

Planificador de Aparcamiento para Vehículos Autoguiados tipo Coche

Luis Gracia Calandín

Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera CP46022, lui-graca@doctor.upv.es

Josep Tornero i Monserrat

Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera CP46022, jtornero@isa.upv.es

Resumen

El presente artículo aborda la planificación (generación de trayectorias) para realizar el aparcamiento en “línea” (o “cordón”) de un vehículo autoguiado tipo coche. Primero, se muestran planificadores existentes que persiguen el objetivo anterior. Posteriormente, nos decantamos por una línea de los planificadores presentados, para mejorarla y, finalmente, implementarla en un entorno de simulación.

Palabras Clave: Planificadores, Aparcamiento, Vehículos Autoguiados.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés por aumentar el grado de automatización (con los beneficios que ello reporta) de todo tipo de procesos. Uno de los niveles superiores en la automatización es la conducción de vehículos. Con lo cual quedan justificados todos los esfuerzos realizados en la línea de automatizar el guiado de vehículos.

Uno de los puntos más complicados de resolver, en el autoguiado de vehículos, es el aparcamiento en unas condiciones de espacio reducido. Esto se debe, en gran parte, a las restricciones cinemáticas no integrables (ver [1]) del vehículo tipo coche, que es el más habitual. Por lo que se hace necesario maniobrar, es decir cambios del sentido de movimiento.

El tipo de aparcamiento más frecuente en estos casos (por motivos de una mejor utilización del espacio) es el llamado en “línea” o “cordón”. En este trabajo desarrollamos la generación de una trayectoria óptima (planificación) para este caso.

Para ello hacemos, en el apartado 2, un análisis de los planificadores existentes que consiguen el objetivo anterior, decantando nuestra línea de investigación en una de esas direcciones.

Posteriormente, en el apartado 3, desarrollamos un planificador de aparcamiento, con algunas mejoras propias.

Finalmente, en el apartado 4, presentamos resultados de la implementación del planificador realizado, en un entorno de simulación.

2 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EXISTENTES EN LA PLANIFICACIÓN PARA EL APARCAMIENTO

2.1 PLANIFICADORES GENERALES

Puesto que el aparcamiento es un caso particular de la generación de trayectorias, los planificadores generales pueden servir para conseguir un aparcamiento en línea, sobre todo si permiten maniobrar.

A continuación presentamos dos líneas diferenciadas, de planificadores generales, que sirven para realizar un aparcamiento.

2.1.1 Basados en grafos de conexión

Esta línea de investigación consiste en crear un grafo de conexión, o estructura en forma de árbol, en la que las hojas serían posturas (posición + orientación) del vehículo y las ramas la trayectoria para pasar de una hoja a otra. A medida que vamos formando el grafo de conexión comprobamos si hemos llegado o podemos llegar al destino.

Planificadores basados en esta técnica encontramos en [3] y [4]. El problema principal que presentan es el tiempo de cómputo, lo que los hace inviables para funcionar en tiempo real.

2.1.2 Basados en herramientas especiales

Esta línea de investigación consiste en utilizar una serie de herramientas recientes, como son: el modelo en el espacio de estado del vehículo (acompañado o no de otras técnicas); la lógica ‘borrosa’, redes

neuronales; linealización por realimentación de estado con acciones de control especiales (sinusoides, etc.); arquitectura reactiva; etc., para planificar bajo condiciones especiales.

Por ejemplo, [1] utiliza sinusoides para controlar la dirección de un vehículo autoguiado remolcando 'n' *trailers*, realizando el aparcamiento del conjunto.

Esta línea de investigación se encuentra, por el momento, al margen de nuestras necesidades.

2.2 PLANIFICADORES ESPECÍFICOS PARA EL APARCAMIENTO

En este subapartado presentamos dos planificadores ([5] y [2]) orientados específicamente a la realización de maniobras para el aparcamiento.

Ambos planificadores comprenden las etapas:

- Caracterización del espacio para el aparcamiento, realizando para ello una pasada paralelamente al espacio (rectángulo) del aparcamiento.
- Aproximación a un punto desde el que iniciamos las maniobras de aparcamiento.
- Realización de las maniobras hacia delante y hacia atrás hasta situar el vehículo en el destino del aparcamiento.

En [5] se calculan las maniobras de forma geométrica, mientras que en [2] se aplican unas acciones de control preestablecidas que, presuntamente, darían lugar a maniobras adecuadas.

Las diferencias entre [5] y [2] son:

- En [5] hay que detener el vehículo a mitad de la maniobra para reorientar las ruedas directrices, mientras que en [2] la reorientación es progresiva.
- En [2] el tiempo de cálculo es mayor, puesto que utiliza integración numérica, mientras que en [5] todos los cálculos son analíticos.

Nosotros nos decantamos por un planificador geométrico, como en [5], con dos mejoras propias: evitación de colisión con el obstáculo delantero y trasero (no sólo con el lateral) y optimización del punto de aproximación, ambas no consideradas en [5].

Un posible trabajo futuro sería conseguir (combinando [5] y [2]) que, además de lo anterior, el giro de las ruedas directrices fuera progresivo.

