

Planificación de Caminos de robots móviles

CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE ROBOTS

Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica

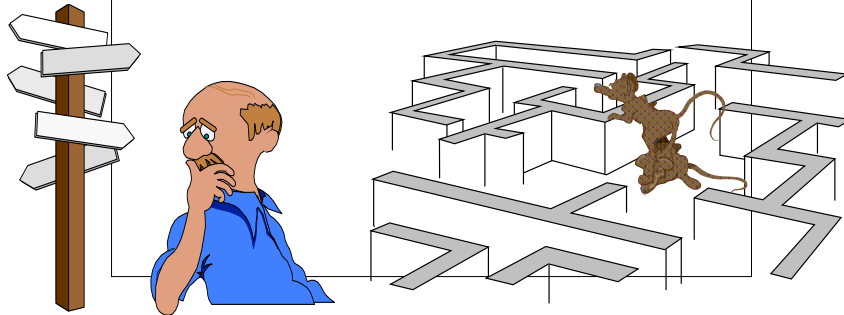
Índice

- Introducción
- Detección, Evitación, Planificación
- Modelos del entorno
- Planificación basada en modelo
- Métodos reactivos

Introducción

Qué es la planificación de caminos?

- Determinar a dónde y cómo vamos de un punto a otro



Pág. 3

Introducción

Problema complejo que involucra otros muchos:

- Localización del robot respecto a su entorno
- Conocimiento de la estructura del entorno -> Mapas
- Capacidad de actualización de datos del entorno -> Sensores
- Generación de trayectorias realizables a partir de la información del entorno
- Ejecución de las trayectorias programadas de modo robusto (evitación de eventuales colisiones)

En general se suelen distinguir tres grandes grupos de tareas

- Planificación de caminos libres de obstáculos
- Detección de colisiones
- Evitación de colisiones

Pág. 4

Detección, Evitación, Planificación

Planificación de caminos

- Se refiere al conjunto de algoritmos diseñados para la obtención de trayectorias libres de obstáculos realizables por el robot móvil.
- Generalmente se trata de optimizar algún criterio (camino de longitud mínimo, maximiza distancia a obstáculos, etc).
- Se asocia a la detección de colisiones

Detección de colisiones

- Prever la posibilidad de colisión del robot, en función de su trayectoria actual, velocidad, y objetos del entorno
- Detección basada en datos de sensores de proximidad y detección basada en mapas del entorno.

Evitación de colisiones

- Conjunto de tareas encaminadas a la generación de acciones de evitación de colisiones, una vez detectada ésta.
- Diferente grado de complejidad: Detención del vehículo, modulación de la velocidad o planificador local de trayectorias.

Pág. 5

Detección, Evitación, Planificación

Funciones de detección, evitación y planificación.

- Funciones de tiempo real
 - Captación y proceso en tiempo real de información de sensores.
 - Sincronización y coordinación
 - Limitaciones de tiempos de ciclo
- Funciones previas al inicio del movimiento
 - Planificación de las tareas de movimiento
 - Integración con los niveles de control inferiores
 - Se basa en información previa del entorno (mapas)
- Funciones de ayuda a la programación
 - Facilitan la tarea del programador
 - Detectan posibles incongruencias en el camino planificado (caminos irrealizables o que requieran reconfiguración del vehículo)

Pág. 6

Modelos del entorno

¿Qué es el entorno?

El entorno consiste esencialmente en

- Obstáculos
 - Zonas del espacio ya ocupadas por el robot u otros objetos
 - Básicamente, !! No podemos ir a estas zonas !!
- Espacio libre
 - Zonas no ocupadas
 - El robot puede ocupar estas zonas

Una **trayectoria válida de movimiento** será aquella secuencia de puntos del espacio libre que una los puntos origen y destino de la trayectoria y que impida que ninguna parte del robot invada zona de obstáculos

Pág. 7

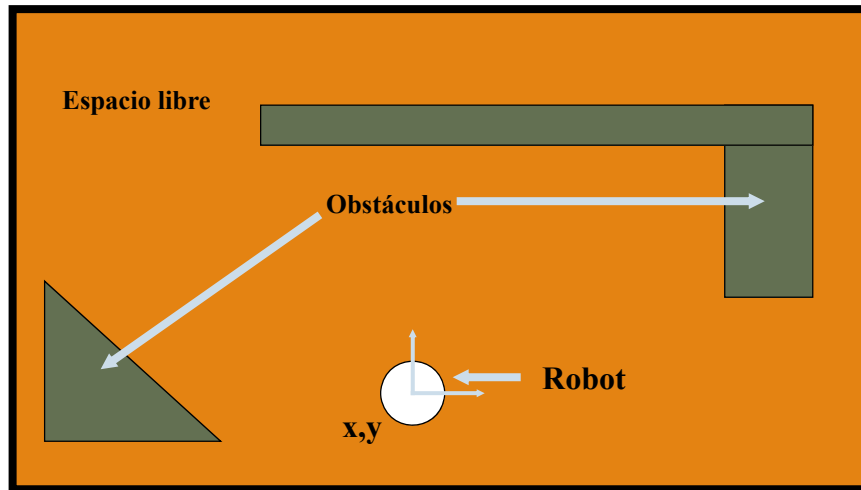
Modelos del entorno

¿Cómo podemos describir con precisión el entorno de movimiento de un robot?

