

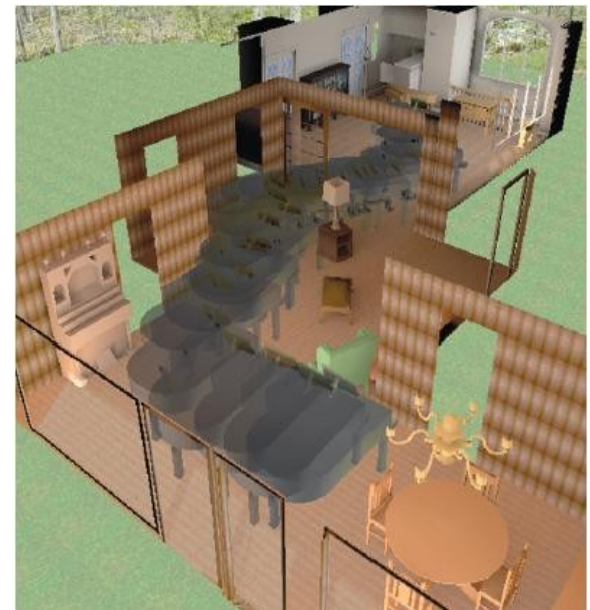
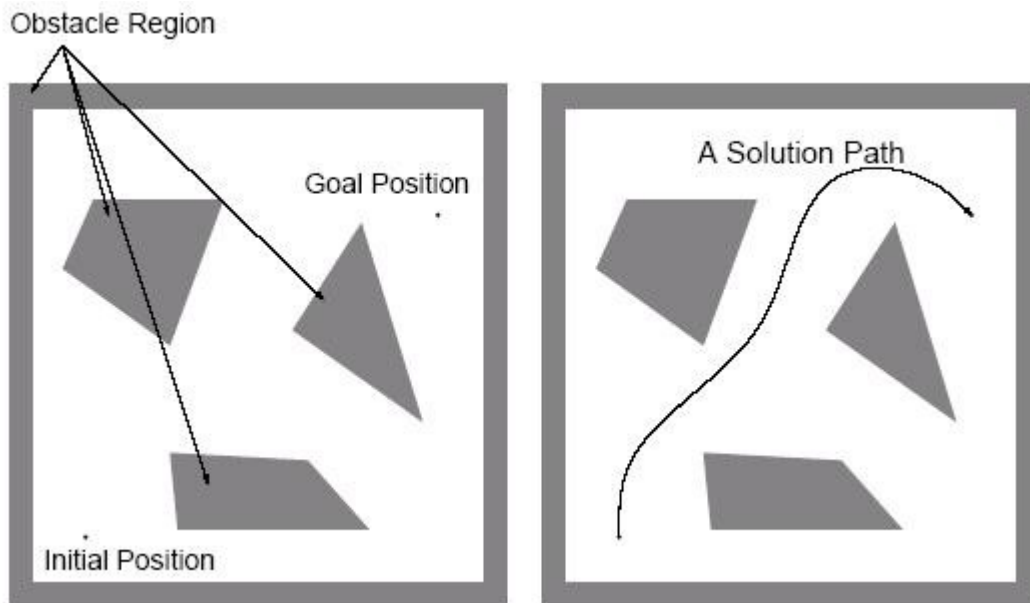
Fundamentos de la robótica autónoma

Navegación

Facultad de Ingeniería
Instituto de Computación

Contenido

- Introducción
- Planificación de trayectoria topológica
- Planificación de trayectoria métrica
- Control de movimiento



Introducción (1/2)

- Habilidad crítica para robots móviles.
- Es la función que presenta más desafíos.
 - Sensado
 - Actuación
 - Planificación
 - Arquitectura
 - Hardware
 - Eficiencia computacional
 - Resolución de problemas

Introducción (2/2)

- Los robots reactivos pueden moverse en el mundo sin colisiones.
- La navegación requiere de deliberación.
- Técnicas:
 - Topológica o cualitativa.
 - Métrica o cuantitativa.

Definición

- Gallister (Gallistel, 1993) define a la navegación como la capacidad de **planificar y ejecutar caminos** dirigidos por **objetivo**, y es visto como la forma en que se enlazan posiciones distintivas generalmente etiquetadas por marcas.

Cuatro preguntas

- La navegación puede ser expresada por cuatro preguntas.
 - ¿A dónde debo ir?
 - ¿Cuál es la mejor forma de llegar?
 - ¿Dónde he estado?
 - ¿Dónde estoy?

¿A dónde debo ir?

- Determinado por un humano o un planificador de misión.
- En general no se incluye dentro del problema de navegación.

¿Cuál es la mejor forma de llegar?

- Este problema se conoce como planificación de trayectorias (path planning).
- Los métodos de planificación de trayectorias se clasifican en:
 - Topológica o cualitativa.
 - Métrica o cuantitativa.

¿Dónde he estado?

- Construcción de mapas.
- Entornos no explorados.
- Mejorar el desempeño aún cuando no cambia el entorno.
 - Fin de una clase.
 - Hora del almuerzo.
- Adaptarse a cambios en el entorno
 - Nuevas paredes.
 - Movimiento de muebles.

¿Dónde estoy?

- Localización.
- Para poder seguir una trayectoria o construir un mapa es necesario saber donde se está.
- La localización puede ser:
 - relativa al entorno (en el centro del cuarto)
 - en coordenadas topológicas (en el cuarto 2)
 - en coordenadas absolutas (latitud, longitud y altitud)

Ejemplos

- Robots guías en museos.
 - Rhino
 - Minerva



Criterios para evaluar planificadores

- Complejidad: espacio y tiempo.
- Representación del terreno: Regular, arena o lodo, e inclinación.
- Representación de las limitaciones físicas del robot
 - Holonómico.
 - Robots no circular.
- Compatible con la capa reactiva.
- Soporte para la corrección de mapas y re-planificación.

Incertidumbre en los sensores

- La navegación se estudia desde 1960 pero recién a principio de los 90s aparecen robots con características de sensado y capacidad de computo razonable.
- Por este motivo los primeros trabajos se desarrollaron sobre simulaciones.
- Se asume en estos casos que:
 - El robot puede localizarse.
 - Los sensores pueden dar una representación precisa del entorno.

Paradigmas robóticos

- La planificación es deliberativa.
- Construir mapas y la localización requieren de memoria y rotular lugares específicos (símbolos: cuarto, hall, puente).
- ¿Cómo voy a llegar a ese lugar?
Usando comportamientos.

Memoria espacial (1/3)

- La representación del mundo se denomina memoria espacial.
- La memoria espacial es el corazón del cartógrafo.
- La memoria espacial debe proporcionar métodos y estructuras de datos para poder procesar y almacenar la información sensorial.
 - Atravesar el hall hasta la cuarta puerta roja sobre la derecha.

Memoria espacial (2/3)

- Funciones soportadas:
 - Atención: Qué características o marcas (landmarks) debo encontrar a continuación?
 - Razonamiento: Puede esa superficie aguantar mi peso?
 - Planificación de trayectorias:Cuál es la mejor forma de atravesar este espacio?
 - Recolección de información:
 - Cómo luce este lugar?
 - Lo he visto antes?
 - Algo ha cambiado desde la última vez?

Memoria espacial (3/3)

- La memoria espacial toma dos formas:
 - Rutas (Route) o cualitativa
 - Layout o métrica

Route o cualitativa

- La representación cualitativa expresa el espacio en términos de conexiones entre marcas.
- Ejemplo: Dos cuadras derecho, luego a mano izquierda hasta el almacén y desde la esquina media cuadra a la derecha.
- Las señales de orientación son egocéntricas.

Layout o métrico

- Cuando se utiliza un mapa, el mapa es el esquema (layout) del entorno.
- Se llama métrico pues en general el mapa está hecho en una determinada escala (permite estimar la distancia).
- Ojo de pájaro y no depende de la perspectiva del agente.
- El agente debe luego traducir el mapa en características a ser sensadas.
- Los mapas contienen información extra, permitiendo generar rutas alternativas.

Cuanto representar

- Eficiencia y precisión necesaria.
- Pueden tomarse rutas sub-optimas?
- Cuáles son las características del entorno?
- Se conocen las distancias de manera precisa?
- De dónde se obtiene información del terreno, tipo de superficie y obstáculos?
- Cuáles son las propiedades de los sensores en ese entorno?

Planificación de trayectorias Topológica

Introducción

- La navegación topológica o cualitativa es en general vista como más simple o natural para un robot y en los humanos.
- No necesita de un mapa pues en las instrucciones de navegación está la información que necesita para resolver el problema.

Representación de rutas

- Relacional, usan presentación tipo grafo.
- Asociativas, acoplan sensado con localización y sensado con actuación.

Landmarks y Gateways (1/2)

- Una marca (landmark) es una o más características de interés perceptualmente distintiva sobre un objeto o lugar de interés.
 - Puerta roja.
 - Centro comercial.
 - Monte de pinos.
- Si se encuentra una marca en el mundo y en el mapa entonces el robot se localiza en él.

Landmarks y Gateways (2/2)

- Si el robot planifica un camino formado por una lista de segmentos es necesario encontrar marcas para avanzar en los segmentos.
- Si el robot encuentra una marca debe agregarla a la memoria espacial, creando o extendiendo el mapa.
- Un gateway es una oportunidad donde el robot puede cambiar su dirección.
- Los gateway son oportunidades de navegación por lo que reconocerlos es crítico para la localización, planificación y construcción de mapas.

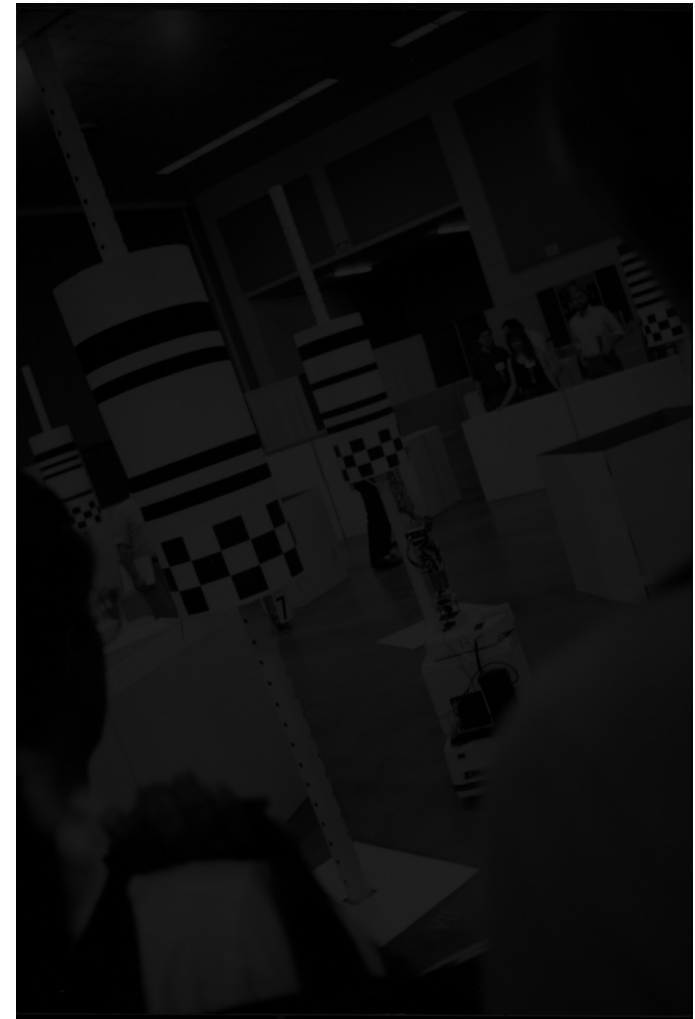
Tipos de marcas

- **Artificiales**
 - Conjunto de características agregadas a un objeto para soportar su reconocimiento u otra actividad sensorial.
- **Naturales**
 - Configuración de características existentes que son seleccionadas para el reconocimiento pero no fueron expresamente diseñadas para la actividad sensorial

Criterios para marcas

- Ser fácilmente identificables
 - Pasiva
 - Perceptible en el rango de acción del robot.
 - Características distintivas al menos en un entorno (vecindario).
- Perceptible para la tarea
 - Extraer la orientación relativa.
 - Marca el camino de manera no ambigua.
- Ser percibida desde distintos puntos de vista.

