
CAPITULO 1.

Introducción.

1.1. Hacia el robot móvil autónomo.

A principios de los años sesenta se introducen en la industria, de modo significativo, los robots manipuladores como un elemento más del proceso productivo. Esta proliferación, motivada por la amplia gama de posibilidades que ofrecía, suscitó el interés de los investigadores para lograr manipuladores más rápidos, precisos y fáciles de programar. La consecuencia directa de este avance originó un nuevo paso en la automatización industrial, que flexibilizó la producción con el nacimiento de la noción de célula de fabricación robotizada.

Los trabajos desarrollados por los robot manipuladores consistían frecuentemente en tareas repetitivas, como la alimentación de las distintas máquinas componentes de la célula de fabricación robotizada. Ello exigía ubicarlas en el interior de un área accesible para el manipulador, caracterizada por la máxima extensión de sus articulaciones, lo cual podría resultar imposible a medida que la célula sufría progresivas ampliaciones. Una solución a este problema se logra al desarrollar un vehículo móvil sobre raíles para proporcionar un transporte eficaz de los materiales entre las distintas zonas de la cadena de producción. De esta forma, aparecen los primeros *vehículos guiados automáticamente* (AGV's). Una mejora con respecto a su concepción inicial estriba en la sustitución de los raíles como referencia de guiado en la navegación por cables enterrados, reduciéndose, con ello, los costes de instalación.

La posibilidad de estructurar el entorno industrial permite la navegación de vehículos con una capacidad sensorial y de razonamiento mínimas. De este modo, la tarea se estructura en una secuencia de acciones en la que a su término el vehículo supone que ha alcanzado el objetivo para el que está programado. Ante cualquier cambio inesperado en el área de trabajo que afecte el desarrollo normal de la navegación, el sistema de navegación del vehículo se encontrará imposibilitado para ejecutar acciones alternativas que le permitan reanudar su labor. Sin embargo, por sus potenciales aplicaciones fuera del ámbito industrial, donde resulta costoso o imposible estructurar el entorno, se les dotó, en la búsqueda de un

vehículo de propósito general apto para desenvolverse en cualquier clase de ambiente, de un mayor grado de inteligencia y percepción. Una definición correcta de robot móvil plantea la capacidad de movimiento sobre entornos no estructurado, de los que se posee un conocimiento incierto, mediante la interpretación de la información suministrada a través de sus sensores y del estado actual del vehículo.

El uso de robots móviles está justificado en aplicaciones en las que se realizan tareas molestas o arriesgadas para el trabajador humano. Entre ellas, el transporte de material peligroso, las excavaciones mineras, la limpieza industrial o la inspección de plantas nucleares son ejemplos donde un robot móvil puede desarrollar su labor y evita exponer, gratuitamente, la salud del trabajador. Otro grupo de aplicaciones donde este tipo de robots complementa la actuación del operador lo componen las labores de vigilancia, de inspección o asistencia a personas incapacitadas. Asimismo en aplicaciones de teleoperación, donde existe un retraso sensible en las comunicaciones, resulta interesante el uso de vehículos con cierto grado de autonomía.

El robot móvil autónomo se caracteriza por una conexión *inteligente* entre las operaciones de percepción y acción, que define su comportamiento y le permite llegar a la consecución de los objetivos programados sobre entornos con cierta incertidumbre. El grado de autonomía depende en gran medida de la facultad del robot para abstraer el entorno y convertir la información obtenida en ordenes, de tal modo que, aplicadas sobre los actuadores del sistema de locomoción, garantice la realización eficaz de su tarea. De este modo, las dos grandes características que lo alejan de cualquier otro tipo de vehículo se relacionan a continuación (Lozano-Pérez, 1.990):

- Percepción: Determina la relación del robot con su entorno de trabajo, mediante el uso de los sensores de a bordo.
- Razonamiento: Determina las acciones que se han de realizar en cada momento, según el estado del robot y su entorno, para alcanzar las metas asignadas.

