

---

## CAPITULO 7.

# Conclusiones y Desarrollos Futuros.

---

### 7.1. Conclusiones.

---

La planificación y generación de trayectorias se constituye como uno de los problemas claves en la navegación autónoma de robots móviles. Esta debe realizarse según la tarea específica a llevar a cabo, la topología del entorno y las características del vehículo. En este punto, aparece el concepto de trayectoria aceptable, que se define como aquella que resulte libre de obstáculos, además de ser admisible desde el punto de vista cinemático y dinámico. Estas tres cuestiones pueden resolverse de forma separada; buscar una ruta libre de obstáculos para construir sobre ella un camino admisible y, por último, asignarle una curva de velocidad que no traspase ninguna de las restricciones que presenta el vehículo. Las contribuciones de esta tesis afectan a estas tres fases, que se han materializado en la definición de un método de generación de caminos locales y globales, el cual se ha integrado con un algoritmo de planificación de rutas basado en grafos de visibilidad. Otra aportación consiste en la creación de un procedimiento para la adecuación de los caminos en trayectorias.

La capacidad de un robot móvil para seguir un camino depende en gran medida de las características del mismo. Según el análisis realizado en el segundo capítulo, mediante el uso del modelo de la bicicleta, la continuidad en posición, orientación y curvatura son las cualidades básicas de un camino. Asimismo, se recomienda una variación suave y lineal de la última variable como una medida eficaz para reducir el esfuerzo de control en el seguimiento. De este modo, el método propuesto garantiza la construcción de caminos admisibles desde el punto de vista cinemático con todas las cualidades expuestas, amén de su bajo coste computacional. La utilización de curvas de  $\beta$ -Spline y el desarrollo de nuevas propiedades para este tipo de funciones permiten la consecución del objetivo planteado.

Existen numerosos métodos para la construcción de una ruta (curva sólo continua en posición) libre de obstáculos para posibilitar la navegación desde un punto inicial hasta otro final. Sin embargo, ninguno garantiza la posibilidad de construcción de un camino admisible y continuo en curvatura sobre la ruta calculada que acredite una navegación segura. La definición del concepto novedoso de *grafo de visibilidad cinemático* y del algoritmo de búsqueda  $V^*$  como herramientas de la planificación de rutas, permite la integración del método de generación de caminos propuesto con un algoritmo de planificación basado en grafos de visibilidad. Si bien aumenta con ello el tiempo de la planificación, la utilización de un mismo grafo de visibilidad cinemático en tanto el entorno permanezca inalterable, simplifica el cálculo del camino de referencias asociado a la ruta solución y por tanto disminuye la complejidad temporal en el proceso de generación. Además las pequeñas variaciones en el entorno pueden solventarse mediante el algoritmo de generación de caminos locales, según lo expuesto en el cuarto capítulo.

Pocos métodos existentes en la bibliografía versan sobre el problema de planificación de velocidades de robots móviles para la transformación de los caminos en trayectorias. De este modo, la mayoría supone que el camino construido se ejecutará mediante el uso de un valor de velocidad constante lo suficientemente pequeño para que la dinámica del vehículo afecte lo menos posible al seguimiento del camino. La introducción de la curva espacio-temporal en conjunción con una metodología de planificación y generación de perfiles de velocidad suaves, permite la construcción de unas trayectorias admisibles para la navegación que aseguran el movimiento estable del vehículo, sin traspasar ninguna de las restricciones, a lo largo de todo el camino. Esta metodología cobra mayor importancia en la navegación de caminos a altas velocidades.

Los distintos procedimientos obtenidos en esta tesis, se han formalizado en forma de algoritmos que definen de forma concisa las aportaciones de la presente tesis. Asimismo, se ha ilustrado, en forma de gráficas, un conjunto de experimentos reales con el robot autónomo móvil RAM-1, que verifican el rendimiento de cada uno de los métodos propuestos. Como método de seguimiento de trayectorias, se ha utilizado la denominada de persecución pura. Se concluye, a partir de los resultados obtenidos, la posibilidad de construcción de trayectorias admisibles a bajo coste computacional, que garantizan, por otra parte, las restricciones presentadas por el entorno y el vehículo, y que facilitan la posterior labor del algoritmo de seguimiento.