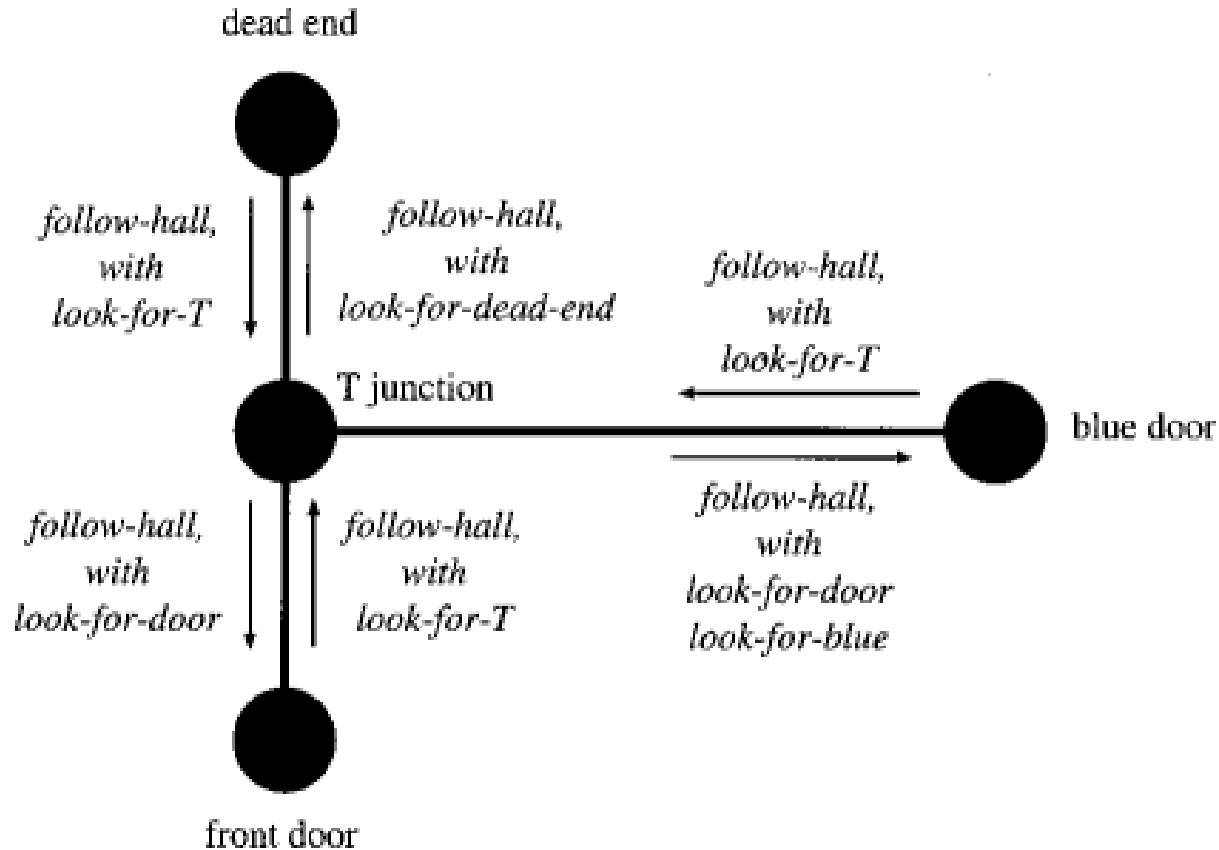
Entornos y marcas



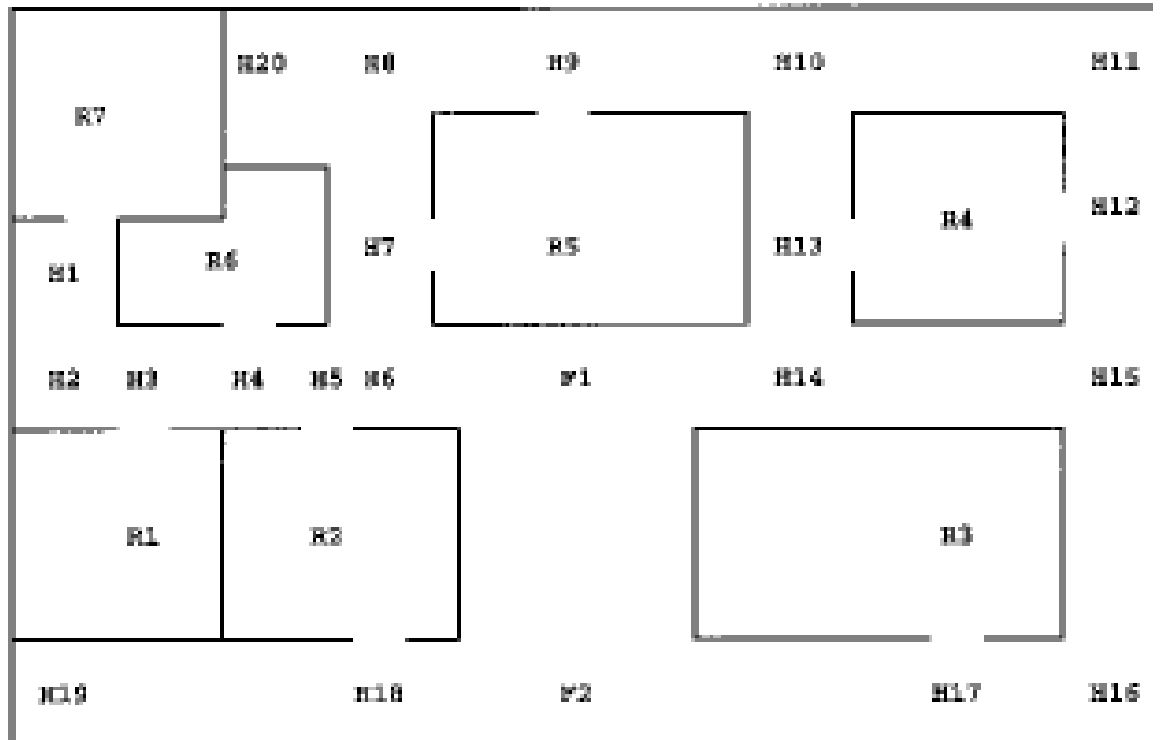
Métodos relacionales

- Los métodos relacionales representan al mundo como un grafo donde los nodos son gateways, marcas o objetivos. Las aristas representas un camino navegable entre dos nodos y efectivamente estos tienen una relación espacial.
- Información en las arista:
 - Orientación (N,S,E,O).
 - Distancia aproximada.
 - Tipo de terreno.
 - Comportamientos necesarios para navegarla.

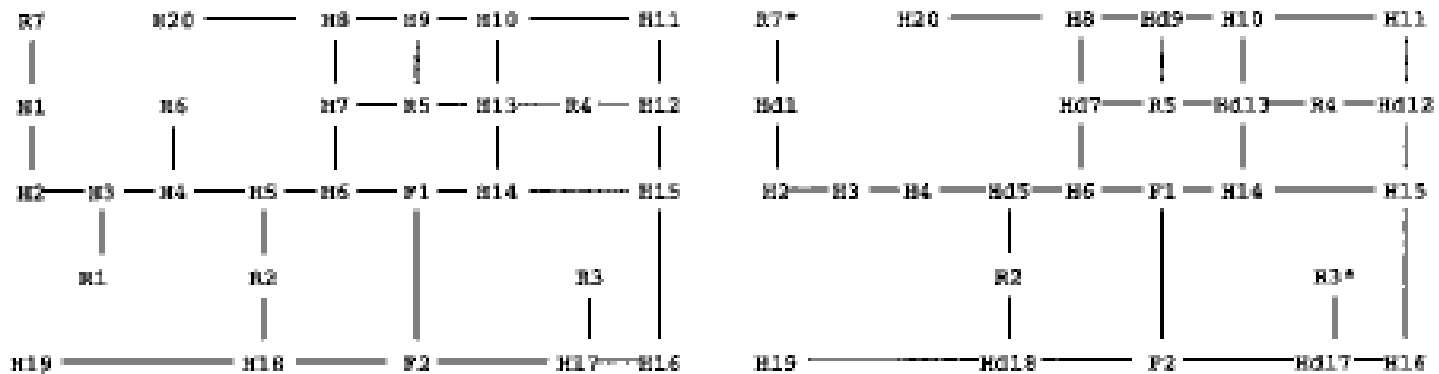
Ejemplo relacional (1/3)



Ejemplo relacional (2/3)



Ejemplo relacional (3/3)