De este modo, la capacidad de razonamiento del robot autónomo móvil se traduce en la planificación de unas trayectorias seguras que le permitan la consecución de los objetivos encomendados. La ejecución de la tarea debe realizarla en bucle cerrado para adaptarse a la navegación sobre entornos no estructurados. No se emplea un bucle de control tradicional, ya que la acción no se genera por la simple realimentación de la salida.

Por tanto, resulta necesario el uso de un planificador con capacidad de análisis geométrico que conozca el estado del entorno y del robot junto a sus características cinemáticas y dinámicas. De este modo, se realiza la transformación de los datos suministrados por la percepción en referencias de control adecuadas que no traspasen ninguna de las limitaciones físicas del vehículo, y que definan una trayectoria libre de obstáculos que garantice el logro de las metas determinadas en la tarea. Así, el planificador se configura como el responsable, en gran medida, de la eficacia del vehículo en la navegación, por lo que en consecuencia, su diseño precisa una especial atención.

1.2. Contribuciones de la tesis.

Esta tesis ofrece resultados teóricos y experimentales relacionados con el problema de la planificación de trayectorias en dos dimensiones en la navegación de robots móviles autónomos. Se supone que la tarea que debe realizar se define mediante el uso de un mapa del entorno y un conjunto de puntos objetivos que se desean alcanzar. Con estos datos el planificador construye una trayectoria con buenas propiedades para ser utilizada por el seguidor y que minimiza el esfuerzo de control sobre el vehículo. La construcción de la trayectoria se lleva a cabo en un primer paso de planificación espacial, para, con posterioridad, realizar la segunda etapa de planificación temporal. Así, las contribuciones de esta tesis se refieren a las dos fases mencionadas, entre las que cabe destacar:

i) Formalización de un procedimiento para eliminar la restricción de un robot puntual en la planificación basada en grafos de visibilidad.

La planificación basada en grafos de visibilidad construye una ruta desde un punto inicial hasta otro final mediante el uso de segmentos rectilíneos. Estos se definen mediante el uso de los vértices de los polígonos que modelan los obstáculos del entorno y pueden yacer por completo en el espacio libre o bien sobre alguna de las aristas. Sólo un robot móvil adimensional puede recorrer tal camino sin colisionar con algún obstáculo. Por tanto, la ruta se denomina semi-libre de obstáculos. Eliminar esta restricción resulta importante en la aplicación del algoritmo de planificación sobre un sistema real. El método propuesto supone una expansión del entorno según cierto factor para garantizar la navegación segura del vehículo.

ii) Desarrollo de un método de generación de caminos locales con buenas propiedades especializado en el sorteo de obstáculos en tiempo real.

La capacidad de un robot autónomo móvil para seguir un camino depende en gran medida de las características del mismo. Por tanto, resulta necesario construirlo de forma adecuada para minimizar los errores en la navegación. El método propuesto se basa en curvas -Splines y no sólo garantiza las buenas propiedades del camino, sino que además realiza la generación en tiempo real. Para ello, se han desarrollado dos nuevas propiedades para la imposición de condiciones iniciales y la acotación cartesiana de las curvas -Splines.

iii) Generalización del método para el problema de la generación de caminos globales.

Existen muchos métodos para la generación de caminos globales, sin embargo los que garantizan buenas propiedades poseen un alto grado de complejidad computacional. La generalización del método de construcción de caminos locales resulta interesante debido a sus características de eficacia y rapidez. Así, mediante un ajuste de las nuevas propiedades definidas sobre las curvas -Spline y la generalización del método de sorteo de obstáculos, se especifica un procedimiento para la construcción de caminos globales.

iv) Integración del método con un algoritmo de planificación basado en grafos de visibilidad.

