectura de control que se describe a continuación.

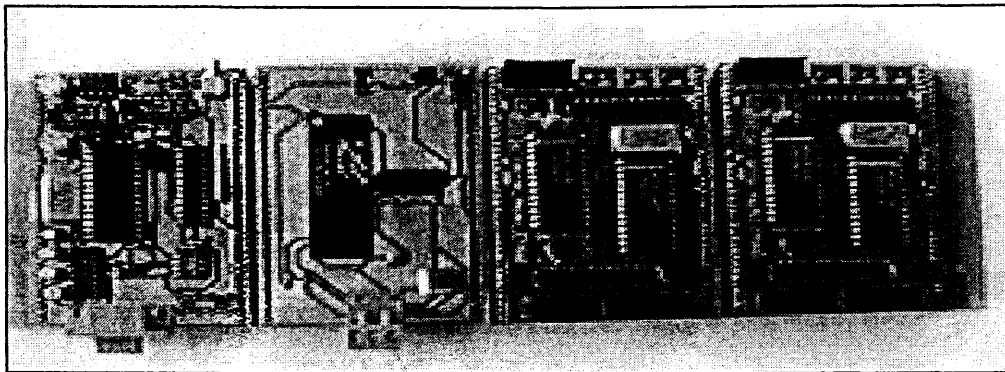
4.3 Control de los motores y subsistemas

El control de los cuatro motores del robot se realiza utilizando una arquitectura modular basada en microprocesadores, elementos de comunicación, circuitos integrados de control y etapas de potencia. Para cada uno de estos elementos se ha desarrollado una tarjeta específica. Estas tarjetas pueden ser apiladas para conformar un conjunto operativo que se comunica mediante un intérprete de comandos con el computador de a bordo. Esta configuración permite descentralizar las tareas de control, liberando recursos y proporcionando una gran flexibilidad de ampliación y reconfiguración. El diseño y desarrollo de esta arquitectura ha sido realizado por J. Vicente [Vicente 1995].

Los módulos de esta arquitectura son:

- **Gestión**, utiliza un microcontrolador compatible con el Intel 8051 que permite interpretar comandos procedentes del computador de abordó y enviar información sobre el estado del control.
- **Comunicaciones**, permite establecer comunicación remota de tres formas diferentes: mediante una comunicación serie RS232C; utilizando el protocolo serie de alta velocidad -5Mbs⁻¹- de INMOS que se utiliza en la comunicación entre Transputers; y una versión de éste con amplificación diferencial, desarrollada por el grupo de ensayos no destructivos del Instituto de Automática Industrial del C.S.I.C., que permite comunicación full duplex con un solo cable coaxial a distancias superiores a los 50 m.
- **Control**, utiliza el circuito integrado LM629 de National que implementa un control P.I.D. y la lectura de los codificadores de posición. Genera una señal PWM.
- **Etapá de potencia**, utilizando un puente en H de transistores MosFet que toma como entrada la señal PWM y suministra tensión controlada a los motores.

Figura 4.8 Fotografías de los módulos que componen la arquitectura.

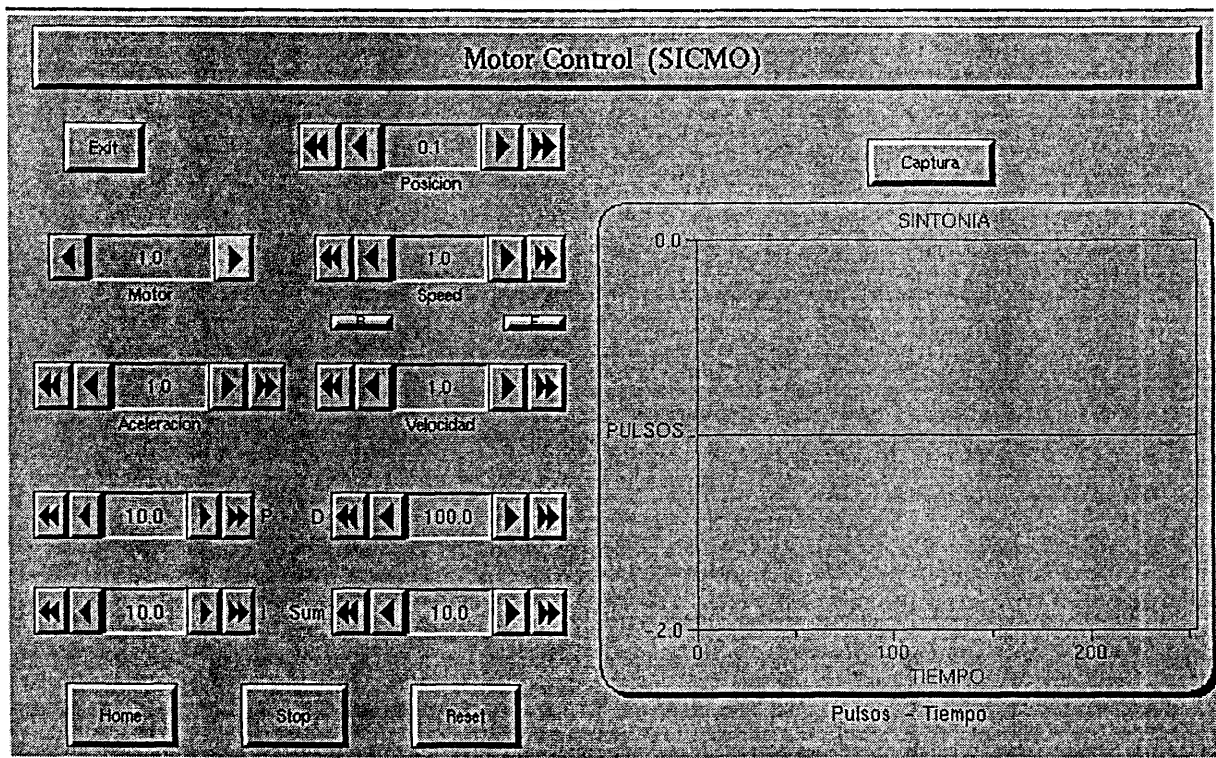


4.4 Software de control e interfaz

El computador de a bordo puede comunicarse con diferentes sistemas de control a través de varios puertos de comunicación. Para ello se dispone de tarjetas de comunicaciones, también desarrolladas por el grupo de ensayos no destructivos citado anteriormente, que permiten establecer comunicaciones serie de alta velocidad. Cada tarjeta dispone de dos canales independientes y, utilizando varias tarjetas, se consigue una configuración en estrella flexible y eficiente. Hemos desarrollado un driver sobre Linux para estas tarjetas que permite integrar fácilmente el control de actuadores y sensores en el sistema global. En la Figura 4.9

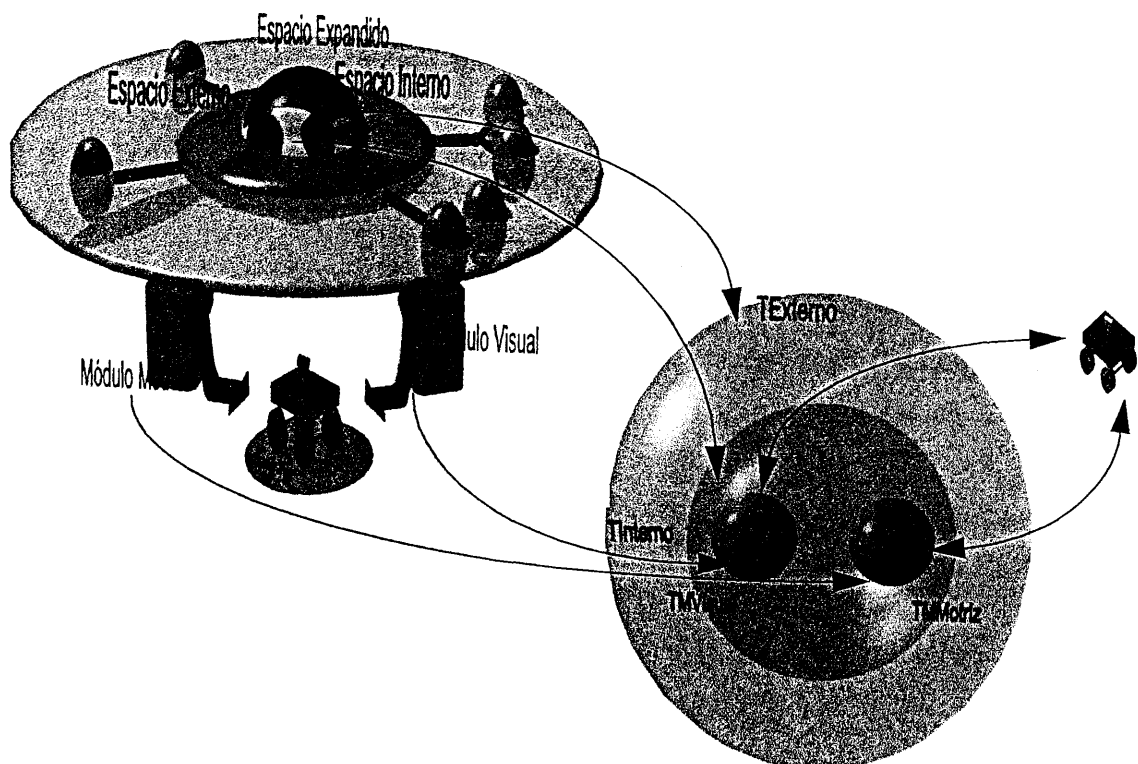
se muestra la interfaz gráfica que se ejecuta sobre el computador y que permite el acceso al sistema de control modular.

Figura 4.9 Interfaz gráfica de control de la torreta



En este capítulo presentamos el resultado de modelar e implementar algunos aspectos del espacio perceptivo y de los módulos visual y motriz, sobre el robot Acai. La programación se ha realizado en C++, haciendo uso del diseño orientado a objetos para reproducir la organización en niveles de los diferentes espacios y su interacción con los módulos de procesamiento. En la Figura 5.1 se muestra esta disposición en relación con el esquema general desarrollado en el Capítulo 3.

Figura 5.1 Organización de objetos software.



Los elementos que hemos seleccionado para su modelado e implementación son:

- En el módulo visual **-TMVisual-**, la segmentación de regiones homogéneas en la fovea y en la periferia del campo visual.
- En el módulo motriz **-TMMotriz-**, el control de los cuatro motores del robot y la cinemática inversa de la torreta y la plataforma.
- En el espacio interno **-TInterno-**, los modelos cinemáticos de la plataforma, de la torreta y de proyección de la cámara.
- En el espacio externo **-TExterno-**, la construcción de una superficie bidimensional donde regiones distinguibles del entorno se interpretan como elevaciones del terreno. Todo el espacio externo mantiene actualizada su posición relativa al espacio interno combinando información odométrica y de reconocimiento morfológico.
- Como actividad atencional en el espacio perceptivo: un mecanismo de atención que permite adquirir y mantener actualizada, selectivamente, información del entorno generando movimientos sacádicos en la torreta.
- Como actividad de desplazamiento del robot: un mecanismo de exploración que fuerza al robot a visitar regiones desconocidas. Este mecanismo interactúa con el sistema atencional.

Estos dos últimos puntos se describen, por claridad, como parte de la dinámica del espacio externo aunque en el Capítulo 3 se trataron como actividades independientes de éste. En los apartados siguientes se describen las diferentes soluciones adoptadas en el modelado de cada elemento.

5.1 Módulo Visual

El módulo visual consta de las siguientes etapas de procesamiento en tiempo real: obtención de la imagen log-polar, segmentación de regiones homogéneas en fovea y periferia y extracción de parámetros geométricos en la región central.

5.1.1 Obtención de la imagen log-polar.

Para obtener la imagen log-polar en tiempo de adquisición de video (25 img/s) se utiliza una cámara Mitsubishi 300E y una tarjeta de adquisición de imágenes comercial de bajo coste,

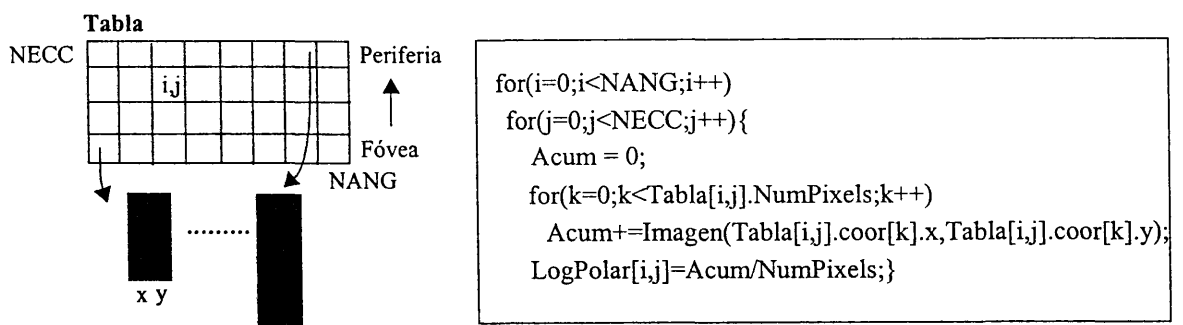
Matrox Meteor, sobre bus PCI. La cámara dispone de un puerto serie para la configuración remota de sus parámetros ópticos. La tarjeta de adquisición utiliza la memoria del PC como memoria de video, aprovechando la alta velocidad de transferencia del bus y un buffer FIFO propio.

El driver que utilizamos se puede instalar dinámicamente en el núcleo de Linux y permite la programación y uso de la tarjeta en distintos modos. En el modo de captura más eficiente, se utiliza un mecanismo de interrupciones que avisa a la rutina encargada en el programa cada vez que una nueva imagen está disponible en memoria. Durante el tiempo de transferencia, que coincide con el de adquisición, la interferencia con la CPU es mínima lo que permite solapar procesamiento y adquisición de forma muy eficiente. El tamaño de las imágenes capturadas es de 256x256 píxels con 8 bits de resolución.

Para llevar a cabo la transformación se utiliza una tabla de conversión entre coordenadas cartesianas y corticales. El software de generación de la tabla permite definir distintos parámetros de la topología del sensor retinal que se quiere simular. Algunos de ellos son: el tamaño de la imagen cartesiana, el número de divisiones angulares y radiales, el tamaño mínimo del fotorreceptor, la geometría de los campos receptivos -triangular o rectangular- y la posición de la fovea en el sensor. Este software ha sido cedido por el LIRA, laboratorio que dirige el Dr. G. Sandini, en Génova, Italia.

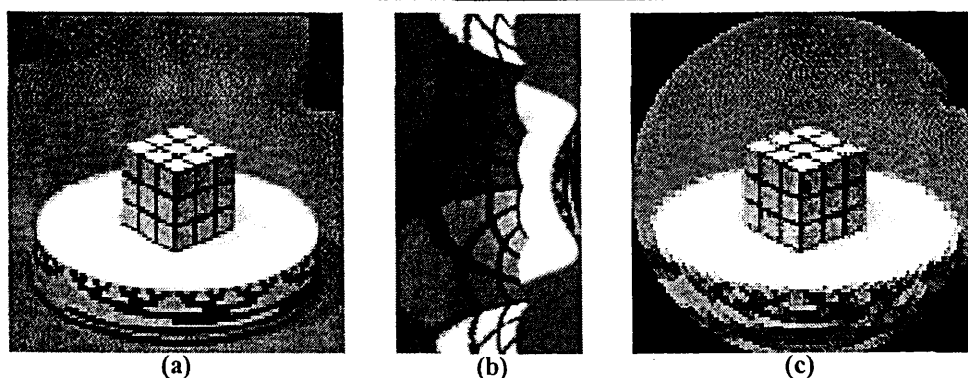
La tabla es una array bidimensional, indexado por ángulo y excentricidad, de listas de las coordenadas cartesianas que componen cada campo receptivo. Para obtener la imagen cortical basta recorrer este array y, por cada elemento del mismo, obtener el promedio de nivel de gris de los píxels de la imagen cartesiana que se corresponden con los elementos de la lista asociada.

Figura 5.2 Obtención de la imagen cortical



El tamaño de imagen cortical que se utiliza es de 128x64 elementos. La reducción de tamaño es por tanto de 64KB a 8KB. Dado lo difícil de una interpretación intuitiva de la geometría polar y como herramienta de ayuda durante el desarrollo, se utiliza la misma tabla para generar una reconstrucción cartesiana de la imagen cortical. En la imagen de 256x256 reconstruida, 56 de los 64KB son valores copiados del nivel de gris promedio del campo receptivo correspondiente. En la siguiente figura se muestra un ejemplo con los tres tipos de imágenes:

Figura 5.3 Ejemplos de imagen cartesiana (a), cortical (b) y reconstruida (c).



La obtención de la imagen cortical de una forma eficiente permite considerar al conjunto de la cámara, la tarjeta de adquisición y este primer nivel de procesamiento como una retina no homogénea virtual. La posibilidad de reconfigurar el mapa log-polar, junto a la facilidad de acceso remoto a muchos de los parámetros ópticos de la cámara, convierte al conjunto en una herramienta de extraordinaria utilidad en la investigación de los procesos de visión activa.

5.1.2 Segmentación: el algoritmo EM

Para la extracción de regiones de interés en la imagen log-polar, hemos utilizado el método EM¹ -expectation-maximization- [Ruiz 1994]. Este método se utiliza con frecuencia en la estimación de funciones de densidad de probabilidad conjunta de variables aleatorias. Estas funciones conjuntas se pueden aproximar por una mezcla finita de clases de $C_1, C_2 \dots C_N$ donde cada clase tiene una función de densidad normal con variables independientes. Dado un conjunto de K variables aleatorias:

$$z = (z_1, z_2, z_3 \dots z_K) \quad (5.1)$$

1. Nuestro agradecimiento a Alberto Ruiz de la Universidad de Murcia por las discusiones, sugerencias y aclaraciones en relación a este método.

se puede estimar su función de densidad de probabilidad conjunta como:

$$\hat{p}(z) = \sum_{i=1}^N P_i p_i(z) \quad (5.2)$$

donde:

$$P_i \text{ es la probabilidad de la clase } C_i \text{ con } \sum_{i=1}^N P_i = 1, \text{ y} \quad (5.3)$$

$$p_i(z) = p_i(z|C_i) \text{ es la probabilidad de } z \text{ condicionada a la clase } C_i \text{ con} \quad (5.4)$$

$$\int p_i(z) dz = 1 \quad (5.5)$$

Al ser $p_i(z)$ una función normal con variables independientes se puede expresar como un producto de funciones normales unidimensionales:

$$p_i(z) = p_{i,1}(z_1) \cdot p_{i,2}(z_2) \dots p_{i,K}(z_K) \text{ con } \int p_{i,k}(z_k) dz_k = 1 \quad (5.6)$$

siendo:

$$p_{i,k}(z_k) = p(z_k|C_i) \quad (5.7)$$

Expresando $p_{i,k}(z_k)$ como una distribución normal:

$$p_{i,k}(z_k) = N(z_k, \mu_{k,i}, \sigma_{k,i}) \text{ con } \mu_{k,i} = E\{z_k|C_i\} \text{ y } \sigma_{k,i} = E\{(z_k - \mu_{k,i})^2|C_i\} \quad (5.8)$$

obtenemos:

$$p_i(z) = N(z_1, \mu_{1,i}, \sigma_{1,i}) \cdot N(z_2, \mu_{2,i}, \sigma_{2,i}) \cdot \dots \cdot N(z_n, \mu_{n,i}, \sigma_{n,i}) \quad (5.9)$$

La restricción de clases con variables independientes no quita generalidad, aunque se necesitará un número mayor de clases para alcanzar la misma precisión en la estimación. A cambio, se puede simplificar computacionalmente el proceso de estimación y de inferencia [Ruiz 1994].