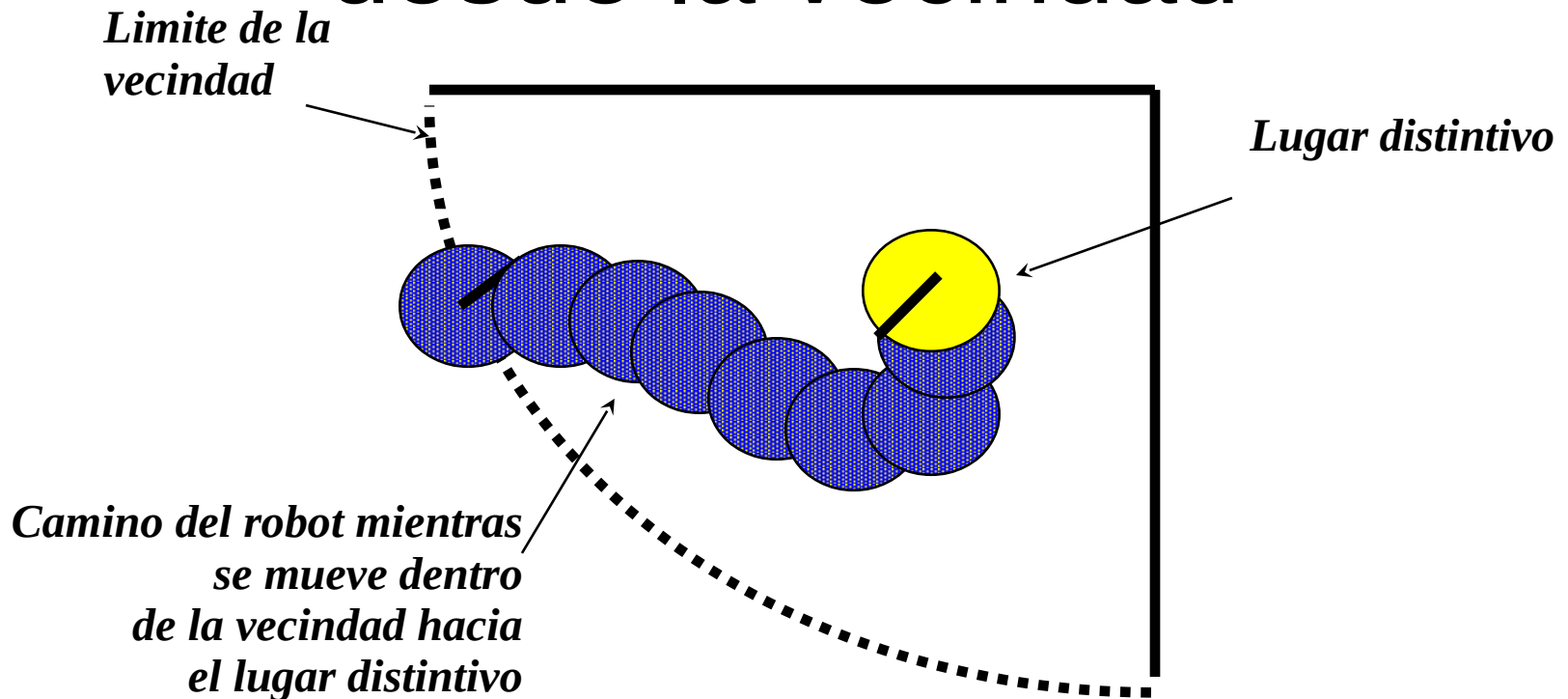


	To			
From	H	F	R	H
H	Navigate-hall	Navigate-hall	Undefined	Navigate-hall
F	Navigate-hall	Navigate-foyer	Navigate-door	Navigate-hall
R	Undefined	Navigate-door	Navigate-door	Navigate-door
Hd	Navigate-hall	Navigate-hall	Navigate-door	Navigate-hall

Lugar distintivo

- El vecindario de una marca es una región cercana a ella desde la cual el robot puede observarla.
- El punto donde los valores característicos de la marca son maximizados se denomina lugar distintivo (nodo del grafo).
- Ubicado en el vecindario y usando un algoritmo de búsqueda local el robot puede llegar al lugar distintivo.

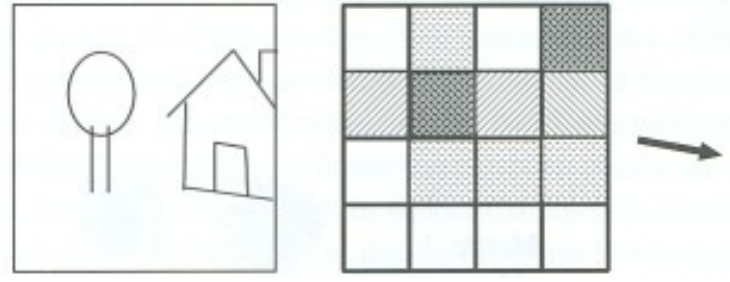
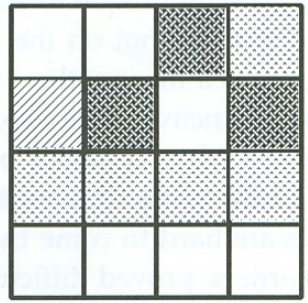
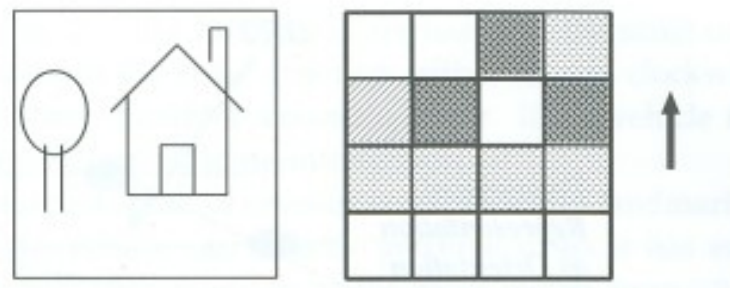
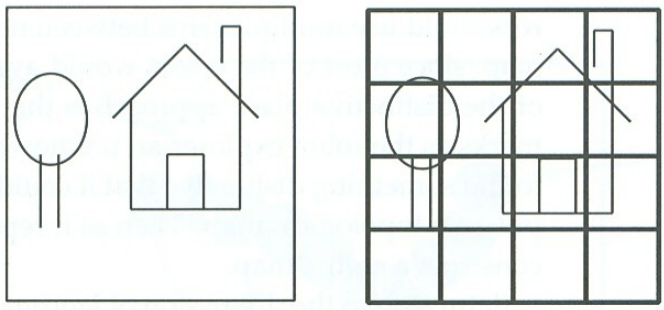
Alcanzando el lugar distintivo desde la vecindad



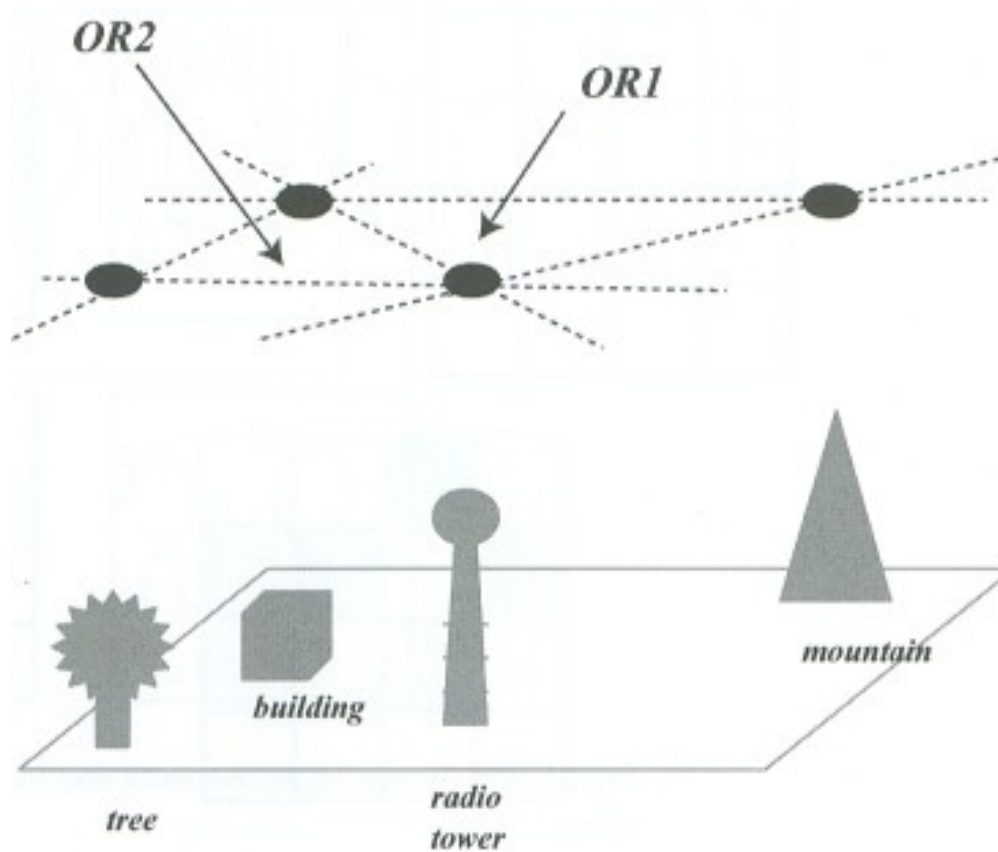
Métodos asociativos

- Los métodos asociativos esencialmente crean un comportamiento que convierte las observaciones sensoriales en direcciones para alcanzar determinada marca.
- Ejemplos:
 - Visual homing
 - QualNav

Visual Homing - Image Signatures



QualNav



Planificación de trayectorias métrica o navegación cuantitativa

Introducción (1/2)

- En general, los métodos métricos tratan de producir trayectorias óptimas.
- Los métodos topológicos se conforman con generar una trayectoria basada en marcas o gateways.
- Las trayectorias métricas se descomponen en waypoints ubicados en una posición fija o coordenada (x, y) .

Introducción (2/2)

- Estoy waypoints no se corresponden a un objeto o marca del mundo.
- Los planificadores de trayectorias primero particionan el mundo en una estructura manejable por los algoritmos.
- Existen dos clases de algoritmos:
 - Los que usan búsqueda.
 - Los que usan coloreado de grafos.

Espacio de configuración (1/2)

- Un espacio de configuración (Cspace) es una estructura de datos que permite al robot especificar la posición de los objetos y él mismo en el mundo.
- Típicamente los algoritmos trabajan con espacio de configuración de dos grados de libertad (en lugar de seis) y robots holonómicos.
- Ejemplos: diagramas de Voronoi, grillas regulares y Quadtrees.