La especificación de un camino para cumplimentar ciertos objetivos debe realizarse mediante el uso de un algoritmo planificador y de otro generador. La integración de ambos resulta importante para asegurar que la ruta construida por el primero posea las características adecuadas, con objeto de especificar sobre ella un camino admisible, definido por el segundo de los procedimientos. La introducción de un nuevo tipo de grafo que además de simbolizar el entorno, aloja información cinemática del vehículo, y el desarrollo de un algoritmo especializado en la búsqueda sobre el mismo, permiten la integración deseada.

v) Desarrollo de un procedimiento de planificación de velocidades y conversión de caminos en trayectorias.

La ejecución del camino especificado en la etapa de planificación espacial exige informar al seguidor de la referencia de velocidad utilizada para la navegación. Muchos métodos evitan este problema mediante la consideración de una referencia constante y lo suficientemente baja como para que la dinámica del vehículo no afecte en demasía al seguimiento. Sin embargo, esta solución no siempre resulta válida, merced a la necesidad de cumplir ciertos requisitos operacionales o bien en aras de minimizar el tiempo de navegación. El procedimiento propuesto construye una curva que garantiza la variación suave de la referencia de la velocidad, así como la continuidad de la aceleración. Además permite la imposición de ligaduras debidas a las características cinemáticas y dinámicas del vehículo. Por último, el estar basado en el uso de splines cúbicas le confieren un tiempo mínimo de cómputo.

vi) Verificación de cada uno de los métodos desarrollados mediante la experimentación sobre del robot autónomo móvil RAM-1.

Todos los resultados teóricos obtenidos han sido formalizados mediante el uso de algoritmos, e implantados sobre el robot autónomo móvil de la Universidad de Málaga RAM-1. De esta forma, se ha comprobado la validez de los métodos expuestos con experimentos reales. Las gráficas que ofrecen la comparación entre los resultados teóricos y los experimentales se exponen a lo largo de toda la tesis.

1.3. Marco de realización.

La realización de esta tesis ha estado determinada por las actividades de investigación que realizan en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, en la línea de los robots móviles y, en particular, en el diseño y construcción del Robot Autónomo Móvil RAM-1.

La elaboración del RAM-1, dirigida por el orientador de la presente tesis, ha sido subvencionada por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología; Plan PETRI para Transferencia de Tecnología; “Diseño y Desarrollo de un Prototipo de Vehículo Autónomo con Estrategias Avanzadas de Control para Aplicaciones Industriales”; PTR-0150.

El nacimiento de esta tesis ha sido posible gracias a la adjudicación de una Ayuda a la Investigación, otorgada al autor, y concedida por la Comisión Científica de Andalucía para la actividad de Control de Procesos y Robótica, para ser desarrollada en el seno del Grupo de Ingeniería de Sistemas y Automática. Asimismo, el autor ha sido beneficiario de una beca a cargo del proyecto de investigación PTR-0150 hasta Febrero de 1.992.

El autor se ha ocupado, de modo directo, de la especificación y construcción del sistema de planificación a bordo del robot RAM-1. Así, todos los experimentos realizados se han llevado a cabo con el uso del mencionado robot móvil.

La implantación de todos de los algoritmos, obtenidos como fruto de la investigación, ha sido realizada mediante el uso del lenguaje C, bajo el sistema operativo UNIX, y sobre estaciones de trabajo Sun Microsystems SPARC 2.

1.4. Estructura de la tesis.

La tesis se encuentra dividida en siete capítulos, dos apéndices y las referencias bibliográficas. Excepto este primer capítulo y el dedicado a las conclusiones y futuros desarrollos, los restantes se inician con una introducción, que expone la problemática que se debe resolver junto con una breve descripción del contenido, y concluyen en unas conclusiones, que destacan los aspectos más relevantes de cada capítulo. Asimismo, se incluyen en estas últimas los resultados experimentales en aquellos capítulos que lo requieran. La organización de la tesis responde a la resolución progresiva del problema de la planificación de trayectorias, y su contenido se describe en los siguientes párrafos del presente apartado.