3 PLANIFICADOR DE APARCAMIENTO EN LÍNEA

3.1 Características generales del planificador

Como ya hemos comentado el planificador que desarrollamos está basado en cálculos geométricos para evitar la colisión con los obstáculos.

Las fases que comprende el planificador son:

- Caracterización del espacio para el aparcamiento, realizando para ello una pasada paralelamente al espacio (rectángulo) del aparcamiento.
- Maniobra de aproximación a un punto desde el que iniciamos las maniobras de aparcamiento. Este punto se encuentra, longitudinalmente, a la altura de la esquina del obstáculo delantero y, transversalmente, optimizamos para estar lo más pegados posible al obstáculo delantero, sin que se produzca colisión en la primera maniobra *backward*.
- Realización de las maniobras (hacia delante y hacia atrás) hasta situar el vehículo en el destino del aparcamiento, sin que se produzcan colisiones con los obstáculos lateral, delantero y trasero. Cada maniobra consiste en dos tramos simétricos en los que la rueda directriz equivalente* adopta un valor de orientación y el opuesto. Además al principio y al final de la maniobra el vehículo está paralelo al espacio de aparcamiento.

En la Figura 1 se muestran las tres fases descritas

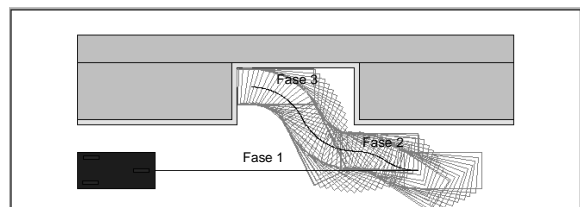


Figura 1: Fases del aparcamiento

3.2 Caracterización geométrica para el aparcamiento

En primer lugar hacemos un estudio de la geometría del vehículo, espacio de aparcamiento, etc.

3.2.1 Parámetros geométricos del vehículo

La Figura 2 muestra los parámetros geométricos de un vehículo tipo coche*.

*Nota: En la Figura del vehículo se ha puesto la rueda directriz equivalente a las dos directrices, puesto que ambas están ligadas por el mecanismo de dirección de Ackerman.

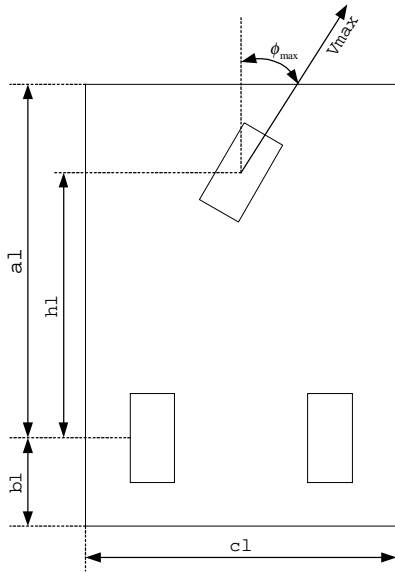


Figura 2: Geometría del vehículo tipo coche*

El significado de las variables y parámetros de la Figura 2 es el siguiente:

a1: distancia entre el eje trasero y la parte delantera del vehículo. *b1*: distancia entre el eje trasero y la parte trasera del vehículo. *h1*: distancia entre los ejes trasero y delantero. *dl*: distancia entre los centros de las ruedas fijas del eje trasero. *cl*: ancho del vehículo *r*: radio de las ruedas del vehículo. ϕ_{max} : Ángulo máximo que se puede orientar la rueda directriz.

3.2.2 Parámetros geométricos del espacio de aparcamiento

La Figura 3 muestra los parámetros geométricos del espacio de aparcamiento.

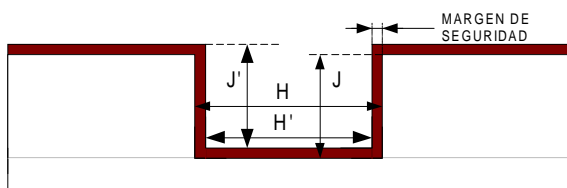


Figura 3: Geometría del espacio de aparcamiento

El significado de las variables y parámetros de la Figura 3 es el siguiente:

J: Ancho de la zona de aparcamiento. *H*: Largo de la zona de aparcamiento. *MS*: Margen de seguridad a considerar. *J'*: Ancho efectivo de la zona de aparcamiento, coincide con *J*. *H'*: Largo efectivo de la zona de aparcamiento, es igual a *H* menos dos veces *MS*.

3.2.3 Relaciones geométricas útiles

→ Relación entre el radio de giro (distancia del centro instantáneo de rotación y el punto medio del eje trasero del vehículo, ver Figura 4) y el ángulo de orientación de la rueda directriz:

$$\rho = \frac{hl}{\tan(\phi)} \quad (1)$$

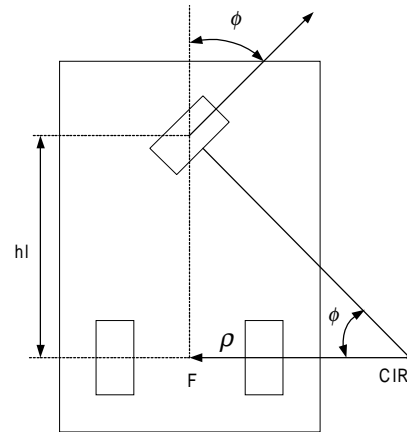


Figura 4: Relación entre el radio de giro mínimo y la orientación máxima de la rueda directriz

A partir de ahora entenderemos como trayectoria la generada por el punto F (punto medio del eje trasero). Así pues tendremos en cuenta la trayectoria como el rastro a dejar por el punto F.