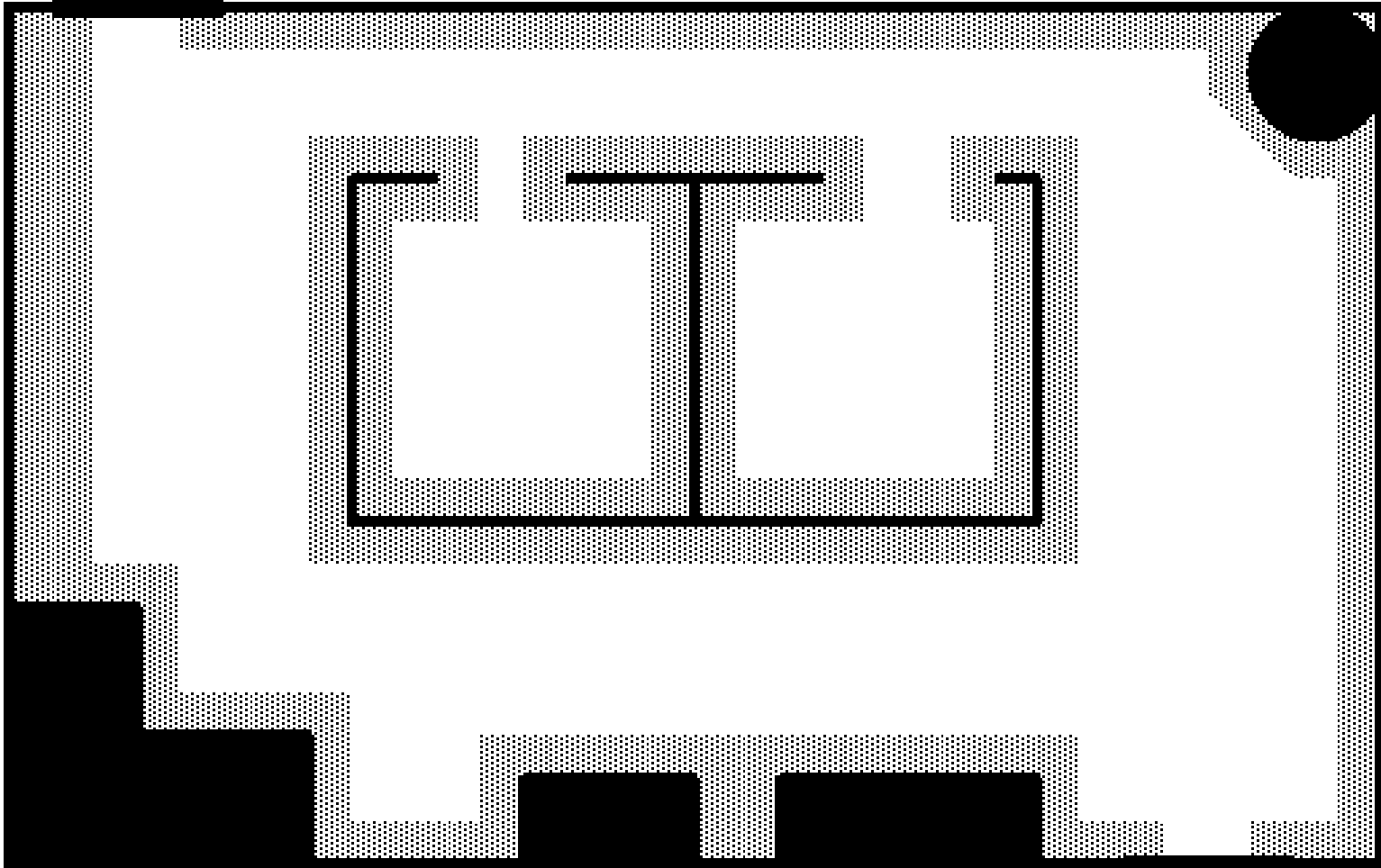
Espacio de configuración (2/2)

- Cada espacio libre de objetos se denomina espacio libre.
- Las diferentes representaciones ofrecen formas distintas de particionar los espacios libres.
- En los espacios libres el robot puede moverse sin colisionar contra los objetos modelados.

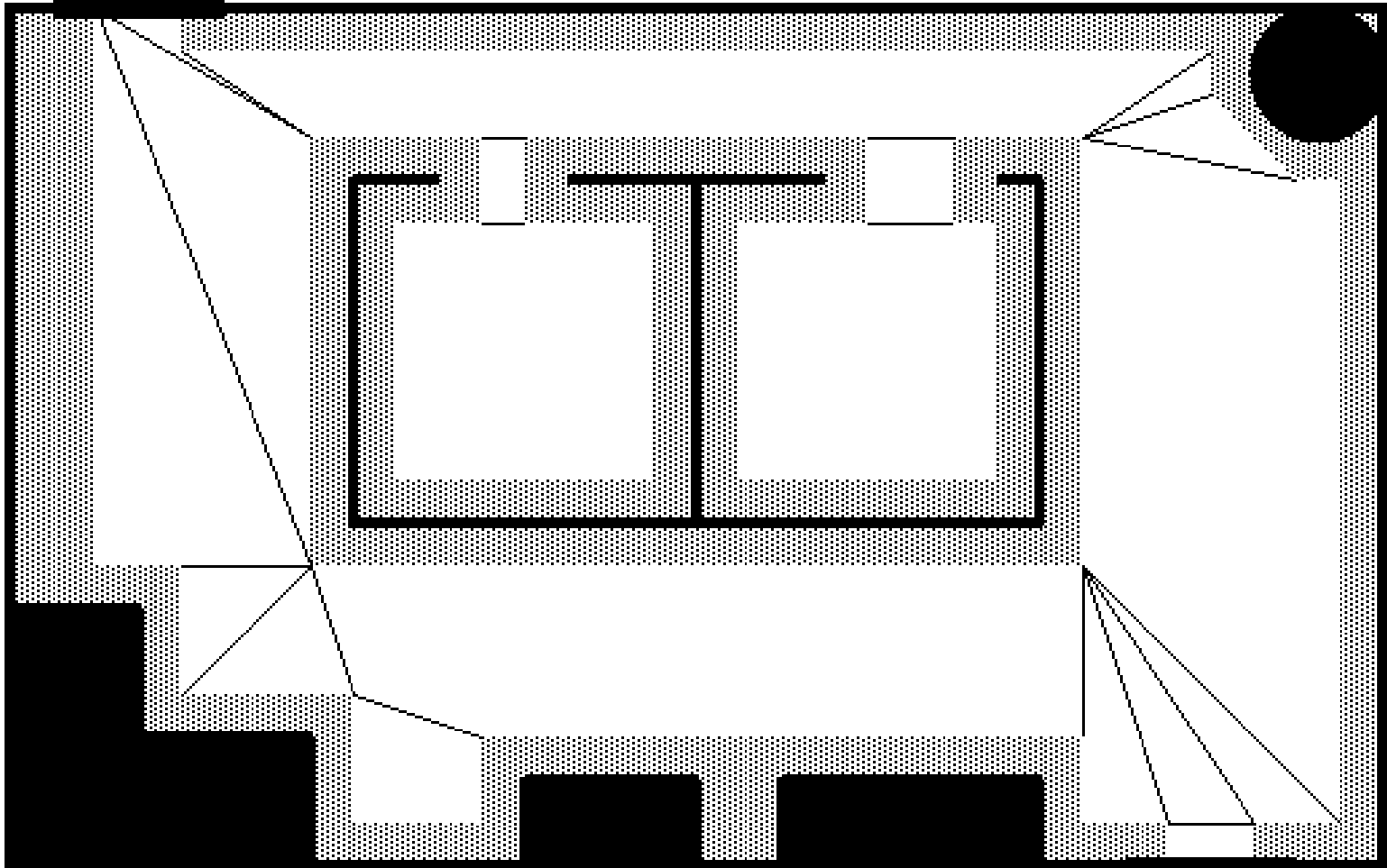
Meadow Maps

- Se transforma el espacio libre en polígonos convexos.
- Si el robot se mueve el línea recta entre puntos del polígono se mantendrá dentro de éste.
- El algoritmo debe encontrar la mejor secuencia de polígonos a transitar.
- El primer paso del algoritmo es incrementar el tamaño de todos los objetos por el tamaño del robot.