El capítulo 2, titulado “Navegación en Robots Móviles”, introduce los conceptos fundamentales que definen la realización de trabajos por parte de los robots móviles. Así, en primer lugar se presenta la estructura general de un navegador estratégico, para, con posterioridad, ocuparse de la formalización del tema central de la tesis: la planificación de trayectorias en dos dimensiones. De este modo, en segundo lugar, se concretan los diferentes aspectos derivados esta última cuestión. La planificación de una ruta a través de

un entorno con obstáculos, el ajuste de una curva para la especificación del camino y la conversión de éste en trayectoria, para asegurar la navegación segura del robot móvil autónomo, son los aspectos introducidos en este capítulo y que se desarrollarán a lo largo de la tesis.

El capítulo 3, con título “Planificación de caminos mediante grafos de visibilidad”, desarrolla el método de planificación escogido entre los expuestos en el segundo capítulo para la búsqueda de una ruta libre de obstáculos. Asimismo, introduce la planificación cimentada en subgrafos de visibilidad y expone una metodología, basada en cierto procesamiento previo sobre el entorno, útil para eliminar la restricción de un robot puntual que presenta el planteamiento original.

El capítulo 4, bajo epígrafe “Generación de caminos locales: Sorteo de Obstáculos”, describe un método para la construcción de una curva con ciertas propiedades que garantizan la admisibilidad para ser seguida por un robot móvil. El procedimiento, apoyado en curvas de tipo C^2 -Spline, verifica la continuidad en posición, orientación y curvatura del camino, así como la variación suave y lineal de esta última. Estas características, conseguidas a un elevado coste computacional por otros métodos, junto a la eficacia del algoritmo descrito, proporcionan la posibilidad de generación del camino local en tiempo real. El desarrollo de dos nuevas propiedades sobre las curvas C^2 -Splines han conferido las mencionadas características al procedimiento.

El capítulo 5, titulado “Generación de caminos globales mediante curvas C^2 -Splines”, propone una generalización del método expuesto en el cuarto capítulo y su posterior integración con el algoritmo de planificación basado en grafos de visibilidad descrito en el tercer capítulo. De este modo, se realiza en primer lugar un ajuste de las nuevas propiedades de las curvas C^2 -Spline para garantizar la interpolación de cada uno de los vértices que componen la ruta, así como empezar y terminar con ciertas posturas específicas. En segundo lugar, para realizar la integración, se introduce el concepto novedoso de grafo de visibilidad cinemático como herramienta para simbolizar el entorno; mediante su uso se garantiza la planificación de una ruta sobre la que puede construirse un camino admisible, según el método propuesto.

El capítulo 6, con título “Planificación de velocidades”, propone una metodología para la conversión de un camino en trayectoria mediante la adición al primero de un perfil de velocidades adecuado. La obligatoriedad de esta operación responde a la necesidad de emplear una referencia de velocidad, que garantice el seguimiento del camino sin violar alguna de las restricciones de movimiento del robot móvil o algunas de las consideraciones

operacionales debidas a la naturaleza de la tarea que debe efectuar. Para ello, en principio se introduce el concepto de curva espacio-temporal como herramienta para la construcción del perfil de velocidades. A continuación, se realiza un estudio de las diferentes limitaciones de velocidad y aceleración a las que se ve sometido el vehículo durante la navegación. Por último, se propone el algoritmo de conversión de un camino a trayectoria, mediante la consideración de las limitaciones estudiadas, en dos fases diferenciadas: planificación de velocidades y generación del perfil de velocidad. El uso de splines cúbicas asegura la continuidad en la velocidad y la aceleración así como la variación suave de esta última.

El capítulo 7, “Conclusiones y Desarrollos Futuros”, destaca los aspectos y contribuciones más relevantes de la tesis, a la vez que las futuras líneas de investigación derivadas del trabajo realizado.

Por último el apéndice A realiza una descripción del robót autónomo móvil RAM-1, y el apéndice B concreta ciertas nociones sobre curvas paramétricas.