

1. Introducción

En este proyecto denominado “Sistema Distribuido de Navegación Autónoma”, se propone y estudia un método cuya finalidad es hacer que un número ilimitado de vehículos coexistentes en un plano encuentren una solución común que permita a cada uno de ellos alcanzar una posición objetivo teniendo en cuenta el movimiento del conjunto.

1.1 La Navegación Autónoma

1.1.1 Antecedentes

La Navegación Autónoma es la capacidad que posee un vehículo para encontrar un recorrido que le permita llegar desde una posición origen a un punto destino de un plano, evitando los obstáculos inherentes al mismo.

Ésta habilidad suscita gran interés en el mundo de la robótica actual, debido a que rompe en gran medida la dependencia existente entre el hombre y la máquina, permitiendo una mayor optimización en los procesos en los que éstos últimos intervengan:

- Robótica Industrial: en entornos fuertemente industrializados, los autómatas suelen adquirir el papel del transporte y la manipulación de objetos pesados o peligrosos. La independencia del operario a la hora realizar dichas tareas permite un aumento de la velocidad de ejecución de las mismas y una minimización drástica del riesgo de accidente en el que pueda estar implicado dicho usuario. De esta forma, la independencia hombre-máquina, permite una maximización de la eficiencia minimizando riesgos.
- Robótica Doméstica: la capacidad de movimiento autónoma de los robots domésticos permite a los mismos realizar tareas tediosas del hogar (como aspirar el polvo) sin la necesidad de la presencia del usuario. Dicha característica se antoja imprescindible para cualquier autómata con capacidad de movimiento, dado que en la mayoría de los casos su presencia se justifica al minimizar la necesidad de interacción con el usuario.



Figura 1.1: Robot Aspiradora Roomba 555

Capítulo 1. Introducción

- Robótica para Salvamento: la peligrosidad asociada a determinados escenarios, justifican la necesidad de autómatas en sustitución del ser humano¹. En ellos, el equipo suele permanecer en todo momento comandado por un operario de forma remota desde una posición segura para el mismo. Sin embargo, la automatización de tareas como el traslado del sistema, permiten al usuario centrar su atención en otras labores de mayor importancia.
- Robótica militar: la creciente automatización de la industria militar ha permitido el desarrollo de múltiples prototipos de vehículos completamente autónomos capaces de rastrear y localizar posibles amenazas y en determinados casos incluso destruirlas, sin necesidad de que un ser humano intervenga en dicha misión poniendo en peligro su vida. Esto permite minimizar el costo de vidas humanas en los conflictos armados.
- Robótica de Seguridad: existe una creciente tendencia a la sustitución, parcial o completa, del ser humano de los sistemas de vigilancia, debido a que una máquina carece de los problemas de disminución de atención con respecto al tiempo que caracteriza a las personas. Dichos sistemas pueden verse complementados por la inclusión de agentes móviles, consiguiendo gracias a su movimiento autónomo una mayor supervisión de la zona de vigilancia a la vez que una minimización de las zonas ciegas² de la misma.



Figura 1.2: UGV Militar MQ1 Predator

1.1.2 El Problema de la Navegación Autónoma

Históricamente la navegación es uno de los campos en los que más esfuerzos se han concentrado. El coste del transporte de una mercancía está intrínsecamente ligado al recorrido que la misma siga, de forma que la optimización de la trayectoria es un factor muy a tener en cuenta para la minimización de costos.

¹ Existen múltiples escenarios en los que los autómatas han sido exitosamente introducidos en sustitución del ser humano por motivos de peligrosidad. Incendios, zonas radioactivas, desastres naturales o desactivación de bombas son los ejemplos más comunes en los que pueden encontrarse a día de hoy una amplia aceptación de los mismos en pro de la seguridad del manipulador.

² Zona Ciega: Espacio dentro del perímetro de vigilancia que queda sin supervisión.

