

CAPÍTULO 1

PLANEACIÓN DE MOVIMIENTOS

Una de las metas en robótica es la creación de *robots autónomos* que acepten una descripción de alto nivel de la tarea a realizar y la ejecuten sin intervención humana. Las entradas describirán lo que el usuario desea hacer en lugar de cómo hacerlo; el robot está equipado con un conjunto de sensores y actuadores que bajo el control de un sistema computacional le permiten ejecutar la tarea.

El desarrollo de tecnologías necesarias para la creación de robots autónomos es una empresa formidable la cual se relaciona ampliamente con diversas áreas como el razonamiento autónomo, la percepción y el control. Sin embargo existen muchos problemas importantes a resolver, uno de ellos es atacado por el área de planeación de movimientos.

En la figura 1.1 ¿cómo puede el robot decidir que movimientos realizar para sujetar la lámpara ubicada debajo de la mesa y colocarla sobre ella?. Esta capacidad es necesaria si deseamos que el robot ejecute tareas moviéndose en el mundo real, entonces lo mínimo que deberíamos esperar de un robot autónomo es la habilidad de planear sus propios movimientos.

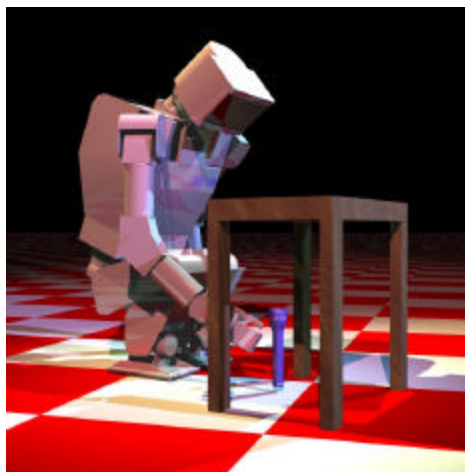


Figura 1.1 Imagen cortesía del Instituto de Robótica de la Universidad de Carnegie Mellon, Pittsburgh.

Un conocimiento previo del espacio de trabajo es necesario para planear estos movimientos. Por ejemplo planear una ruta libre de colisión requiere el conocimiento de la localización de los obstáculos, el cual puede ser proporcionado por el usuario a través de un sistema asistido por computadora o bien obtenido por medio de sensores.

Si se tiene el conocimiento del espacio de trabajo, los movimientos pueden ser calculados y ejecutados. Sin embargo el problema puede complicarse aún más si suponemos que hay obstáculos móviles o bien otros robots operando en el mismo espacio de manera independiente o colaborativa, implicando que los movimientos sean planeados no solo como rutas geométricas sino además como funciones de tiempo [3].

Como observamos el problema de la planeación de movimientos está bien definido pero es muy general, por tal motivo se hacen algunas simplificaciones tratando de hacer menos complicado el problema.

1.1 PROBLEMA BÁSICO

El robot es el único objeto en movimiento en el espacio de trabajo y se ignoran sus propiedades dinámicas; estos movimientos estarán libres de colisión, es decir el robot no choca con ningún otro objeto del ambiente en el cual opera.

Tales condiciones reducen el problema de planeación de movimientos a un problema geométrico. Si simplificamos aún más, el robot es un objeto rígido, sin articulaciones y sus movimientos solo están restringidos por la forma de los obstáculos.

El resultado de estas simplificaciones es el siguiente:

- Sea A un objeto rígido (robot) el cuál se mueve en un espacio euclidiano W llamado espacio de trabajo representado como \mathbb{R}^N , donde $N = 2$ ó 3 .

- Sean B_1, \dots, B_q objetos rígidos fijos distribuidos en W a los cuales llamamos obstáculos.
- Tanto la forma geométrica como la posición del robot y de los obstáculos, distribuidos en W , es conocida.