El conjunto de clases o funciones de estimación -mixture- queda completamente definido por la probabilidad a priori de cada clase P_i y las medias y varianzas de sus componentes, $\mu_{k,i}$

y $\sigma_{k,i}$. El método EM permite obtener estos valores a partir de un conjunto de M ejemplos $\{z^{(e)}\}$ donde $e = 1 \dots M$ y $z^{(l)} = (z_1^l, z_2^l, \dots, z_K^l)$ es el ejemplo l de dimensión K .

El algoritmo parte de un número N predeterminado de clases C_i y de un valor inicial tentativo para sus probabilidades a priori, medias y varianzas. A partir de aquí, se itera ajustando estos parámetros hasta que la probabilidad total de la estimación

$$J = \prod_{e=1}^L \hat{p}(z^{(e)}) \quad (5.10)$$

no mejora, dado un umbral fijado a priori.

Cada iteración se divide en dos pasos:

(E) Expectación, se calculan las probabilidades a posteriori $q_{i,e}$, esto es, la probabilidad de que el ejemplo $z^{(e)}$ haya sido generado por la clase C_i :

$$q_{i,e} = p(C_i | z^{(e)}) = \frac{P_i \cdot p_i(z^{(e)})}{\sum_{j=1}^N P_j \cdot p_j(z^{(e)})} \quad (5.11)$$

de lo que se obtiene un array bidimensional con tantas filas como variables y tantas columnas como ejemplos.

(M) Maximización, se calculan cada vez las nuevas probabilidades a priori, medias y varianzas utilizando todos los ejemplos ponderados con sus probabilidades a posteriori calculadas en el paso anterior:

$$P_i = \frac{1}{M} \cdot \sum_{e=1}^L q_{i,e} \quad (5.12)$$

$$\mu_{k,i} = \frac{1}{P_i \cdot M} \cdot \sum_{e=1}^L q_{i,e} \cdot z_k^{(e)} \quad \text{y} \quad (5.13)$$

$$\sigma_{k,i} = \frac{1}{P_i \cdot M} \cdot \sum_{e=1}^L q_{i,e} \cdot (z_k^{(e)} - \mu_{k,i})^2 \quad (5.14)$$

siendo M el número total de ejemplos.

A continuación, aplicamos este algoritmo a la segmentación de regiones.

5.1.3 Extracción del contorno centrado en la fovea

Para extraer eficientemente el contorno que ocupa el centro del campo visual procedemos en dos pasos:

1. Binarización de la imagen por umbralización del histograma utilizando una variante incremental del método EM.
2. Obtención del contorno procediendo radialmente desde el centro de la imagen.

Binarización: utilizando la notación del apartado anterior, tomamos el histograma con M valores como muestras de una variable aleatoria z . Suponemos que es bimodal, por lo que tenemos dos clases C_1 y C_2 que son funciones gaussianas de medias μ_1, μ_2 y varianzas σ_1, σ_2 , y las inicializamos de tal forma que se sitúen ocupando las mitades izquierda y derecha del histograma. La expresión para el paso E será:

$$q_{i,e} = \frac{P_i \cdot N(z^{(e)}, \mu_1, \sigma_1)}{\sum_{j=1}^2 P_j \cdot N(z^{(e)}, \mu_j, \sigma_j)} \quad \text{donde } i: 1..2 \text{ y } e: 1..M \quad (5.15)$$

y las expresiones correspondientes para el paso M. La diferencia que introducimos aquí, y por la que hemos calificado al método de **incremental**, se basa en asumir que *la evolución temporal del histograma es localmente constante*. Partiendo de esta suposición, podemos ejecutar una única iteración por cada imagen adquirida y reinicializar las gaussianas sólo cuando la torreta realiza un movimiento sacádico. Esto permite que el seguimiento suave de objetivos pueda llevarse a cabo al ritmo de captura de imágenes. Los pequeños cambios que se producen después de cada adquisición se absorben rápidamente -normalmente la estabilidad se alcanza en una iteración- ya que el estado almacenado proporciona en todo momento una *inicialización* muy favorable. Puede verse como un proceso de optimización adaptativo donde, una vez alcanzado el máximo, el algoritmo lo sigue a medida que éste se desplaza.

En el caso de los movimientos bruscos o sacádicos, la situación es diferente. Por un lado, durante el tiempo que dura el movimiento no se procesa información visual ya que son demasiado rápidos para obtener imágenes nítidas; por otro, no es posible mantener la hipótesis de continuidad del histograma. La única opción que queda es reinicializar los parámetros de las gaussianas. Después de cada iteración del algoritmo, obtenemos el punto de corte de las dos gaussianas que queda entre las dos medias. Esto se puede hacer analíticamente igualando

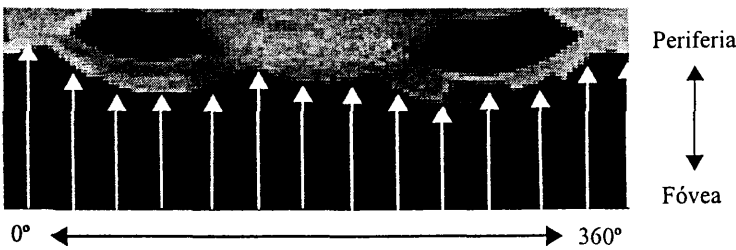
las dos funciones. Sin embargo, una opción más económica computacionalmente es aproximar este punto por la media de las medias ponderadas con las varianzas:

$$C = \frac{\mu_1 \cdot \sigma_1 + \mu_2 \cdot \sigma_2}{\sigma_1 + \sigma_2} \tag{5.16}$$

Esta es la opción que hemos utilizado en la implementación. En la elección se toma un compromiso en la precisión con la que se extrae el umbral, frente al tiempo de ejecución. Para mantenernos lo más próximo posible a ritmo teórico de adquisición -25 f/s- todos los ahorros son pocos. Con el umbral obtenido, sólo resta generar una imagen umbralizada a partir de la cual se extraerá el contorno buscado.

Extracción del contorno: dado que buscamos el primer contorno centrado en la fovea, procedemos recorriendo cada radio sobre la imagen binarizada hasta encontrar un cambio de valor. El resultado es un array unidimensional con tantas entradas como el número de ángulos de discretización -128 en este caso- y donde en cada una se almacena el valor encontrado del radio. Dada la estructura de la imagen log-polar, este proceso sólo requiere recorrer un índice completo del array y, de forma anidada, el segundo índice hasta una profundidad que depende de la localización del punto de contorno. La duración de este bucle depende, obviamente, del contorno pero el número medio de operaciones es de 128x32, para la imagen de 128x64 píxels.

Figura 5.4 Extracción del contorno central sobre la imagen log-polar binarizada.



Sobre este contorno en coordenadas log-polares es sencillo y eficiente calcular su radio medio, que tomaremos por tamaño, el nivel medio de gris y el centroide. Para optimizar este cálculo, el proceso se lleva a cabo durante la extracción del contorno.

5.1.4 Extracción de regiones en la periferia

El segundo tipo de operación que realizamos sobre la imagen log-polar tiene como finalidad la segmentación de múltiples regiones de interés en la periferia del campo visual. Esta tarea es más compleja que la anterior y requiere un método extremadamente eficiente para mantener la restricción de tiempo real. La opción que tomamos es utilizar de nuevo el algoritmo EM, pero bajo una interpretación ligeramente diferente. La idea es tratar la periferia, definida en cada adquisición como el área visual que va desde el contorno central, previamente extraído, hasta los límites externos de la imagen, como una función bidimensional definida sobre los ejes de ángulo y radio. Esta función es una transformación de la imagen de niveles de gris que, simplemente, resta al valor de cada pixel a un valor de referencia *-Ref-* y toma el valor absoluto. Como resultado se obtiene un valor de distancia lineal positivo respecto de la referencia establecida:

$$_{sa}(\varphi, \zeta) = |I_{orig}(\varphi, \zeta) - Ref| \quad (5.17)$$

donde $_{sa}(\varphi, \zeta)$ es la imagen resultado o también denominada de *saliencia* en el contexto de los mecanismos de atención visual. $_{orig}(\varphi, \zeta)$ es la imagen original de niveles de gris y φ, ζ son el índice de ángulo y radio logarítmico, respectivamente.

A continuación normalizamos esta imagen a la vez que efectuamos una compresión no lineal. El objetivo es obtener valores de 1 para los píxeles de distancia 0 y una función exponencialmente decreciente hacia cero para el resto de las distancias. Esta transformación se denomina *SoftMax* [Rao et al. 1996]:

$$M(\varphi, \zeta) = \frac{e^{\frac{-(I_{sa}(\varphi, \zeta))}{\lambda}}}{\sum_{\varphi} \sum_{\zeta} I_{sa}(\varphi, \zeta)} \quad (5.18)$$

El denominador normaliza el volumen total debajo de la función a un valor constante para todas las imágenes y λ es un factor que permite modular el grado de decrecimiento de la función.

Con esta imagen transformada ya podemos aplicar el algoritmo EM para segmentar aquellas regiones más salientes. Tomamos φ, ζ como dos variables aleatorias que toman los valores que acabamos de calcular y estimamos su densidad conjunta mediante un número de

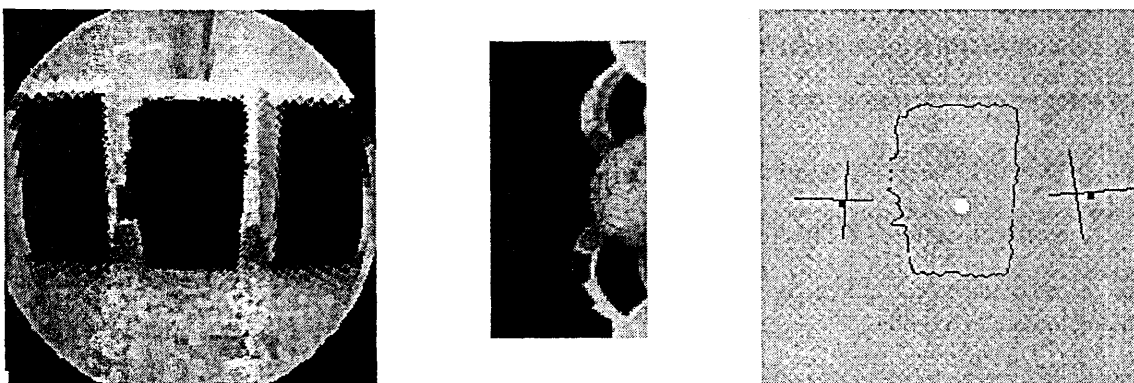
clases o gaussianas que fijamos a priori. En la implementación sobre el robot, fijamos en 3 el número de clases, que se interpreta como el número máximo de regiones diferentes a las que se puede prestar atención simultáneamente. Para su inicialización seguimos la misma estrategia que en el caso del histograma y las situamos uniformemente sobre el espacio de la imagen.

En la ejecución del algoritmo de estimación también hacemos la suposición de continuidad, pero en este caso sobre los cambios locales en la estructura de la escena. Esto nos permite realizar una única iteración por imagen adquirida cuando la cámara está estática o en movimiento continuo. Las gaussianas quedan *enganchadas* a sus regiones y evoluciona con ellas sobre la imagen. En consecuencia, además de una segmentación obtenemos un seguimiento dentro del campo visual que va a sernos muy útil para establecer estrategias de predicción. En el caso de los movimientos sacádicos y con la información que tenemos hasta el momento, lo más razonable es reinicializar las gaussianas y asumir un pequeño transitorio. Este transitorio introduce una incertidumbre ya que no es posible distinguir el movimiento de las gaussianas sobre la imagen de un posible movimiento de los elementos de la escena. Sin embargo, cuando introduzcamos el espacio perceptivo en el siguiente apartado, la reinicialización será sustituida por una predicción proveniente del conocimiento almacenado en instantes anteriores. De esta forma, después de haber adquirido información suficiente y mientras en la escena no aparezcan elementos nuevos, la predicción conduce a una facilitación perceptiva que prácticamente cancela el efecto de los transitorios.

Cuando hay menos regiones salientes que gaussianas, varias de éstas se agrupan sobre una región. La forma de detectar esta situación es analizando el solapamiento, pero esto debe hacerse en otro nivel y a diferente escala de tiempo. Las regiones segmentadas se definen con los tres grupos de parámetros de una gaussiana: la posición de la media en coordenadas de imagen, las varianzas en cada eje -la diagonal de la matriz de covarianza- y el factor de escala -probabilidad a priori en el EM.

En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo de segmentación utilizando este método. Las líneas cruzadas sobre las regiones representan los parámetros de las gaussianas bidimensionales: la media como el punto de corte de las líneas; y las varianzas en ambos ejes como las propias líneas.

Figura 5.5 Segmentación central y en periferia: imagen cartesiana, log-polar y contornos



El resultado de la segmentación se muestra en el plano cartesiano reconstruido, por lo que las varianzas siguen la dirección radial y angular, que corresponden a los ejes del espacio log-polar.

Las regiones segmentadas en la periferia del campo visual no obtienen su contorno hasta que no pasan a estar centradas en la fovea. La forma del contorno en la periferia cambia con la distancia al centro de la imagen debido a la geometría log-polar. Debido a esto, estas regiones constituyen zonas de interés potencial y son la primera causa de los cambios atencionales, que se llevan a cabo mediante movimientos sacádicos.

5.1.5 Profundidad

La estimación de la distancia a la que se encuentran las diferentes regiones detectadas se lleva a cabo utilizando el sensor ultrasónico descrito en el Capítulo 4. Este está situado de forma que su haz sea ligeramente convergente con el eje óptico. Para integrarlo con los procesos de segmentación, asociamos la distancia medida con el contorno centrado en la fovea. Esta medida es menos precisa a medida que aumenta la distancia, ya que el haz ultrasónico forma un lóbulo de unos 30° . Sin embargo la estimación es suficiente para el objetivo de captar la estructura aproximada del entorno. Como veremos, el problema está más en mantener la coherencia a lo largo del tiempo y del movimiento, que en medidas precisas sobre una sola imagen. Otro aspecto importante de la integración del sensor ultrasónico es que sólo el contorno central recibe información de profundidad. Las regiones periféricas deben esperar a estar centradas para obtener esta información.

5.2 Módulo Motriz

Los elementos que constituyen el módulo motriz fueron descritos en el Capítulo 4. Aquí únicamente enumeramos los distintos componentes:

- Control en lazo cerrado de los motores del robot.
- Control de velocidad de la plataforma.
- Control de posición de la torreta.

5.3 Generación del espacio perceptivo

En este punto disponemos ya de los elementos necesarios para comenzar a construir el espacio perceptivo. La implementación que hemos realizado incluye aspectos del espacio interno y perceptivo y su interacción con los módulos visual y motriz. Para simplificar la exposición, supondremos por el momento que sólo hay movimientos rotacionales generados por la torreta.

La interacción entre los dos módulos y el espacio perceptivo genera dos flujos de información en sentidos opuestos. El primero se origina con la adquisición de imágenes, atraviesa el espacio perceptivo y alcanza a los actuadores, para retornar a través del entorno. El segundo es de carácter predictivo y comienza en el módulo motriz, recorre el espacio perceptivo y acaba en el módulo visual. Al combinar las propiedades del espacio perceptivo y esta interacción con los módulos, obtenemos una estructura dinámica que es, simultáneamente, una representación del entorno y un generador de comportamiento visual. Estas dos facetas pueden verse como propias de un sistema que se *comporta para representar y representa para comportarse*.

5.3.1 Espacio interno

En el espacio interno se representa la estructura cinemática -la estructura dinámica no se utiliza en esta implementación. Puede verse como una copia interna de él mismo o modelo directo, que constituye la base del espacio externo y del espacio extendido. Su conexión con el módulo de control permite la anticipación del resultado de las acciones, simplemente respondiendo en menos tiempo a las mismas órdenes de control que llegan a los actuadores. Como se argumentó en el Capítulo 3, la importancia de contar con un modelo directo

articulado, va más allá de la predicción de sensaciones y está estrechamente relacionado con otras capacidades cognitivas como la planificación o la generación de imágenes mentales.

El espacio interno (*EI*) que hemos implementado recoge las características cinemáticas de la estructura de la torreta sobre la plataforma móvil, según el modelo desarrollado en el Capítulo 5. Definimos un sistema de referencia *SR* con su origen situado en el centro de giro de la torreta del robot y orientado según las direcciones vertical, longitudinal y transversal del mismo, con el origen en la base de la torreta. Utilizando las medidas conocidas del robot y las expresiones de su cinemática, situamos en este sistema de referencia la torreta con sus dos grados de libertad, la cámara y las ruedas. Establecemos una conexión entre este espacio y el módulo motriz para obtener la posición y velocidad angular de cada articulación de la torreta y las componentes de velocidad translacional y rotacional de la plataforma. Estos valores representan el estado actual del robot. Para obtener una predicción del movimiento, esto es, adelantarse al efecto de las acciones, necesitamos la estimación de estos valores antes de que se alcancen en los actuadores. En definitiva, necesitamos la salida de un control en lazo abierto -la cinemática inversa- al mismo tiempo que comienza a ejecutarse el control realimentado. Dotamos al módulo motor de esta capacidad, de tal forma que ambos juegos de valores sean accesibles al espacio interno. Utilizaremos esta anticipación del movimiento únicamente para la construcción del espacio exterior, aunque tendría una utilidad clara en la adaptación del modelo y en la adaptación de los controladores.

Con la información suministrada por el módulo motriz y las expresiones de la cinemática directa construimos el espacio interno como un proceso que mantiene una predicción y actualización continua de la *copia interna* del robot. Los elementos de esta copia en el sistema de referencia interno tienen los siguientes parámetros: la orientación OR_{cam} , velocidad angular ω_{cam} y velocidad de traslación T_{cam} de la cámara; y la velocidad de traslación T_{plat} y de rotación ω_{plat} de la plataforma. El conjunto de todos ellos lo expresamos como:

$$EI_t = \{OR_{cam}, \omega_{cam}, T_{cam}, \omega_{plat}, T_{plat}\} \quad (5.19)$$

Además de la información cinemática, el modelo interno mantiene los parámetros proyectivos de la cámara y, en general, información estructural sobre la geometría de los sensores.