Para la correcta resolución de dicha problemática, la navegación autónoma ha de hacer frente a los siguientes retos:

1. Localización: el correcto posicionamiento en el plano de trabajo de forma continua es crucial para poder alcanzar el objetivo.
2. Detección de Obstáculos: el agente ha de conocer su entorno, localizar obstáculos y posicionarlos con respecto a su ubicación y a un mapa global. Esto es necesario para poder planificar una ruta en la que se pueda alcanzar el destino.
3. Planificación de Rutas: el sistema ha de contar con la capacidad de, dado el mapa con los obstáculos y la posición actual y destino, encontrar una ruta que permita llegar al agente a su objetivo sorteando los obstáculos.
4. Seguimiento de Rutas: el correcto seguimiento de la ruta establecida permite alcanzar el objetivo sin colisionar con los obstáculos adyacentes al mismo.

El siguiente diagrama muestra la relación entre los bloques mencionados:

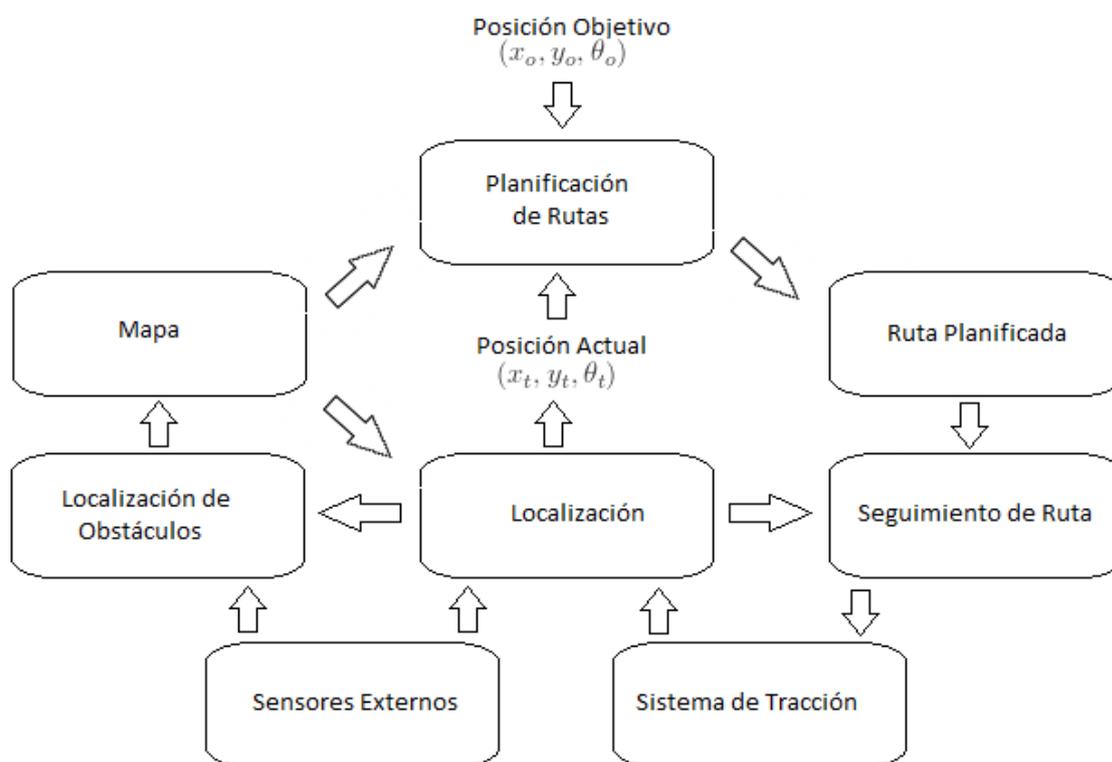


Figura 1.3: Arquitectura de un Sistema Navegación Autónoma

Para comprender más fácilmente la problemática asociada al caso del multiagente, comenzaremos estudiando el caso de un único agente en un plano bidimensional.