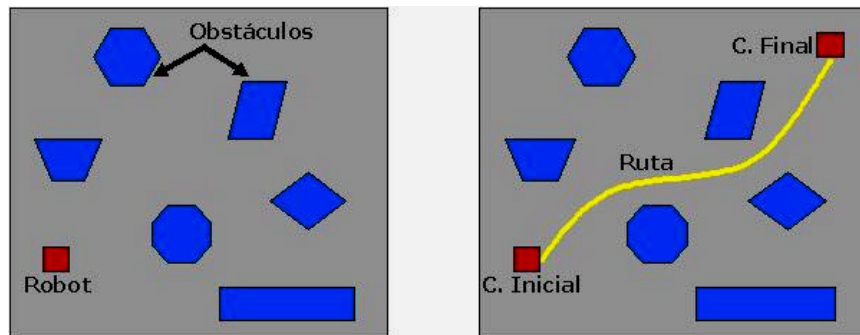


Figura 1.2

Como se ilustra en la figura 1.2 el problema consiste en que dadas una posición y orientación inicial y una posición y orientación final de A en W se desea generar una ruta R que especifique una secuencia continua de posiciones y orientaciones de A , evitando siempre el contacto con los obstáculos. La ruta comienza en la posición y orientación inicial y termina en la posición y orientación final; si la ruta no existe o no es encontrada se reporta como una falla [3].

1.2 ESPACIO DE CONFIGURACIONES

Una configuración indica la posición y orientación que el robot puede tomar en el espacio de trabajo. Cuando el robot no colisiona con ninguno de los obstáculos se dice que se encuentra en el espacio libre y la configuración es libre; en caso contrario la configuración está en colisión.

El espacio de trabajo del robot puede ser explicado, de manera conceptual, como un espacio de configuraciones y consiste en el conjunto de todas las posiciones y orientaciones que el

robot puede tomar. Obtener el espacio de configuraciones es equivalente a que el robot recorra y se posicione en todos los puntos posibles del espacio de trabajo.

El robot se representa como un punto y los obstáculos son construidos dentro de él tal y como se ilustra en la figura 1.3. El problema de planeación de movimientos para un objeto se transforma en un problema de planeación de movimientos para un punto.

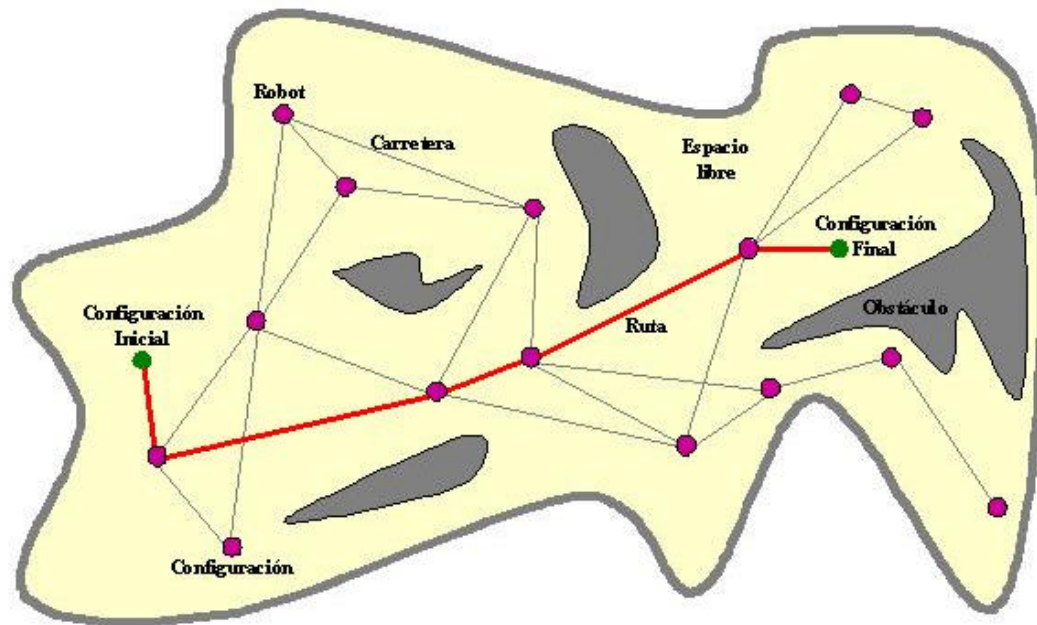


Figura 1.3 Espacio de configuraciones [3].