→ Relación (ver Figura 5) entre el radio de giro y la distancia del centro instantáneo de rotación (CIR) a las esquinas del vehículo:

$$\begin{aligned} d1 &= \sqrt{b1^2 + \left(\rho + \frac{cl}{2}\right)^2} & d2 &= \sqrt{a1^2 + \left(\rho + \frac{cl}{2}\right)^2} \\ d3 &= \sqrt{b1^2 + \left(\rho - \frac{cl}{2}\right)^2} & d4 &= \sqrt{a1^2 + \left(\rho - \frac{cl}{2}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

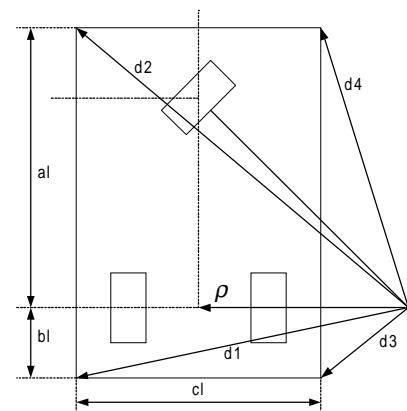


Figura 5: Relación entre el radio de giro y las distancias del CIR y las esquinas del vehículo

→ Relación (ver Figura 6) entre la orientación del vehículo θ y la posición en (X, Y) de las esquinas (P_1, P_2, P_3, P_4) del vehículo respecto al CIR:

$$\begin{aligned} X_{P_1} &= d_1 \cdot \cos(\theta - f_1), & Y_{P_1} &= d_1 \cdot \sin(\theta - f_1) \\ X_{P_2} &= d_2 \cdot \cos(\theta + f_2), & Y_{P_2} &= d_2 \cdot \sin(\theta + f_2) \\ X_{P_3} &= d_3 \cdot \cos(\theta - f_3), & Y_{P_3} &= d_3 \cdot \sin(\theta - f_3) \\ X_{P_4} &= d_4 \cdot \cos(\theta + f_4), & Y_{P_4} &= d_4 \cdot \sin(\theta + f_4) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} f_1 &= \arctan \left(\frac{bl}{\rho + \frac{cl}{2}} \right) & f_2 &= \arctan \left(\frac{al}{\rho + \frac{cl}{2}} \right) \\ f_3 &= \arctan \left(\frac{bl}{\rho - \frac{cl}{2}} \right) & f_4 &= \arctan \left(\frac{al}{\rho - \frac{cl}{2}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

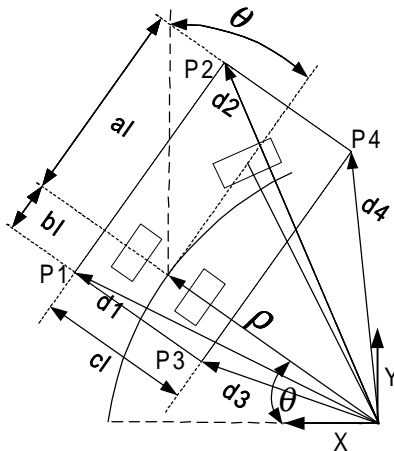


Figura 6: Relación entre θ y la posición de las esquinas del vehículo respecto al CIR

→ Desplazamiento longitudinal y transversal para dos arcos simétricos (ver Figura 7) del mismo valor:

$$\begin{aligned} X &= 2 \cdot \rho \cdot \cos(\xi) & Y &= 2 \cdot \rho \cdot \sin(\xi) \\ Z &= \rho \cdot (1 - 2 \cdot \cos(\xi)) \end{aligned} \quad (4)$$

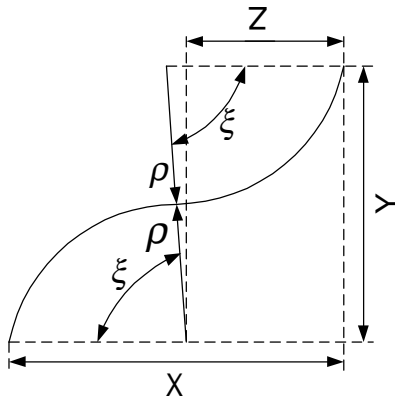


Figura 7: Desplazamiento con arcos simétricos y del mismo valor

3.3 Posibles colisiones

Las colisiones posibles son: la lateral, la delantera, la trasera y la del punto de aproximación.

A continuación describimos y caracterizamos estas colisiones.