- Características requeridas para la descripción
 - Descripción suficientemente precisa para describir todos los elementos del entorno relevantes para el propósito del mismo
 - Descripción matemática simple (depende del entorno)
 - Búsqueda eficiente de información
 - Poco tamaño en memoria
 - Actualizable
- Hipótesis:
 - Estructura del entorno: Entorno bidimensional, plano
 - Obstáculos fijos sin movimiento
 - No existen otros objetos móviles en el entorno

Pág. 8

Ejemplo de entorno (y Robot)



Pág. 9

Modelos del entorno

1. Modelado mediante ocupación de celdas

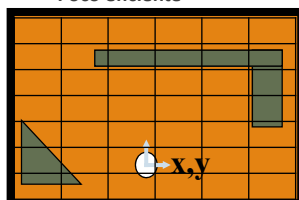
- Dividir el volumen de trabajo en celdas de una determinada dimensión.
- Si la celda (i,j) contiene total o parcialmente un obstáculo, se pone a uno, o cero en caso contrario

Ventajas:

- Descripción sencilla

Inconvenientes:

- Requiere un mallado muy fino para describir con precisión el entorno
- Ocupan mucha memoria
- Poco eficiente



0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0

Pág. 10

Modelos del entorno

2. Estructuras jerárquicas

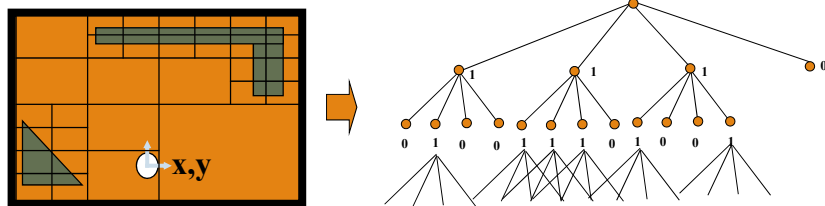
- Similar a la anterior, pero se adapta el mallado a las zonas donde se requiera más resolución
- Se emplean estructuras de datos (quadrees u octrees)

Ventajas:

- Descripción sencilla y eficiente
- Ocupan poca memoria

Inconvenientes:

- Búsquedas más complejas



Pág. 11

Modelos del entorno

3. Modelos de primitivas de sólidos 2D o 3D

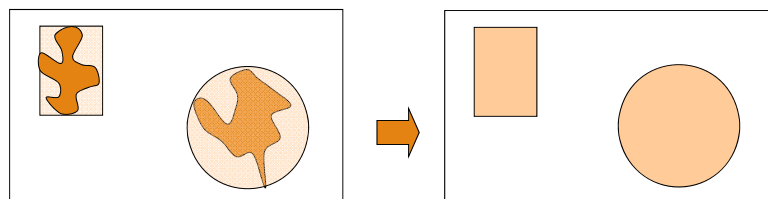
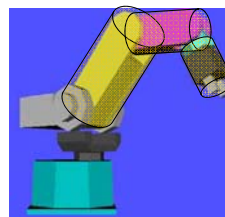
- Se modelan los obstáculos como sólidos de geometría sencilla (esferas, cilindros, paralelepípedos, cilindrosferas, etc)

Ventajas:

- Descripción sencilla y eficiente
- Ocupan poca memoria

Inconvenientes:

- Descripción conservadora



Pág. 12

Modelos del entorno

4. Expansión de obstáculos

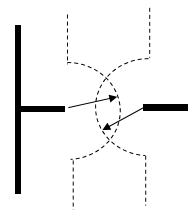
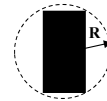
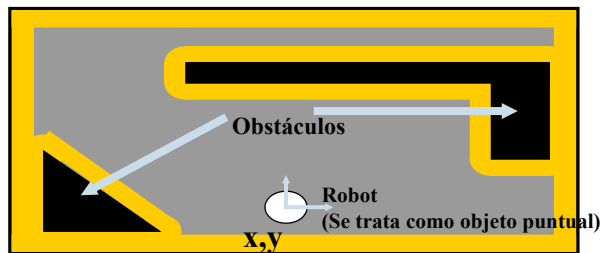
- Se aproxima el robot por una forma geométrica sencilla y se expanden los obstáculos en la misma proporción
- Permite tratar el robot como un objeto puntual

Ventajas:

- Robot puntual = descripción sencilla

Inconvenientes:

- Conservadurismo



Pág. 13

Modelos del entorno

5. Modelado en el espacio de las configuraciones

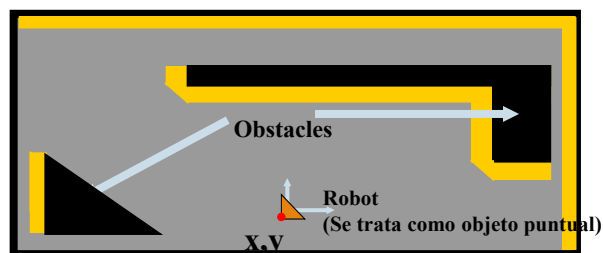
- Conjunto de todos los puntos alcanzables del espacio basado en el conocimiento del entorno y el robot
- Se contruye expandiendo los obstáculos según la geometría y grados de libertad del robot

Ventajas:

- Descripción menos conservadora
- El robot es tratado como objeto puntual

Inconvenientes:

- Descripción más compleja



Pág. 14

Indice

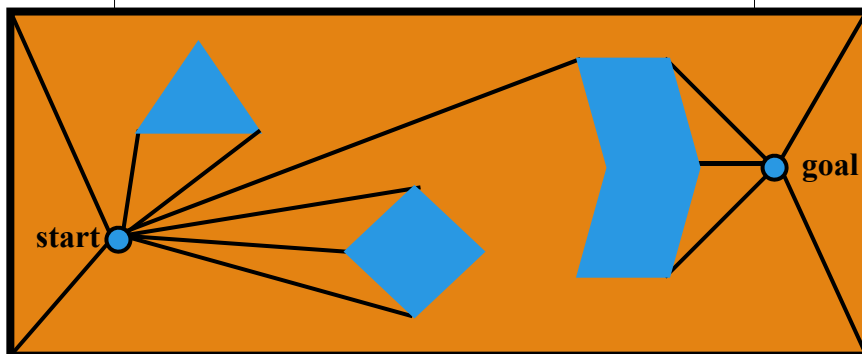
- Introducción
- Detección, Evitación, Planificación
- Modelos del entorno
- **Planificación basada en modelo**
- Métodos reactivos

Pág. 15

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

- Se definen todos los segmentos que conectan el punto origen, el punto destino y los vértices de los obstáculos, siempre y cuando haya visibilidad entre ellos
- Se entiende que un segmento es "visible", si transcurre todo él, íntegramente en zona libre de obstáculos
- Se supone que existen caminos bordeando los obstáculos