Lo que nos interesa de esta construcción es mantener una representación articulada en un espacio común de las partes móviles del robot, así como, de la estimación de su movimiento. Esta representación permitirá, por ejemplo, activar directamente la región del espacio externo que quedará conectada con el exterior a través del campo visual de la cámara, cuando la torreta efectúe un giro. De la misma forma, cuando el robot avanza, la velocidad estimada se transmite internamente al espacio externo dotándolo de movimiento propio. Esta componente del movimiento percibido, debida al movimiento propio es necesaria para diferenciar la dinámica del robot de la dinámica del entorno. Por último, la conexión doble del módulo motor, donde residen los algoritmos de control, con los actuadores y con este espacio interno, es la base para un futuro desarrollo de mecanismos de adaptación continua que mantengan la coherencia entre la estructura física del robot y el modelo directo.

5.3.2 Espacio externo

El espacio externo se construye a partir del espacio interno como una extensión de éste. Podemos verlo como el espacio que no está ocupado por la *copia* del robot, pero que se define sobre el mismo sistema de referencia. La relación entre ambos, permite que la zona sensorialmente accesible por la cámara delimite un cono dentro de este espacio externo. Si hubiese otros sensores como ultrasonidos, infrarrojos, micrófonos, etc. todos ellos estarían referidos, en virtud de su ubicación en el espacio interno, al mismo sistema de referencia. Aún más, todos ellos contribuirían a moldear el espacio externo sujetos a las restricciones geométricas de éste. En lugar de una fusión sensorial estadística, buscaríamos una fusión sensorial geométrica.

Un último punto antes de comenzar con la implementación del espacio externo. El hecho de que este espacio sea teóricamente continuo alrededor del robot, permite satisfacer una de las propiedades que argumentamos en el Capítulo 3: la continuidad del espacio perceptivo. Además, siendo una estructura dinámica con propiedades de memoria, actualización, etc. y anclada en el sistema de referencia del espacio interno, también permite que la percepción sea estable. La información que se recoge en el espacio externo es una *interpretación* simultáneamente compatible con los datos sensoriales, la cinemática del agente y sus estados anteriores. Para que esta compatibilidad sea posible el espacio externo debe ser continuo y estable.

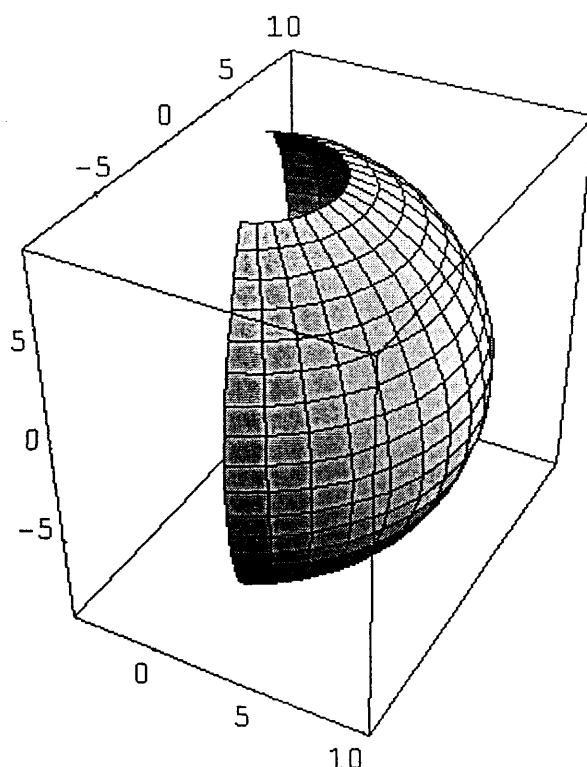
5.3.3 Geometría

El espacio externo está representado como un conjunto de puntos en coordenadas esféricas φ, θ, ρ , cuyo origen coincide con el origen del *espacio interno*. Para facilitar su tratamiento computacional utilizamos un array bidimensional *EE* -por *espacio externo*- de dimensiones *MAXPHI* y *MAXTHETA* y cuyos índices $[i,j]$ corresponden a los valores, en grados, de los ángulos:

$$\varphi = 90 + \frac{i - \text{MAXPHI}}{2} ; \theta = j - \frac{\text{MAXTHETA}}{2} \quad (5.20)$$

y, el valor de cada elemento $EE[i,j]$, al módulo ρ . Tomamos como φ_0, θ_0 la dirección paralela al eje longitudinal del robot. Para una valor inicial constante de todos los módulos, obtenemos la siguiente representación tridimensional:

Figura 5.6



Inicializamos este espacio de tal forma que sea plano -paralelo al suelo- hasta la línea del horizonte, desde $\left\{ \varphi = 90 + \frac{\text{MAXPHI}}{2} \right\}$ hasta $\varphi = 90$ y, de módulo constante, hasta el extremo superior.

5.3.4 Regiones del espacio externo

Tomamos como regiones de interés en el espacio perceptivo el resultado de segmentar el campo visual utilizando los métodos descritos anteriormente. Esta segmentación genera una lista de regiones por cada imagen procesada. De estas regiones, una es distinguida por ser el contorno centrado en la fovea. Recordemos que esta región es la única sobre la que se ha podido extraer el contorno en esa adquisición. Cada una de estas regiones tiene una ubicación precisa en el campo visual -coordenadas log-polar- que se transforma al sistema de referencia del espacio externo. Este proceso es sencillo ya que hemos hecho coincidir el origen del espacio externo con el centro de giro de la torreta. Conocida la amplitud del campo visual de la cámara, éste se puede aproximar por un casquete esférico dentro del espacio externo. En la cámara utilizada, la amplitud es de 36° en el eje vertical y en el horizontal. La información necesaria para llevar a cabo esta transformación es, precisamente, la que se recoge y mantiene en el *espacio interno*.

Las regiones segmentadas se interpretan como elevaciones perpendiculares al plano del suelo en el espacio externo (*EE*), esto es, a cada punto del contorno segmentado se le asigna un par $\{\phi, \theta\}$ y se calcula el módulo correspondiente a una altura fija en cartesianas. Desde el punto de vista de la implementación, mantendremos esos cambios en el espacio externo como una lista de regiones que denominamos *zonas*. Estas zonas son alteraciones estables de la geometría plana inicial del espacio externo *EE* y están sujetas a una dinámica propia que se modela en el apartado siguiente.

Llamaremos R_t al conjunto de regiones $\{r_0, r_1, r_2, \dots, r_n\}$ suministradas por el módulo visual *MV* en el instante t , donde r_0 es la región centrada en fovea cuyo contorno es conocido. Denominamos *MM* al módulo motriz, *EP* al espacio perceptivo y Z al conjunto de zonas del *EE*.

En el instante inicial y con la torreta parada, *EE* es una superficie plana que se extiende por debajo del robot -se supone la horizontalidad del robot ya que éste no dispone de inclinómetro. Después de procesar la primera imagen, el *MV* genera una colección de regiones que desencadenan la creación del mismo número de zonas en el *EE*. Cada zona se crea como un objeto -una instancia de una clase- dentro del *EE*. Estos objetos se ejecutan periódicamente mediante una concurrencia simulada. Cada vez que llega una nueva colección de regiones, los

objetos activos determinan el grado de proximidad entre ellos y las regiones. Cuando la similaridad es suficiente, el objeto interpreta a la región como un refresco o confirmación de su existencia. Las regiones que no se corresponden con zonas existentes generan una *ruptura de expectativa*, ya que se esperaba que esa región mantuviese su estado anterior. Este evento se traduce en la incorporación de zonas nuevas que van añadiendo información al espacio perceptivo. Una vez añadida la zona, en la siguiente iteración, no se producirá error de predicción a menos que se dé un movimiento brusco en el entorno.

Para comparar la proximidad entre regiones nuevas y zonas existentes, utilizamos la **cota de Bhattachariyya** [Fukunaga 1990]. Esta se utiliza para comparar distribuciones de probabilidad en técnicas de inferencia estadística. La expresión de esta cota es:

$$Cota = \sqrt{P_1 \cdot P_2} \cdot e^{-\left(\frac{1}{8} \cdot (M_2 - M_1) \cdot \left[\frac{S_1 + S_2}{2} \right]^{-1} \cdot \log \left[\frac{\left| \frac{S_1 + S_2}{2} \right|}{\sqrt{|S_1| \cdot |S_2|}} \right] \right)} \quad (5.21)$$

donde P_1 y P_2 son las probabilidades a priori y M_1 , M_2 , S_1 y S_2 son las medias y covarianzas de las funciones y $|x|$ indica el determinante. El exponente es la **distancia de Bhattachariyya**.

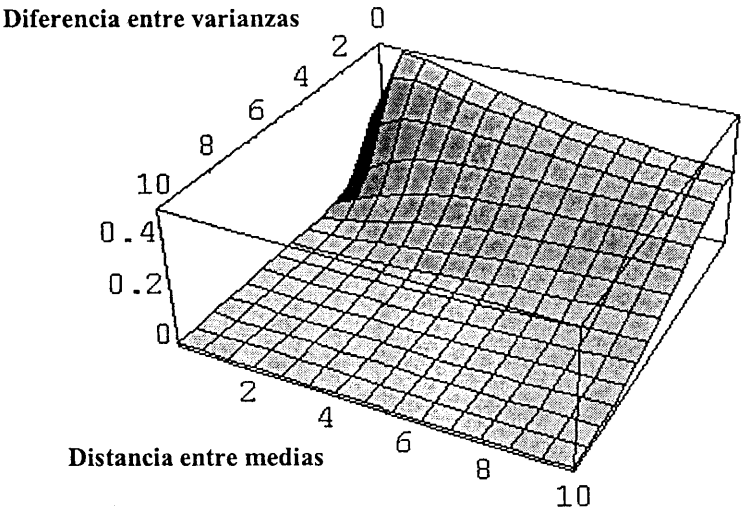
Simplificando esta expresión para el caso de covarianzas diagonales se obtiene:

$$Cota = \sqrt{P_1 \cdot P_2} \cdot e^{-\left(\frac{\frac{(-\mu_1^a + \mu_2^a)^2}{\sigma_1^a + \sigma_2^a} + \frac{(-\mu_1^r + \mu_2^r)^2}{\sigma_1^r + \sigma_2^r}}{4} + \frac{\log \left[\frac{(\sigma_1^a + \sigma_2^a) \cdot (\sigma_1^r + \sigma_2^r)}{4 \cdot \sqrt{\sigma_1^a \cdot \sigma_2^a \cdot \sigma_1^r \cdot \sigma_2^r}} \right]}{2} \right)} \quad (5.22)$$

donde μ_i^a es la componente angular -r para la radial- de la media de la función i , y σ_i^a es la componente angular de la varianza para la función i .

La Figura 5.7 muestra el valor que toma esta cota a medida que aumenta la distancia entre medias y varianzas. La cota toma el valor máximo cuando las medias son máximamente distantes y las varianzas no producen solapamiento.

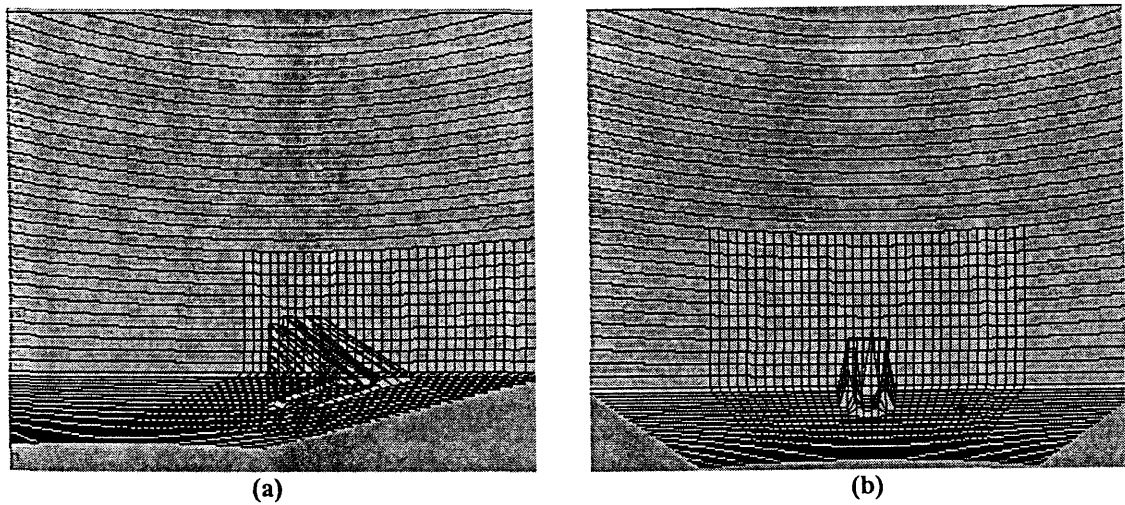
Figura 5.7 Cota de Bhattacharyya (ver texto).



El mínimo valor de esta cota en la comparación de todos los pares región-zona determina el mejor candidato para la asignación. La asignación se hace efectiva si la cota es inferior a un umbral máximo.

En la siguiente figura se pueden ver dos representaciones del contorno de una *zona* en el *espacio externo*, desde una vista lateral y otra frontal. La rejilla vertical representa la región que ocupa el campo visual en el *espacio externo*:

Figura 5.8 Zona en el espacio externo. (a) vista lateral; (b) vista frontal



5.3.4.1 Dinámica de zonas y atención visual

Hemos visto que la combinación de información perceptiva y motora permite implementar un espacio perceptivo simple. Una vez que ya hay algunas regiones destacadas en este espacio, introducimos el problema del movimiento de la torreta. Aquí hay dos aspectos diferentes: el criterio de movimiento y las consecuencias de que una región deje de ser visible por caer fuera del campo efectivo de la cámara. Veamos que ambos aspectos admiten una solución integrada.

En el primer caso y dado que, por el momento, no tenemos ningún criterio por el cual unas regiones puedan revestir mayor interés que otras -no hay una tarea de mayor nivel- introducimos un criterio por omisión que nos va a permitir mantener actualizada una cierta cantidad de información en el espacio perceptivo. El criterio es muy simple y consiste en *repartir por igual la atención entre todas las zonas activas*. Dado que pueden aparecer en cualquier momento nuevas zonas, la única forma de satisfacer este criterio es estableciendo una dinámica abierta, que dependa de valores de parámetros que se fijen externamente. Este criterio es *de abajo a arriba o guiado por los datos*, al igual que el utilizado en la segmentación. La condición que debemos imponerle es que sea modulable cuando exista una tarea de alto nivel. La idea es, por tanto, que exista una dinámica de atención básica, dependiente de la configuración de rasgos salientes en la escena y que esta dinámica pueda ser gradualmente modificada por otros criterios derivados de objetivos más específicos, a medida que éstos estén disponibles en el sistema. Esta idea de atención está bastante extendida en psicología [Henderson et al. 1997] y soportada por datos experimentales.

La cuestión de la evolución de las zonas activas, está estrechamente relacionada con la dinámica de la atención. Para mantener la coherencia entre el espacio perceptivo y el entorno es necesario refrescar la información almacenada. Cuanto más tiempo lleve una zona sin verificar la existencia de la región externa correspondiente, menos confianza debe tener en que esa región siga ahí y menos valor predictivo tendrá. Las zonas se implementan, por tanto, como procesos activos sujetos a una dinámica de olvido y refresco. Una zona que no consiga refresco suficiente desaparece del espacio perceptivo liberando recursos para el resto u otras nuevas que puedan aparecer.

Con estas dos ideas podemos construir la dinámica interna del espacio perceptivo y su relación básica con el módulo motriz. Para ello necesitamos introducir el concepto de *valor de*

activación E_k de una zona como una estimación de la coherencia entre la zona y su región correspondiente en el entorno. El comportamiento dinámico que buscamos debe hacer que *las zonas compitan entre sí para maximizar su valor de activación*. Antes de formalizar esta idea, especificamos los criterios y restricciones que queremos incluir:

1. El valor de E_k dependerá del tiempo y la representamos como $E_k(t)$.
2. Una zona nueva se crea con un valor inicial $E_k(0)$ predeterminado.
3. Cuando una zona existente establece que una región entrante es suficientemente similar a ella, su valor de activación aumenta hasta un máximo establecido.
4. Cuando una zona existente no establece correspondencia con ninguna región entrante su valor de activación decae hasta un mínimo establecido. A esta dinámica la denominamos *olvido*.
5. La velocidad de olvido depende del valor de activación y de la acumulación en el tiempo de este valor. Intuitivamente, no se olvida a igual velocidad una zona que lleve mucho tiempo en el espacio perceptivo, que una zona reciente aunque ambas partan del mismo valor de activación.
6. Las zonas compiten entre sí en base a una función del inverso de su valor de activación. Con esto se pretende que cuanto más evidencia haya de una zona, menor sean sus posibilidades de acceder al refresco.
7. Cuando una zona gana la competición, obtiene prioridad de comunicación con el módulo motriz y le solicita un movimiento de reorientación de la cámara que la sitúe en la fovea.

Estos criterios definen una dinámica no lineal. Para obtener una formalización compacta utilizamos ecuaciones diferenciales que implementamos directamente mediante un método de integración numérica.

Cuando se incorpora una nueva zona al espacio externo, se inicializa su valor de activación. A partir de ese momento, se integra numéricamente la ecuación dinámica que determina su comportamiento. Las ecuaciones de las distintas zonas se integran en paralelo durante la existencia de éstas. Esta estructura satisface los criterios 1 y 2.

Utilizamos dos expresiones diferentes para reflejar el crecimiento y decrecimiento del valor de activación. Para el crecimiento debido al refresco utilizamos una ecuación lineal:

$$\dot{E}_k(t) = -\alpha \cdot E_k(t) + MaxRef \quad (5.23)$$

donde α es una ganancia constante y $MaxRef/\alpha$ es el valor máximo de activación posible. Desde el valor inicial $E_k(0)$, la activación aumenta según una dinámica de primer orden hasta alcanzar su valor máximo establecido. Criterio 3.

La ecuación de olvido establece un decrecimiento del valor de activación cuyo ritmo depende de la historia anterior de la zona. Cuanto más tiempo haya estado activa más lentamente debe decaer: Utilizamos la siguiente expresión:

$$\dot{E}_k(t) = -\beta(t) \cdot E_k(t) \quad (5.24)$$

donde la ganancia depende de la suma, sobre una ventana temporal finita, del valor de activación de E_k :

$$\beta(t) = c / \left(\int_{(t-n)}^t E_k(x) dx \right) \text{ y } c > 0 \quad (5.25)$$

lo que satisface los criterios 4 y 5 -c es un factor de escala.