3.3.1 Colisión lateral

Es la colisión que se produce con el obstáculo lateral de la zona de aparcamiento. Esta colisión, si se produce, empieza con una de las esquinas exteriores (más cercanas al obstáculo lateral) del vehículo. Concretamente aquella que está en la parte que marca el sentido del movimiento. Por ejemplo, en la Figura 6 es la esquina P1.

Así pues si garantizamos que la esquina exterior que corresponda no colisiona lateralmente no lo hará el resto del vehículo.

Por otro lado dada la simetría de los dos arcos de la Figura 7 basta con analizar el tramo segundo, que es el más próximo al lateral.

Por lo tanto, la condición de que el vehículo no colisione lateralmente es que la esquina exterior correspondiente no colisione en el segundo tramo de la maniobra. Para ello basta comprobar la máxima distancia lateral alcanzada por dicha esquina y comprobar que es menor que el espacio lateral disponible.

La distancia lateral (tomando como referencia el punto inicial de la trayectoria) alcanzada por la esquina P1/P2 (según estemos en *backward* ó *forward*), para un ángulo θ del segundo tramo, utilizando (3) y (4), es:

$$X_{P1/P2}(\theta) = d1/d2 \cdot \cos(\theta - f1/f2) + \rho \cdot (1 - 2 \cdot \cos(\xi)) \quad (5)$$

El máximo de (5) se encuentra para:

$$\hat{\theta} = f1/f2, \hat{X}_{P1/P2} = d1/d2 + \rho \cdot (1 - 2 \cdot \cos(\xi)) \quad (6)$$

El valor de (6.b) es el que hay que comparar con la distancia lateral disponible (a partir del punto inicial de la maniobra) para saber si se produce colisión.

3.3.2 Colisión delantera y trasera

Es la colisión que se produce con los obstáculos delantero y trasero de la zona de aparcamiento.

Esta colisión, si se produce, empieza con la esquina del vehículo que está en la parte más cercana al obstáculo (delantero/trasero) y al centro del arco que

describe la trayectoria (CIR del vehículo). Así pues, puede ser cualquiera de las cuatro esquinas.

Por ejemplo, en la Figura 6 es la esquina P3.

Por lo tanto, si garantizamos que la esquina que corresponda no colisiona con el obstáculo (delantero/trasero) no lo hará el resto del vehículo.

Para ello basta con comprobar que la posición en Y alcanzada por dicha esquina es monótonamente creciente/decreciente (según el caso) en todo el arco. Obsérvese que basta con analizar uno de los dos arcos para cada una de las posibles colisiones delantera y trasera en una maniobra, debido a la simetría entre los dos arcos y que uno de ellos está más cerca del obstáculo a considerar que el otro.

El hecho de que la evolución longitudinal de la esquina a lo largo de uno de los arcos sea monótona implica que no haya máximos/mínimos. Por lo tanto si comprobamos que no hay máximos/mínimos en la esquina correspondiente el vehículo no colisionará, puesto que sabemos que en el punto final/inicial de la maniobra no hay colisión.

Por ejemplo, para la Figura 6, la evolución de la esquina $P3$ (que es la que puede provocar colisión trasera) según (3), es:

$$Y_{P3}(\theta) = d3 \cdot \sin(\theta - f3) \quad (7)$$

El mínimo (por sentido de eje Y en Figura 6) se alcanza para:

$$\hat{\theta} = f3 - \frac{\pi}{2} = \arctan\left(\frac{bl}{\rho_{\min} - \frac{cl}{2}}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

siendo : $0 \leq \theta \leq \xi$, , $0 \leq f3 \leq \pi$

Por lo tanto para un valor de $f3 \leq \frac{\pi}{2} \rightarrow \hat{\theta} \leq 0$ y por lo tanto no existe mínimo. Lo implicaría que no hay colisión trasera. El hecho de que $f3 \leq \frac{\pi}{2}$ viene dado por la condición de que $cl/2 \leq \rho$.

En el caso de $f3 > \frac{\pi}{2}$ ($cl/2 > \rho$) $\rightarrow \hat{\theta} > 0$ y faltaría ver si $\hat{\theta} < \xi$, en cuyo caso habría colisión trasera.

En el caso de que la esquina que puede producir la colisión trasera/delantera sea otra (teniendo en cuenta que cambian los sistemas de coordenadas y el CIR) se obtiene el mismo resultado, pero sustituyendo bl (en $P1, P3$) por al para $P2$ y $P4$.

Así pues para evaluar la colisión trasera o delantera implementamos el Algoritmo 1:

si $\frac{cl}{2} \leq \rho$ (9) \rightarrow no hay colisión
sino
si $\arctan\left(\frac{aux}{\rho - \frac{cl}{2}}\right) - \frac{\pi}{2} > \xi$ (10)
 \rightarrow no hay colisión
{siendo $aux=bl$ para $P1, P3$ y $aux=al$ para $P2, P4$ }
sino \rightarrow hay colisión

Algoritmo 1

3.3.3 Colisión del punto de aproximación

Es la posible colisión con el obstáculo delantero en la maniobra *backward* que se realiza desde el punto de aproximación.

Si esta colisión se produce seguro que colisiona la esquina $P2$, y tiene lugar en el segundo tramo de la maniobra, puesto que en el primer tramo es imposible.