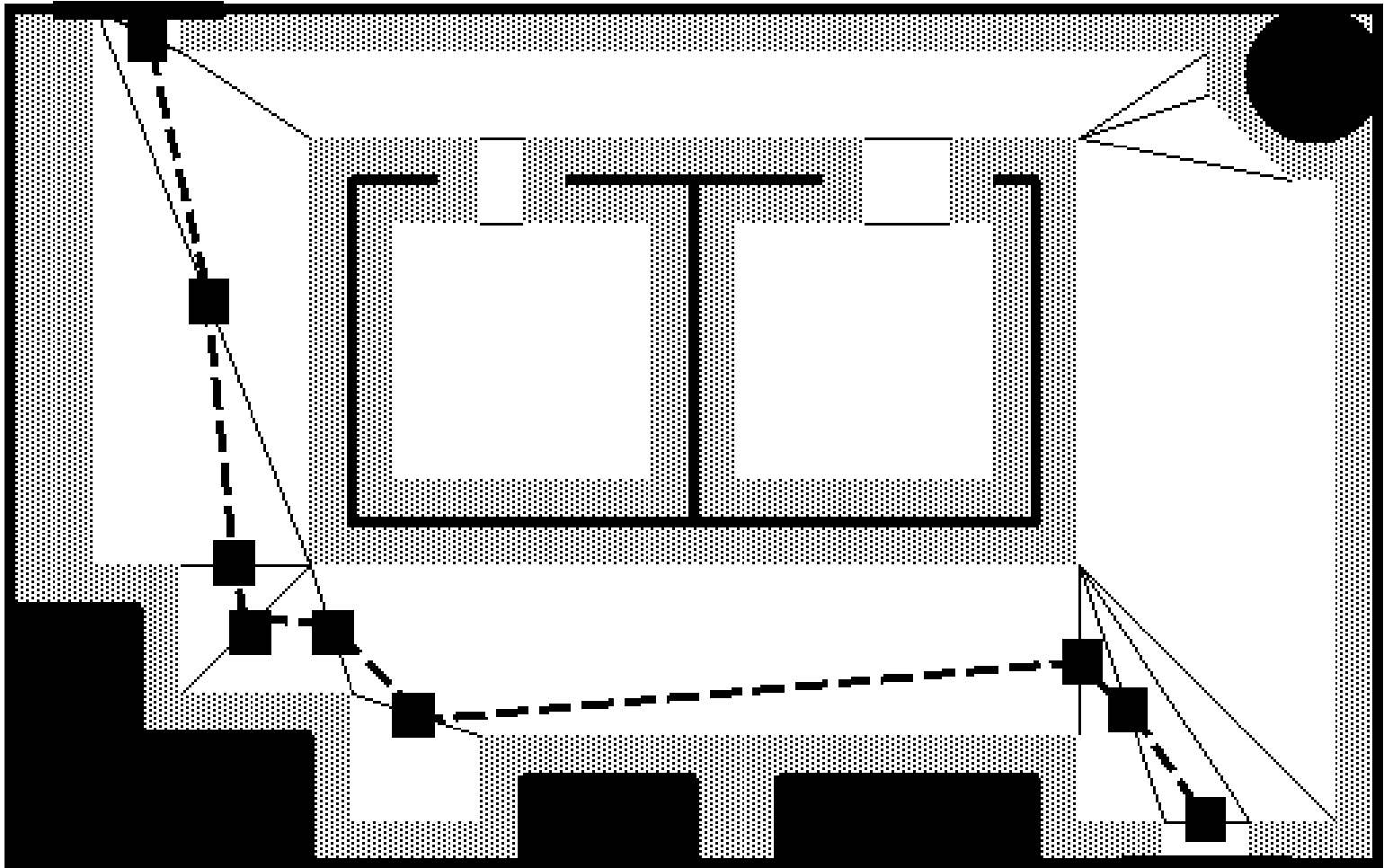
Expandir los obstáculos



Polígonos convexos



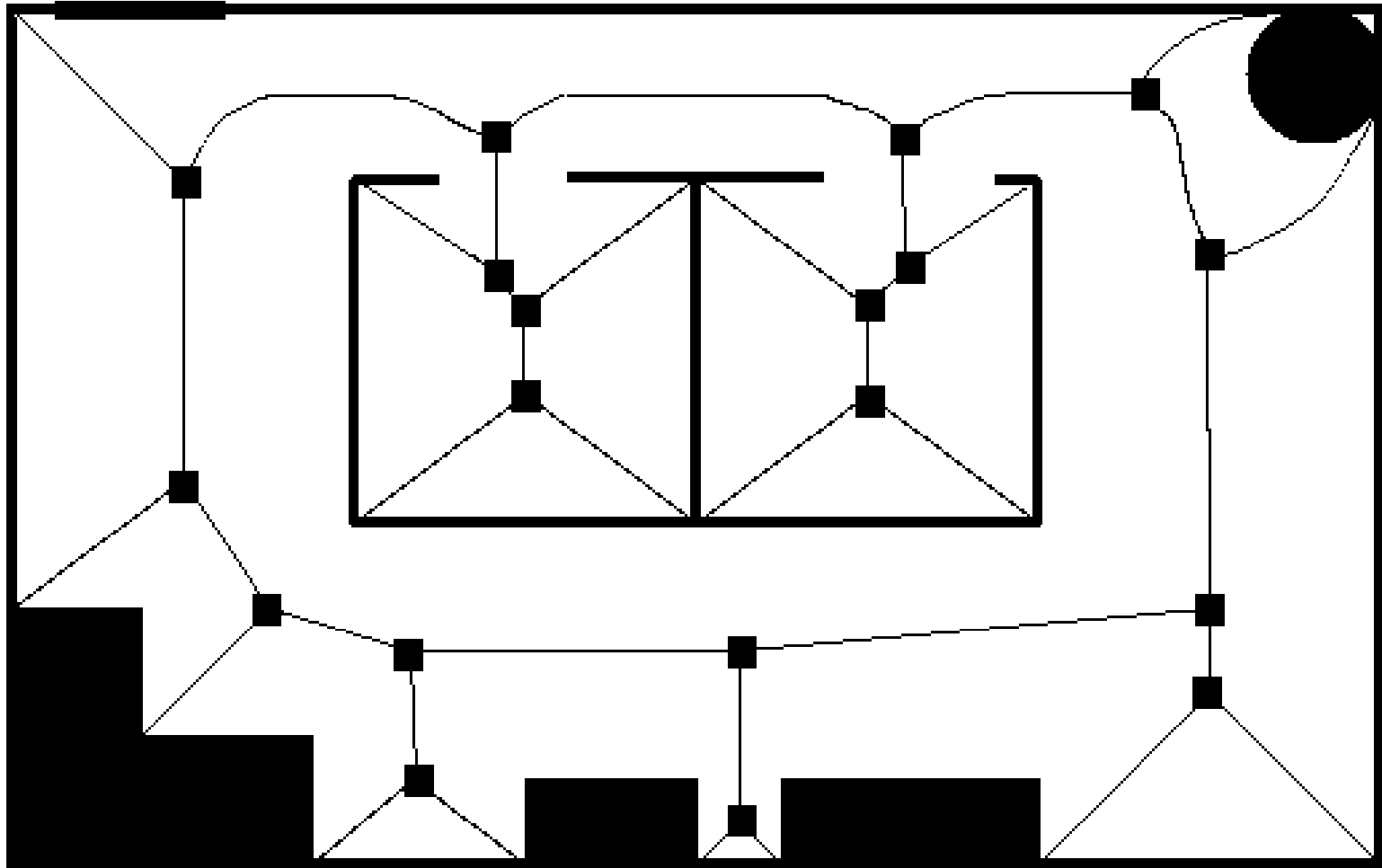
Planificar trayectoria



Grafos de Voronoi

- La idea de los grafos de Voronoi es generar una línea equidistante de todos los puntos.
- Los vértices se determinan por la intersección de líneas de Voronoi.

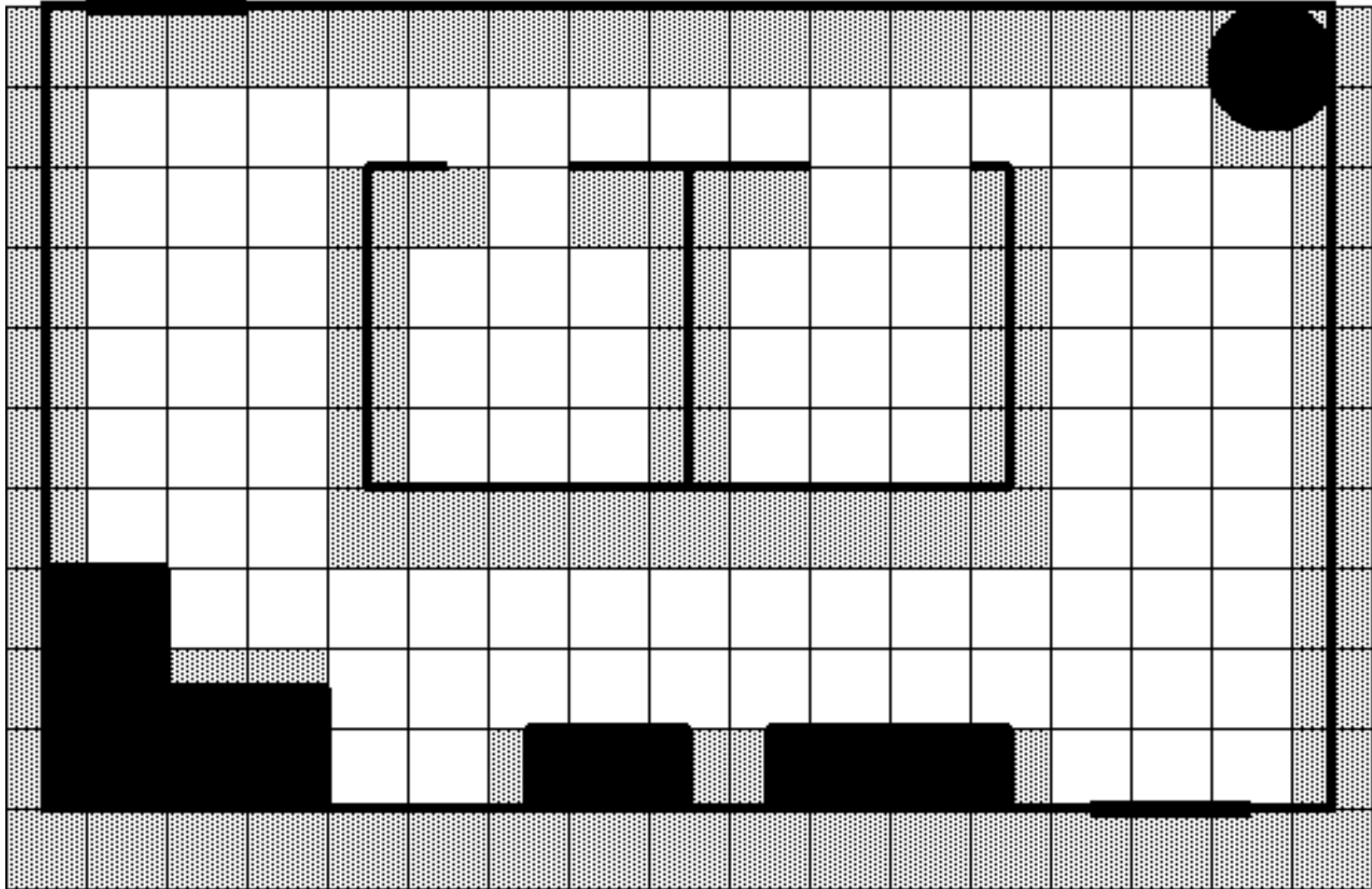
Grafo de Voronoi



Grillas regulares (1/2)

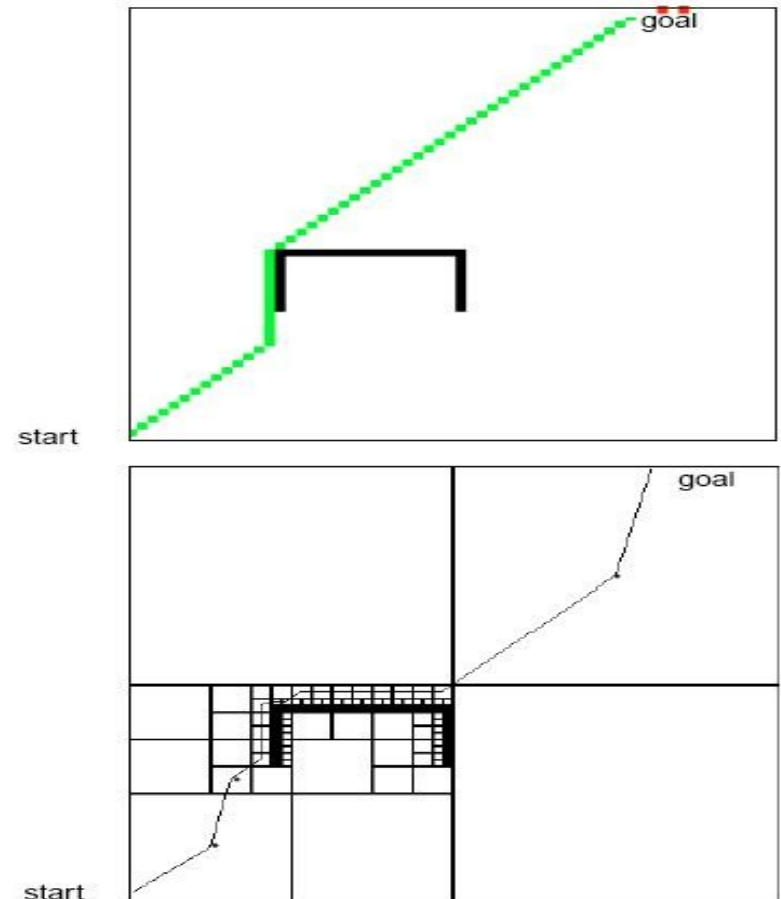
- Se particiona el entorno usando una grilla regular.
- Si algún objeto cae en una celda se marca a ésta como ocupada.
- Luego el centro de la grilla se transforma en un nodo y se consideran 4 u 8 conexiones.

Grillas regulares (2/2)



Quadrees

- Para evitar el desperdicio de espacio cuando se usan grillas regulares y mantener la memoria y el cómputo manejable.
- Se comienza con celdas grandes y si se encuentra un objeto dentro de ella se parte la celda en cuatro. Esto se repite hasta alcanzar un tamaño de celda mínimo.



Planificadores basados en grafos

- Los CSpaces pueden ser convertidos a grafos.
- Algoritmos de búsqueda en grafos
 - Búsqueda primero en anchura
 - Búsqueda primero en profundidad
 - Búsqueda de profundidad limitada
 - Búsqueda primero en profundidad con profundidad iterativa
 - Búsqueda bidireccional.