Estas dos expresiones se pueden combinar en una sólo ecuación con dos sumandos mediante un selector no lineal que active uno u otro. Podemos utilizar con este fin la cota de **Bhattachariyya** calculada entre la zona en cuestión y las diferentes regiones candidatas. Dada una zona z_i y una región candidata r_j , expresamos la similaridad entre ambas como:

$$Sim(z_i, r_j) = 1 - Cota(z_i, r_j) ; 0 \leq Sim \leq 1 \quad (5.26)$$

Definimos el máximo de esta cota para una zona z_i y todas las regiones candidatas como:

$$Sel(z_i) = \begin{cases} Max(R) & \text{si } Max(R) > MinSim \\ 0 & \text{si } Max(R) \leq MinSim \end{cases} ; \quad = \{r_0, r_1, \dots, r_n\} \quad (5.27)$$

siendo $MinSim$ el umbral mínimo de distancia.

Combinando las ecuaciones [5.23], [5.24] y [5.27] obtenemos la expresión:

$$\dot{E}_k(t) = Sel(z_i) \cdot (\alpha \cdot E_k(t) + MaxRef) + (1 - Sel(r_j)) \cdot \beta(t) \cdot E_k(t) \quad (5.28)$$

de tal forma que:

- el primer sumando se activa cuando hay una región suficientemente próxima y eleva el valor de activación con la ganancia β . El segundo sumando queda inhibido.
- el segundo sumando se activa cuando ninguna región es suficientemente próxima y hacer decrecer el valor de activación con la ganancia $\beta(t)$, que a su vez depende de la cantidad de activación acumulada por la zona.

La integración continua de esta ecuación va proporcionando los valores de activación de cada una de las zonas del espacio perceptivo. Con estos valores llegamos al mecanismo de competición que va a permitir a una de ellas tomar momentáneamente el control de la cámara. La zona ganadora en un instante t será aquella que tenga el menor valor de activación:

$$r_t^{max} = \text{Min}(E_k(t)), \quad k \in \{1, 2, \dots, \text{NumZonas}\} \quad (5.29)$$

y su posición en el espacio perceptivo pasa a ser la nueva referencia para el sistema de control de la torreta. En este punto cerramos el flujo de información que va desde la adquisición de la imagen hasta la ejecución de una acción. Como *producto* intermedio se obtiene una representación espacial con un comportamiento dinámico que la lleva a construirse y auto mantenerse generando comportamiento visual. El número de zonas activas en esta representación depende de la velocidad de todo el conjunto, incluido procesamiento, respuesta de los motores y adquisición de imágenes y de la propia distribución espacial de las regiones en el entorno.

Cuando una zona se crea por la aparición de una región que no está centrada en la fovea, no recibe información del contorno. Sin embargo, cuando eventualmente toma el control y orienta la torreta en la dirección apropiada, el sistema perceptivo extrae su contorno y se lo envía. Esto supone que la información del entorno se adquiere progresivamente, primero las características espaciales, de nivel de gris y movimiento -aunque todavía no llegado a este punto- mínimas y, luego, los detalles de la forma. Esta estrategia es una puerta abierta a la optimización de la búsqueda de regiones cuyas características sean conocidas de antemano.

5.3.4.2 Predicción

El último aspecto que nos queda por desarrollar, en la dinámica de esta implementación del espacio externo, es la predicción. La extensión y estabilidad del espacio perceptivo y su interacción con el módulo motor permite definir un flujo de información que recorre el

sistema en el sentido inverso al habitual. Cuando se genera una orden de control desde alguna zona del espacio externo (*EE*), el flujo habitual llega hasta los actuadores y se cierra a través del entorno con la adquisición de una nueva imagen. El flujo inverso es aquél que retorna desde el módulo motor (*MM*), internamente, hasta el (*EE*) y de ahí al módulo visual (*MV*). Este flujo es más rápido que el directo y permite anticipar el resultado del movimiento. La salida de control del (*MM*) llega al espacio interno donde se actualizan los parámetros de la torreta y la plataforma. Esta reorientación se refleja directamente en el espacio externo anticipando la futura percepción del entorno. Intuitivamente, lo que estamos haciendo es *imaginar* el mundo justo antes de percibirlo.

La diferencia entre lo que finalmente llega desde el (*MV*) y lo que se espera en el espacio externo es el error de predicción. Este error se calcula en coordenadas esféricas: dada una región proveniente del (*MV*) que se considera suficientemente próxima a una zona existente, según la cota de Bhattacharyya, el error cometido será la diferencia en coordenadas $\{\varphi, \theta, \rho\}$ entre sus centroides.

Contemplamos los siguiente casos:

- Si este error es pequeño, la zona existente actualiza su posición y parámetros morfológicos -altura, forma del contorno, nivel de gris- a los de la nueva región. Si sólo llevamos a cabo esta corrección, se modifican las posiciones relativas entre la zona refrescada y el resto de las zonas existentes en el espacio externo. Lo que nos interesa es evitar que errores de posicionamiento alteren la estructura existente de zonas. En el caso de los desplazamientos de la plataforma, la situación es aún más grave. Para evitar la acumulación de errores hacemos que todo el *espacio externo* gire y se traslade al actualizar las coordenadas de una zona. Intuitivamente, esto se puede ver como si todas las zonas percibidas estuviesen ligadas entre si y, al cambiar la posición de una de ellas respecto del agente, el resto también cambia manteniendo intacto el conjunto de la estructura. La geometría esférica hace que la operación de girar todo el espacio externo sea una simple suma sobre las coordenadas angulares. Esta política no hace desaparecer el error de predicción debido a una calibración espacio externo-espacio interno incorrecta. Para ello sería necesario recalibrar esta relación al mismo tiempo que se ajusta toda la estructura del espacio externo.
- Si el error es grande, mayor que un cierto umbral, se crea una nueva zona como hemos descrito anteriormente.

Esta estrategia es válida para un entorno estático y cuando sólo se producen movimientos rotacionales. En el caso de un entorno dinámico, sería necesario modelar el movimiento de cada una de las zonas animadas, e incluir esta información en la estrategia de corrección.

Cuando la plataforma se desplaza, su vector de velocidad se puede descomponer en una componente rotacional y en otra translacional. Las ecuaciones que relacionan las velocidades de giro de las ruedas con estas componentes se obtuvieron en el capítulo anterior. Aquí describiremos un algoritmo sencillo para actualizar continuamente el espacio externo a medida que la plataforma gira sobre si misma. Antes de proseguir conviene recordar que, únicamente, si el sistema de referencia del robot gira o se desplaza es necesario realizar esta operación. Cuando la torreta gira, el efecto es local al sistema de referencia del robot y sólo hay que actualizar su posición en él. Esta operación basta para generar la predicción, como hemos comentado anteriormente.

El espacio externo es una representación de la estructura del entorno y, por tanto, de algo que se supone estático. Al girar la plataforma, lo que antes estaba delante, pasa a ocupar posiciones laterales. La forma de llevar a cabo esta actualización es la siguiente:

- La velocidad de rotación se obtiene en el *espacio interno* como: $\omega = \frac{V' - V}{radio}$; esto es, como el diferencial de velocidad de las ruedas, dividido por el radio de giro de la plataforma.
- A intervalos fijos de tiempo se integra la velocidad de rotación para obtener un incremento angular ω . El sentido de giro se obtiene del signo de la expresión de ω .
- Este incremento se transforma en un desplazamiento de todas las filas del array *EE* que corresponden a los paralelos del espacio esférico, esto es, variaciones de θ para constante.
- El sentido del desplazamiento viene dado por el sentido de giro y la cantidad por $F(\Delta S)$, donde F es la función que relaciona la medida de velocidad del sensor odométrico con las dimensiones del espacio externo. Dependiendo del sentido de giro, los valores de la última columna van perdiendo en cada desplazamiento y, los de la primera, toman los valores de inicialización por omisión -superficie plana hasta el horizonte y esférica hasta $\theta = 0$.

En esta implementación, la función F se ha obtenido desde los modelos cinemático y de proyección. Esta aproximación, por precisa que sea, pierde rápidamente su utilidad debido a los deslizamientos de las ruedas. Al final del siguiente apartado sugeriremos algunas posibles soluciones.

5.3.5 Espacio externo: movimiento traslacional

Los diferentes modelos y algoritmos descritos hasta el momento permiten construir un espacio perceptivo con actividad atencional. La torreta del robot se mueve guiada por la estructura del entorno y por la representación que va generando. El problema que abordamos ahora, nos lleva a introducir una actividad exploratoria que genere desplazamientos en el robot guiados, de igual manera, por la interacción entre la estructura del entorno y la representación generada. Esta actividad requiere resolver dos nuevos problemas: la actualización del espacio externo ante translaciones; y la propia generación estos movimientos.

5.3.5.1 Actualización del espacio externo ante translaciones.

La actualización del espacio externo requiere obtener las expresiones que relacionan un incremento de espacio lineal Δs con la nueva posición, en el espacio esférico, de cada una de las zonas activas. Este proceso conlleva los siguientes pasos:

- Obtención de Δs como la integración de la velocidad de translación a lo largo de un intervalo fijo de tiempo. La velocidad de translación de la plataforma fue obtenida en el capítulo anterior como: $V_T = \frac{V + V'}{2}$.
- Dadas las coordenadas esféricas $\{\varphi, \theta, \rho\}$ de una zona activa en un instante t , sus nuevas coordenadas, después de que la plataforma recorra Δs , se obtienen fácilmente utilizando las relaciones trigonométricas de la geometría esférica:

$$\theta_{t+1} = \text{atan} \frac{\text{Proy}_{\theta_t} \cdot \sin \theta_t}{\text{Proy}_{\theta_t} \cdot \cos \theta_t - F(\Delta S)} \quad (5.30)$$

$$\varphi_{t+1} = \text{atan} \frac{\text{Proy}_{\varphi_t} \cdot \sin \varphi_t}{\text{Proy}_{\varphi_t} \cdot \cos \varphi_t - F(\Delta S)} \quad (5.31)$$

$$\rho_{t+1} = \frac{Proy_{\theta_{t+1}}}{\sin \varphi_{t+1}} \quad (5.32)$$

donde $Proy_{\theta}$ y $Proy_{\varphi}$ son las siguientes proyecciones del vector de coordenadas $\{\varphi, \theta, \rho\}$:

$$Proy_{\theta} = \rho \cdot \sin \varphi \quad (5.33)$$

$$Proy_{\varphi} = \rho \cdot \cos \theta \quad (5.34)$$

y F es una función análoga a la que aparecía en el caso de la rotación.

Con estas expresiones el espacio externo se puede *acercar* o *alejar* predictivamente, antes de que el módulo visual procese el nuevo estado del entorno.

Intuitivamente, podemos ver este mecanismo, en su conjunto, como si el robot estuviese anclado a las zonas percibidas mediante unas *gomas elásticas*. Cada goma queda anclada, por un extremo, al origen del espacio perceptivo y, por el otro, al centroide de la zona. Su longitud corresponde a la distancia estimada y, su orientación, a los ángulos horizontal y vertical que forman con el origen. Cuando el robot se desplaza, todas las gomas fijadas al robot se *estiran* y *reorientan* de forma acorde a la velocidad del movimiento.

Dada una estimación, a priori, de la función F los errores de predicción se tratan de la misma forma que en el caso de la rotación. Una zona que ha seleccionado a una región procedente del módulo visual, sustituye sus coordenadas de posición y parámetros morfológicos por los de la región. La diferencia en coordenadas esféricas entre ambas se propaga al resto de las zonas para mantener la coherencia de la estructura global. De esta forma y, parcialmente, los errores de estimación de F y, sobre todo, los errores debidos al deslizamiento, se traducen en cambios globales que no alteran las posiciones relativas entre las zonas.

Esta forma de tratar los errores de predicción constituye una primera aproximación hacia el problema de mantener la coherencia entre el movimiento propio, lo representado y la información procesada en los módulos visual y motriz. En sí mismo es un mecanismo insuficiente para resolver el problema, sin embargo, sugiere líneas de ampliación interesantes dentro del espacio perceptivo. En primer lugar, la aplicación de este criterio debe ser dependiente de si el entorno tiene o no movimiento propio. En el caso de un entorno estático, como el que hemos supuesto hasta ahora, resulta imprescindible mantener intacta la estructura

relativa del entorno representado para evitar trasladar a éste los continuos errores de posicionamiento. Si se mantienen las posiciones relativas de las zonas, entonces es posible diseñar estrategias de relocalización basadas en el reconocimiento de zonas adyacentes. Por el contrario, si cada error de predicción se corrige localmente sobre la zona afectada, al cabo del tiempo, las posiciones relativas del conjunto irán cambiando e introducirán falsos errores de predicción. A este mecanismo habría que añadir un algoritmo adaptativo de estimación continua de las funciones que hemos denominado F , esto es, las relaciones de calibración entre el espacio interno y el externo. Si se aplican conjuntamente las dos acciones, el ajuste global del espacio externo y el ajuste de las relaciones de calibración, los errores de predicción deben mantenerse acotados.

Si la plataforma y la torreta se mueven simultáneamente, aparece el problema de atribuir la causa de los errores de predicción a cualquiera de las dos calibraciones: plataforma- espacio externo; torreta-espacio externo. En esta situación, la diferencia de velocidades puede actuar como desacoplo entre las dos fuentes de error. Finalmente, si añadimos la existencia de objetos con movimiento propio y de las predicciones específicas que habría que construir y actualizar continuamente para ellos, aumentaría todavía más la incertidumbre en la selección de la causa de los errores. Quizás la solución más efectiva en situaciones de este tipo sería utilizar estrategias de desacoplo activo, esto es, eliminar selectivamente fuentes de error, por ejemplo, deteniendo la plataforma o forzando trayectorias fácilmente predecibles.

5.3.5.2 Actividad exploratoria.

Según adelantábamos en el Capítulo 3, la generación de actividad de exploración debe tener las mismas características que la actividad atencional. En este último caso, las zonas del espacio externo incorporan unas variables de estado que evolucionan en el tiempo según las ecuaciones dinámicas desarrolladas para ellas. Podemos extender esta misma aproximación al caso de la exploración, simplemente, considerándola una atención en el eje de profundidad. Las condiciones que buscamos para este caso son:

- Cuanto más alejada esté la zona, mayor energía adquiere para atraer al robot hacia ella.
- Cuanto más cerca esté del robot, mayor energía adquiere para alejar al robot de ella.
- Ambas variables dependen del *valor de activación* obtenido desde la dinámica atencional.

Necesitamos introducir dos nuevas parejas de variables de estado $\dot{L}_k(t)$, $L_k(t)$ y $\dot{C}_k(t)$, $C_k(t)$ -lejanía y cercanía, respectivamente- para los dos primeros puntos. La ecuación dinámica que relaciona a cada variable con su derivada es análoga a la que planteamos para el valor de activación. Finalmente, multiplicamos cada variable con el valor de activación de su zona.

El mecanismo de selección por competición es, de nuevo, el mismo que en el caso anterior y la resolución de la ruptura de expectativa creada por la zona ganadora, se traduce en una intervención del módulo motriz. Este utiliza el modelo inverso de la plataforma para generar las consignas de velocidad a los motores y genera las predicciones necesarias para actualizar la posición relativa de las zonas existentes.

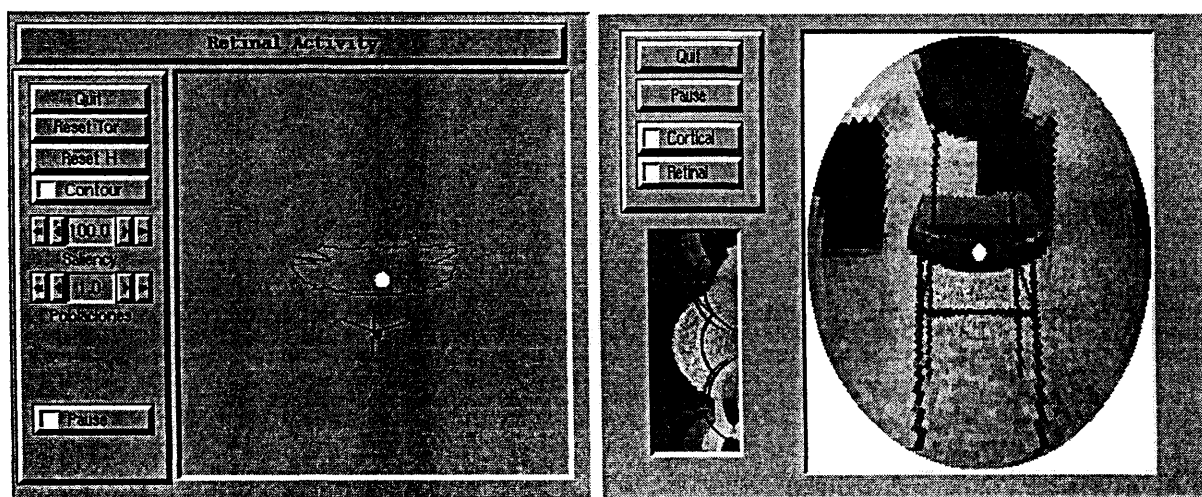
Es interesante ver cómo este sencillo acoplamiento da lugar al siguiente comportamiento: una zona lejana representada en el espacio externo y que esté siendo refrescada consistentemente, adquiere el potencial de atraer al robot. Si esta zona gana la competición el robot comienza a desplazarse en esa dirección, independientemente de que no mantenga la atención fija sobre la zona objetivo. Cuando esto ocurre, las otras zonas cercanas van quedando progresivamente fuera del rango de la torreta, por lo que dejan de reclamar cambios de orientación. Al acercarse a la región de destino, la zona objetivo mantendrá posiciones favorables en el espacio externo que la llevarán a permanecer mayor tiempo en la fóvea. Eventualmente, otras regiones aparecerán en el campo visual repitiéndose este ciclo. La transición entre atención a regiones cercanas y lejanas se resuelve dinámicamente dentro del espacio perceptivo y, durante todo este proceso, el agente adquiere mayor información sobre su entorno.

En este Capítulo presentamos la ejecución, sobre el robot, de los algoritmos desarrollados en el capítulo anterior. El objetivo es mostrar, con diferentes imágenes de la interfaz de usuario, los resultados de segmentación y control en los modelos visual y motriz, la construcción del espacio externo sobre el espacio interno y la interacción dinámica entre estos y los modelos, dando lugar a un mecanismo de atención y representación.

6.1 Segmentación en fovea y periferia

En este primer apartado recogemos algunos ejemplos de la segmentación que realiza el módulo visual sobre diferentes objetos. En la imagen de la izquierda de la Figura 6.1 aparece el contorno centrado en la fovea como una línea continua. Debajo de éste, unas líneas en forma de cruz indican la posición de un objeto en periferia con un nivel de gris similar al de la fovea.