Por lo tanto, si garantizamos que la esquina $P2$ no colisiona con el obstáculo delantero no lo hará el resto del vehículo.

Para ello calculamos $dx1$ para que, cuando la esquina $P2$ pasa a la altura del final del obstáculo delantero, su posición transversal sea menor o igual que cero, es decir: $X_{P2}(Y_{P2}=0) \leq 0$. Para estar los más cerca posible del obstáculo delantero buscamos $X_{P2}(Y_{P2}=0) = 0$. El sistema de coordenadas considerado es el mostrado en la Figura 8.

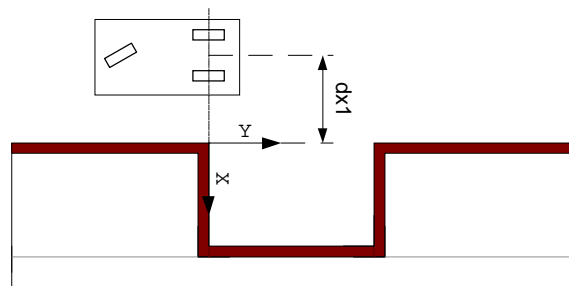


Figura 8: Sistema de coordenadas considerado en la colisión del punto de aproximación

Teniendo en cuenta (3) y (4):

$$\begin{aligned} Y_{P2}(\theta) &= 2 \cdot \rho \cdot \sin(\xi) - \\ &\left(\rho \cdot \sin(\theta) + \frac{cl}{2} \cdot \sin(\theta) + al \cdot \cos(\theta) \right) \\ X_{P2}(\theta) &= -dx1 + \rho \cdot (1 - 2 \cdot \cos(\xi)) + \\ &\rho \cdot \cos(\theta) + \frac{cl}{2} \cdot \cos(\theta) - al \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (11)$$

La evolución de Y_{P2} puede ser: (a) aumentar siempre ó (b) empezar disminuyendo y continuar aumentando (presencia de un mínimo).

Así pues, para obtener $dxl(X_{P2}(\theta(Y_{P2}=0))=0)$ utilizando (11), procedemos de la siguiente forma:

1. Variamos numéricamente $\theta \rightarrow$ empezando en $\theta = \xi$ y decrementando θ hacia cero.
2. Si Y_{P2} (se evalúa para primer par de valores de θ) disminuye estamos en (b), sino estamos en (a)
3. Evaluamos Y_{P2} hasta que sea igual a cero. Si estamos en (b) comprobamos que estamos en un tramo en el que Y_{P2} aumenta, sino seguimos hasta que Y_{P2} vuelva a ser cero.
4. Sustituimos el valor de θ que ha hecho que Y_{P2} sea cero en $X_{P2} \rightarrow X_{P2}(\theta(Y_{P2}=0))$
5. Despejamos dxl de $X_{P2}=0 \rightarrow dxl(X_{P2}(\theta(Y_{P2}=0))=0)$

Algoritmo 2

3.4 Cálculos para el aparcamiento

En este subapartado vamos a detallar los cálculos y algoritmos utilizados para implementar las tres fases de aparcamiento descritas en el subapartado 3.1.

Para la fase a) necesitamos obtener el punto en el que detenernos (previo al de aproximación) desde el que hacer una maniobra *backward* previa para alcanzar el de aproximación. Evidentemente este punto depende del punto de aproximación elegido, y por lo tanto su cálculo es posterior.

Para la fase b) necesitamos calcular la distancia de separación dxl respecto al obstáculo delantero.

Para la fase c) necesitamos un algoritmo de cálculo de maniobras.

3.4.1 Cálculos del punto de aproximación

El punto de aproximación tiene nulo su valor en el eje Y , ver Figura 8, mientras que la distancia dxl hay que calcularla. Para ello buscaremos situarnos lo más cerca posible del obstáculo delantero sin que se produzca colisión en la maniobra *backward* que parte del punto de aproximación.

La forma de proceder es la siguiente:

1. Calculamos (ver Figura 3) el espacio longitudinal disponible Dy como:

$$Dy = H - MS - bl \quad (12)$$
2. Calculamos el radio de giro mínimo (ϕ_{max}) con (1).

3. Calculamos el ξ correspondiente de (4.b) con los resultados de 1. y 2.
4. Comprobamos que no se produce colisión trasera con el *Algoritmo 1*, para los resultados de ξ y ρ obtenidos en 2. y 3. En el caso de que haya colisión hacemos $\rho = cl/2$ y calculamos nuevamente ξ con (4.b).
5. Calculamos la distancia máxima alcanzada por PI , a partir del punto inicial de la maniobra, utilizando (6).
6. Calculamos dxl con el *Algoritmo 2*.
7. Utilizamos 5. y 6. para calcular el valor definitivo de dxl :
 - a. si $(5. - H > 6.)$
 - i. si $(5. - H > Sep_inic^*) \rightarrow$ decrementamos ϕ y volvemos a 1.
 - ii. sino: $dxl=5. - H$
 - b. sino: $dxl=6.$
8. Si: $dxl < cl/2 \rightarrow dxl=cl/2$

*Nota: *Sep_inic* es la separación inicial del vehículo respecto a los obstáculos delantero y trasero en la fase de barrido del vehículo

Algoritmo 3

Por último comprobamos si el valor obtenido es menor que cero, lo cual querría decir que no habría colisión, en caso contrario habrá colisión.