La ventaja principal que ofrece este espacio es que cualquier par de puntos que no pertenezcan a la región de los obstáculos representan dos configuraciones libres para el robot. Si además estos dos puntos pueden ser unidos por una línea (recta o curva) que pase por las regiones libres significa que existe un camino libre de colisión entre estas dos configuraciones [4].

Aquí el problema de planeación de movimientos se reduce a encontrar una secuencia de configuraciones y caminos entre éstas, que se encuentren completamente en el espacio libre y que nos lleven desde la configuración inicial hasta la configuración final. La dimensión del espacio de configuraciones corresponde al número de grados de libertad del robot [4].

Actualmente existen un gran número de métodos que intentan resolver el problema de planeación de movimientos sin embargo no todos ellos lo resuelven completamente ya que encontrar una ruta no es tarea fácil, se requiere tiempo exponencial con respecto a los grados de libertad del robot y tiempo polinomial según el número de obstáculos en el espacio de trabajo [5].

1.3 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS DE PLANEACIÓN DE MOVIMIENTOS

La planeación de movimientos puede ser clasificada en dinámica o estática dependiendo de si los obstáculos se encuentran en movimiento o no. En un problema estático toda la información acerca de los obstáculos se conoce y el movimiento del robot se diseña a partir de ella. Mientras que en un problema dinámico solo se tiene información parcial del ambiente y el movimiento del robot se planifica con esta información, conforme éste se mueve se obtiene más información para continuar la trayectoria [4].

Los métodos de planeación de movimientos se clasifican por su precisión y por su alcance. A su vez los primeros son clasificados en *completos*, *heurísticos*, *de resolución completa* y *probabilísticamente completos* [4].

Los métodos completos encuentran una solución si esta existe o bien reportan falla en caso contrario y por su naturaleza son computacionalmente caros. Los heurísticos se enfocan a generar soluciones rápidas sin embargo pueden fallar o encontrar soluciones erróneas en algunas ocasiones.

Los métodos de resolución completa discretizan el espacio de trabajo en una malla de configuraciones para encontrar un solución, tal es el caso de los algoritmos basados en campos potenciales los cuales serán descritos más adelante. Los métodos probabilísticamente completos determinan que la probabilidad para terminar con una solución (una ruta encontrada o no) tiende a uno cuando el tiempo permitido se incrementa hacia infinito.

Por otra parte, los métodos clasificados por alcance se subdividen en *globales* y *locales*. Los métodos globales trabajan con la información de todo el espacio de configuración y planifican una ruta desde la configuración inicial hasta la configuración final. En cambio los métodos locales no exploran todo el espacio de configuración, son utilizados como componentes de los métodos globales y se caracterizan por ser bastante rápidos al calcular una ruta dentro del espacio de configuraciones del robot.

Estos últimos buscan solucionar el problema paso a paso encontrando configuraciones libres de colisión de tal forma que en cada iteración se acerquen más a la configuración final. El progreso de avance a través del espacio es representado en un grafo donde las diferentes configuraciones encontradas son los nodos y las aristas representan la estrategia de movimiento realizada hasta el momento.

En la siguiente sección se describirán de manera breve y general los métodos más comunes aplicados al problema de la planeación de movimientos.

1.4 ENFOQUES DE PLANEACIÓN DE MOVIMIENTOS

La planeación de movimientos en espacios de trabajo conocidos y estáticos se ha estudiado ampliamente en las últimas dos décadas. Para robots con pocos grados de libertad se han desarrollado heurísticas extremadamente rápidas sin embargo la atención ahora está centrada en la creación de métodos eficientes destinados a robots con muchos grados de libertad [6].

