

CONTROL LATERAL BORROSO APLICADO A LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE UN VEHÍCULO

Patricio Donato*, Miguel Ángel Sotelo Vázquez**, Daniel Carrica*

{donatopg, carrica }@fi.mdp.edu.ar, michael@depeca.uah.es

* Laboratorio de Instrumentación y Control (LIC) – Universidad de Mar del Plata

** Departamento de Electrónica – Universidad de Alcalá

En este trabajo se presentan los resultados de un controlador borroso aplicado a la problemática de la conducción de un vehículo. La estrategia del controlador borroso ha sido diseñada para vehículos a velocidades elevadas, lo cual también permite su aplicación a vehículos a bajas velocidades. La respuesta del controlador ha sido comprobada mediante simulaciones para velocidades de hasta 130 km/h.

Palabras claves: Control borroso, Control lateral, Vehículos inteligentes

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial a la conducción automática de vehículos en carretera se ha incrementado debido al aumento vertiginoso de la velocidad y capacidad de los procesadores modernos. En líneas generales el problema de la conducción de un vehículo en una carretera se puede resumir como la obtención de una ley de control apropiada para comandar la dirección del vehículo. Diversos grupos de investigación alrededor del mundo han obtenido resultados alentadores en esta área, aplicando soluciones tales como controladores no lineales (Sotelo, 2001), controladores robustos (Byrne *et al.*, 1998; Guldner *et al.*, 1999), y controladores borrosos (Hessburg y Tomizuka, 1994; De Pedro *et al.*, 2001). En todos los casos, independientemente de la técnica utilizada, es necesario controlar tanto el comportamiento lateral como el longitudinal del vehículo en cuestión. Dado que es posible desacoplar dichos comportamientos (Taylor *et al.*, 1999), en el presente trabajo se plantea utilizar un modelo linealizado de la dinámica lateral del vehículo para el control de la dirección. Con el fin de simplificar el diseño e implementación práctica, se propone el uso de dos controladores borrosos para obtener un control lateral estable apto para la conducción autónoma de vehículos en carretera a velocidades elevadas. El uso de dos controladores, uno trabajando como controlador básico, y otro como supervisor, permite mejorar la respuesta del sistema completo. La estrategia de control descrita en este trabajo se ha simulado satisfactoriamente, utilizando un modelo del vehículo con parámetros reales obtenidos de un prototipo de Citroen Berlingo eléctrico (denominado Babieca), en el que se usa una cámara de visión color como sensor para medir la posición del vehículo en la carretera.

2. CONTROL LATERAL

El objetivo principal del módulo de control lateral en el caso de un vehículo que se desplaza por una carretera, es asegurar un seguimiento apropiado de una trayectoria de referencia, manteniendo el vehículo en el centro de la carretera con la dirección apropiada (paralela a la trayectoria deseada). Este objetivo se puede resumir como la minimización de los errores de dirección y distancia lateral del vehículo (d_e , θ_e) en un punto de control determinado. En este caso, y teniendo en cuenta los resultados de trabajos previos sobre este tema (Sotelo 2001, Sotelo *et al.*, 2004), el punto de control está situado a una distancia L_h , denominada “distancia hacia delante” (look-ahead, según su definición en inglés), respecto de la trayectoria de referencia. Gráficamente el problema se puede apreciar en la figura 1, donde el punto de control del vehículo está ubicado a una distancia L_h sobre el eje longitudinal del vehículo, para anticipar adecuadamente la curvatura de la trayectoria. La importancia de L_h radica en que las decisiones sobre la corrección del rumbo se toman a una cierta distancia por delante del vehículo. Es necesario elegir un valor para L_h , que dependa de las características del vehículo y de la velocidad (sección 2.1), pero previamente es necesario obtener un modelo que describa el comportamiento dinámico de los errores d_e y θ_e , para diseñar y simular un controlador estable.