Respecto al *Algoritmo 3* se pueden hacer varios comentarios:

- \rightarrow El hecho de que haya colisión trasera obliga indefectiblemente a reducir el ángulo de orientación de la rueda delantera, y en consecuencia el radio de giro, al cual fijamos para que esta colisión no se produzca seguro.
- \rightarrow Los valores del barrido lateral (a) y de punto calculado por el Algoritmo 2 (b) (para que no se produzca la colisión de punto de aproximación) se utilizan (de los dos el que sea más restrictivo) para calcular dxl .

En el caso de que sea (a) mayor y que nos haga alejarnos del obstáculo delantero buscamos disminuir el ángulo de orientación de la rueda delantera hasta que avancemos tanto con la primera maniobra como distancia hay inicialmente del obstáculo lateral al vehículo.

- \rightarrow En el caso de que el valor asignado a dxl sea menor de la mitad del ancho del vehículo se hace que sea igual a la mitad del ancho del vehículo.
- \rightarrow Los valores finales de ξ y ρ son utilizados para la maniobra *backward* que parte del punto de aproximación.

3.4.2 Cálculo del punto previo al de aproximación

Partimos de la separación inicial del vehículo con los obstáculos delanteros y traseros X_2 y de la separación del punto de aproximación X_1 (calculado en 3.4.1) para calcular la distancia Y_3 que conecte a través de una maniobra (Figura 7) el punto 2 con el 3, tal y como se ilustra en la Figura 9.

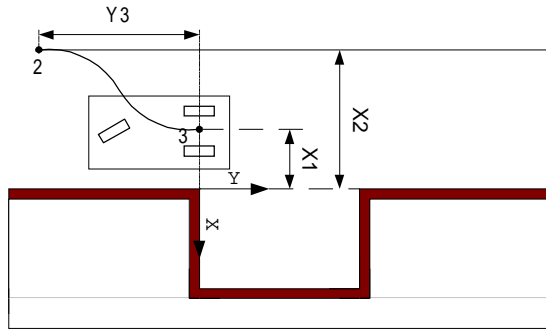


Figura 9: Cálculo del punto previo al de aproximación

La forma de proceder es la siguiente:

1. Calculamos el radio de giro mínimo (ϕ_{max}) con (1)
2. Calculamos ξ con (4.a), teniendo en cuenta que $X = |X_1 - X_2|$
3. Calculamos Y_3 con (4.b)
4. Comprobamos que no se produce colisión lateral con el obstáculo delantero para ello evaluamos: $Mayor(X_2, X_1) \geq (6.b) \rightarrow$ No hay colisión \rightarrow SALIR
5. Aumentamos $Y_3 \rightarrow Y_3 = Y_3 + \Delta Y_3$
6. Calculamos ξ y ρ con el sistema de ecuaciones formado por (4.a,b) para " $X=|X_1-X_2|$ " e " $Y=Y_3$ "
7. Volvemos a 4.

Algoritmo 4

3.4.3 Cálculo de las maniobras backward-forward

Para el cálculo de maniobras, del tipo de la Figura 7, partimos de la separación inicial (W_{max}) del obstáculo lateral para definir ξ y el ρ de cada maniobra.

La forma de proceder es la siguiente:

1. Calculamos el radio de giro mínimo (ϕ_{max}) con (1)
2. Comprobamos que se cumple (9) (para que seguro no haya colisión trasera-delantera), en caso contrario hacemos $\rho = c/2$
3. Calculamos el ξ con (4.b), teniendo en cuenta que $Y = H - 2 \cdot MS = H'$
4. Comprobamos que se cumple $W_{max} \geq (6.b)$, en caso contrario se calculan ρ y ξ para cumplir (4.b) y $W_{max}=(6.b)$.

Algoritmo 5

Se dejan de realizar maniobras cuando se alcanza una separación lateral menor o igual a la mínima deseada.

4 RESULTADOS DEL PLANIFICADOR DESARROLLADO

Se ha implementado el planificador, anteriormente presentado, en un entorno de simulación.

La única diferencia respecto a hacerlo sobre una plataforma real sería el seguimiento de la trayectoria planificada, ya que la implementación del planificador sería intrínsecamente la misma, generándose la misma trayectoria.

A su vez se ha desarrollado una interfaz, ver Figuras 10, 11 y 12, que permite introducir las características geométricas y dinámicas (para el seguimiento) del vehículo, las geométricas del espacio de aparcamiento y las del aparcamiento.