La complejidad de los métodos de planeación de movimientos en espacios de trabajo multidimensionales ha llevado a los investigadores a buscar métodos heurísticos completos que puedan ser parcialmente adaptados para solucionar problemas específicos de dominio.

Los métodos más comunes se basan en aproximaciones generales conocidas como *mapa de carreteras*, *descomposición en celdas* y *campos potenciales*. A continuación brevemente describiremos cada una de estas aproximaciones.

1.4.1 MAPA DE CARRETERAS

El método consiste en capturar la conectividad del espacio libre en una red de carreteras que en adelante llamaremos “**roadmap**”. Una vez construido se usa como un conjunto de rutas, posteriormente se intenta conectar las configuraciones inicial y final a puntos en el roadmap y finalmente se busca una ruta entre estos puntos.

La ruta construida es la concatenación de tres subrutas: una subruta conectando la configuración inicial al roadmap, una subruta contenida en el roadmap y la subruta conectando el roadmap a la configuración final.

Varios métodos basados en esta idea se han propuesto los cuales construyen diferentes tipos de *roadmaps*, algunos de los más conocidos son *el grafo de visibilidad* y *el método probabilístico de carreteras*.

a) GRAFO DE VISIBILIDAD

Este es uno de los métodos más rápidos de planeación de movimientos, principalmente aplica en espacios de configuración bidimensionales con regiones poligonales en los obstáculos. El grafo de visibilidad es un grafo no dirigido cuyos nodos son la configuración inicial, final y todos los vértices de los obstáculos [3].

Las aristas del grafo son segmentos de línea recta que no pasan o no intersectan el interior de un obstáculo y que conectan dos nodos. La figura siguiente muestra un ejemplo del método *Grafo de Visibilidad*, las aristas del grafo que conectan solo los vértices de los obstáculos construyen el roadmap.

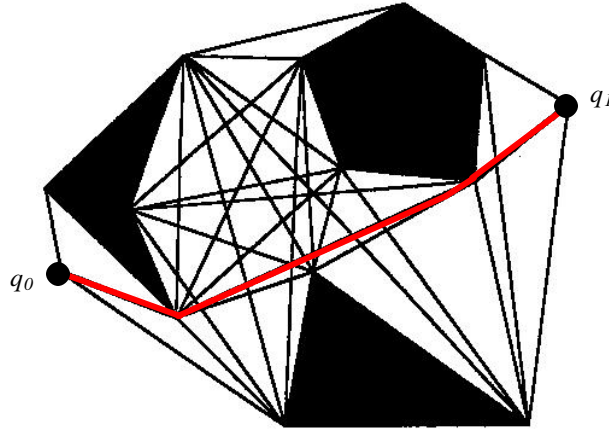


Figura 1.4 El roadmap construido se representa como una red, la ruta entre las configuraciones inicial y final se indica por una línea roja [3].

La configuración inicial y final se conectan a puntos en el roadmap q_0 y q_1 respectivamente y se busca la ruta mas corta entre estos puntos utilizando un algoritmo de búsqueda en grafos, si existe una ruta será la línea que conecte a los puntos q_0 y q_1 a través de los vértices de los obstáculos.

b) MÉTODO PROBABILÍSTICO DE CARRETERAS

El método consiste de dos fases, la primera denominada de **construcción** donde se construye un roadmap probabilístico y se representa como un grafo cuyos nodos corresponden a configuraciones libres de colisión y las aristas son rutas factibles entre estas configuraciones.

La etapa de *generación de configuraciones* contenida dentro de la fase de construcción consiste en generar un número n de configuraciones libres de colisión de manera aleatoria uniforme en todo el espacio de trabajo.

Si n es suficientemente grande el espacio de trabajo se cubre totalmente y el roadmap o grafo generado está completamente conectado. En caso contrario éste estará formado de componentes disconexos indicando que no se ha capturado eficientemente la conectividad de dicho espacio.

Posteriormente se tiene la etapa de *conexión* donde cada uno de los nodos se intenta conectar con sus k nodos vecinos más cercanos; estas líneas de conexión definen las aristas en el roadmap (ver figura 1.5).