Capítulo 1. Introducción

1.1.2.1 Localización

Todo sistema de navegación perteneciente a un plano puede ser representado en el mismo a través de un vector de tres elementos (x,y,θ) , donde x e y representan la posición con respecto a un plano cartesiano y θ la orientación del sistema con respecto mismo. Dicho plano cartesiano ha de ser previamente fijado, creando de ésta forma un marco de referencia que denominamos “Sistema de Coordenadas del Mundo”.

Por lo general, todo método de localización utiliza para posicionarse la información adquirida por odometría del sistema de tracción³, las observaciones de los sensores externos, capaces de determinar la posición con respecto a puntos de referencia conocidos, y en algunos casos el uso de sistemas de posicionamiento externos tipo GPS⁴ o sistemas inerciales.

La reciente evolución en el mundo de los sensores combinado con las actuales técnicas de filtrado⁵ hace que en las condiciones apropiadas sea posible estimar la posición y la orientación de un vehículo con un pequeño margen de error.

No obstante, no siempre es posible trabajar en las condiciones deseadas y la minimización de dicho error en condiciones adversas suele conllevar un alto encarecimiento de los sensores asociados además de un notable aumento en la capacidad de cómputo necesaria para procesar dicha información, sin que ello asegure en todo momento un error aceptable.

³ Odometría: mecanismo capaz de medir la posición de un robot respecto de su ubicación en origen realizando mediciones sobre el sistema de tracción. Por lo general dichos sistemas suelen contar las vueltas dadas por las ruedas emplazadas sobre el eje en el que se sitúa el sistema de referencia. Su fiabilidad suele depender de la configuración tractora del agente, y es decremental conforme aumenta el recorrido realizado.

⁴ Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global): sistema compuesto de 24 satélites de órbita baja que permiten por triangulación determinar la posición en globo terráqueo en la que se realiza la medición. Aunque existen técnicas para su minimización, el error típico de éste tipo de sistemas es de $\pm 2'5m$.

⁵ Filtro de Kalman: sistema de filtrado basado en observación, predicción y corrección de las medidas con las que en última estancia se determina la posición de un equipo.

1.1.2.2 Localización de Obstáculos

Los sistemas de localización asociados a los robots viajeros tratan de hacer uso de las medidas provenientes de los sensores externos para posicionar sobre el mapa interno que el mismo posee, los múltiples obstáculos que el sistema encuentra en su recorrido.

Dichas medidas no suelen estar carentes de errores, y aunque la reciente evolución de la sensorística láser consigue aproximaciones bastante exactas, el sistema suele referenciar los obstáculos encontrados a la posición del robot, por lo que éstos heredan el error de la misma.

Las medidas de dichos sensores pueden ser usadas en caso de conocer la existencia de objetos estáticos para mejorar el posicionamiento, sin embargo, no todos los planos cuentan con dichos objetos definidos por lo que no siempre será posible el uso de ésta característica.

1.1.2.3 Seguimiento de Ruta

El sistema de seguimiento de ruta se encarga de proveer al robot de las actuaciones necesarias sobre su sistema de tracción y dirección para que llegue a una determinada posición objetivo. En un plano ideal, carente de obstáculos, la trayectoria óptima entre la posición actual y la posición destino es la línea recta que surca ambos puntos, por tanto, cualquier sistema de seguimiento tenderá a la minimización de la diferencia entre dicha orientación y la actual, a la vez que potenciará el movimiento del agente en la dirección correcta.