Figura 6.1



La segmentación se realiza sobre la imagen log-polar, donde puede observarse la compresión de los objetos en la periferia. Esta reducción de área implica que pierden peso en la segmentación respecto de otros, de menor tamaño real, pero más próximos a la fovea. En el recuadro de la derecha aparecen la imagen log-polar -zona inferior izquierda- y la reconstrucción cartesiana.

La Figura 6.2 recoge la segmentación de una pared acristalada del laboratorio. El procedimiento radial de extracción del contorno impide que el entrante superior izquierdo de la ventana sea incluido en la región segmentada. Las dos cruces indican la posición de sendas regiones oscuras en la parte inferior y derecha de la imagen.

Figura 6.2

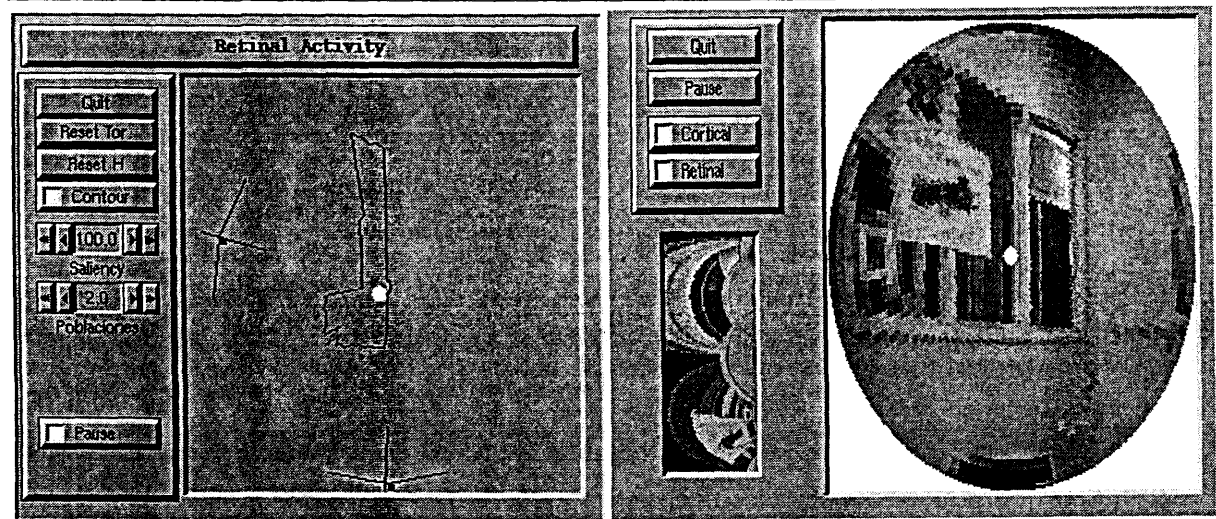
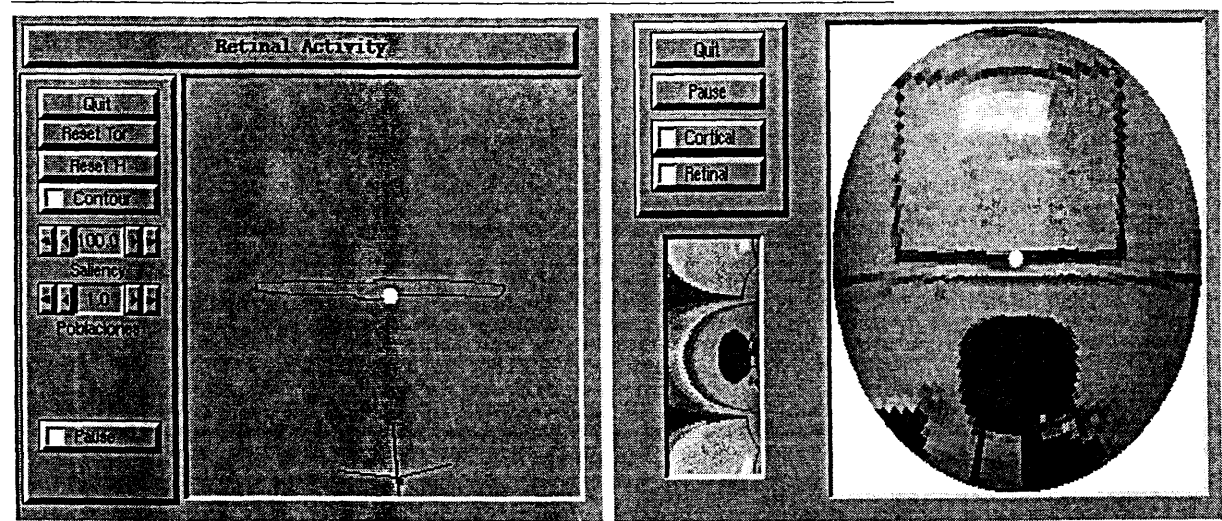


Figura 6.3



En la Figura 6.3 se repite el proceso para el borde inferior de la pizarra. En la parte inferior aparece señalada la posición de la silla.

6.2 Activación en el espacio externo

En este apartado se muestra todo el conjunto de controles y representaciones gráficas accesibles desde la estación remota. En la parte superior izquierda aparecen los elementos del módulo visual. La ventana grande que ocupa la región derecha muestra una reconstrucción tridimensional del espacio externo, con el contorno segmentado como una elevación vertical sobre el suelo. La rejilla vertical representa la zona cubierta por el campo visual de la cámara. Los puntos rojos son los centros de las regiones segmentadas por el módulo visual, que se han constituido en zonas activas en el espacio externo. La ventana rectangular de la parte inferior izquierda muestra los niveles de activación de estas zonas. Las ventanas cuadradas con una cruz sobreimpuesta permiten controlar directamente la posición de la torreta y el desplazamiento de la plataforma.

Figura 6.4

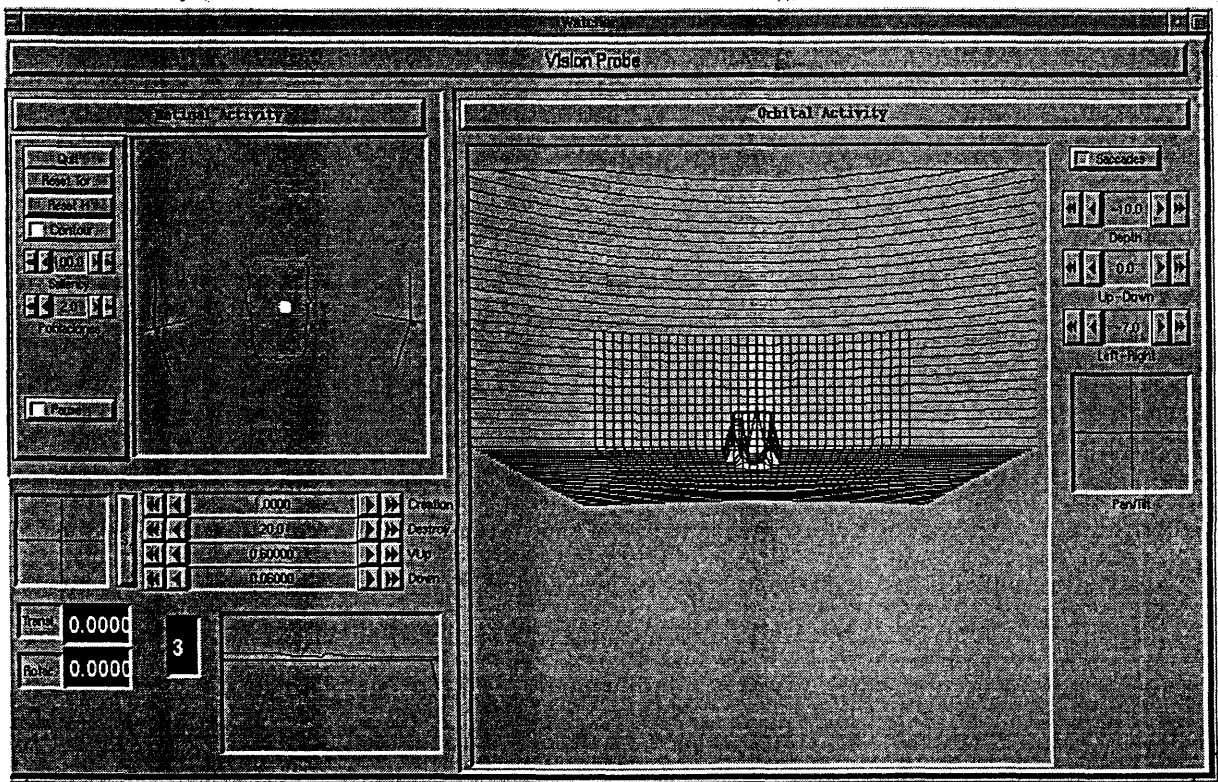
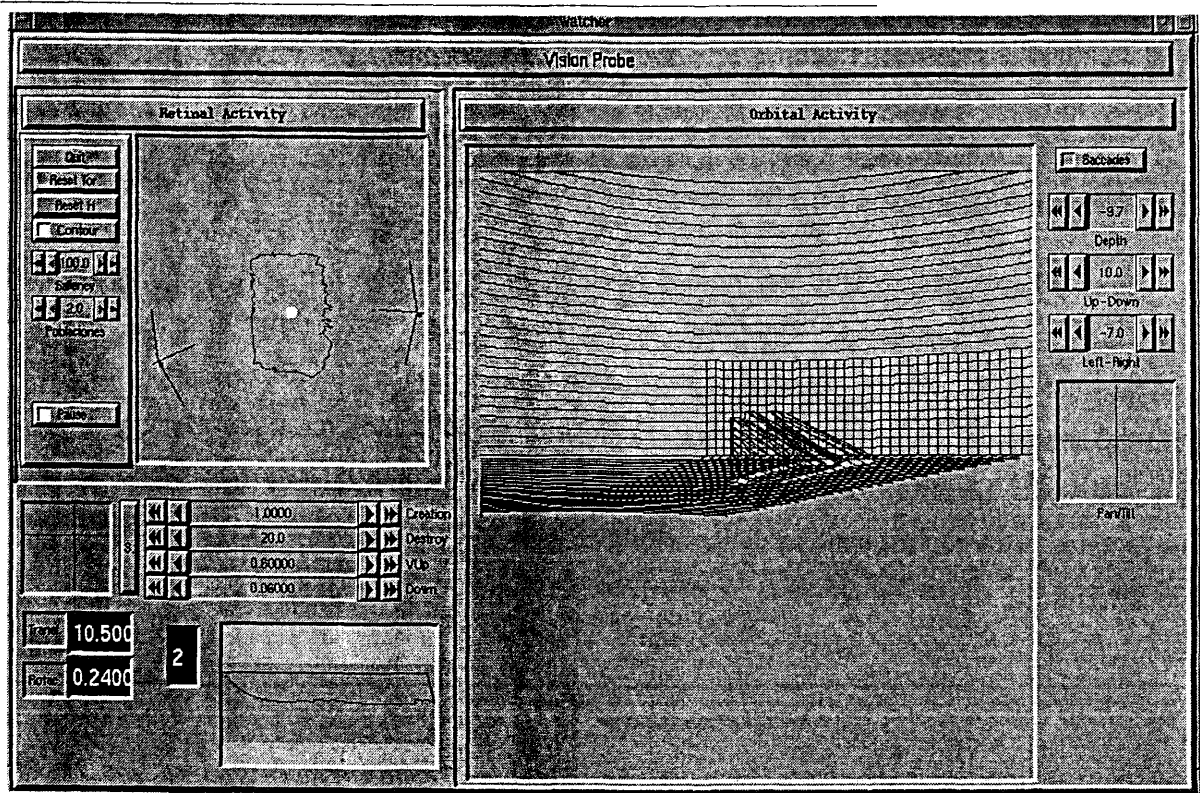


Figura 6.5



La Figura 6.5 muestra la misma situación desde una punto de vista lateral.

6.3 Dinámica de zonas en el espacio externo: atención visual

A continuación se muestra en una serie de tres imágenes el mecanismo de atención visual que incorpora, progresivamente, nuevas zonas al espacio externo. En la primera y en la última se ha sobreimpuesto la reconstrucción cartesiana de la imagen recibida, en ese momento, por la cámara.

En la Figura 6.6, la torreta se encuentra ligeramente desviada hacia la izquierda del eje longitudinal del robot. El contorno central ya ha sido asimilado como zona activa y las dos posibles regiones de la periferia se encuentran solapadas sobre un objeto a la derecha. En la Figura 6.7, el robot ya ha realizado otro movimiento sacádico hacia el objetos de la derecha, incorporándolo como zona activa. A medida que aumenta el número de zonas, la atención comienza a repartirse entre ellas según el criterio de competencia discutido en el capítulo anterior. En general, no es posible saber con mucha antelación qué zona tomará el control del siguiente sacádico.