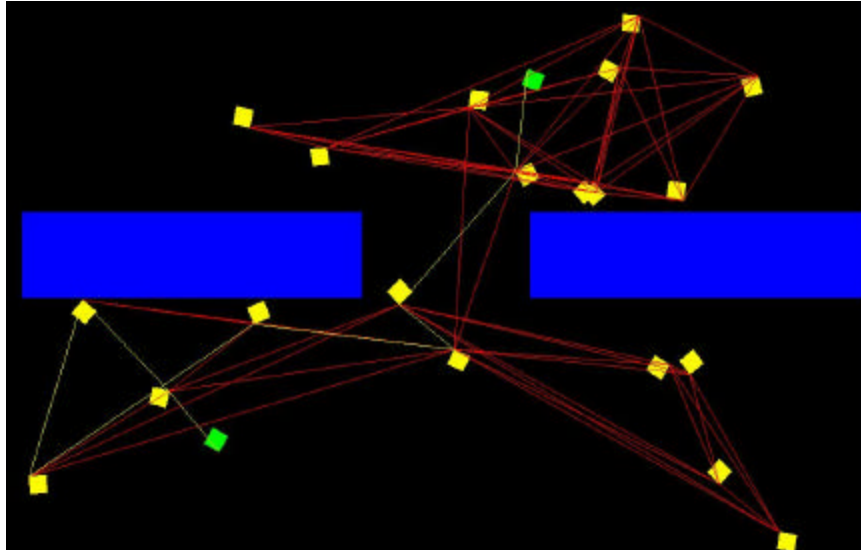


Figura 1.5 Roadmap generado en un espacio bidimensional compuesto de dos obstáculos (azul) y 20 configuraciones libres (amarillo) unidas en línea recta con sus k vecinos. La ruta entre las configuraciones inicial y final (verde) es indicada por una línea blanca.

La segunda fase o de **consulta** intenta conectar las configuraciones inicial y final de un robot a dos nodos en el roadmap; una vez conectadas se busca una ruta que una a estos dos nodos, el método reporta éxito si la ruta es encontrada y fracaso en caso contrario.

1.4.2 DESCOMPOSICIÓN EN CELDAS

El método es uno de los más estudiados hasta ahora, consiste en descomponer el espacio libre en regiones simples llamadas celdas de tal manera que una ruta entre dos configuraciones cualesquiera pueda ser fácilmente encontrada.

Un grafo no dirigido representa la relación de adyacencia entre las celdas y se le llama *grafo de conectividad*. Los nodos son celdas extraídas del espacio libre y están conectadas por una arista si y solo si las dos celdas correspondientes son adyacentes. El resultado de la

búsqueda en el grafo es una secuencia de celdas llamada *canal*, una ruta libre de colisión se calcula a partir de esta secuencia [3].

El método consta de dos enfoques, el exacto y el aproximado:

- a) El método exacto divide el espacio libre en celdas cuya unión corresponde exactamente al espacio libre.
- b) El enfoque aproximado produce celdas de forma predefinida, generalmente rectángulos, cuya unión no corresponde estrictamente al espacio libre.

La figura ilustra el enfoque exacto en un espacio de configuraciones bidimensional. El espacio libre está externamente limitado por un polígono e internamente limitado por tres polígonos. La descomposición genera celdas trapezoidales y triangulares las cuales son construidas dibujando líneas verticales que parten de cada vértice de los obstáculos, dos celdas son adyacentes si comparten una arista común.

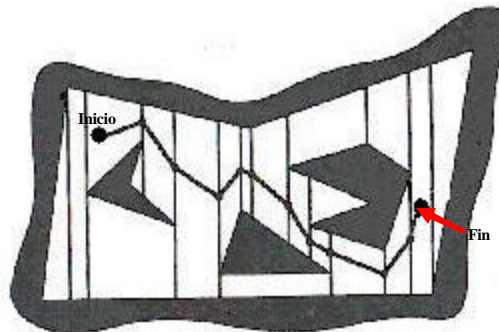


Figura 1.6 La ruta encontrada se indica con una línea que toca los puntos medios de cada una de las aristas de las celdas comprendidas dentro del espacio libre [3].