2.1 Modelo cinemático

El modelo cinemático del vehículo es el punto de partida para interpretar la variación de los errores lateral y de orientación. Para el vehículo se utiliza el conocido modelo de Ackermann o de la bicicleta

(Ackermann y Siemel, 1990), asumiendo que las dos ruedas frontales giran aproximadamente iguales y por lo tanto, el centro de rotación instantáneo puede ser calculado fácilmente (figura 2). Partiendo de la curvatura instantánea de la trayectoria descrita por el vehículo, $\kappa(t)$, se obtiene que:

$$\kappa(t) = \frac{1}{R(t)} = \frac{\tan \phi(t)}{L} = \frac{d\theta(t)}{ds} \quad (1)$$

donde R es el radio de curvatura, L es la longitud del vehículo, ϕ es el ángulo de la dirección, s denota la longitud del camino y θ sirve para ubicar al vehículo en un sistema de coordenadas globales (figura 1). La variación de θ se calcula como una función de la velocidad del vehículo (v):

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \kappa(t) \cdot v(t) = \frac{\tan \phi(t)}{L} \cdot v(t) \quad (2)$$

Las variables ϕ y v son directamente controladas, por lo que corresponden al espacio de actuación del vehículo. Las variables de posición y orientación globales descritas por (x, y, θ) , siempre que se suponga un terreno plano (2D), componen el espacio de configuración del sistema. Mediante las ecuaciones de Fresnel, que son usadas típicamente en navegación inercial (Sotelo, 2001), se puede relacionar el espacio de actuación y el de configuración. En la ecuación 3 se pueden ver las variaciones de (x, y, θ) .

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{dx}{dt} = v(t) \cdot \cos \theta(t) \\ \dot{y} &= \frac{dy}{dt} = v(t) \cdot \sin \theta(t) \\ \dot{\theta} &= \frac{d\theta}{dt} = v(t) \cdot \frac{\tan \phi(t)}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

donde $v(t)$ representa la velocidad instantánea del vehículo, medida a partir del punto medio de su eje trasero, el cual puede considerarse que se mueve a la misma velocidad que el punto de control situado a la distancia L_h .

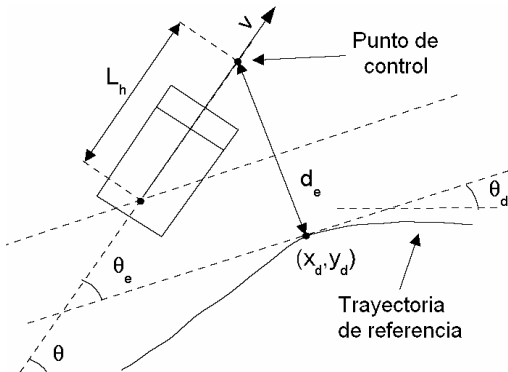


Figura 1: Error lateral (d_e) y de orientación (θ_e) a la distancia L_h respecto de la trayectoria de referencia.

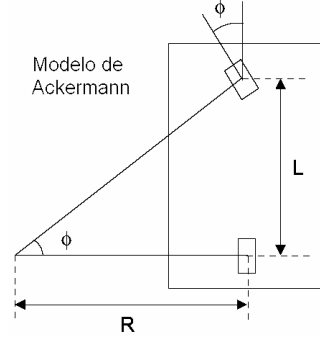


Figura 2: Modelo cinemático aproximado del vehículo

La información sobre la posición y orientación global del vehículo (x, y, θ) se transforma para describir las variaciones de los errores lateral y de orientación. El error lateral d_e es la distancia entre el punto de control del vehículo y el punto más cercano a lo largo de la trayectoria deseada del mismo (figura 1), descrito por las coordenadas (x_d, y_d) . Por tanto, d_e es perpendicular a la tangente a la trayectoria de referencia en el punto (x_d, y_d) . La pendiente de la tangente en (x_d, y_d) se denomina θ_d , y representa la orientación deseada en dicho punto. Por lo tanto, d_e y θ_e son suficientes para caracterizar el error de posición entre el vehículo y la trayectoria de referencia (Sotelo, 2001):

$$d_e = -(x + L_h \cos \theta - x_d) \cdot \sin \theta_d + \dots \quad (4)$$

$$\dots + (y + L_h \sin \theta - y_d) \cdot \cos \theta_d \quad (5)$$

$$\theta_e = \theta - \theta_d$$

La elección de L_h se hace en función de la velocidad del vehículo (v), obteniéndose los parámetros de la ecuación 6. Se ha demostrado en (Broggi *et al.* 1999) que cuando se incrementa la velocidad, empeora el factor de damping del sistema de lazo cerrado. Esto se puede mejorar dentro de ciertos límites mediante el incremento de la distancia de look-ahead:

$$L_h(v) = \begin{cases} L_{\min} & \text{si } v < v_{\min} \\ v \cdot t_l & \text{si } v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ L_{\max} & \text{si } v > v_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