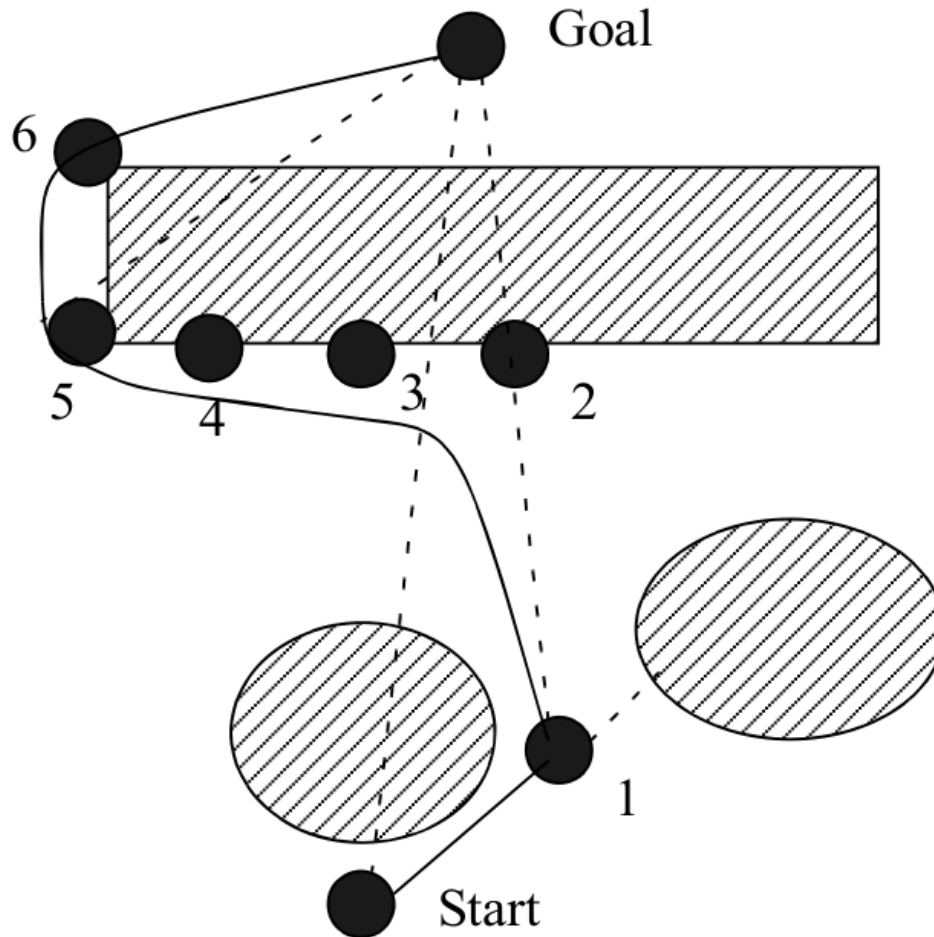
Planificación local

- Potential Field.
- Wandering Standpoint
- DistBug

Wandering Standpoint

- Intenta alcanzar el objetivo en línea recta desde su posición.
- Cuando encuentra un obstáculo calcula el ángulo para evitarlo por la izquierda y el ángulo por la derecha, y gira basado en el menor ángulo.
- Continúa utilizando un comportamiento de seguimiento de borde alrededor del obstáculo hasta que la dirección al objetivo quede despejada nuevamente.

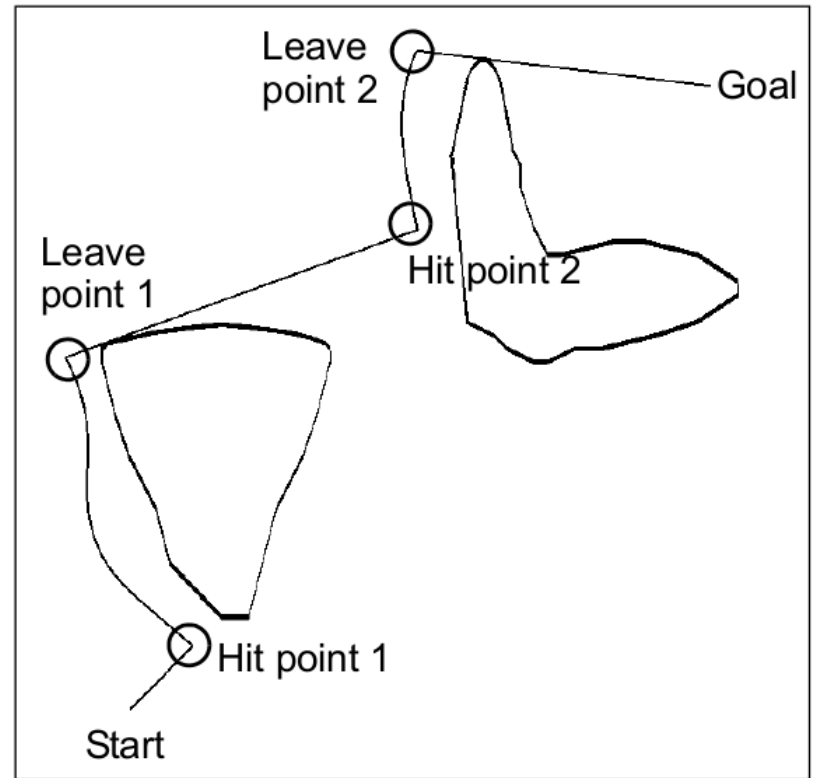
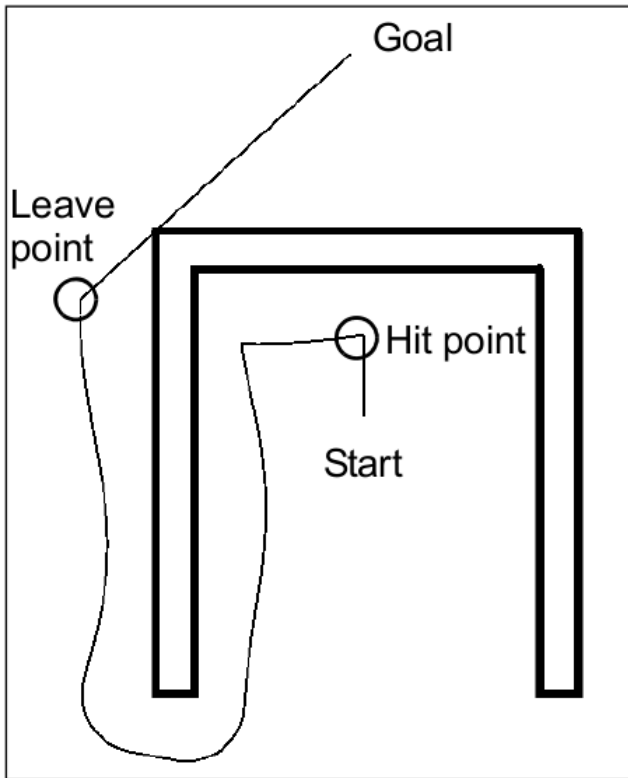
Ejemplo



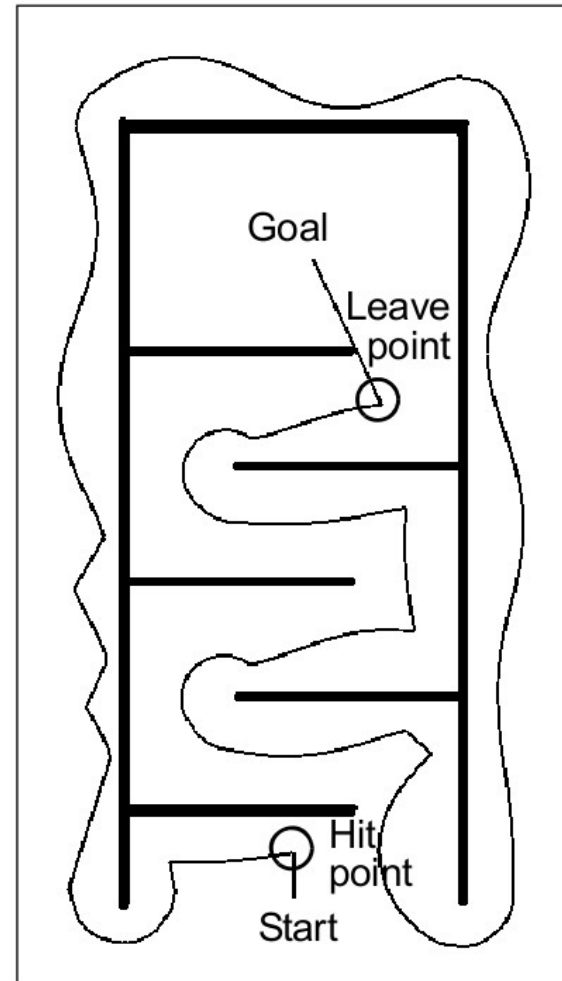
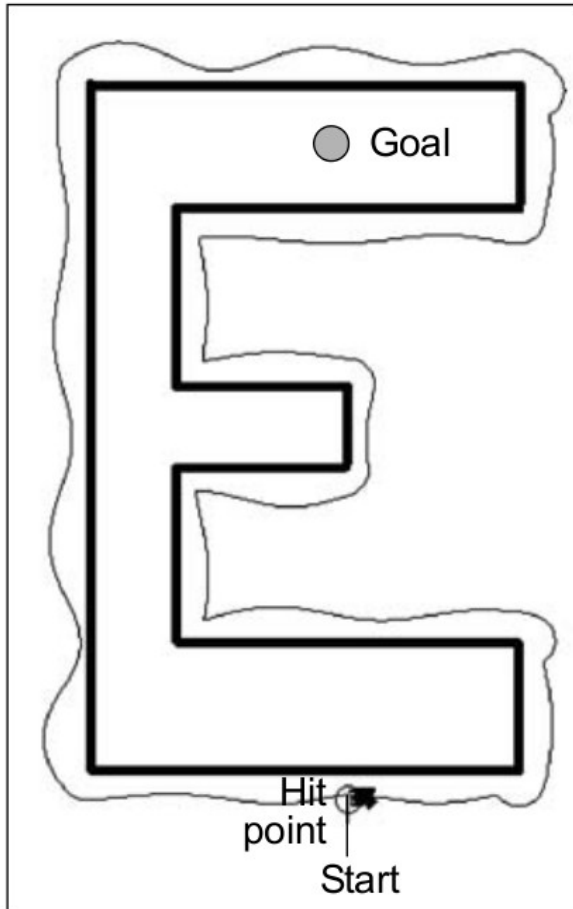
DistBug

- Intenta alcanzar el objetivo en línea recta desde su posición cuando sea posible, en caso contrario gira a la izquierda y utiliza un comportamiento de seguimiento de borde alrededor del obstáculo.
- Deja de bordear solo si el objetivo es directamente alcanzable o el próximo punto de choque lo “acerca al objetivo” ($d(X, G) - F \leq d_{\min}(G) - \text{Step}$). X , posición actual. F (free), distancia al próximo objeto en dirección a G . d_{\min} , mínima distancia a G registrada desde el último hit point. Step , constante a ajustar.
- Si el algoritmo lleva al robot al mismo punto de colisión con el obstáculo, entonces el objetivo es inalcanzable.