Estos sistemas responderán típicamente al siguiente esquema:

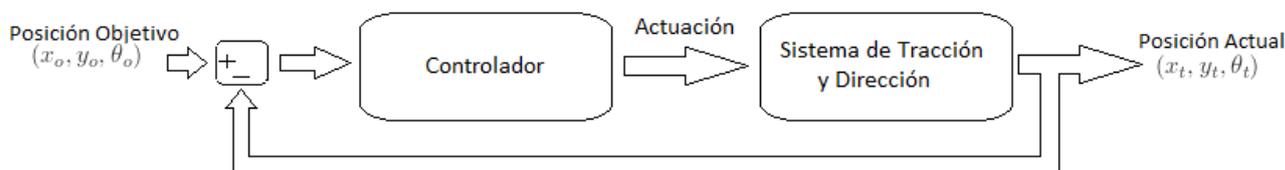


Figura 1.4: Esquema de Control por Realimentación de la Posición

Capítulo 1. Introducción

1.1.2.4 Planificación de Rutas

En un entorno carente de obstáculos, el Sistema de Seguimiento de Ruta sería capaz en todo momento de llevar a un agente a la posición objetivo. No obstante cualquier mapa real dispone de una serie de obstáculos estáticos y dinámicos, que impiden alcanzar el destino en línea recta.

Si bien su resolución ha sido correctamente abordada con técnicas algorítmicas⁶, evolutivas y genéticas⁷, todas ellas suelen estar caracterizadas por proveer al sistema de Seguimiento de Ruta, una secuencia de objetivos intermedios denominados “Way Points”, que permiten al agente alcanzar el objetivo salvando los obstáculos.

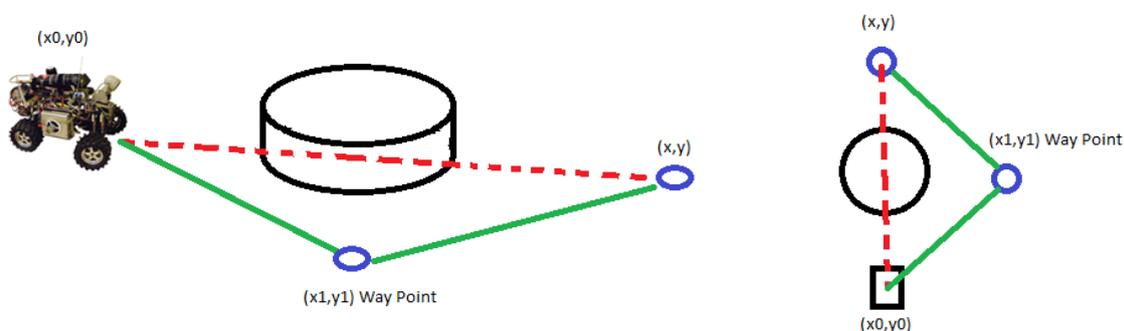


Figura 1.5: Robot esquivando un obstáculo gracias al uso de Way Points

Aunque dichos métodos, denominados Algoritmos de Navegación Deliberativos⁸, han demostrado su eficacia en la resolución de la problemática, el coste computacional asociado aumenta conforme aumenta la complejidad del mapa y la resolución del mismo⁹, no estando estos exentos de errores debido a la herencia generada por los sensores que les aportan información.

⁶ Técnicas Algorítmicas: procesos de cálculo matemático basados en instrucciones detalladas que indican paso por paso la forma de resolución de un problema.

⁷ Técnicas Evolutivas y Genéticas: técnicas que se basan en la simulación de procesos naturales resolviendo complejos problemas de búsqueda. En el caso de la Evolución Genética los procesos son capaces de aprender durante la resolución del problema.

⁸ Sistema de Navegación Deliberativo: sistemas capaces de trasladar la información del mundo real a una descripción simbólica (típicamente un mapa de obstáculos) y analizarla para encontrar un recorrido apropiado hacia el destino prefijado.

⁹ Los sistemas suelen definir sobre el mapa mallas de navegación; la resolución de dichas mallas está ligada a la cantidad de nodos que poseen por cada unidad de distancia. Conforme mayor es la resolución más detallado será nuestro mapa pero mayor la complejidad de computar una solución sobre el mismo.