La siguiente figura ilustra la descomposición aproximada del espacio libre, el rectángulo R que limita el espacio de trabajo es recursivamente descompuesto en rectángulos más pequeños. Un tipo de descomposición genera cuatro nuevos rectángulos idénticos en cada iteración y se conoce como descomposición “*quadtree*”, ésta puede ser representada por un árbol de grado 4.

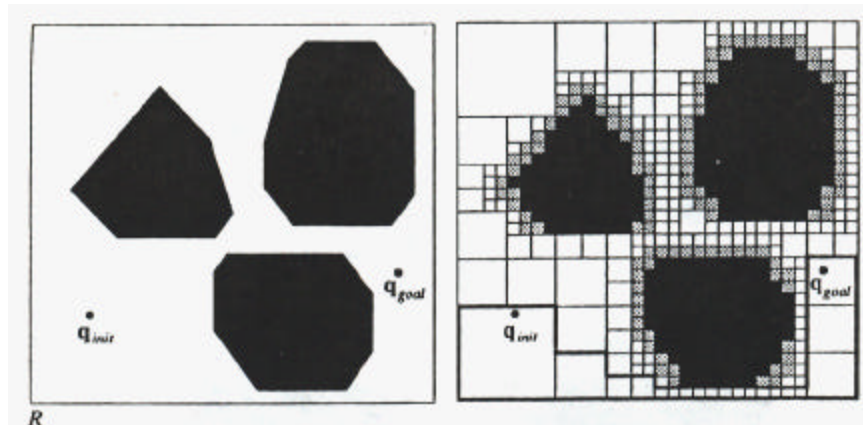


Figura 1.7 La ruta encontrada entre los puntos q_{init} y q_{goal} se indicada con una línea gruesa de color negro [3].

Las celdas que se encuentran completamente en el espacio libre se usan para construir el grafo de conectividad, si la búsqueda en el grafo encuentra una secuencia de celdas que representen una ruta en el espacio libre el método reportará éxito, en caso contrario significará que la resolución o descomposición seleccionada es insuficiente o bien que una ruta libre de colisión no existe entre las configuraciones inicial y final.

El método aproximado opera de manera jerárquica usando una resolución burda en el inicio de la descomposición y refinándola continuamente hasta que una ruta se encuentra o una resolución límite se alcanza.

El enfoque exacto es un método completo, es decir garantiza encontrar una ruta libre de colisión si esta existe o reportar fracaso en el caso contrario, en cambio el método aproximado no es completo pero si mucho más rápido.

1.4.3 CAMPOS POTENCIALES

Una aproximación alternativa para planeación de movimientos consiste en discretizar el espacio de configuraciones en una malla muy fina que permita buscar en ella una ruta libre de colisión. El método requiere de una poderosa heurística que guíe la búsqueda dado que quizás la malla que se genere sea muy grande; muchas heurísticas se han propuesto pero la más exitosa de ellas consiste en funciones que se interpretan como *campos potenciales* [3].

En este método el robot representado como un punto en el espacio de configuraciones es una partícula cuyo movimiento está influenciado por una fuerza artificial producida por la configuración final y los obstáculos. La configuración final genera un potencial de atracción que lleva al robot hacia la meta y los obstáculos producen un potencial de repulsión que aleja al robot de ellos.

El gradiente negativo del potencial total se trata como una fuerza artificial aplicada al robot, por lo que en cada configuración la dirección de esta fuerza se considera como la dirección más oportuna de movimiento. La figura siguiente ilustra la noción de potencial de atracción y repulsión.