Figura 6.6

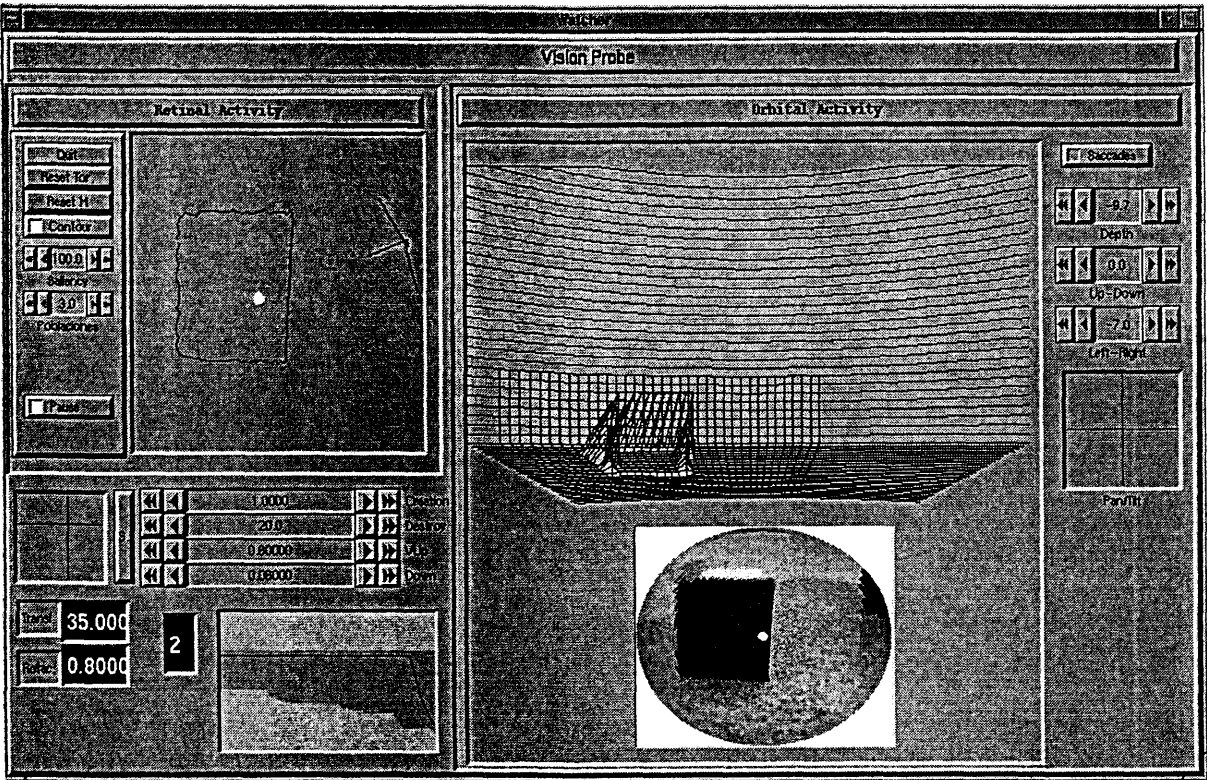


Figura 6.7

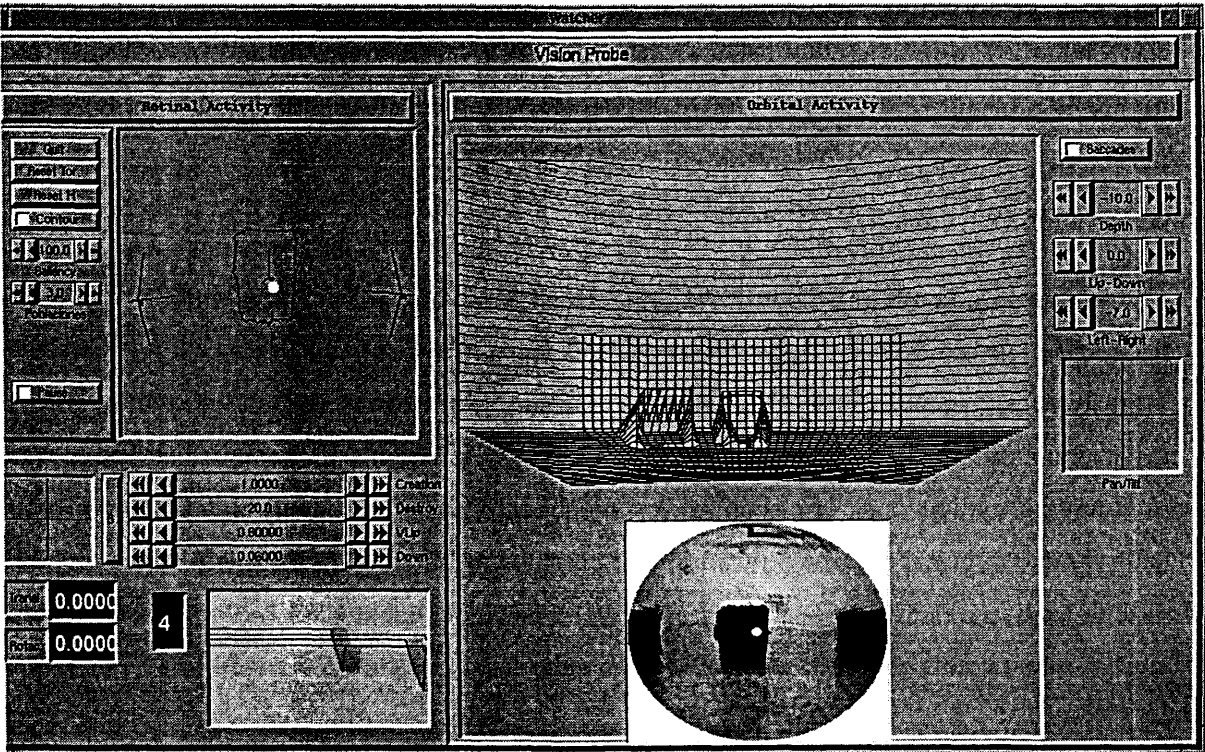
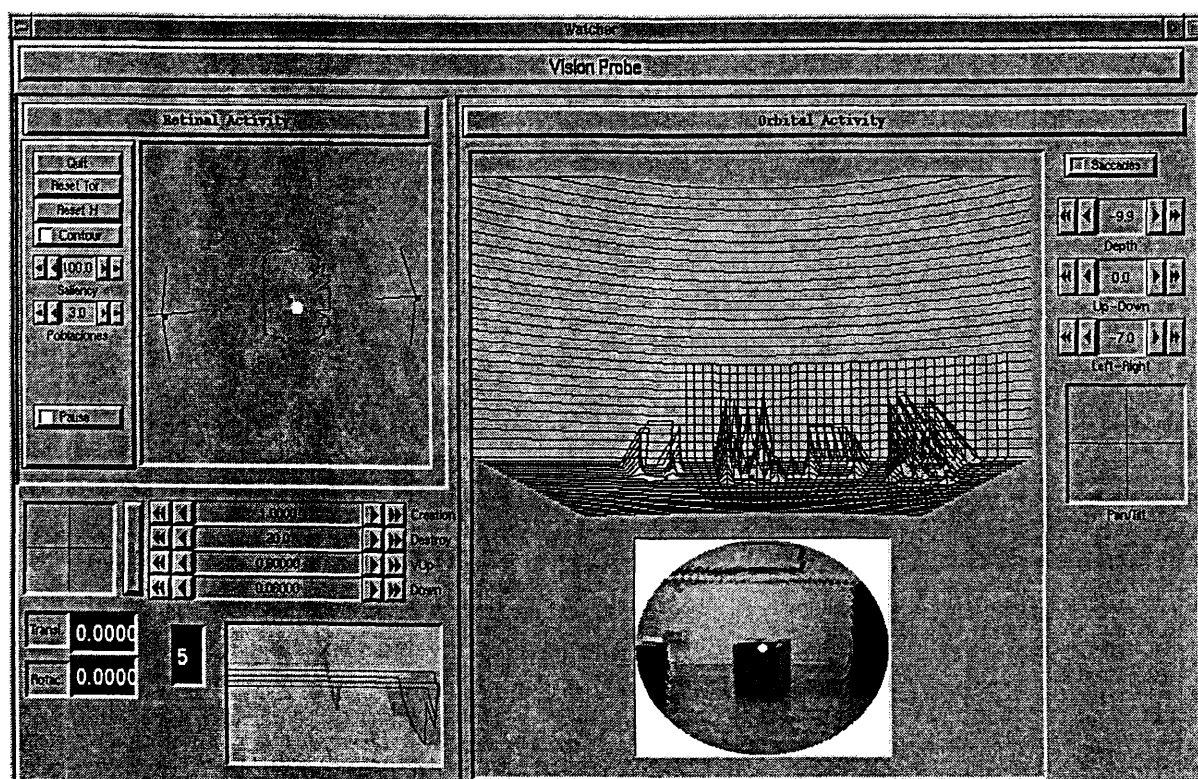


Figura 6.8

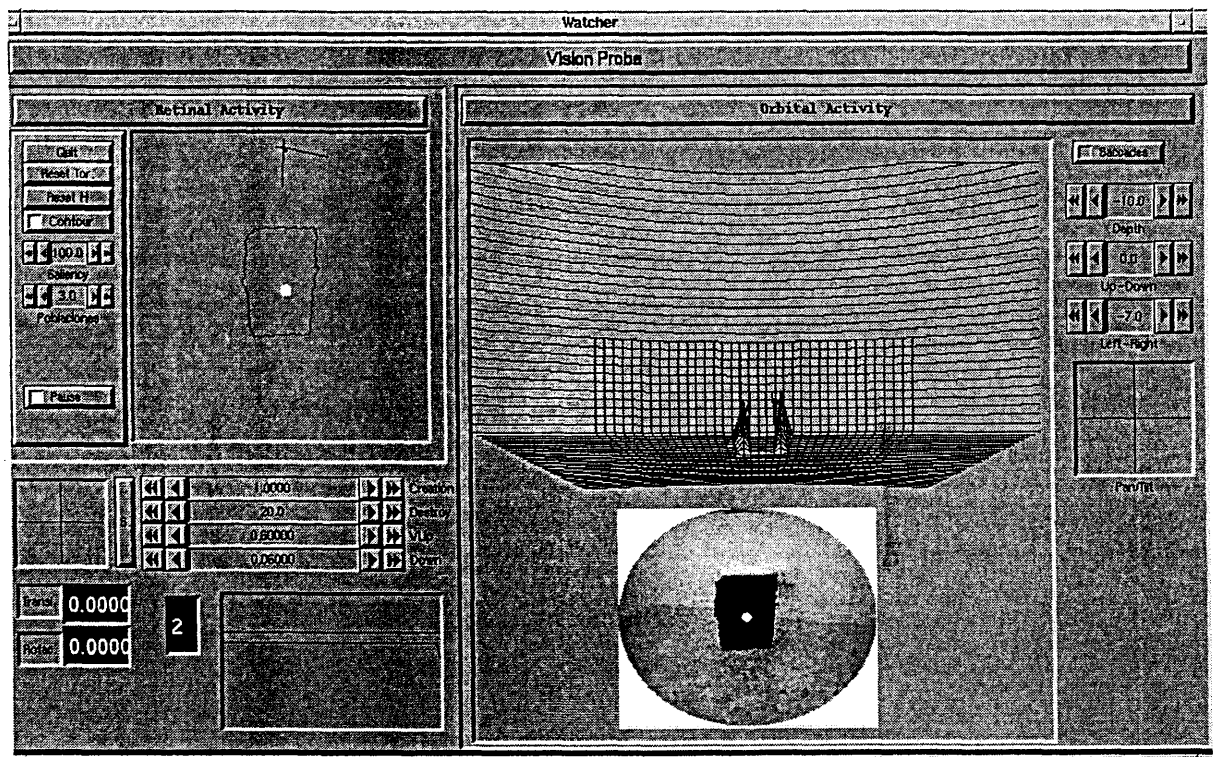


En la Figura 6.8 el robot ya ha incorporado dos regiones más situadas en la parte derecha de la escena. La región situada más a la derecha corresponde a otro robot móvil que habita el mismo laboratorio. Puede observarse el incremento de líneas representando la evolución de la activación de cada una de las zonas. Los picos descendentes indican la disminución de activación y, por tanto, el riesgo de eliminación por olvido. Cuando la línea vuelve a subir, indica que la zona ha sido refrescada.

Justo antes de efectuarse un movimiento sacádico, todas las zonas que van a entrar dentro del campo visible generan implícitamente una expectativa. Cuando llega la información del módulo visual, cada una de ellas evalúa la cantidad de refresco que recibe. Si la medida de similaridad es suficientemente alta, su actividad sube y pierden toda posibilidad de conseguir el siguiente sacádico. Si, por el contrario, no encuentran una región suficientemente próxima su actividad decrece rápidamente y compiten con mayor fuerza en la siguiente oportunidad. El resultado es que la atención se dirige con mayor frecuencia hacia las zonas donde se producen rupturas de expectativa y, en menor medida, a aquellas que son más predecibles.

En la Figura 6.11 la zona de la izquierda ya ha desaparecido del espacio externo debido a que ha pasado a una situación inaccesible al giro de la torreta y, por lo tanto, a pesar de contar con mayores posibilidades de obtener el control al posición, la posición de referencia que llegaba al módulo motriz nunca podía ejecutarse. Una situación análoga se da instantes después al seguir avanzando el robot. El objeto de la derecha deja de ser accesible por la torreta y termina desapareciendo. Finalmente, solo queda el objeto al que se dirigía el robot.

Figura 6.12



Concluimos este capítulo con un breve resumen de las ideas más importantes sobre las que hemos desarrollado el *espacio perceptivo*, y con las perspectivas que este modelo abre y que se están comenzando a investigar en nuestro entorno de trabajo.

El Capítulo 1 recoge un esfuerzo de síntesis en torno a las diferentes corrientes teóricas que articulan la disciplina de la Inteligencia Artificial. En el desempeño de esta tarea, hemos intentado encontrar y organizar aquellos principios, muchas veces filosóficos, que respaldan la miriada de técnicas y métodos generados dentro de este campo. La dicotomía de tendencias finalmente presentada ha resultado ser un ejemplo más de una división clásica en el estudio de la mente: el debate entre el racionalismo y el empirismo, entre lo innato y lo adquirido, lo deductivo y lo inductivo, las representaciones simbólicas explícitas y las distribuidas subsimbólicas, la acción como resultado de la premeditación y la acción situada, el espacio como objetos geométricos y el espacio como reacciones y motivaciones. Todo ello, acrecentado por la metáfora del computador.

El análisis de esta situación dualista y los enormes problemas conceptuales a los que se enfrenta la robótica inteligente hoy en día nos ha llevado a definir, como proyecto de investigación de esta tesis, un problema que creemos subyace a gran parte de las intuiciones existentes sobre la inteligencia: la percepción del espacio. En el desarrollo de este proyecto hemos buscado una aproximación complementaria combinando, el estudio conceptual y teórico, con la construcción de un robot móvil dotado de un sistema de visión orientable para su uso en la validación experimental.

El trabajo que se describe en el Capítulo 2 traslada las preocupaciones anteriores al campo de la visión artificial. Después de revisar las intuiciones más importantes que han

aportado las teorías sobre percepción visual, examinamos la noción de visión activa tal y como ha sido propuesta y se está desarrollando actualmente. En este sentido, hemos propuesto una interpretación más ambiciosa de lo *activo*, donde la visión y la acción establecen una relación de predicción en los dos sentidos: el movimiento predice lo que se va a ver; y lo que se ve predice las acciones posibles. Esta relación no es de carácter simbólico ni de carácter reactivo. Su naturaleza es dinámica y da lugar a una estructura interna de representación, no simbólica, que hemos denominado *espacio perceptivo*.

Para desarrollar estas ideas sobre el soporte experimental del robot Acai, hemos estudiado aspectos anatómicos y funcionales de la visión biológica y su modelado algorítmico. El resultado de este trabajo se recoge en la tecnología, de la que ahora disponemos, sobre visión foveatizada en tiempo real y los mecanismos de control relacionados con la atención visual. Además de su aplicación directa a los diferentes robots móviles del Laboratorio de Percepción Artificial del Instituto de Automática Industrial, estos estudios han permitido generar un proyecto más ambicioso dirigido a la construcción de lo que se ha empezado a denominar *ojo electrónico* (CICYT TIC-1392-C02-01).

La aportación más importante de esta tesis se recoge en el Capítulo 3, donde introducimos el concepto de *espacio perceptivo* como el elemento que permite relacionar el procesamiento visual y el motriz dando lugar a la percepción del espacio. Definimos el espacio perceptivo como una estructura dinámica organizada en tres niveles: el espacio interno, el espacio externo y el espacio expandido. Esta estructura interacciona con los módulos visual y motriz para mantener, simultáneamente, un estado predictivo global y una coherencia con el entorno a diferentes escalas espaciales. La motivación y los objetivos para abordar este problema fueron planteados en el apartado "La construcción del espacio como prerequisite para la inteligencia." del Capítulo 1. Siendo ésta una propuesta teórica, la mejor forma de evaluar el alcance los resultados es analizando, en que medida, este marco del que ahora disponemos responde a las cuestiones allí planteadas:

- Estabilidad y continuidad perceptiva en el entorno cercano, como la relación de predicción entre el espacio interno, el externo y el extendido.
- Reconocimiento de lugares habituales, por la comparación morfológica y estructural que se lleva cabo continuamente en el espacio externo.

-
- Facilitación progresiva en la elección de caminos recorridos. Esta propiedad de estudio en el apartado "Planificación" del Capítulo 4.
 - Sorpresa ante cambios no esperados. Esta es la consecuencia más importante del estado predictivo global que se mantiene en el espacio perceptivo.
 - Sistemas de referencia relativos. Por construcción del espacio interno y su relación con el externo y el expandido.
 - Dificultades en la reconstrucción precisa de lo que no es directamente percibible. Esta propiedad se obtiene como consecuencia de la codificación no invertible de la información.
 - Homogeneidad en la adquisición y almacenamiento de la información espacial. Esto es consecuencia de cómo están articulados los tres niveles de organización del espacio perceptivo y de las operaciones de predicción y proyección que los relacionan dinámicamente.
 - Predicción continua de la entrada perceptiva a diferentes escales espaciales. El argumento es análogo al del punto anterior.
 - Cooperación de distintos sistemas sensoriales en la discriminación de localizaciones con una dependencia estrecha entre la estructura conceptual y la organización y contenido de la memoria espacial. Este punto no se ha abordado en este trabajo ya requieren desde nuestro punto de vista, la incorporación de un módulo lingüístico. A pesar de ello, en el apartado "La estructura conceptual." del Capítulo 1 comentamos el estado de los primeros trabajos en esta dirección.

Creemos que este estudio abre una vía hacia la estudio del comportamiento inteligente, que sintetiza muchas de las intuiciones desarrolladas hasta el momento desde las diferentes aproximaciones y, al mismo tiempo, sugiere una salida de las posiciones dualistas extremas a través de las estructuras dinámicas. En éstas, la representación y el comportamiento son aspectos complementarios y permiten un acercamiento más homogéneo de lo reactivo y lo reflexivo que la línea definida por las arquitecturas híbridas.

En el cuarto capítulo se detalla el proceso de diseño y construcción del robot móvil Acai. Este robot, íntegramente construido en nuestro laboratorio, ha servido como pista de rodaje imprescindible en la adquisición de conocimientos prácticos sobre múltiples aspectos de la tecnología y la ingeniería asociada a la robótica. Estos conocimientos nos están permitiendo

abordar la construcción de nuevas máquinas más complejas con las garantías necesarias. En la descripción del proceso de diseño y desarrollo del robot, hemos hecho especial hincapié en cuestiones relacionadas con las arquitecturas de proceso, la modularidad en los sistemas de control y la relación entre complejidad, coste, eficiencia y evolución del mercado con el fin de optimizar diseños futuros. Como consecuencia del desarrollo de este robot hemos generado, conjuntamente en el laboratorio, una tecnología propia de control distribuido de motores que se está utilizando en otros proyectos de investigación y de aplicación industrial.

Otro de los objetivos planteados es el contraste experimental de las propuestas planteadas. En este sentido, en el Capítulo 5 hemos desarrollado modelos matemáticos y algoritmos que permiten trasladar los conceptos sobre los módulos de proceso y el espacio perceptivo, al robot Acai. A continuación resumimos estos resultados:

Módulo visual -todo el procesamiento se realiza en tiempo real, 25 fs^{-1} , sobre un único procesador:

- generación de la imagen log-polar.
- segmentación del contorno centrado en fovea por umbralización del histograma mediante una implementación incremental del algoritmo EM.
- segmentación de múltiples regiones de la periferia del campo visual mediante una adaptación del algoritmo EM.

Módulo motriz -el control de bajo nivel se realiza sobre hardware específico:

- control de posición y velocidad de los cuatro motores del robot.
- cinemática inversa de la torreta y de la plataforma.

Espacio interno:

- Cinemática directa de la plataforma.
- Cinemática directa de la torreta.
- Modelo de proyección de la cámara.

Espacio externo:

- Modelado de la geometría del espacio mediante zonas activas que representan regiones tridimensionales del entorno.

-
- Actualización de las zonas en el sistema de referencia egocéntrico mediante una combinación de información odométrica y de reconocimiento morfológico.

Objetivos en el espacio perceptivo:

- Modelado de un esquema de atención visual que combina dinámicamente la construcción de representaciones y la generación de comportamiento.
- Modelado de un esquema de navegación que interacciona dinámicamente con el sistema de atención visual.

Finalmente, en el Capítulo 7 se muestran algunos experimentos realizados sobre el robot Acai, que validan las propuestas básicas recogidas en el *espacio perceptivo*. En este sentido y aunque sólo se han llevado a la fase de implementación algunas de las ideas del Capítulo 4, se ha conseguido uno de los objetivos fundamentales: mostrar que la arquitectura del robot permite ampliar su funcionalidad incrementalmente sin sufrir los problemas de *escalabilidad* que discutimos en el Capítulo 4. Recordamos que atribuimos estos problemas a las arquitecturas reactivas como resultado de experimentos concretos de control visual realizados con este mismo robot, del análisis de otras experiencias similares y de argumentos teóricos recogidos de la literatura y desarrollados por nosotros mismos.

La implementación de todo el modelo requiere desarrollar los detalles de todos los elementos y conceptos que articulan el espacio perceptivo y su relación con los módulos visual y motriz. Las distintas formas de llevar esto a cabo se discuten a continuación.

Perspectivas

Este trabajo ha dejado abiertas un gran número de cuestiones que esperamos ir abordando en un futuro próximo. Para ser breves, nos limitaremos a situar a grandes rasgos las líneas que consideramos más prometedoras:

- Formalizar matemáticamente las restricciones geométricas que caracterizan, de forma innata, el espacio perceptivo. Con esto nos referimos, en una primera aproximación, a superficies bidimensionales continuas y, posteriormente, a topologías más complejas.
- Estudiar transformaciones que permitan relacionar la información obtenida de los métodos de procesamiento visual conocidos, con cambios en la geometría del espacio perceptivo, especialmente en la región del espacio externo, donde se da la percepción

directa. La intuición es que la tridimensionalidad se percibe desde el primer momento por una combinación de las restricciones geométricas del espacio perceptivo, de la información procesada en el módulo visual y de la predicción procedente del módulo motriz. De las técnicas de procesamiento visual, las que consideramos especialmente prometedoras en estos momentos, son las relacionadas con los espacios de escala no lineales.

- Estudiar la percepción de objetos más complejos que las deformaciones sobre una superficie bidimensional. En este sentido, esperamos que la capacidad de percibir objetos independientes esté estrechamente relacionada con la manipulación y con la incorporación de una topología acorde en el espacio perceptivo. La experimentación en esta línea requeriría dotar al robot de un brazo manipulador, lo que se reflejaría en la cinemática y dinámica del espacio interno y permitiría, además, estudiar situaciones en las que el agente observa partes de si mismo. Esto llevaría a un nivel superior de complejidad, donde sería posible interpretar objetos externos articulados. Como estadio final de esta progresión, aparecerían los objetos animados como objetos articulados dotados de una ley interna. La intuición en este sentido, es que el movimiento externo se entiende si se entiende el movimiento propio. Podemos ver el hecho de entender un objeto animado, como la proyección sobre él de nuestro propio modelo de movimiento. Sólo si esta proyección es posible, se entiende la situación que estamos percibiendo.
- Enlazando con el punto anterior, otra línea de trabajo apuntaría a elaborar una teoría sobre la interpretación como proyección. Brevemente, la idea es la siguiente: en lugar de asumir que entendemos lo que es una silla si un clasificador de rasgos geométricos decide que el objeto percibido pertenece a la clase silla, podemos decir que lo entendemos si, al ver su disposición espacial y proyectar mentalmente sobre ella el modelo de nuestro cuerpo, reconstruimos las mismas sensaciones directas que al sentarnos en una silla real.
- Finalmente y quizás como el aspecto más complejo de todos los propuestos, está el estudio de la incorporación de las teorías sobre el lenguaje humano y la estructura léxica, a la percepción del espacio. Algunos lingüistas como Jackendoff [Jackendoff 1995] lleva tiempo estudiando este problema y hasta donde podemos decir, su enfoque no se aleja mucho de lo que aquí proponemos.