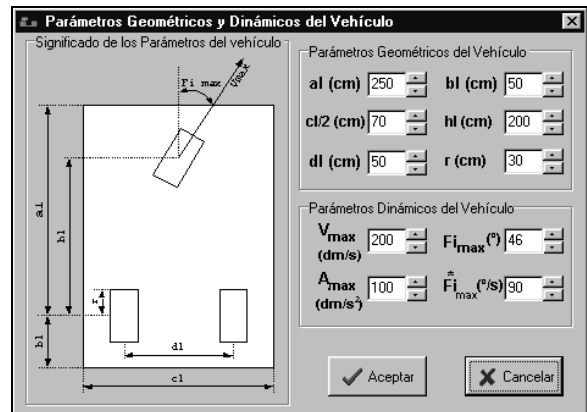


Figura 10: Interfaz desarrollado para introducir las características geométricas y dinámicas del vehículo



Figura 11: Interfaz desarrollado para introducir las características geométricas del espacio de aparcamiento



Figura 12: Interfaz desarrollado para introducir las características del aparcamiento

En la Figura 13 se muestra el ejemplo 1 de aparcamiento en el que se han tomado los siguientes parámetros: $al=150$ cm, $bl=50$ cm, $cl=140$ cm, $hl=105$ cm, $dl=50$ cm, $r=30$ cm, $\phi_{max}=46^\circ$, $H=335$ cm, $J=200$ cm, $MS=20$ cm, Separación inicial (%cl/2)=100%, Separación final mínima (%cl/2)=10%.

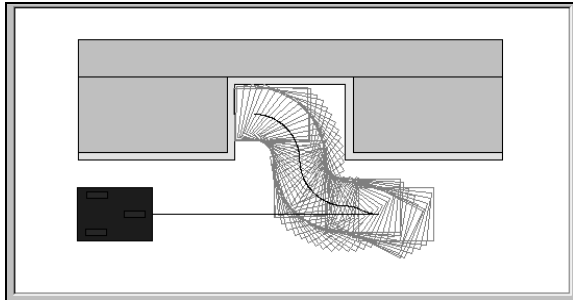


Figura 13: Ejemplo 1 planificación de aparcamiento

En el ejemplo 1 el tiempo de cálculo resulta de 0.438 milisegundos y se realizan 2 maniobras (contando la previa al punto de aproximación).

El vehículo del ejemplo 1 se podría corresponder, por sus dimensiones, con un vehículo de investigación.

En la Figura 14 se muestra el ejemplo 2 de aparcamiento en el que se han tomado los siguientes parámetros: $al=75$ cm, $bl=15$ cm, $cl=350$ cm, $hl=60$ cm, $dl=130$ cm, $r=12$ cm, $\phi_{max}=46^\circ$, $H=330$ cm, $J=360$ cm, $MS=12$ cm, Separación inicial (%cl/2)=10%, Separación final mínima (%cl/2)=10%.

En el ejemplo 2 el tiempo de cálculo resulta de 1.3 milisegundos y se realizan 4 maniobras (contando la previa al punto de aproximación).

El vehículo del ejemplo 2 se podría corresponder, por sus dimensiones, con un vehículo agrícola.

En la Figura 15 se muestra una ampliación de la Figura 14, en la que se puede apreciar que, efectivamente, el vehículo no colisiona con el margen de seguridad.

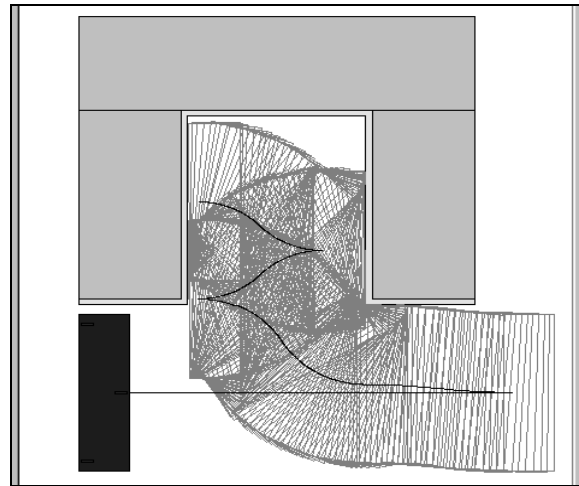


Figura 14: Ejemplo 2 planificación de aparcamiento

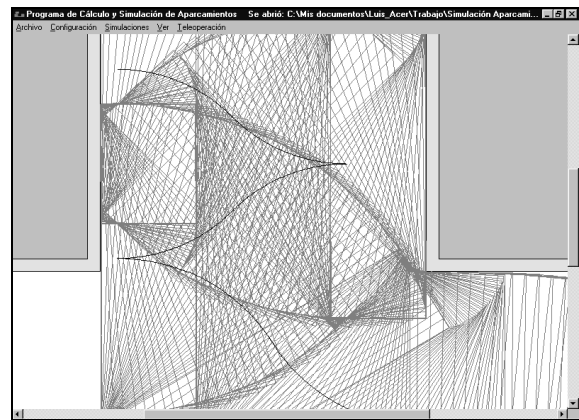


Figura 15: Ampliación del Ejemplo 2

Hay que tener en cuenta en las Figuras 13, 14 y 15, que aunque la trayectoria calculada no invada el margen de seguridad, su representación gráfica discreta puede (debido a redondeos) llegar al límite del margen de seguridad.