Los valores mínimos y máximos para L_h , v , y t_l (tiempo de look-ahead) se han determinado empíricamente mediante los ensayos, obteniéndose $t_l=1.5s$, $v_{\min}=25\text{km/h}$, $v_{\max}=75\text{km/h}$, $L_{\min}=10.41\text{m}$, y $L_{\max}=31.25\text{m}$. Calculando las derivadas de d_e y θ_e respecto del tiempo se obtiene el modelo no lineal de la ecuación 7. Las variables d_e y θ_e se calculan en cada instante por un proceso basado en visión que se desarrolla en (Sotelo *et al.*, 2004).

$$\dot{d}_e = v \cdot \sin \theta_e + \frac{v \cdot L_h}{L} \cdot \cos \theta_e \cdot \tan \phi \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_e = \frac{v \cdot \tan \phi}{L}$$

2.2 Modelo dinámico

Para el diseño y simulación de un controlador estable es esencial contar con un modelo adecuado del comportamiento dinámico y la latencia de los actuadores. De acuerdo con esto, y basándose en (Taylor *et al.*, 1999), la dinámica de los actuadores ha sido desacoplada en una dinámica lateral y una dinámica longitudinal. Esta división es útil para diseñar los controladores de velocidad y de dirección de manera independiente. Aunque este trabajo está enfocado en el diseño del control lateral, se necesita de un modelo de la dinámica longitudinal para la simulación y los ensayos. En el modelo considerado en la figura 4 (Kelly, 1995) se contempla tanto la dirección como la propulsión del vehículo, asumiendo el caso ideal de que las ruedas no patinan. También se considera que el terreno por donde se desplaza el vehículo no tiene inclinación ($\alpha=0$), por lo que no hay componente del peso del vehículo que se oponga al movimiento del mismo (figura 3). El modelo de la dirección cuenta con la relación no lineal entre la curvatura y el ángulo de dirección. Una de las no linealidades la introduce la limitación de velocidad de giro del volante, y la otra se debe al máximo ángulo de giro de la dirección (figura 4). En el modelo de la propulsión del vehículo se tiene en cuenta una no linealidad, que es debida al límite del par de torsión del vehículo. Se ha incorporado un retardo constante en ambos modelos, para que el vehículo simulado demore algunos segundos en responder a una entrada tipo escalón, tal como sucede en los ensayos reales. La inversa de la constante K_{pv} es una constante de tiempo que relaciona la aceleración que se le aplica al vehículo (a_{cmd}) con el error (V_{err}) respecto de la velocidad de referencia o de comando (V_{cmd}). La aceleración a_{cmd} depende de la fuerza aplicada (F_{cmd}) y la masa (M) del vehículo (8), por lo que despejando se obtiene que K_{pv} es función de M y de la relación entre F_{cmd} y V_{err} (9).

$$a_{cmd} = K_{pv} \cdot V_{err} \quad (8)$$

$$K_{pv} = \frac{a_{cmd}}{V_{err}} = \frac{F_{cmd}}{M \cdot V_{err}} \quad (9)$$

2.3 Diseño del controlador borroso

En algunos trabajos previos se ha utilizado un único controlador borroso, pero trabajando a baja velocidad (De Pedro *et al.*, 2001), o utilizando más variables de entrada en el controlador (Hessburg y Tomizuka, 1994). En este trabajo se utilizan dos controladores separados (figura 5), con el objeto de asegurar un seguimiento correcto y estable de la trayectoria de referencia. Por una cuestión de simplicidad, se asume que la velocidad del vehículo es constante durante cada ciclo de control. El primer controlador borroso