Bibliografía

-
- [Agapito 1996] L. de Agapito, "Estrategias de correspondencia jerárquica y métodos directos de autocalibración para un sistema estereoscópico binocular" Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 1996.
- [Agre 1990] P. Agre, "The Dynamic Structure of Everyday Life", PhD Thesis, AI LAB MIT 1990.
- [Agre & Chapman 1987] P. Agre & D. Chapman, "Pengi: An Implementation of a Theory of Activity", AAAI 1987.
- [Agre & Chapman 1990] P. Agre & D. Chapman, "What are plans for?", Robotics and Autonomous Systems 6, 1990.
- [Agre & Horswill 1997] P. Agre & I. Horswill, "Lifeworld Analysis", Journal of Artificial Intelligence Research 6, pp. 111-145, 1997.
- [Ali & Klyne 1985] M.A. Ali and M.A. Klyne, "Vision in Vertebrates", Plenum Press, 1995.
- [Aloimonos et al. 1987] J. Aloimonos & A. Baudyopadhyay, "Active Vision", First International Conference in Computer Vision, 1987.
- [Aloimoinos et al 1993] J. Aloimonos [ed.], "Active Perception", Hillsdale, 1993.
- [Ashby 1952] Ashby, "El Cerebro Electrónico", Fondo de Cultura 1952.

-
- [Arbib 1995] M.A. Arbib, "Review of Newell's Unified Theories of Cognition", Artificial Intelligence, 1995.
- [Bajcsy 1988] R. Bajcsy, "Active Perception", Proceeding of the IEEE, vol 76, nº 8, 1988.
- [Bajcsy 1995] R. Bajcsy, "Signal-to-Symbol Transformation and Vice Versa: From Fundamental Processes to Representation", ACM Computing Surveys, Vol. 27, No. 2, September 1995.
- [Bajo & Cañas 1991] M.T. Bajo & J.J. Cañas, "Ciencia Cognitiva", Debate 1991.
- [Ballard 1989] D. Ballard, "Reference Frames in Animate Vision", IJCAI 1989.
- [Baumela 1995] L. Baumela "Contribución a seguimiento de móviles con cabezas robóticas y visión artificial". Tesis Doctoral. Dpto. de Inteligencia Artificial. Facultad de Informática. UPM. 1995.
- [Baumela et al. 1997] M. J. Brooks, W. Chojnacki & L. Baumela, "Determining the egomotion of an uncalibrated camera from instantaneous optical flow", Journal of the Optical Society of America A, Vol 14, No. 10, pp. 2670-2677, 1997.
- [Bechtel 1991] W. Bechtel, "Filosofía de la Mente. Una panorámica para la ciencia cognitiva", Tecnos, 1991.
- [Brachman et al. 1995] R. Brachman & H. Levesque, "Undirected behavior without unbounded search" ACM Computing Surveys, Vol. 27, No. 3, September 1995.
- [Boden 1989] M. Boden, "The Phylosophy of Artificial Intelligence", Oxford Press, 1989.
- [Brown 1994] C. M. Brown, "Vision, Learning and Development", TR 492, Computer Science Department, University of Rochester 1994.
- [Brooks 1983] R. Brooks, "Solving the Find-Path Problem by Good Representation of Free Space", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Vol. SMC 13. No 3. 1983.

-
- [Brooks 1986] R.A. Brooks, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot", IEEE Journal of Robotics and Automation. Vol. RA-2, No. 1. March 1986.
- [Brooks 1987] R. A. Brooks, "A Hardware Retargetable Distributed Layered Architecture for Mobile Robot Control", Proc. Robotics and Automation, Vol 1. Computer Society Press, 1987.
- [Brooks 1989] R.A. Brooks, "The Whole Iguana", en M. Brady ed. Robotics Science. MIT Press, 1989.
- [Brooks 1991] R.A. Brooks, "Intelligence without Representation", Artificial Intelligence, Vol. 47, No. 1-3, 1991.
- [Brooks 1991a] R. A. Brooks, "Intelligence without Reason", A.I. Memo No. 1293, Artificial Intelligence Laboratory, MIT 1991.
- [Brooks & Stein 1993] R. A. Brooks & L. A. Stein, "Building Brains for Bodies", A.I. Memo No. 1439, Artificial Intelligence Laboratory, MIT 1993.
- [Brooks 1996] R. A. Brooks, "From Earwings to Humans", AI Lab MIT 1996.
- [Bustos et al. 1995] P. Bustos, F. Recio, D. Guinea & M.C. García-Alegre, "Active Vision in a Network of Transputers", First International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Automation, Grecia 1995.
- [Bustos et al. 1997] P. Bustos, S. Espejo & G. Cristobal, "Resultados Preliminares en el Diseño de un Sistema Integrado de Visión Activa", Reunión Nacional de Optica, Valencia, 1997.
- [Cabrera 1994] J. Cabrera, "Sistema basado en el conocimiento para segmentación de imágenes. Desarrollo y aplicaciones", Tesis Doctoral. Universidad de las Palmas, 1994.
- [Carpenter 1988] R.H.S. Carpenter, "Movements of the Eyes", Plenum Press, 1988.
- [Caselles et al. 1996] V. Caselles, B. Coll & J. Morel, "A Kanizsa Programme", Progress in Nonlinear Differential Equations and their Applications, Vol. 25, 1996.
- [Chapman 1994] D. Chapman, "Visión, Instruction and Action, " MIT Press. 1994.

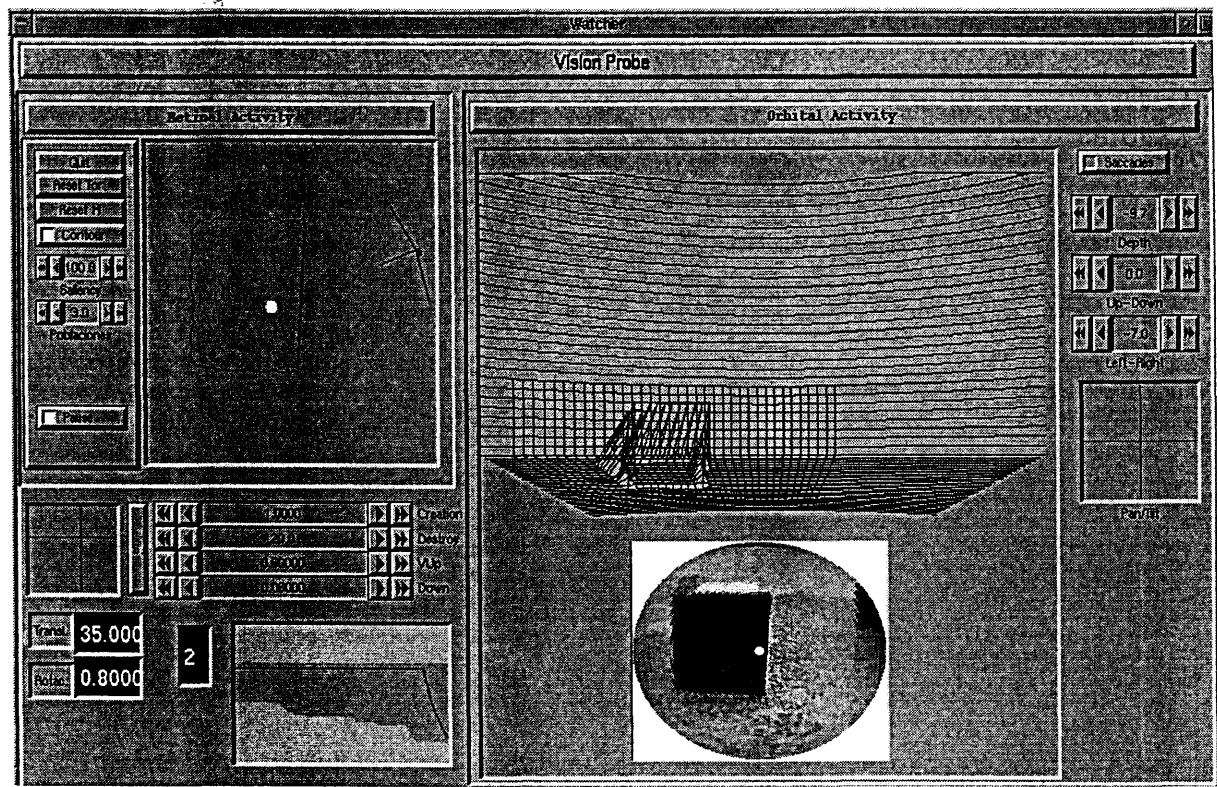
-
- [Chomsky 1995] N. Chomsky, "Language and Mind", *Mind* Vol. 104, No. 413, 1995.
- [Clancey 1995] W.J. Clancey, "A Boy Scout, Toto and a Bird: How Situated Cognition is different from situated robotics", en *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Situated Embodied Agents*, Eds: L. Steels & R.A. Brooks. Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- [Clancey 1996] W.J. Clancey, "Situated Action: A Neurophysiological interpretation", *Cognitive Science* 17[1] pp.87-107, 1996.
- [Clancey 1997] W.J. Clancey, "Situated Cognition: On Human Knowledge and Computer Representation", Cambridge Academic Press, 1997.
- [Churchland 1990] P. Churchland, "Neurophilosophy. Towards a Unified Science of the Brain", MIT Press 1990.
- [Churchland et al. 1994] P. Churchland, V. S. Ramachandran and T. Sejnowsky, "A Critique of Pure Vision", en *Large-Scale Neuronal Theories of the Brain*, Eds: C. Koch & J. L. Davis. MIT Press 1995.
- [Christensen et al. 1993] H.I. Christensen, K.W. Bowyer and H. Bunke, Eds. "Active Robot Vision", Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, Vol. 6, World Scientific, 1993.
- [Crutchfield et al. 1994] J.P. Crutchfield & M. Mitchell, "The evolution of emergent computation", Santa Fe TR-94-03-012, 1994.
- [Danieliidis et al. 1995] K. Danieliidis, C. Krauss, M. Hansen & G. Sommer, "Real Time Tracking of Moving Objects with an Active Camara", Computer Science Institute-Christian-Albrecht University TR-1995.
- [Damasio 1994] A.R. Damasio, "Descartes' error" 1994.
- [Damasio et al.1995] A.R. Damasio & H. Damasio, "Cortical systems for retrieval of concrete knowledge: the convergence zone framework", en *Large-Scale Neuronal Theories of the Brain*, Eds: C. Koch & J. L. Davis. MIT Press 1995.
- [Davies 1982] M. Davies, "Computability and Unsolvability", Dover, 1982.

En la situación de la figura anterior y, si no entran nuevos objetos en el campo visual, la atención se repartirá entre las zonas activas. Podemos interpretar esta situación desde el punto de vista de la dinámica, como una región de equilibrio por la que el sistema transita continuamente. Esta región puede alterar su forma si entra en escena algún objeto nuevo o si uno de los objetos desaparece. Este es el caso que ocurre cuando el robot avanza hacia el objeto más lejano, como veremos en el siguiente apartado.

6.4 Traducción

En las cuatro siguientes imágenes se recoge la evolución del espacio externo a medida que el robot avanza hacia la zona más alejada que percibe. En la Figura 6.9 se parte de la misma situación que en el caso anterior, con una zona activa y otra detectada en la parte derecha de imagen.

Figura 6.9



En la Figura 6.10 el robot ya está manteniendo tres zonas activas y comienza a moverse hacia la zona central. En la imagen cartesiana puede verse que la primera región que va a desaparecer es la situada en la parte izquierda.

Figura 6.10

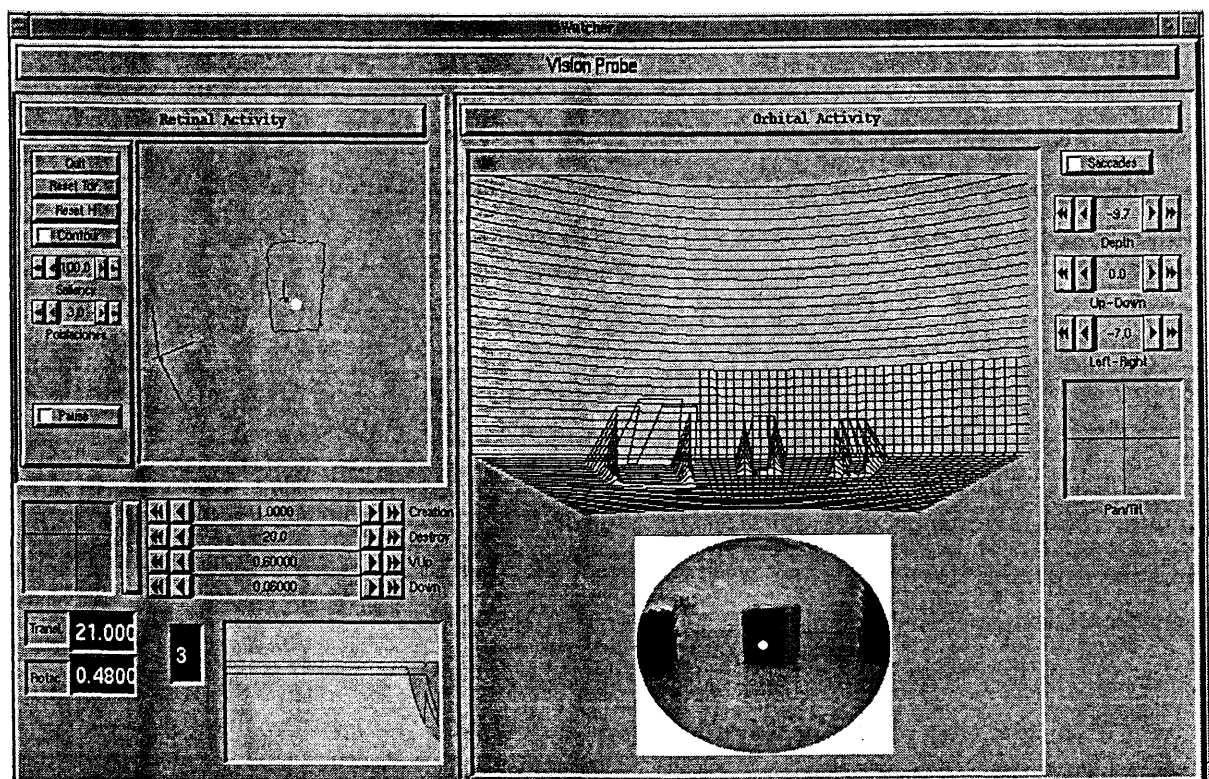
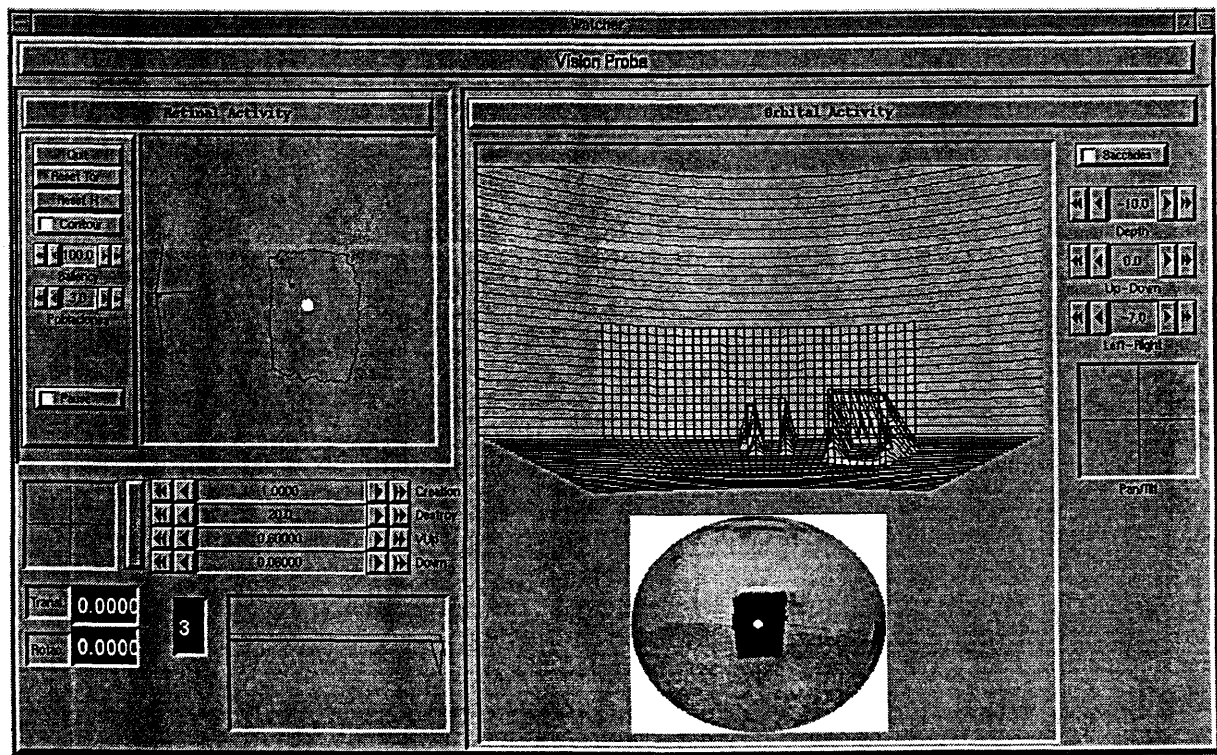


Figura 6.11



-
- [Dennett 1989] D. Dennett, "Cognitive Wheels: The Frame Problem in Artificial Intelligence", en M. Boden Ed. "The Philosophy of Artificial Intelligence", Oxford Press 1989.
- [Dennett 1992] D. Dennett, "Consciousness Explained", Penguin, 1991.
- [Dennett 1995] D. Dennett, "Darwin's Dangerous Idea", Penguin, 1995.
- [Desimone 1995 et al.] R. Desimone, E. K. Miller and L. Chelazzi, "The Interaction of Neural Systems for Attention and Memory", en Large-Scale Neuronal Theories of the Brain, Eds: C. Koch & J. L. Davis. MIT Press 1995.
- [Dickmanns 1992] E.D. Dickmanns, "Expectation-based Dynamic Scene Understanding", Exploratory Vision, The Active Eye. Springer 1995.
- [Eccles 1989] J. Eccles, "La creación de la consciencia" Labor 1989.
- [Edelman 1992] G. M. Edelman, "Bright Air, Brilliant Fire. On the Matter of the Mind", Basic Books 1992G. M. Edelman, "Bright Air, Brilliant Fire. On the Matter of the Mind", Basic Books 1992.
- [Elfes 1987] A. Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation", IEEE Journal of Robotics and Navigation, RA-3 [3] 1987.
- [Farah 1993] Farah M. J., "Neuropsychological inference with an interactive brain: a critique of the locality assumption", Behavioral and Brain Sciences, 1993.
- [Ferrell 1993] C. Ferrell, "Robust Agent Control of an Autonomous Robot with Many Sensors and Actuators", MSc Thesis. AI Lab. MIT, 1993..
- [Fischl et al. 1996] B. Fischl, E.L. Schwartz and M.A. Cohen, "The Local Structure of Space-Variant Images", TR CAS/CNS-96-023, Boston University, 1996.
- [Fodor 1983] J. Fodor, "The Modularity of Mind", MIT Press 1983.
- [Fodor 1984] J. Fodor, "El Lenguaje del Pensamiento", Cátedra, 1984.
- [Fodor 1997] J. Fodor, "Review of " New York Review of Books, Marzo 1997.