En la Figura 16 mostramos como aumentan las maniobras, para el ejemplo 1, ha medida que disminuye H . En el eje de abcisas se representan las maniobras (contando la previa al punto de aproximación) y en el de ordenadas el ratio (en %) de espacio para el aparcamiento. Siendo dicho ratio:

$$\text{ratio} = \frac{\text{espacio}_\text{útil} - \text{longitud}_\text{vehículo}}{\text{espacio}_\text{útil}} \quad (13)$$

$$\text{ratio} = \frac{(H - 2 \cdot MS) - (al + bl)}{(H - 2 \cdot MS)}$$

Se puede comprobar que el número de maniobras crece desmesuradamente a partir de un valor de ratio del 30%.

En cuanto a la referencia a generar (para el posterior seguimiento) utilizamos los valores de V_{max} y A_{max} introducidos (ver Figura 10) de tal forma que para cada tramo tengamos un trapecoide (ver Figura 17).

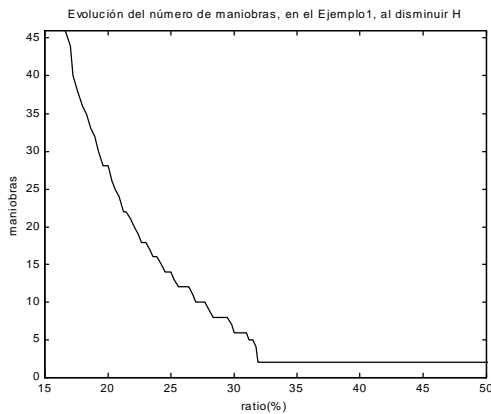


Figura 16: Relación entre el ratio (%) y el número de maniobras

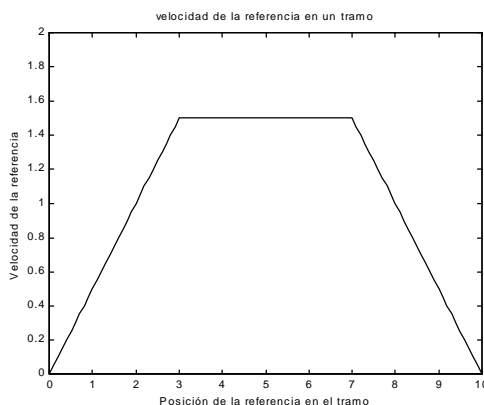


Figura 17: Evolución de la referencia en un tramo

Cada tramo viene marcado por la necesidad de detener el vehículo, bien porque cambiamos el sentido de la marcha o porque hay que reorientar la rueda directriz. Por lo tanto tenemos un tramo en la primera fase de aparcamiento y dos tramos por cada maniobra *backward* o *forward*.

5 CONTROL CINEMÁTICO PARA SEGUIR LA TRAYECTORIA PLANIFICADA

El seguimiento de la referencia, generada como se indica en el apartado anterior, podría realizarse con el control cinemático desarrollado en [6].

Obteniéndose la postura (posición + orientación) del vehículo, en lugar de por visión como en [6], por sensores (incorporados al vehículo) de ultrasonidos (ó laser, ó infrarrojo) que nos dan la distancia del vehículo a los obstáculos. Además, estos sensores se utilizan para caracterizar el espacio de aparcamiento en la fase primera del aparcamiento.

6 CONCLUSIONES

La aportación fundamental del trabajo realizado radica en las dos mejoras introducidas respecto al planificador de [5]. Estas mejoras son, tal y como se

detallaba en el subapartado 2.2, la evitación de colisión con los obstáculos delantero y trasero y la optimización de la separación $dx1$ del punto de aproximación.

Además los resultados de tiempo de cálculo (menores que 1 milisegundo) para la planificación, obtenidos en el apartado 4, permiten trabajar en tiempo real.

Un posible trabajo futuro sería introducir, como se comentó en 2.2, el giro progresivo, de la orientación de la rueda directriz, para pasar de un tramo al otro en cada maniobra. La anterior supone como mejora el no tener que detenernos a mitad de la maniobra para reorientar la rueda directriz.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el gobierno español (Secretaria de Estado de Universidades, Investigación y Desarrollo) TAP1999-1080-C04-04 y (Plan Nacional de I+D) 1FD97-1136.

Referencias

- [1] D. Tilbury, R. Murray and S. Sastry, Trajectory Generation for the N-Trailer Problem Using Goursat Normal Form, Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, San Antonio December of 1993.
- [2] I. E. Paromtchik and C. Laugier, Motion Generation and Control for Parking an Autonomous Vehicle, Proc. Of The IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, USA, April 22-28, 1996, pp. 3117-3122.
- [3] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, 1991, chapter 7.
- [4] J.-P Laumond, P. E. Jacobs, et. al., A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10 No. 5, October 1994.
- [5] K. Jiang, D. Z. Zhang and L. D. Seneviratne, A Parallel Parking System for a Car-like Robot with Sensor Guidance, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 213 Part C 1998.
- [6] L. Gracia, J. Tornero, Control Cinemático de Vehículo Autoguiados utilizando un Sistema por Visión, Actas de las XXII Jornadas de Automática, Barcelona (España), Septiembre de 2001.