se denomina básico y tiene dos entradas, d_e y θ_e , y una salida que es el ángulo de comando de dirección a priori. Conforme a la actuación de la salida del controlador básico el error lateral tiende a cero, pero aparecen oscilaciones en la dirección, debidas principalmente al retardo en la actuación de la misma. Independientemente del diseño del controlador, en cada instante existirá una diferencia entre el ángulo de dirección comandado y el ángulo de dirección real. Esa diferencia es la que hace que aparezcan oscilaciones que pueden ser peligrosas a velocidades elevadas. Por lo tanto, el controlador básico proporciona un ángulo de comando de dirección a priori, que debe corregirse según la condición real del vehículo. El segundo controlador borroso, denominado supervisor, tiene en cuenta el ángulo de comando de dirección a priori, y su derivada respecto del tiempo. El controlador supervisor evita que el vehículo provoque cambios de dirección bruscos, evaluando la magnitud del ángulo de comando de dirección a priori y su evolución temporal, de manera tal que no se actúe sobre la dirección si el signo del ángulo de comando de dirección a priori es contrario al de su derivada (exceptuando el caso donde cualquiera de los dos, o ambos, son nulos). Esto es crucial para la estabilidad en la navegación autónoma a velocidades elevadas (>100 km/h). La salida provista por el controlador supervisor es el ángulo real de comando de la dirección del vehículo.

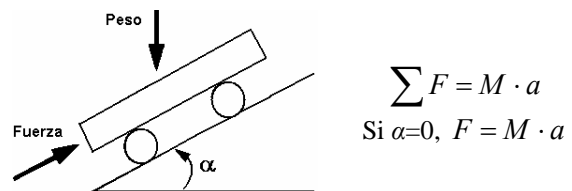


Figura 3: Sumatoria de fuerzas sobre el vehículo

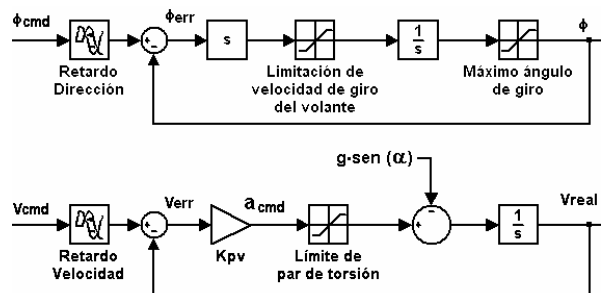


Figura 4: Modelo dinámico de la propulsión y dirección

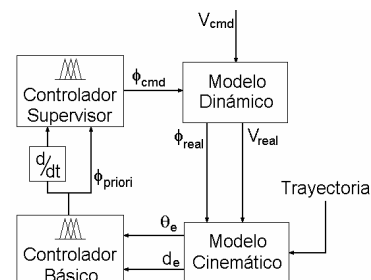


Figura 5: Diagrama en bloques del sistema completo

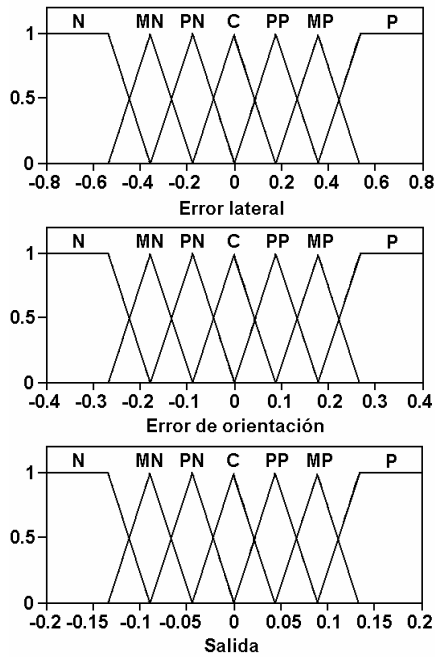


Figura 6: Conjuntos borrosos del controlador básico

Tabla 1: Motor de inferencias del controlador básico

		θ_e						
		N	MN	PN	C	PP	MP	P
d_e	N	P	P	MP	MP	MP	C	C
	MN	P	MP	MP	MP	MP	C	C
	PN	MP	MP	PP	PP	C	PN	PN
	C	PP	PP	PP	C	PN	PN	PN
	PP	PP	PP	C	PN	PN	MN	MN
	MP	C	C	MN	MN	MN	MN	N
	P	C	C	MN	MN	MN	N	N

En la figura 6 se ven los conjuntos borrosos de variables de entrada y salida del controlador básico, y en la figura 7 se ven los correspondientes al controlador supervisor. Las etiquetas N, MN, PN, C, PP MP, y P significan Negativo, Medianamente Negativo, Poco Negativo, Cero, Poco Positivo, Medianamente Positivo, y Positivo, respectivamente. Como puede verse, las mismas etiquetas se han utilizado para las dos variables de entrada y la de salida. En las tablas 1 y 2 se detallan las reglas borrosas utilizadas en el motor de inferencias del controlador básico y del controlador supervisor.

3. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

Los controladores borrosos y los modelos cinemático y dinámico del vehículo se han simulado en Simulink V5R13. La respuesta del sistema se ha evaluado introduciendo perturbaciones externas que actúan como si fuesen desviaciones de la trayectoria deseada.

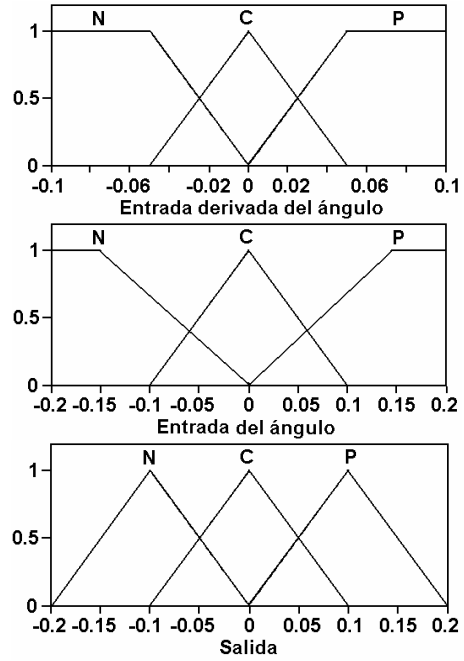


Figura 7: Conjuntos borrosos del controlador supervisor

Tabla 2: Motor de inferencias del controlador supervisor

		θ		
		N	C	P
d/dt	N	N	C	C
	C	N	C	P
	P	C	C	P

Los parámetros utilizados en las simulaciones fueron obtenidos a partir de parámetros del vehículo prototipo (tabla 3). Se realizaron simulaciones a diferentes velocidades, para comparar la respuesta del sistema y los controladores en el tiempo. En el primer experimento, la velocidad de comando del vehículo es 25 km/h, y se lo somete a una perturbación angular trapezoidal que simula una desviación gradual de casi 30° (0,5 radianes). Tanto el error lateral como el de orientación responden de manera satisfactoria, obteniéndose una recuperación rápida de la trayectoria deseada (figura 8). En la figura 9 se puede apreciar el ángulo real de dirección, el cual no excede nunca los 0,05 radianes ($\approx 3^\circ$).

En las figuras 10 y 11 se ven los resultados correspondientes al vehículo circulando a 75 km/h y sometido a la misma perturbación angular. Se puede ver que el error lateral y el de orientación responden adecuadamente, con una rápida recuperación de la trayectoria deseada (figura 10). A diferencia del caso anterior, la respuesta contiene un cierto grado de oscilación, que puede tolerarse sin inconvenientes. Esto mismo se ve en la figura 11, donde el ángulo de dirección real tiende a oscilar un poco más que en el caso previo. Se destaca que el ángulo de dirección real no excede nunca los 0,03 radianes ($\approx 2^\circ$).

Finalmente, en las figuras 12 y 13 se ven los resultados correspondientes al vehículo circulando a 130 km/h y sometido a la misma perturbación angular. En este caso también se observa que los errores lateral y de orientación responden con una rápida recuperación de la trayectoria deseada (figura 12). Nuevamente, la respuesta contiene un cierto grado de oscilación, que es mayor que el caso previo. Lo mismo se aprecia en la figura 13, donde el ángulo de dirección real oscila más que en el caso previo, aunque nunca excede nunca los 0,03 radianes ($\approx 2^\circ$). Estas oscilaciones, tanto a 75 km/h como a 130 km/h, no sólo son tolerables, sino que además van a estar filtradas en el sistema físico real por la misma respuesta del vehículo.

Los ensayos reales se llevarán a cabo en el vehículo prototipo mencionado anteriormente, el cual ha sido modificado para permitir un control automático de velocidad y dirección. El mismo está equipado con una cámara color que suministra la información de la posición lateral y orientación respecto de la carretera (Sotelo *et al.*, 2004), además de un receptor DGPS, una PC y un conjunto de dispositivos electrónicos para actuar sobre el acelerador y la dirección, así como para sensar la velocidad y el ángulo de dirección.