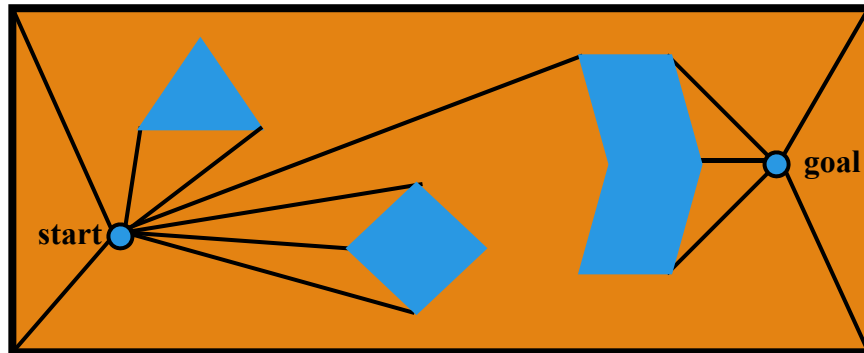


Pág. 16

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

- Primero se une el origen y el destino con todos los vértices del entorno con los que haya visibilidad



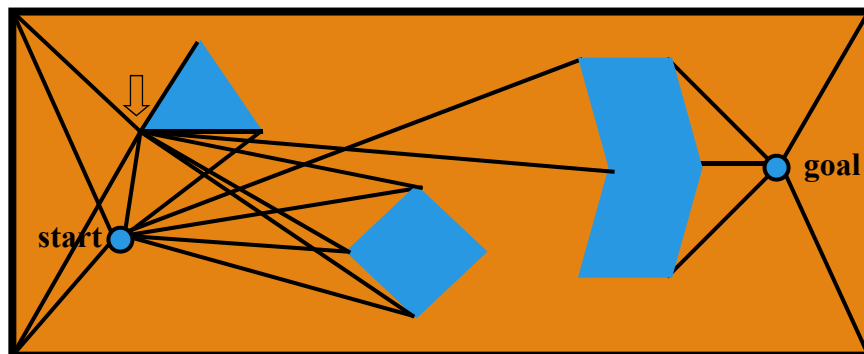
Pág. 17

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

Segundo, se trazan líneas de visibilidad desde cada vértice alcanzado a todos lo visibles desde cada uno de ellos

Recordemos que los laterales de los obstáculos también se consideran líneas de visibilidad

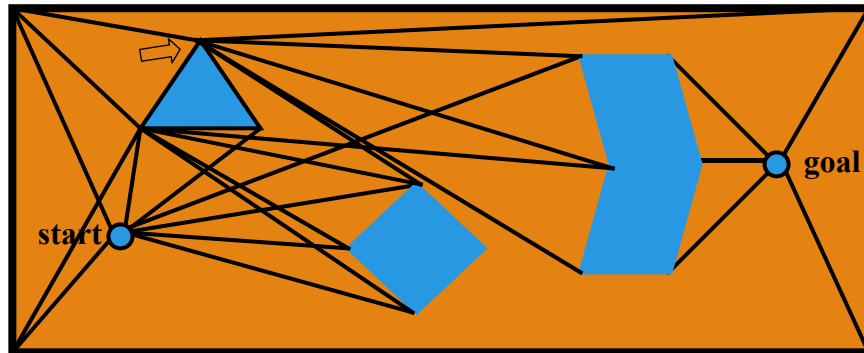


Pág. 18

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

Continuamos con el procedimiento desde cada nuevo vértice alcanzado, hasta que ya no queden vértices

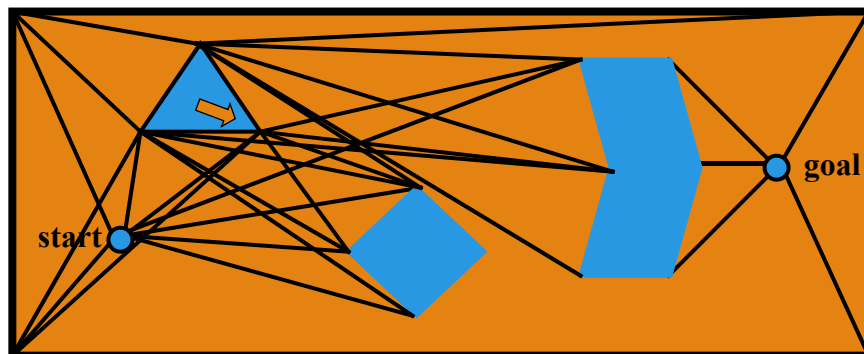


Pág. 19

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

- Continuamos con el procedimiento desde cada nuevo vértice alcanzado, hasta que ya no queden vértices

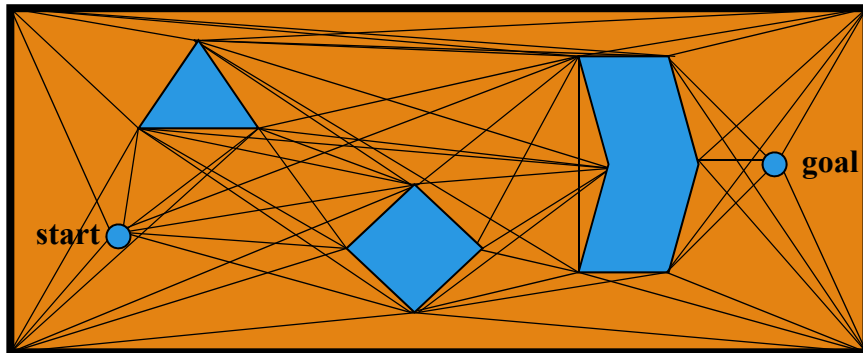


Pág. 20

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

- Continuamos con el procedimiento desde cada nuevo vértice alcanzado, hasta que ya no queden vértices