Ejemplo



Ejemplo complejo



Control de movimiento

Control de movimiento

- El control se vale únicamente de la configuración actual del robot y de la configuración objetivo.
- El control calcula las próximas velocidades de las ruedas para permitirle avanzar un paso hacia el objetivo.
- La sucesión de todos los pasos, desde que comenzó hasta que terminó la aplicación del control, determina la trayectoria realizada por el robot.

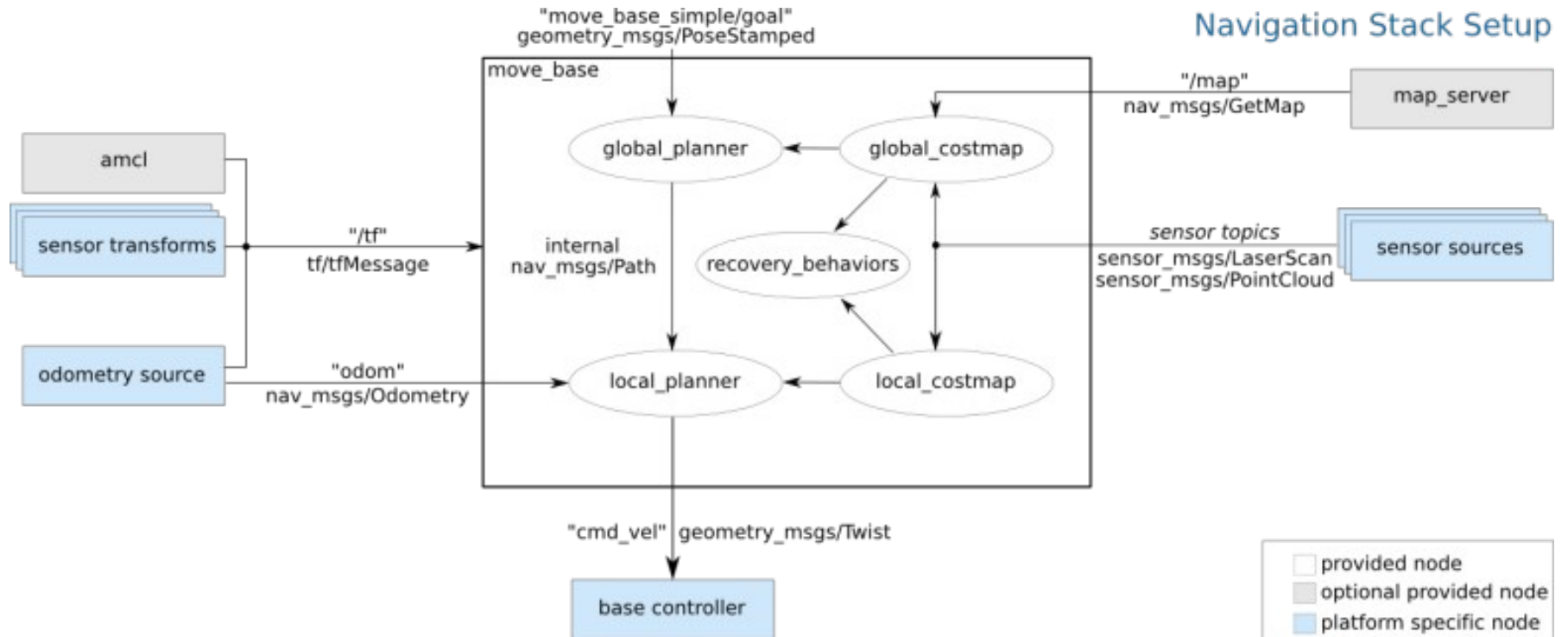
Control Direct

$$(v_l, v_r) = \begin{cases} (MaxVel + f(\alpha), MaxVel) & si \quad \alpha < 0 \\ (MaxVel, MaxVel - f(\alpha)) & si \quad \alpha \geq 0 \end{cases}$$

$f: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$ una función de normalización del ángulo alfa.

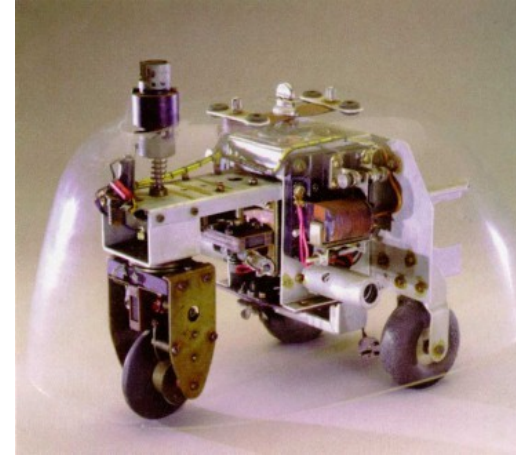
Stack de navegación de ROS

Nodo move_base



Biorrobótica

- Biorrobótica puede definirse como la intersección de la robótica y la biología.
- Entender la biología para construir robots.
- Construir robots para entender a la biología.
- Tanto los robots como los animales deben moverse en el mundo real utilizando sensores y actuadores.
- 1940s Gray Walter desarrollo dos tortugas robóticas llamadas Elsie y Elmer.



Motivación

- La evolución ha producido una gran variedad de organismos inteligentes desde insectos a humanos.
- Comparados con los robots estos organismos son mucho más flexibles y eficientes en su control.
- Características: agilidad, robustez y adaptabilidad.

Señales internas y externas

- Dos estrategias diferentes son usadas por los animales para navegar, las marcas y la integración de trayectorias.
- La navegación por marcas ocurre cuando el animal deriva su posición y dirección actual en el entorno relativa a las marcas que tiene a su alrededor (señales externas – allotheric).
- La integración de trayectorias (dead reckoning), se toma en cuenta la posición y orientación inicial, y a partir de éstas estima su posición y orientación actual mediante la integración de información de auto-movimiento interno (señales internas - idiothetic).

Historia

- 1940s, Gray Walter desarrollo dos tortugas robóticas.
- 1948, Tolman argumenta sobre mapas cognitivos.
- 1970s, descubrimiento de celdas de lugar y primeros trabajos en navegación.
- 1984, descubrimiento de celdas de posición de la cabeza.
- 2006, descubrimiento de celdas grilla.
- 2008, descubrimiento de celdas borde.

Cognición espacial

- Representación mental del entorno construida por el cerebro, utilizada para localizarse y planificar movimientos futuros.
- Involucra aprendizaje, memoria y razonamiento.
- El termino fue usado por primera vez en 1948 por Edward Tolman.
- Las celdas de navegación encontradas en el cerebro codifican de manera selectiva algún aspecto de posición y/o orientación, mientras son invariantes a los otros.

Celdas de lugar (1/3)

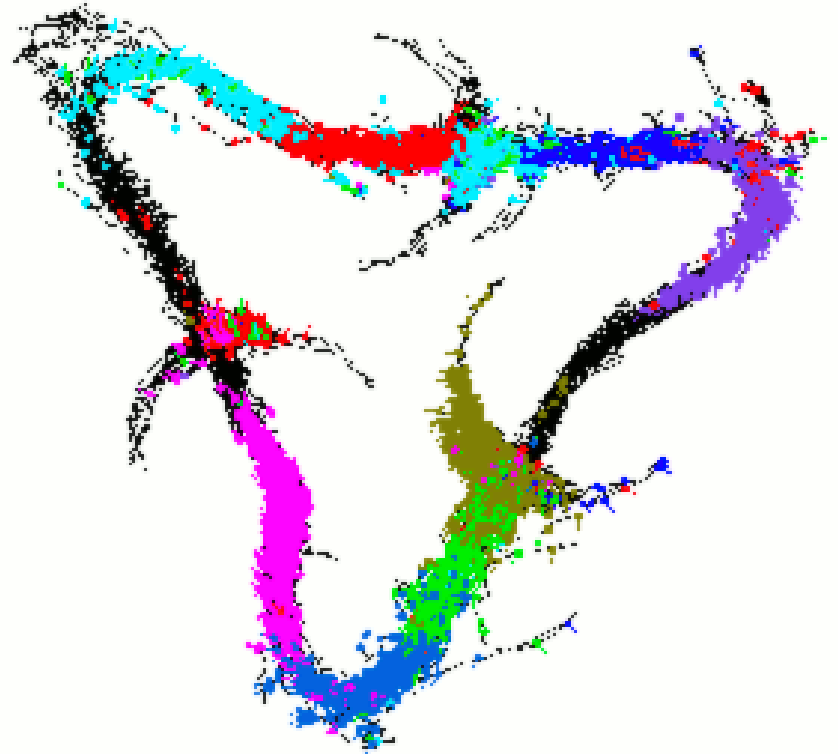
- Observadas a principios de 1970s por O'Keefe y Dostrovsky.
- Se activan en una posición particular del entorno.
- Son neuronas en el hipocampo que presentan una razón alta de disparo cuando el animal se encuentra en una posición específica del entorno.
- Las señales visuales parecen ser el principal determinante de los disparos de las celdas de lugar.
- Los disparos persisten en la oscuridad.

Celdas de lugar (2/3)

- Celdas cercanas anatómicamente no necesariamente definen campos de lugar cercanos en el entorno.
- Frente a un nuevo entorno, los campos de lugar se establecen en algunos minutos. Los campos de lugar de una celda tienden a mantenerse estables en sucesivas exposiciones al mismo entorno.
- En un entorno diferente una celda puede tener un campo de lugar totalmente diferente o no tener campo de lugar.
- Se encuentran en el estriado dorsal, estrato ventral, corteza parietal posterior, corteza entorrinal, culiculus superior, septun lateral, parasubiculum y subiculum.