Comparado con los controladores robustos aplicados al control de dirección (Byrne *et al.*, 1998; Guldner *et al.*, 1999), el sistema de control aquí propuesto presenta una mayor simplicidad y su diseño es más intuitivo. Se puede decir que un controlador borroso es un controlador que incorpora un cierto grado de inteligencia, ya que las reglas de control se expresan siguiendo una lógica más humana. El diseño del controlador robusto depende del modelo de vehículo utilizado, y de las no linealidades tenidas en cuenta, mientras que el controlador borroso es más general, gracias a esa característica de “inteligencia” con la que cuenta.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un controlador del tipo borroso para la asistencia de navegación de un vehículo en carretera. La estrategia de control borroso descrita ha probado su estabilidad empírica para conducción autónoma de vehículos en carretera a velocidades elevadas. La actuación del vehículo comandado se toma en cuenta considerando la velocidad del vehículo en la selección de la distancia de look-ahead. Esto permite adaptar el ángulo de dirección como una función de las condiciones de conducción. Se ha implementado un controlador borroso supervisor para asegurar una respuesta estable y precisa a velocidades elevadas, evitando oscilaciones peligrosas que pueden ocurrir cuando se

utiliza un único controlador para comandar el ángulo de la dirección. Esto permite conducir de forma estable el vehículo a velocidades de hasta 130 km/h, como se ha demostrado en las simulaciones.

Actualmente el trabajo está enfocado en la implementación de la estrategia de control lateral borroso en Babiaca, para testarlo en un vehículo real y en condiciones reales.