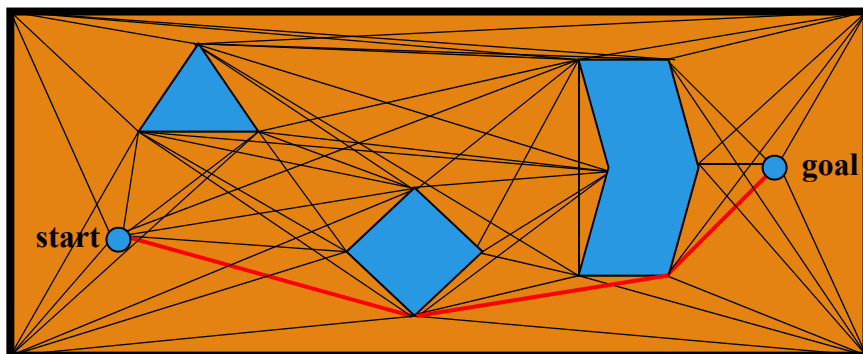


Pág. 21

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

1.- Gráficos de visibilidad

- Finalmente calculamos el “mejor” camino posible según el criterio seleccionado. Generalmente el de menos longitud

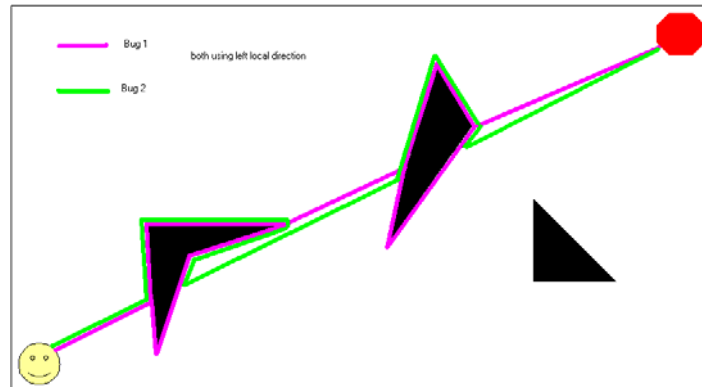


Pág. 22

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

2.- Método Lumelsky o de "bordeo de obstáculos"

- Trazamos el segmento entre origen y destino, bordeamos arbitrariamente a izquierda o derecha en caso de colisión con algún obstáculo hasta recuperar el camino original
- Muy simple pero poco eficiente

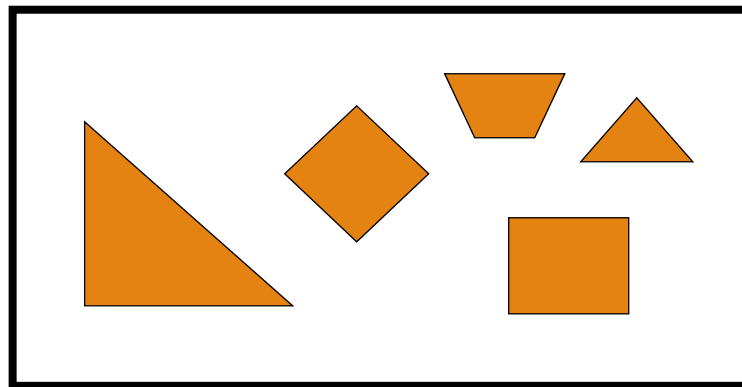


Pág. 23

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Descomponemos el entorno en zonas trapezoidales que, o bien contengan íntegramente obstáculos, o bien espacio libre, y determinamos el cetroide de cada trapecio

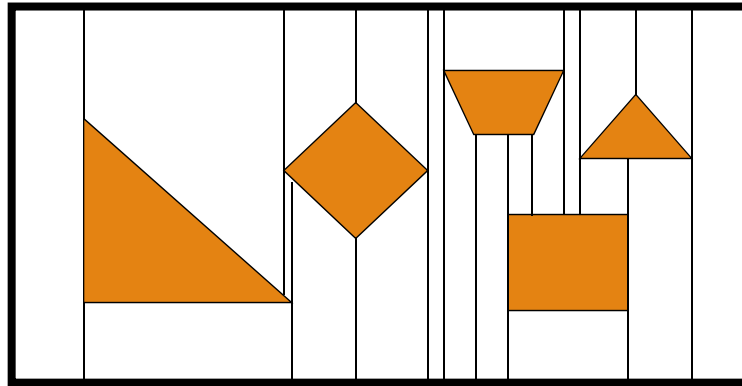


Pág. 24

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Descomponemos el entorno en zonas trapezoidales que, o bien contengan íntegramente obstáculo, o bien espacio libre, y determinamos el cetroide de cada trapecio

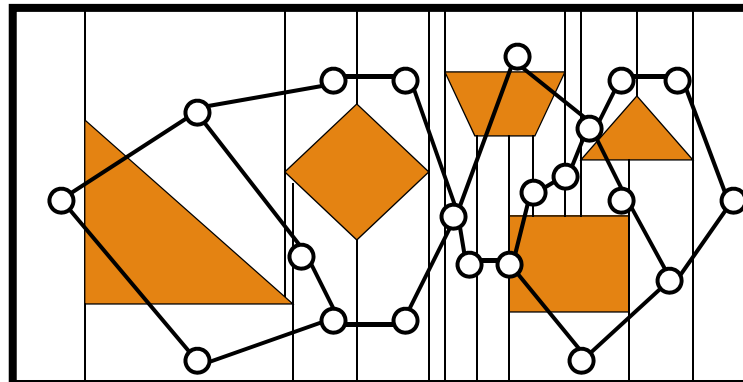


Pág. 25

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Descomponemos el entorno en zonas trapezoidales que, o bien contengan íntegramente obstáculo, o bien espacio libre, y determinamos el cetroide de cada trapecio

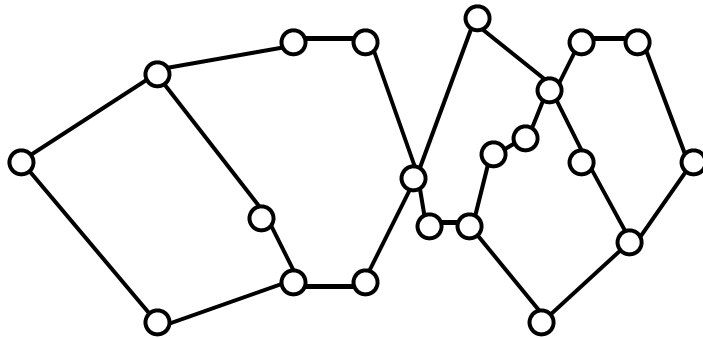


Pág. 26

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Reducimos el entorno a un grafo que representa la conectividad del espacio libre
Si alguno de los segmentos invade obstáculos se particiona un nivel más el espacio libre