Una forma de paliar este gasto computacional es la aplicación de dichos métodos de forma previa a la ejecución de la ruta, permitiendo el uso de toda la capacidad computacional del UGV en otras tareas.

Sin embargo, independientemente de las dificultades de generar un mapa previo perfectamente definido, al preprocesar la ruta, el sistema carece de la capacidad de reacción necesaria en caso de encontrar nuevos obstáculos.

Por tanto, en caso de que deseemos una capacidad de reacción ante cualquier imprevisto, es necesario la inclusión de un algoritmo de planificación en tiempo real sobre el computador asociado, que adquirirá mayor relevancia con respecto a cualquiera calculado conforme aumente el desconocimiento del mapa de trabajo.

1.1.3 La Navegación Autónoma ante Obstáculos Dinámicos

La evolución en el mundo de la robótica hace que cada vez sea más conveniente y habitual el empleo de múltiples agentes para realizar tareas coordinadas. Por ello, es interesante la búsqueda de soluciones para el enrutamiento de múltiples agentes. Soluciones flexibles, capaces de readaptarse a los obstáculos imprevistos del mapa de forma dinámica, a la vez que conservando la capacidad de generar trayectorias eficientes.

Hasta ahora se ha tratado el caso de un único agente moviéndose sobre un plano en el que los obstáculos son poco dinámicos o no entorpecen de forma importante. Sin embargo, la inclusión de múltiples robots cambia mucho la problemática asociada, generando que el ámbito de actuación de cada uno de ellos se convierta en un entorno fuertemente activo.

El número de agentes móviles involucrados influye de forma muy importante a la solución a alcanzar dado que cada uno de ellos se presenta como un obstáculo para el resto que cambia la configuración del escenario a cada instante.

Un método de resolución válido para dicha problemática es el uso de los mismos algoritmos utilizados para la navegación de un único agente, aplicándolos sobre un sistema de computación global. Para ello, se suma a la solución la variable tiempo, de forma que generamos una distribución de mapas de obstáculos, dependientes de la posición de cada agente, sólo válidos para determinados instantes puntuales.

Capítulo 1. Introducción

La resolución de dicha problemática se realiza muy comúnmente haciendo uso de un computador centralizado que analiza las múltiples trayectorias posibles de todos los agentes. Generando recorridos superpuestos con restricciones temporales asociadas que obligan a los sistemas a llegar a determinados puntos antes de determinado instante o a no pasar por otros puntos en determinados intervalos.

El hecho de realizar dichos cálculos de forma centralizada acarrea un gran coste computacional asociado y que en la mayoría de los casos genera soluciones poco flexibles y que se asocian a mapas carentes de dinamismo¹⁰.

Por otra parte, el problema de la navegación para entornos fuertemente dinámicos ha sido exitosamente resuelto con técnicas reactivas. En ellos se prima la información adquirida en cada instante por cada agente, respondiendo a cada estímulo externo con respuestas simples.

El conjunto de respuestas generadas, consigue hacer viajar el robot sobre el mapa sin ocasionar colisiones. No obstante, dichas respuestas hacen que en el afán por evitar los obstáculos se pierda la garantía de convergencia hacia una solución para determinadas situaciones.

Por todo ello, se ha decidido crear una solución híbrida, expuesta en el presente documento, y que sea capaz de coordinar a un número indeterminado de agentes sobre un entorno dinámico, conservando trayectorias pseudo-óptimas, sin que todo ello requiera una gran potencia de cálculo.

¹⁰ Estos sistemas centralizados han sido exitosamente implantados en determinadas industrias, donde las máquinas transportan las mercancías pesadas de forma autónoma por un escenario dedicado e independiente de las zonas de tránsito de los empleados. La capacidad de reacción de éstas ante imprevistos no suelen llegar más allá de la de pararse al detectar a un empleado en su ruta trazada y esperar en dicha posición a que el obstáculo desaparezca.