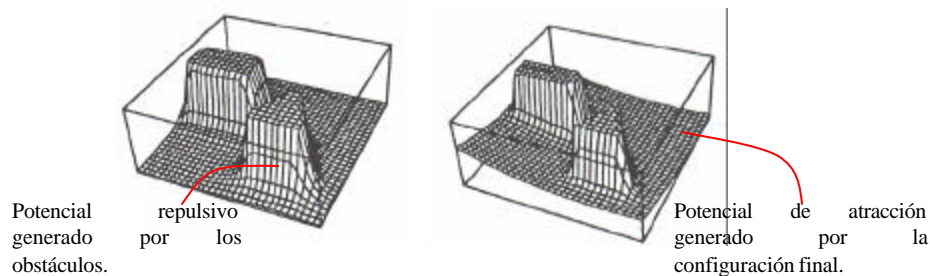


Figura 1.8 [3].

El potencial de atracción disminuye conforme nos acercamos a la configuración final mientras que el potencial de repulsión es un valor no cero a cierta distancia del obstáculo y tiende a infinito conforme nos acercamos a él. La ruta encontrada entre las configuraciones inicial y final se genera siguiendo el gradiente negativo del potencial total.

El método es eficiente sin embargo tiene la desventaja de que la función potencial puede caer en un mínimo local en lugar de que en la configuración final, es decir la fuerza de atracción y repulsión en algún punto es de igual intensidad provocando que el robot no se mueva. Una solución a esto es diseñar funciones que no tengan mínimos locales o bien desarrollar mecanismos alternativos que permitan escapar de ellos.

1.5 PASAJE ESTRECHO

La mayoría de los métodos de planeación de movimientos desarrollados hasta ahora fallan cuando en el espacio de trabajo existen pasajes estrechos que deben ser forzosamente cruzados por el robot para llegar a su destino.

Los pasajes estrechos son esas pequeñas áreas en donde el robot deberá hacer movimientos muy finos para evitar colisionar con los obstáculos. Estas regiones son las mas difíciles de resolver por los métodos existentes y actualmente se busca diseñar poderosas heurísticas que logren generar configuraciones libres de colisión para el robot en esas áreas [7] (Ver figura 1.9).

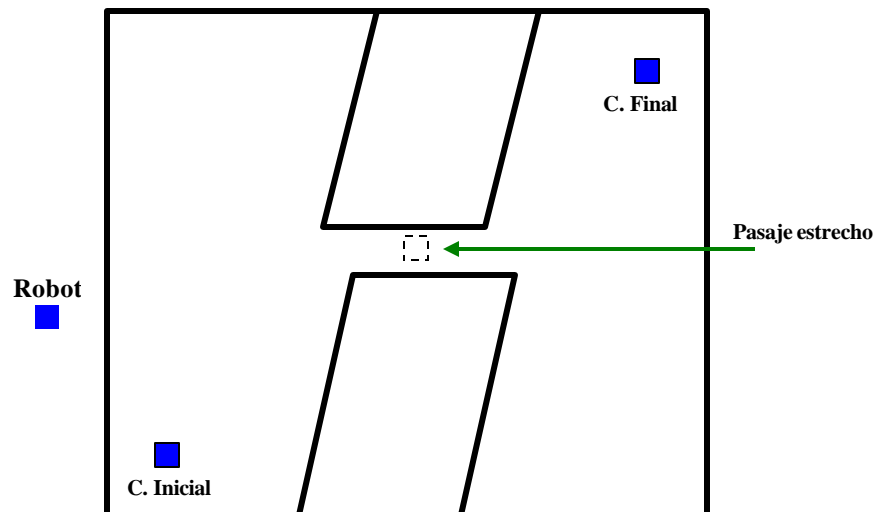


Figura 1.9 La generación de configuraciones adecuadas que permitan a un robot cruzar los pasajes estrechos es una de las tareas más difíciles de resolver por los métodos de planeación de movimientos.

En este capítulo presentamos el área de planeación de movimientos y los conceptos más importantes y necesarios para su estudio, proporcionando al lector un panorama general del área y de la problemática abordada en esta tesis. En el siguiente capítulo se describen detalladamente los métodos probabilísticos más comúnmente usados para atacar dicho problema y que se implementaron durante el trabajo desarrollado en esta tesis.