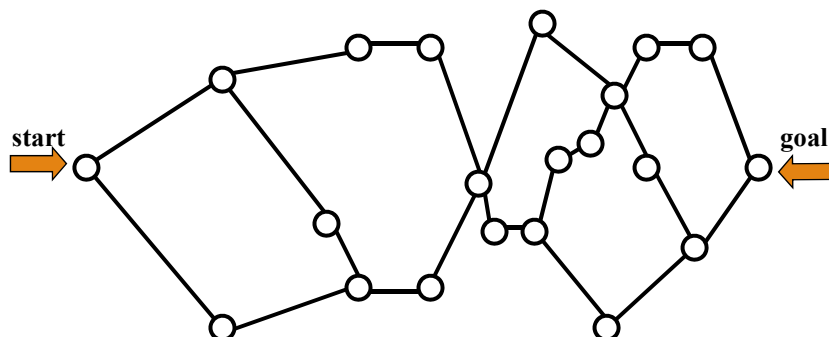


Pág. 27

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el grafo de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

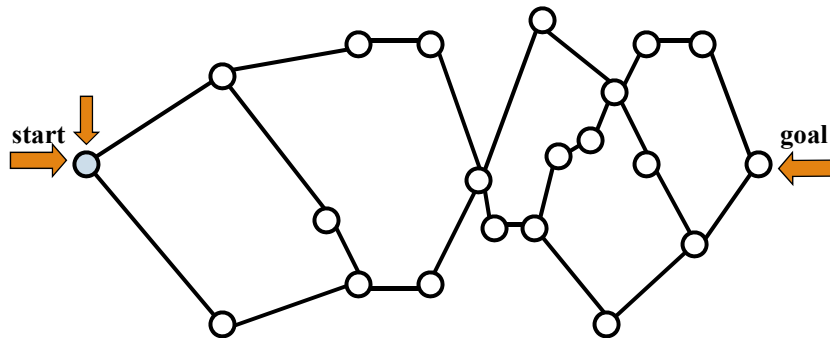


Pág. 28

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

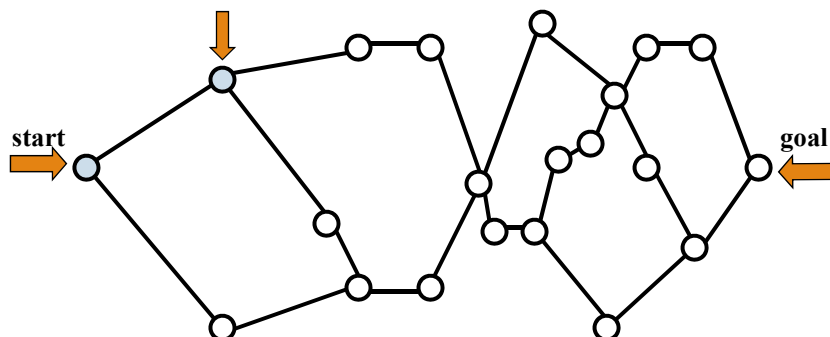


Pág. 29

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

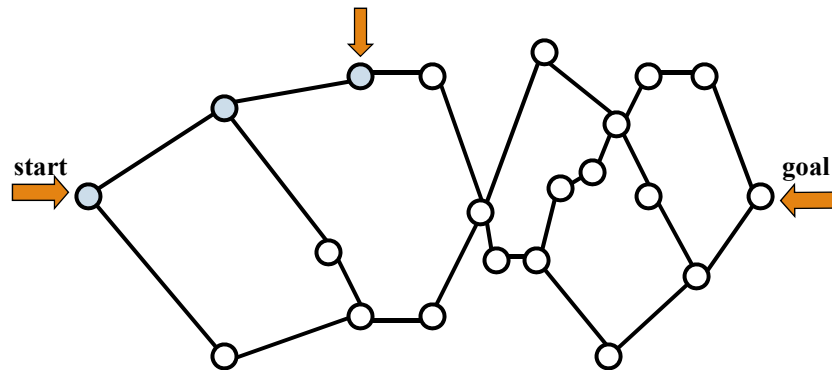


Pág. 30

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

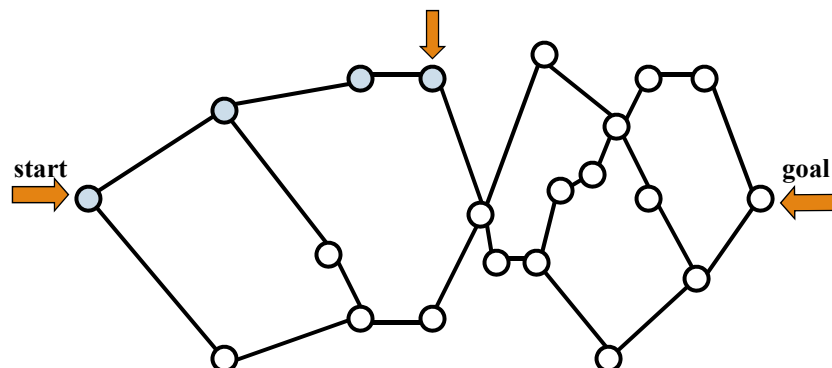


Pág. 31

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

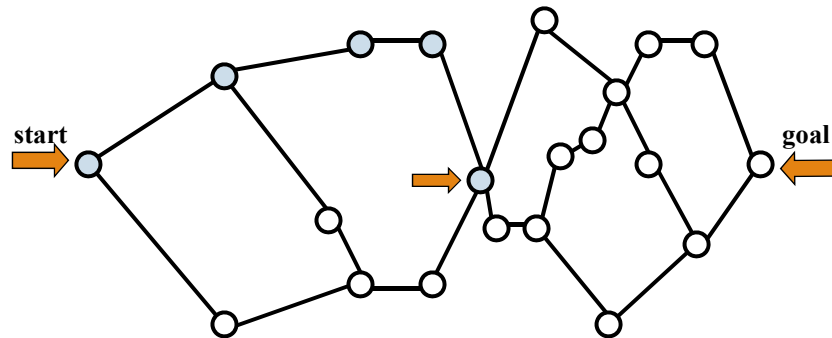


Pág. 32

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

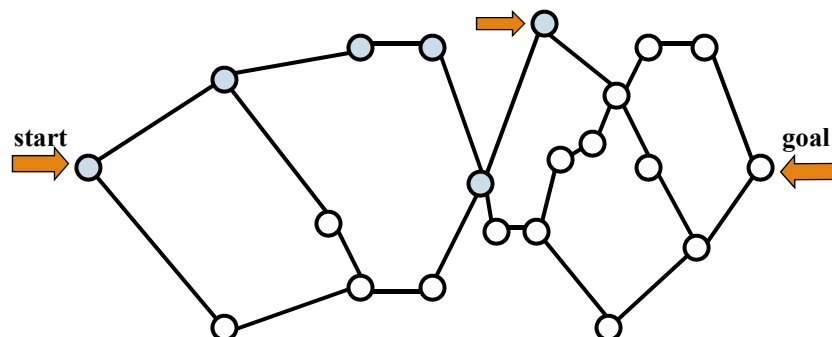


Pág. 33

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

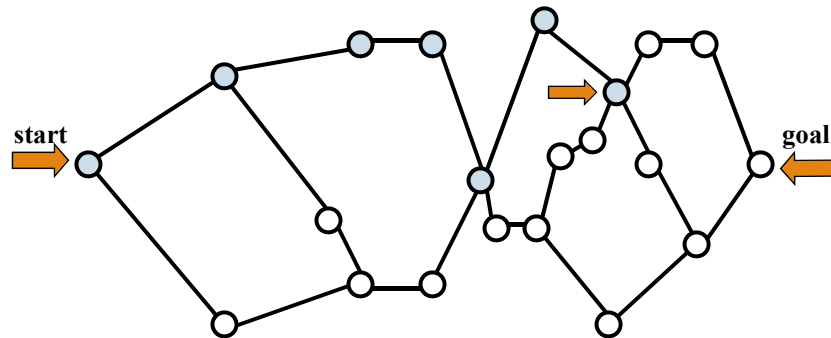


Pág. 34