## 7.2. Desarrollos futuros.

---

Las principales ampliaciones de los trabajos realizados en la presente tesis, responden, de forma principal, a los puntos que se relacionan a continuación:

- i) **Modificación del método de sorteo de obstáculos para la navegación en entornos desconocidos.** Las características del camino construido, junto con la rapidez de la generación del mismo, permite la utilización del mencionado método junto a un sistema sensorial basado en un rastreador láser radial para la navegación en tiempo real sobre entornos desconocidos. De este modo, con la coordinación adecuada de ambos elementos se podría llevar a cabo la actualización tanto de la trayectoria como del mapa del entorno sin necesidad de efectuar la parada del vehículo.
- ii) **Planificación en tres dimensiones.** La navegación en interiores en general, y en ambientes industriales en particular, en función de la topología del terreno resulta posible despreciar la tercera dimensión en favor de la utilización de una planificación en el plano. Sin embargo, la navegación en exteriores requiere de esta información adicional para la planificación de caminos seguros a través de áreas abruptas. De este modo, a cada tramo planificado resulta necesario añadirle información sobre el grado de elevación que posee, información que será utilizada en otro momento en la construcción de una nueva curva -Spline que representará la variación de cota. La planificación de velocidades también se hallaría afectada al entrar en juego nuevos comportamientos dinámicos que permanecían ocultos en el planteamiento inicial.
- iii) **Regeneración del grafo de visibilidad cinemático.** La generación del grafo resulta costoso desde el punto de vista computacional, por ello sólo se realiza una vez en el proceso de inicialización del navegador, y su validez permanece mientras el entorno no sea alterado. De este modo, cualquier cambio provoca la necesidad de reconstrucción del grafo en su totalidad, con la consecuente carga del sistema. Para evitarlo la solución adoptada es el uso del algoritmo de generación de caminos locales que permite eludir la colisión con cualquier obstáculo inesperado del entorno. Sin embargo, sería de sumo interés la modificación parcial según los cambios que hayan acontecido, para que el grafo de visibilidad cinemático resulte coherente con el estado actual del entorno a un menor coste computacional.

- iv) **Autoajuste en la planificación de velocidades.** Según el desarrollo efectuado en el sexto capítulo, la planificación de velocidades es fruto de un trabajo previo de análisis de la cinemática y dinámica del vehículo. Sin embargo, este estudio no se halla libre de imperfecciones que pueden conducir a la especificación de un perfil de velocidades inadecuado. La interacción de las ruedas del vehículo con el suelo se constituye como un comportamiento complejo de modelar que afecta al vehículo desviándolo de su trayectoria, y que resulta factible de mitigar mediante el uso de una velocidad adecuada. Por ello, una vía para evitar este problema es el uso de sensores (por ejemplo acelerómetros) que informen de la calidad del seguimiento realizado sobre la trayectoria. De este modo, según esta realimentación se ajustarían, mediante el uso de técnicas de inteligencia artificial, los valores calculados en la planificación de velocidades. Este aprendizaje proporciona una forma de acomodar los datos teóricos obtenidos por simulación a la realidad del robot y del entorno.
- v) **Integración dentro de un robot móvil de arquitectura mixta.** El trabajo realizado en esta tesis se halla enmarcado dentro de una filosofía de navegación estratégica (*sensing - planning - tracking*). Sin embargo, existen también procedimientos estratégicos y reactivos, donde la planificación entra a formar parte del sistema como un comportamiento más. Con ello, se consigue ampliar el grado de utilización del robot al proporcionar una mayor independencia del mismo sobre el ámbito de trabajo. Así, este tipo de arquitectura se muestra más eficiente sobre entornos desconocidos e incluso dinámicos, y resulta fácil de adoptar a partir de un navegador estratégico.