Tabla 3: Parámetros de simulación

M (kg)	K_{pv}^{-1} (s)	L_h (m)	L (m)
1267	0,5	10,41 – 31,25	3,0

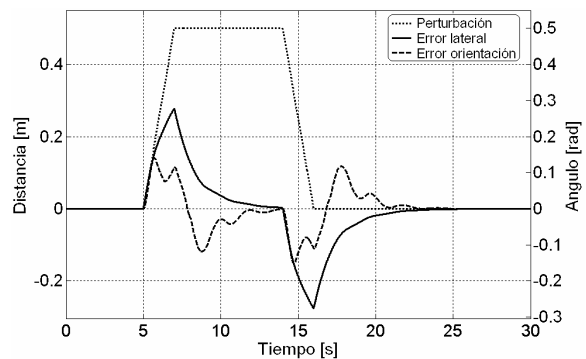


Figura 8: Error lateral y de orientación, a 25 km/h y con $L_h=10,41m$

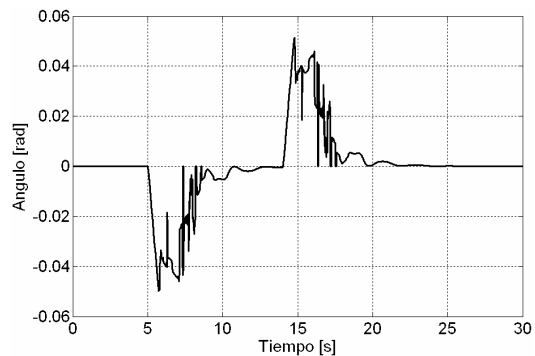


Figura 9: Ángulo de dirección real, a 25 km/h y con $L_h=10,41m$

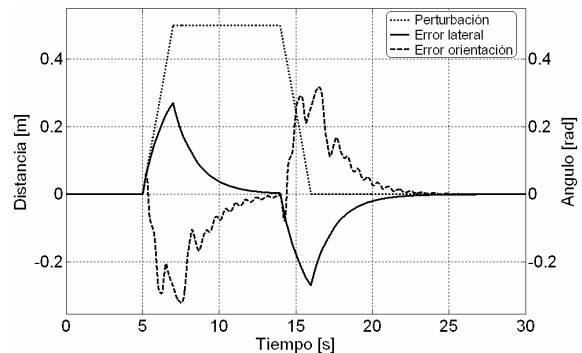


Figura 10: Error lateral y de orientación, a 75 km/h y con $L_h=31,25m$

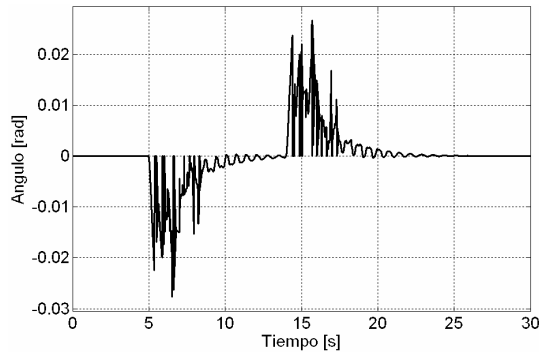


Figura 11: Ángulo de dirección real, a 75 km/h y con $L_h=31,25m$

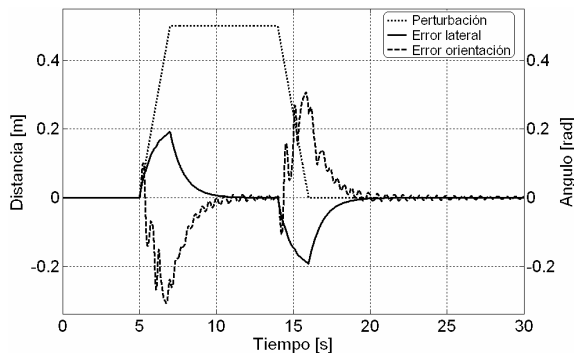


Figura 12: Error lateral y de orientación, a 130 km/h y con $L_h=31,25m$

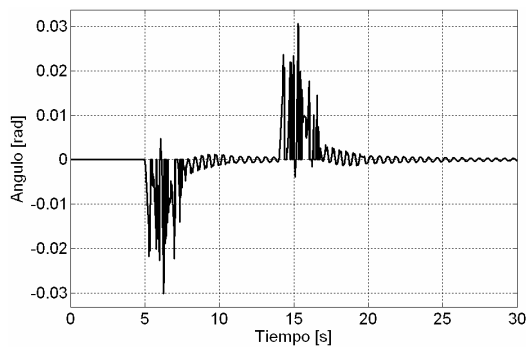


Figura 13: Ángulo de dirección real, a 130 km/h y con $L_h=31,25m$

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la CICYT (España), a través del proyecto DPI2002-04064-C05-04, así como al soporte del Instituto de Automatización Industrial del CSIC (España). La presentación a este congreso ha sido posible gracias al apoyo de la Universidad de Mar del Plata (Argentina).

REFERENCIAS

Ackermann, J. and Sienel, W. (1990). Robust control for automated steering. *Proceedings of the 1990 American Control Conference, ACC90*, pp. 795-800, San Diego, CA.

- Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A. and Conte, G. (1999). Automatic Vehicle Guidance: the experience of the ARGO autonomous vehicle. *World Scientific Co. Publisher*, Singapur. ISBN 981-02-3720-0.
- Byrne, R., Abdallah, C., and Dorato, P. (1998). Experimental results in robust lateral control of highway vehicles. *IEEE Control Systems* 18(2), pp. 70-76.
- De Pedro, T., García, R., González, C., Naranjo, J., Reviejo, J. and Sotelo, M.A. (2001). Vehicle automatic driving system based on GNSS. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Vehicles*. Sevilla.
- Guldner, J., Sienel, W., Tan, H., Ackermann, J., Patwardhan, S., and Bunte, T. (1999). Robust automatic steering control for look-down reference systems with front and rear sensors. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 7, No. 1, pp. 2-11.
- Hessburg, T. and Tomizuka, M. (1994). Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance. *IEEE Control System Magazine* 14, pp. 55-63.
- Kelly, A. (1995). An intelligent, predictive control approach to the high-speed cross-country autonomous navigation problem. *PhD Thesis*, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- Sotelo, M.A. (2001). Sistema de navegación global aplicado al guiado de un vehículo autónomo terrestre en entornos exteriores parcialmente conocidos. *Tesis Doctoral*, Universidad de Alcalá, España.
- Sotelo, M. A., Rodriguez, F. J., Magdalena, L., Bergasa, L. M., and Boquete, L. (2004). A robust vision-based lane tracking system for autonomous driving on unmarked roads. *Autonomous Robots* (ISSN 0929-5593), Vol. 16, No 1, pp: 95-116
- Taylor, C. J., Kosecka, J., Blasi, R., and Malik, J. (1999). A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving. *The International Journal of Robotic Research*. 18(5), pp. 442-453.