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

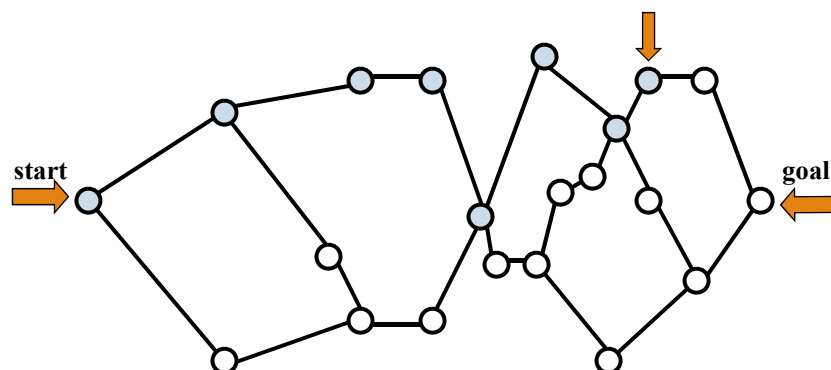


Pág. 35

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

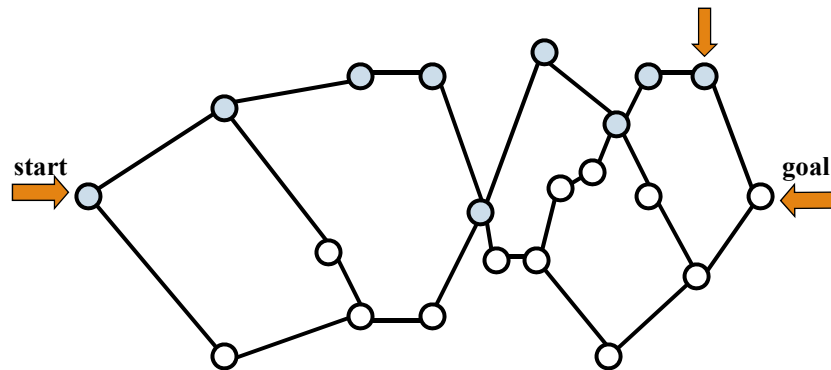


Pág. 36

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio

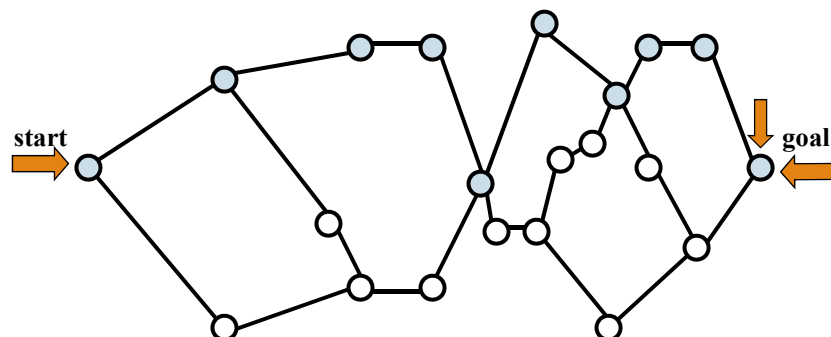


Pág. 37

Planificación basada en modelo: Métodos espacio cartesiano

3.- Método de descomposición trapezoidal

Buscamos un camino basado en el gráfico de conectividad que una origen y destino, según un determinado criterio



Pág. 38

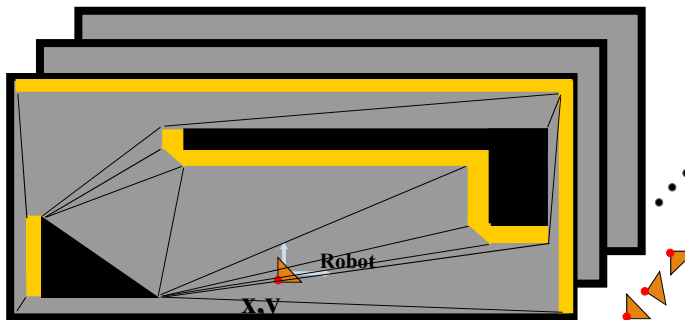
Planificación basada en modelo: Métodos en el espacio de las Configuraciones

Métodos en el espacio de las configuraciones

1.- Grafos de conectividad

Se genera un grafo de conectividad de todos los vertex del espacio de configuraciones, y se calcula una trayectoria óptima basada en dicho grafo.