-
- [Fodor & Pylysyn 1981] J. Fodor and Z. Pylysyn, "How Direct is Visual Perception?: Some reflection on Gibson's Ecological Approach", *Cognition*, 1981
- [Fragua 1997a] L.A. Fragua, "Mind over Matter", manuscrito no publicado, 1997.
- [Fragua 1997b] L.A. Fragua, "Percepción, Dimensiones y Mente", manuscrito en preparación, 1997.
- [Fu 1987] K. S. Fu, R. C. Gonzalez, C. S. G. Lee "Robotics: Control, Sensing and Intelligence". Mraw-Hill. 1987.
- [Fukunaga 1990] K. Fukunaga, "Introduction to Statistical Pattern Recognition", Academic Press, 1990.
- [Gasós & Martin 1996] J. Gasós & A. Martín, "A fuzzy approach to build sonar maps for mobile robots", *Computers in Industry*, Vol. 32 N° 2, pp. 151-167, 1996.
- [Gasós et al. 1997] J. Gasós & A. Ralescu, "Using imprecise environment information for guiding scene interpretation", *Fuzzy Sets & Systems*, Vol. 88-3, pp. 265-288, 1997
- [Gibson 1986] J.J. Gibson, "The Ecological Approach to Visual Perception", Lawrence Erlbaum Ass., 1986.
- [García-Alegre et al. 1995] M.C. García-Alegre, P. Bustos, D.Guinea, "Complex Behavior Generation on Autonomous Robots: A Case Study", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vancouver, pp. 1729-1734, October 1995.
- [Gombrich, 1972] E. H. Gombrich, "Arte e Illusione", Einaude, Turin, 1972.
- [Gray 1994] J. Gray, "The Contents of Consciousness: A Neuropsychological Perspective", *Behavior and Brain Sciences*, 1994.
- [Gregory 1979] R. L. Gregory, "Eye and brain. The Psychology of Seeing", Princeton University Press, 1979.
- [Grush 1995] R. Grush, "Emulation and Cognition", PhD Thesis, University of San Diego, 1995.

-
- [Grush 1996] R. Grush, "The Architecture of Representation", Philosophical Psychology, 1996.
- [Guinea et al. 1995] D. Guinea, G. Sánchez, P. Bustos & M.C. García -Alegre, "A Distributed Architecture Active Perception in Autonomous Robots", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver, pp. 1740-1745, 1995.
- [Guinea et al. 1996] D. Guinea, "Comportamiento autónomo de robots en entornos con complejidad e incertidumbre", Actas de las Jornadas de Robótica e Inteligencia Artificial, pp. 11-16. Universidad de Alcalá de Henares, 1996.
- [Haar Romeny, 1996] B.M. ter Harr Romeny, "Introduction to Scale-Space Theory: Multiscale Geometric Image Analysis", Technical Report, ICU-96-21, Utrecht University, 1996.
- [Harnard 1993] S. Harnard, "The Frame Problem", Psychology 4[34], 1993.
- [Henderson et al. 1997] J.M. Henderson & A. Hollinworth, "Object recognition is functionally isolated from meaning: Evidence from a change detection paradigm", TR-9-97, Michigan State University, Eye Movement Laboratory, 1997.
- [Hernández 1996] D. Hernández, "Qualitative Distances", COSIT 95-LNCS, Springer, 1995.
- [Hofstadter 1989] D. Hofstadter, "Gödel, Escher, Bach. Un Eterno y Grácil Bucle", 3ª Ed. Tusquets 1989.
- [Hofstadter 1995] D. Hofstadter, "Fluid Concepts and Creative Analogies. Computer Models of the fundamental Mechanisms of Thought", Basic Books 1995.
- [Horswill 1993] I. Horswill, "Specialization of Perceptual Processes", PhD Thesis, AI Lab, MIT 1993.
- [Hutchins 1995] Hutchins, "Distributed Cognition", MIT Press, 1995.
- [Jackendoff 1995] R. Jackendoff, "Languages of the Mind", MIT Press 1995.

-
- [Jaeger 1995] H. Jaeger, "The Dual Dynamics Design Scheme for Behavior-Based Robots: A Tutorial, TR-GMD, 1995.
- [Jeannerod 1994] M. Jeannerod, "The Representing Brain: Neural Correlates of Motor Intention and Imagery", Behavior and Brain Sciences, 7[12] 1993.
- [Khatib et al. 1986] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1 pp. 90-98, Springer 1986,.
- [Kauffmann 1992] S. Kauffmann, "The Origins of Order", Oxford Press, 1993
- [Kauffmann 1995] S. Kauffmann, "At Home in the Universe", Viking 1995.
- [Kelso 1995] J.A. Kelso, "Dynamic Patterns. The Self-Organization of Mind and Behavior", MIT Press 1995.
- [Koch & Devis 1995] C. Koch & J.L. Davis, Eds. "Large-Scale Neuronal Theories of the Brain", MIT Press 1995.
- [Köhler 1967] W. Köhler, "Psicología de la Forma", Biblioteca Nueva, Madrid 1972.
- [Kosecka et al. 1993] J. Kosecka, R. Bacsy, M. Mintz, "Control of Visually Guided Behaviors" GRASP Laboratory TR 367, Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, 1993.
- [Kosecka et al. 1995] J. Kosecka, H. I. Christensen, R. Bacsy, "Discrete Event Modeling of Visually Guided Behaviors", International Journal of Computer Vision, 14, 179-191, 1995.
- [Kosslyn 1994] S.M. Kosslyn, "Image and Brain: The Resolution of the Imagey Debate", MIT Press, 1994.
- [Kower 1995] E. Kower, "Cogito Ergo Moveo: Cognitive Control of Eye Movement", Exploratory Vision, The Active Eye. Springer 1995.
- [Kuipers 1978] B. Kuipers, "Modeling Spatial Knowledge", Cognitive Science 2, 1978.

-
- [Kuipers 1983] B. Kuipers, "Modeling Human Knowledge of Routes: Partial Knowledge and Individual Variation", National Conference on Artificial Intelligence, 1983.
- [Kuipers 1996] B. Kuipers, "A Hierarchy of Qualitative Representations of Space", Working Papers of the Tenth International Workshop on qualitative Reasoning about Physical Systems, AAAI Press 1996.
- [Levitt & Todd 1990] Levitt & Todd, "Qualitative Navigation for Mobile Robots", Artificial Intelligence 44, 305-360, 1990.
- [Lorenz 1978] K. Lorenz, "Fundamentos de Etología", Paidós 1978.
- [Lorigo 1996] L.M. Lorigo, "Visually-Guided Obstacle Avoidance in Unstructured Terrains", MSc Thesis, AI Lab. MIT, 1996.
- [Lozano-Pérez 1987] T. Lozano-Pérez, "Spatial Planning: A Configuration space Approach", IEEE Transactions on Computers. Vol. RA-3, No. 3. 1987.
- [Maes 1993] P. Maes, "Behavior-Based Artificial Intelligence", Proceedings of the Second Conference on Adaptive Behavior, MIT Press, 1993.
- [Malcolm & Smithers 1992] Malcolm and T. Smithers, "Taking Eliminative Materialism Seriously", Proceedings of the First International Conference on Artificial Life, F. Varela & Bourgine [Eds.] 1992
- [Marendaz 1997] J. Marendaz, "La Visión. Una percepción subjetiva", Mundo Científico, Nº 172, Octubre 1996
- [Marr 1982] D. Marr, "Vision", MIT Press, 1992
- [Martínez et al. 1996] O. Martínez, P. Bustos & F. Recio, "Análisis de flujo óptico en imágenes log-polar" TR-GPA IAI-CSIC, 1996
- [Mataric 1989] M. J. Mataric, "Navigation with a Rat Brain", MSc Thesis. AI Lab. MIT 1989
- [Mataric 1994] M.J. Mataric, "Behavior-Based Control: Main Properties and Implications" AI LAB - MIT 1994.

-
- [Mataric 1994] M.J. Mataric, "Interaction and Intelligent Behavior", PhD Thesis, AI-LAB MIT 1994.
- [McCarthy 1958] J. McCarthy, "Formalizing Common Sense", CS Department. Stanford University, 1958. <http://www-formal.stanford.edu/jmc>
- [McCarthy 1990] J. McCarthy, "Artificial Intelligence, Logic and Formalizing Common Sense", CS Department. Stanford University. 1990. <http://www-formal.stanford.edu/jmc>
- [McCarthy 1996] J. McCarthy, "Concepts of Logical AI" CS Department . Stanford University, 1996. <http://www-formal.stanford.edu/jmc>
- [McCulloch & Pitts 1947] W. McCulloch and W. Pitts, "A Logical ", The Philosophy of Artificial Intelligence, Ed. M. Boden, Oxford Press 1990.
- [McDermott 1987] D. McDermott, "A Critique of Pure Reason", en Philosophy of Artificial Intelligence, Ed. M. Boden Oxford Press, 1989
- [McFarland et al 1994] D. McFarland and T. Bösner, "Intelligent Behavior in Animals and Robots", MIT Press, 1993.
- [Miller et al.1969] Miller, Galanter & Pribram, "Plans and the Structure of Behavior" Routledge, 1969
- [Minsky 1986] M. Minsky, "La Sociedad de la Mente", Galápagos, 1986.
- [Munford 1995] D. Munford, "Neuronal Architectures for Pattern-theoretic Problems", en Large-Scale Neuronal Theories of the Brain, Eds: C. Koch & J. L. Davis. MIT Press 1995
- [Murray 1992] D.W. Murray, F. Du, P. F. McLauchlan, I.D. Reid, P.M. Sharkey and M. Brady, "Design of Stereo Heads", Active Vision, Eds. A. Blake and A. Yuille. MIT Press 1992
- [Nehzow 1993] U.T. Nehmzow, T. Smithers and B. McGonigle, "Increasing Behavioral Repertoire in a Mobile Robot", From Animals to Animats 2, MIT Press 1993
- [Newell 1982] A. Newell, "The Knowledge Level", Artificial Intelligence 18, 87-112, 1982.

-
- [Newell 1994] A. Newell, "Unified Theories of Cognition", Harvard University Press, 1994.
- [Newell & Simon 1976] A. Newell & H. Simon, "Computer Science as Empirical Enquiry: Symbols and Search" en M. Boden Ed. "The Philosophy of Artificial Intelligence", Oxford Press 1989.
- [Newell et al. 1957] A. Newell, Shaw & H. Simon, "Empirical explorations of the logic theory machine", Proc. West. Joint Conf. vol. 15, pp.218-239, 1957.
- [Newell et al. 1963] A. Newell, Shaw & H. Simon, "GPS, a program that simulates human thought", En E. A. Feigenbaum & J. Feldman [eds.], "Computers and Thought". McGraw-Hill 1963.
- [Pahlavan 1993] K. Pahlavan, "Active Robot Vision and Oculomotor Processes", PhD Thesis. Royal Institute of Technology, Sweden 1993.
- [Pardo 1997] F. Pardo, "Sensor Retínico Variante con Tecnología CMOS" Tesis Doctoral. Departamento de Informática y Electrónica, Universidad de Valencia, 1997.
- [Payton 1991] D. W. Payton, "Internalized Plans: A Representation for Action Resources", en Designing Autonomous Agents, P. Maes ed. MIT Press, 1991.
- [Penrose 1991] R. Penrose, "The Emperor's new mind", Oxford Press, 1991.
- [Penrose 1994] R. Penrose, "Shadows of the Mind", Oxford Press, 1994.
- [Pfeifer 1992] R. Pfeifer and P. Verschure, "Distributed Adaptive Control: A Paradigm for Designing Autonomous Agents", Toward a Practice of Autonomous Systems. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life, MIT Press 1992.
- [Pierantoni 1979] R. Pierantoni, "El ojo y la idea. Fisiología e historia de la visión", Paidós 1979.
- [Pierce & Kuipers 1997] D. Pierce & B. Kuipers, "Map Learning with Uninterpreted Sensors and Effectors", To appear, Artificial Intelligence Journal, 1997.

-
- [Pylyshyn 1973] Z. Pylysyn, "What the mind's eye tells the the mind's brain?: A critique of mental imageries", *Psychological Bulletin*, vol. 80, No. 1, 1973.
- [Pylyshyn 1994] Z. Pylysyn, "Some Primitive Mechanisms of Spatial Attention", TR-Rutgers University, 1994.
- [Quartz et al. 1996] S. R. Quartz & T. Sejnowsky, "The Neural Basis of Cognitive Development: A Constructivist Manifesto", *Behavior and Brain Sciences*, 1996.
- [Rao et al. 1996] R. Rao & G. J. Zelinsky, "Modelling Saccadic Targeting in Visual Search", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1996.
- [Rao & Ballard 1996] R. Rao & D. Ballard, "The Visual Cortex as a Hierchical Predictor", TR 96.4 Dept. of Computer Science. Univ. of Rochester, 1996.
- [Recio 1997] F. Recio, "Obtención del flujo óptico en imágenes log-polar", TR-IAI-GPA-3, 1997.
- [Riekki & Kuniyoshi 1995] J. Riekki, Y. Kuniyoshi "Architecture for Vision-Based Purposive Behaviors", *IROS* 1995.
- [Ruiz 1994] A. Ruiz, "Applications of Mixture Models to Probabilistic Inductive Inference", TR-DIS 10-1994, Facultad de Informática. Universidad de Murcia.
- [Sandini 1990] G. Sandini & M. Tistarelli, "Vision and Space Variant Sensing", *Neural Networks for Perception*, Vol 1, Academic Press, 1992.
- [Schwartz 1977] E.L. Schawrtz, "Spatial mapping in the primate sensory projection: analytic structure and relevance to perception. *Biological Cybernetics*, 25:181-194, 1977.
- [Schöner et al. 1996] G. Schöner, M. Dose & C. Engels, "Dynamics of Behavior: Theory and Applications for Autonomous Robots Architectures", submitted to *Robotics and Autonomous Systems*, 1996.

-
- [Schneider 1996] M. Schneider, "Planificación basada en percepción activa para la navegación de un robot móvil", Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, 1996.
- [Serradilla & Maravall 1996] F. Serradilla, D. Maravall, "A Navigation System for Mobile Robots using Visual Feedback and Artificial Potential Fields", Proceedings of the thirteenth European Meeting on Cybernetics and System Research. R. Trappl [ed.] 1996.
- [Serradilla 1997] F. Serradilla, "Arquitectura cognitiva basada en el gradiente sensorial y su aplicación a la Robótica Móvil", Tesis Doctoral, Departamento de Inteligencia Artificial. Universidad Politécnica de Madrid, 1997.
- [Simmons 1996] R. Simmons, "Towards Reliable Automous Agents", TR-Robotics Institute, CMU 1996.
- [Steels 1993] L. Steels, "The Artificial Life Roots or Artificial Intelligence", TR-Artificial Intelligence Laboratory, Universidad Libre de Bruselas, 1993.
- [Stein 1996] L.A. Stein, "Post-modular Systems: Architectural Principles for Cognitive Robotics", AI LAB Report, MIT 1996.
- [Steinman 1995] R. M. Steinman, "Moveo Ergo Video: Natural Retinal Image Motion and its Effect on Vision", Exploratory Vision, The Active Eye. Springer 1995.
- [Suchman 1989] L. Suchman, "Plans and Situated Action", Cambridge University Press, 1987.
- [Tsotsos 1990] J. K. Tsotsos, "Analyzing Vision at the Complexity Level", Behavior and Brain Sciences, 13:3, 1990.
- [Tsotsos et al.] J. K. Tsotsos, S. M. Culhane, W. Wai & Y. Lai, "Modeling Visual Attention via Selective Tuning", Artificial Intelligence 78, pp. 507-545,
- [Turing 1937] A. Turing, "On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem", Proc. London Math. Soc. 43: 544, 1937,
- [Ullman 1984] S. Ullman, "Visual Routines", Cognition 18, pp. 97-159, 1984.

-
- [Ullman 1995] S. Ullman, "High Level Visión" MIT Press, 1995.
- [Uriagereka 1996] J. Uriagereka, "Warps: some thoughts on categorization", Cuadernos de Lingüística del I.U. Ortega y Gasset, 1996.
- [Vicente 1995] J. Vicente, "Desarrollo de un controlador multimotor para aplicaciones en robótica", Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicación, U.P.M., 1995.
- [van der Heijden 1992] A.H.C. van der Heijden, "Selective Attention in Vision", Routledge 1992.
- [Varela 1992] F. Varela, "El árbol del conocimiento", Debate, 1992.
- [Walker 1987] Walker, "Animal Learning", Routledge & Kegan Paul, 1987.
- [Walter 1975] W. G. Walter, "El cerebro viviente", Fondo de Cultura Económica, México 1975.
- [Weiman & Chaikin 1975] C.F.R. Weiman & G. Ghaikin, "Logarithmic Spiral Grids form Image Processing and Display", Computer Graphics and Image Processing, 11, 197-226, 1979.
- [Young et al. 1998] G. Young, M. Herman, T. Hong, D. Jiang and J. Yang, "New Visual Invariants for Terrain Navigation without 3D Reconstruction", Aparecerá en International Journal of Computer Vision, 1998.
- [Zeki 1995] S. Zeki, "A Vision of the Brain", Blackwell Scientific Publications, Oxford 1993.
- [Zimmer 1996] U. R. Zimmer, "Robust World Modelling and Navigation in the Real World", Neurocomputing 1996.