Celdas de lugar (3/3)

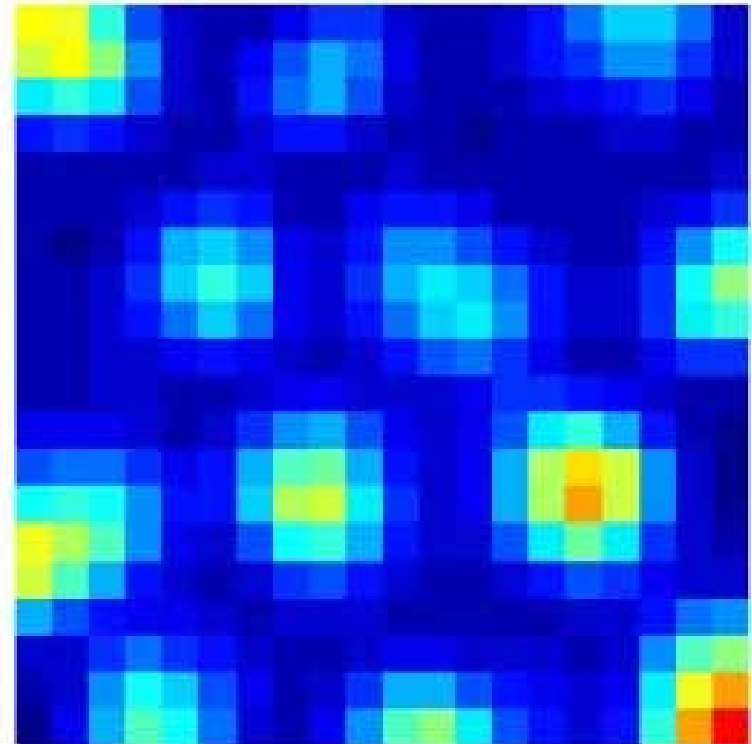
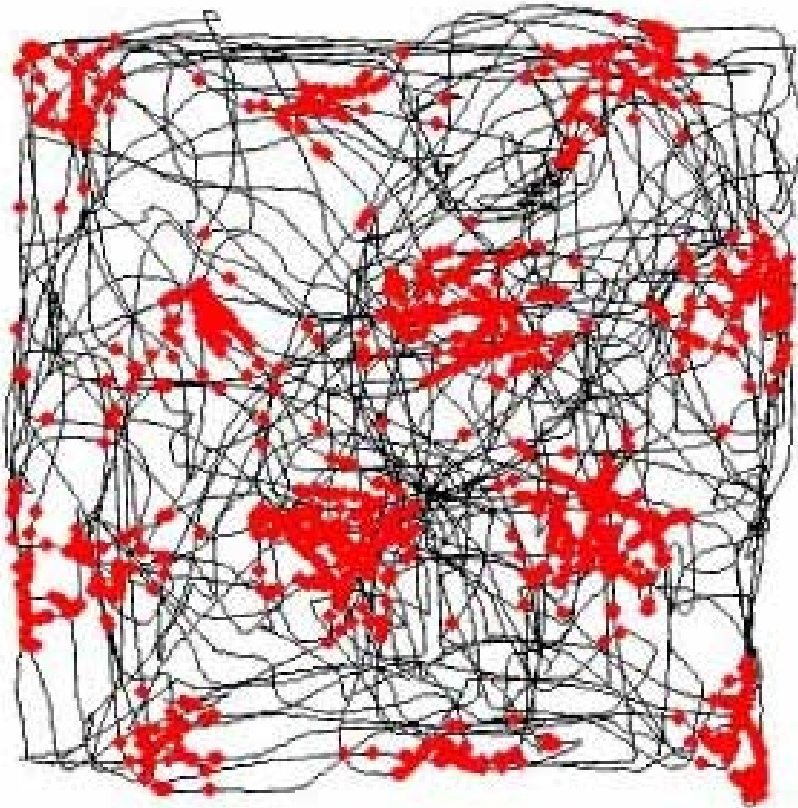
- Laberinto triangular.
- Cada color identifica una neurona.
- Se muestra el lugar en el laberinto donde se activa.



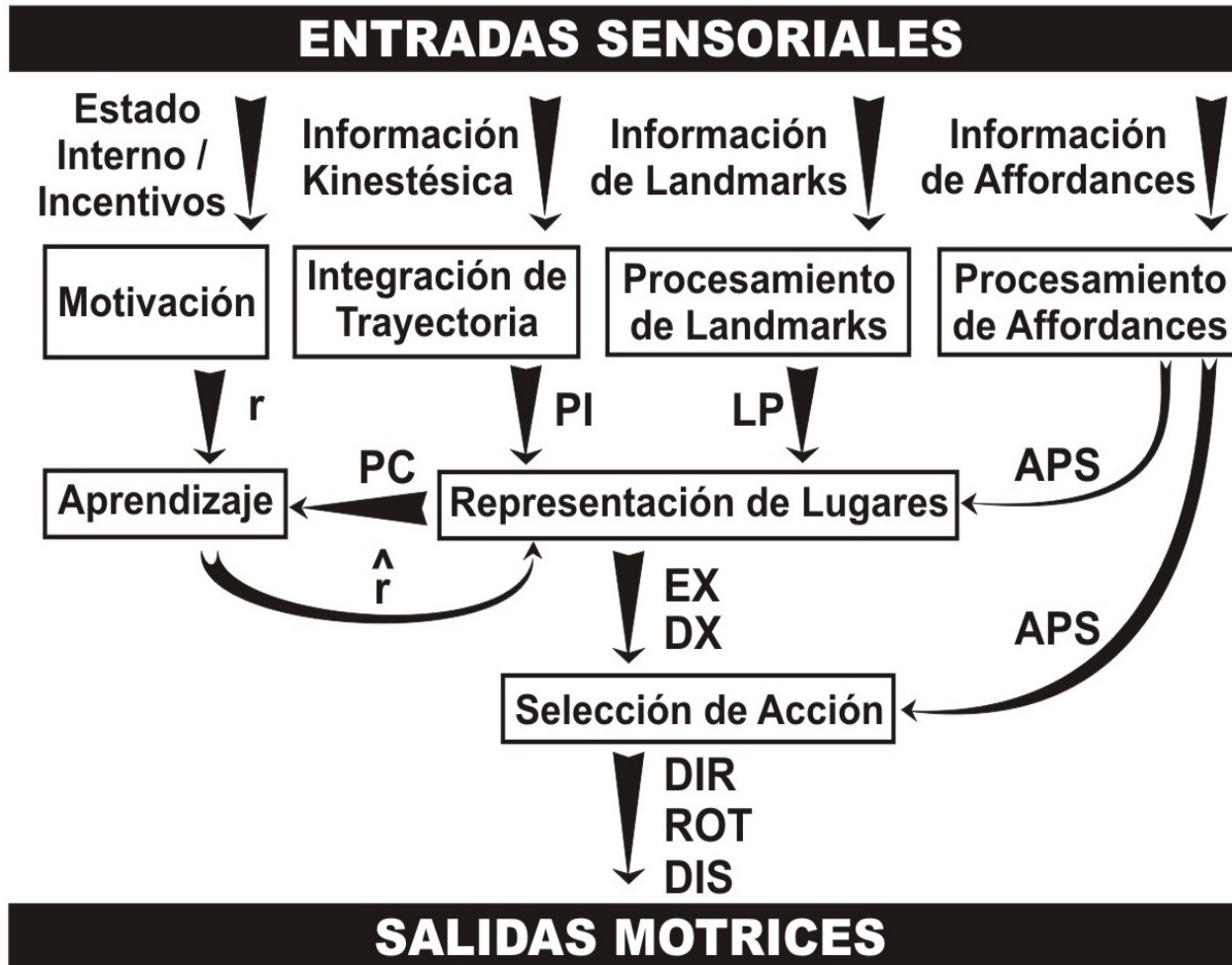
Celdas grilla (1/2)

- Descubiertas por Fyhn en 2004 en la MEC.
- Se activan en varias posiciones del entorno arreglándose regularmente como una grilla.
- Tienen disparos dispersos en todo el entorno dependiendo de la posición.
- Los campos de disparo se organizan en una grilla hexagonal.
- La regularidad en el espaciado de la grilla no se deriva de ninguna regularidad en el entorno o entrada sensorial.

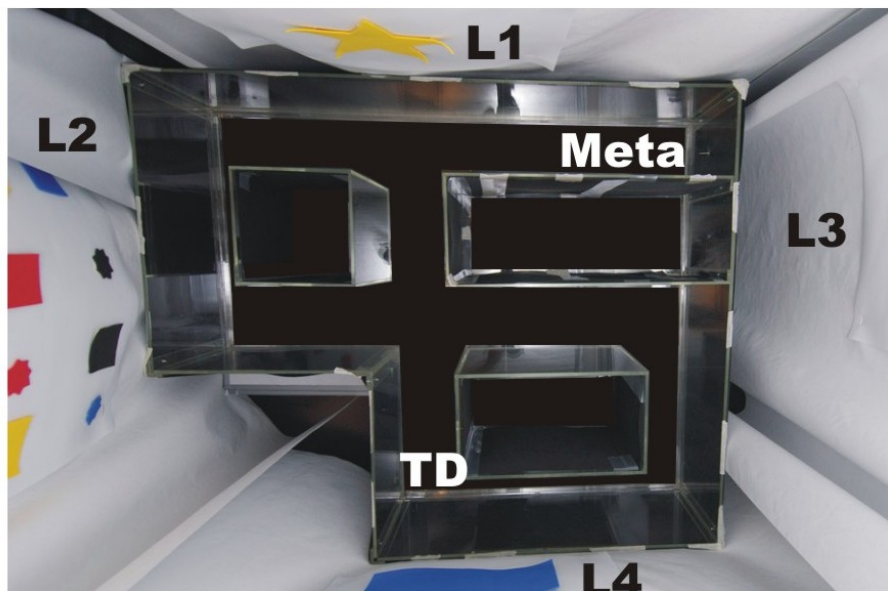
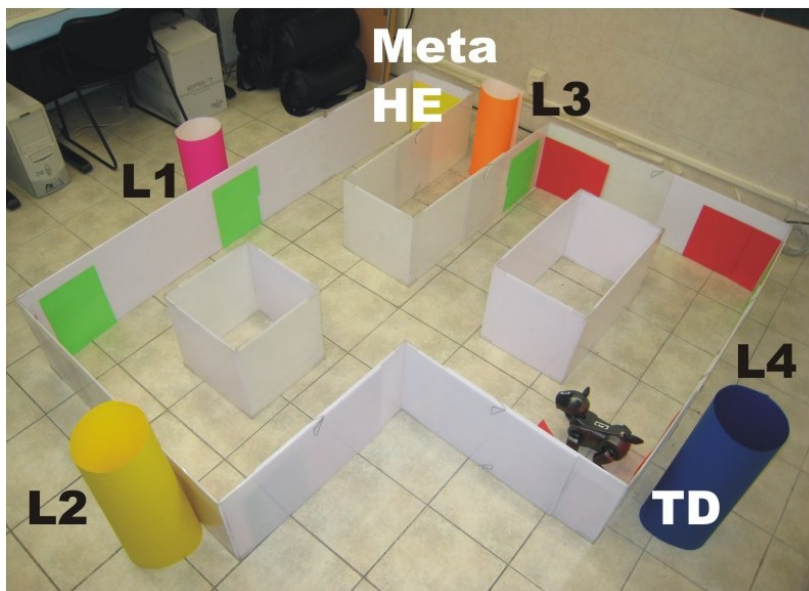
Celdas grilla (1/2)



Arquitectura



Entornos



Referencias

- Murphy R. R., An Introduction to AI Robotics, Capítulos 9 y 10, MIT Press, 2000.
- Alvaro Castroman y Ernesto Copllo, Fútbol de robots, Reporte Técnico, Instituto de Computación, 2003.

Preguntas