Si se emplean los gdl del robot, transforma problemas geométricos 2D y problemas de grafos 3D.



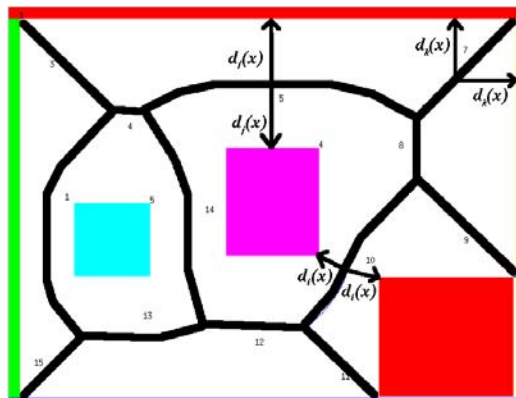
Pág. 39

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Métodos basados en diagramas de Voronoi

Se calcula el lugar geométrico de los puntos que equidistan y minimizan la distancia a los objetos del entorno.

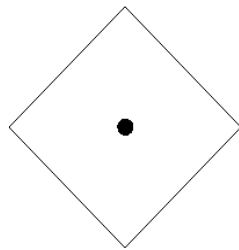
Si nos movemos por los puntos del diagrama de Voronoi, estaremos maximizando la distancia a los obstáculos (mínimo riesgo de colisión)



Pág. 40

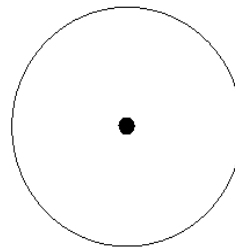
Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Métrica de los diagramas de Voronoi



$$\{(x,y) : |x| + |y| = \text{const}\}$$

L1



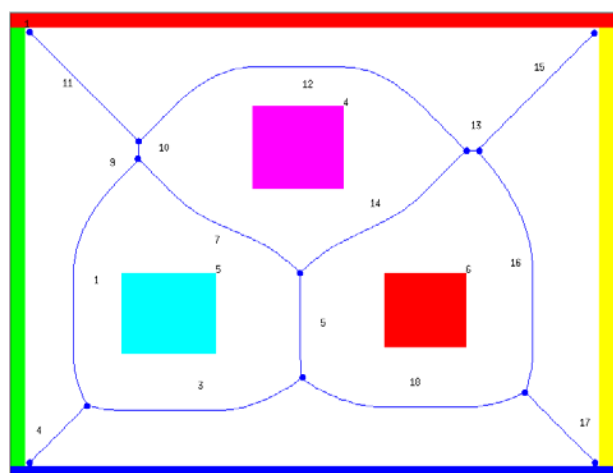
$$\{(x,y) : x^2 + y^2 = \text{const}\}$$

L2

Pág. 41

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

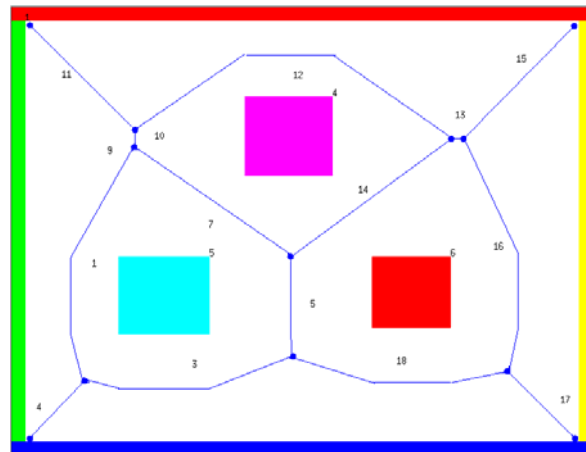
Observe
los
bordes
curvos



Pág. 42

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

No hay
curvos



Pág. 43

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

Proporciona trayectorias de mínima distancia sobre un mapa del entorno de ocupación de celdas.

Es eficiente y simple computacionalmente.

Las distancias se discretizan empleando una métrica apropiada



Conectividad de 8 puntos

Conectividad de 4 puntos

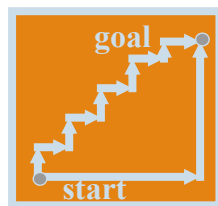
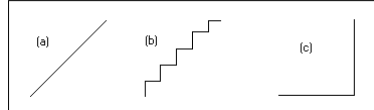
Pág. 44

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

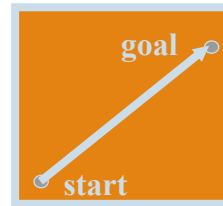
Planificador de frente de onda

Varías métricas disponibles

- Métrica L1
 - $(x,y) : |x| + |y| = \text{const}$
- Métrica L2
 - $(x,y) : x^2 + y^2 = \text{const}$



- Métrica L1 (x,y)



- Métrica L2 (x,y,θ)

Pág. 45

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Pág. 46

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

Comenzando por el punto de destino, actualizar todas las celdas “conexas” con valor cero, al valor actual más uno.

Se puede elegir conectividad de 8 o 4 celdas

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Pág. 47

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Iteramos con el resto de celdas, hasta alcanzar el origen

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Pág. 48

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Iteramos con el resto de celdas, hasta alcanzar el origen

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	4
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Pág. 49

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Iteramos con el resto de celdas, hasta alcanzar el origen

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	4
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Pág. 50

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Iteramos con el resto de celdas, hasta alcanzar el origen

7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	7	7	7
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6	6
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	5
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	5	4	4
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	5	4	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	6	5	4	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Pág. 51

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Hecho !!
- Si quedan celdas a cero, significaca que son zonas no alcanzables (interior de obstáculos o similares)

7	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	9	9	9	9	9	9
6	17	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	8	8	8	8	8
5	17	16	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	7	7	7	7
4	17	16	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	6	6	6
3	17	16	15	14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5
2	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4	4
1	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	3
0	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Pág. 52

Planificación basada en modelo: Otros Métodos

Planificador de frente de onda

- Para obtener el camino, partir desde el origen, moviéndonos siempre a una celda con valor numérico inferior
- El valor de cada celda, es aproximadamente la distancia que la separa del punto de destino (según la métrica elegida)

Dos posibles caminos de longitud mínima en este ejemplo

7	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	9	9	9	9	9
6	17	17	16	15	14	13	12	11	10	9	9	8	8	8	8
5	17	16	15	15	14	13	12	11	10	9	8	7	7	7	7
4	17	16	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	5	6	6
3	17	16	15	14	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5
2	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4
1	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
0	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	2
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Pág. 53

Planificación no basada en modelo: Métodos Reactivos

Métodos reactivos

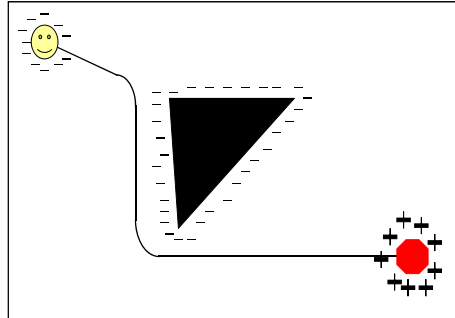
- Permiten generar una respuesta rápida a información de sensores de proximidad del robot.
- Se emplean generalmente como respuesta para evitación de colisiones.
- No es necesario disponer de modelos del entorno
- La percepción del entorno inmediato del robot se obtiene mediante sensores apropiados: (Sensores, láser, ultrasónicos y de contacto)
- Dos métodos:
 - Método de los campos potenciales
 - Método de las fuerzas virtuales

Pág. 54

Planificación no basada en modelo: Métodos Reactivos

1.- Métodos reactivos: Método de los campos potenciales

- Se basa en considerar el movimiento del robot en un campo de fuerzas con los obstáculos generando fuerzas repulsivas, y la posición objetivo del objeto, una fuerza atractora.

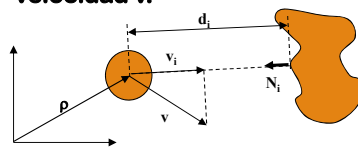


Pág. 55

Planificación no basada en modelo: Métodos Reactivos

1.- Métodos reactivos: Método de los campos potenciales

- Consideremos un robot aproximándose a un obstáculo a velocidad v .



Definamos la función potencial

$$P_i(\rho, v) = \begin{cases} 0 & \text{si } v_i \leq 0 \\ \frac{1}{t_{max} - t_{min}} = \frac{\alpha v_i}{2d_i\alpha - v_i^2} & \text{si } v_i > 0 \end{cases}$$

Tiempo mínimo requerido para detener el vehículo

$$t_{min} = \frac{v_i}{\alpha}$$

Tiempo máximo para detener el vehículo (con la mínima desaceleración posible)

$$t_{min} = \frac{2d_i}{v_i}$$

Vector de evitación de obstáculos

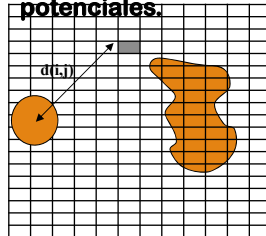
$$C_{o,i} = \begin{cases} -\nabla_{\rho} P_i & \text{si } v_i \leq 0 \\ -\frac{\partial P_i}{\partial d_i} N_i = \frac{2\alpha^2 v_i}{(2d_i\alpha - v_i^2)^2} N_i & \text{si } v_i > 0 \end{cases}$$

Pág. 56

Planificación no basada en modelo: Métodos Reactivos

2.- Métodos reactivos: Método de las Fuerzas Virtuales

- Combina métodos de rejillas de certidumbre con técnicas potenciales.



Cada celda ocupada aplica una fuerza repulsiva al robot proporcional al nivel de certidumbre de ocupación

$$F(i, j) = \frac{F_{cr}C(i, j)}{d^2(i, j)} \left[\frac{(x_i - x_a)}{d(i, j)} \vec{X} + \frac{(y_i - y_a)}{d(i, j)} \vec{Y} \right]$$

Vector de evitación de obstáculos $F_r = \sum_{i,j} F(i, j)$

El robot es atraído por el punto destino con una fuerza atractiva

$$F_o = F_{co} \left[\frac{(x_o - x_a)}{d(o)} \vec{X} + \frac{(y_o - y_a)}{d(o)} \vec{Y} \right]$$

$$R = F_r + F_o \quad \cos \theta = \frac{v_x F_{rx} + v_y F_{ry}}{|v| |F_r|}$$

Además se modula la velocidad

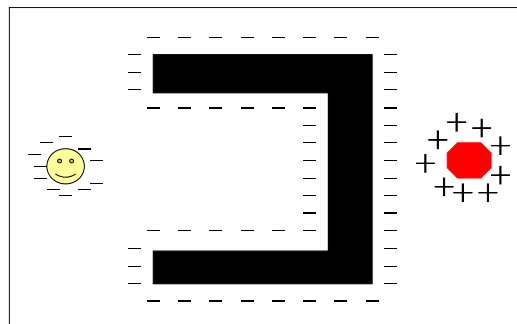
$$v = \begin{cases} V_{max} & \text{para } |F_r| = 0 \\ V_{max}(1 - |\cos(\theta)|) & \text{para } |F_r| > 0 \end{cases}$$

Pág. 57

Planificación no basada en modelo: Métodos Reactivos

Métodos reactivos:

- Problema: **Mínimos locales**



Pág. 58