

CONDUCCIÓN AUTÓNOMA EN CIRCUITO DE DIFÍCIL MANIOBRABILIDAD

Vicente Milanés

Instituto de Automática Industrial – CSIC

Ctra. Campo Real km 0.200, 28500 La Poveda – Arganda del Rey (Madrid)

vmilanes@iai.csic.es

Enrique Onieva, Teresa de Pedro, Ricardo García, Javier Alonso, Joshué Pérez, Carlos González

Instituto de Automática Industrial – CSIC

Ctra. Campo Real km 0.200, 28500 La Poveda – Arganda del Rey (Madrid)

{onieva, tere, ricardo, jalonso, jperez, gonzalez}@iai.csic.es

Resumen

En este trabajo se presentan los experimentos realizados con nuestro vehículo Clavileño en las instalaciones del INRIA Rocquencourt, Versailles, como preparación de la demostración final del proyecto CyberCars-2. Los resultados muestran el versátil comportamiento del vehículo fuera de las pistas del IAI y su capacidad de adaptación para funcionar en poco tiempo en cualquier lugar. Los experimentos realizados consisten en el seguimiento de trayectorias curvas con un radio en el límite de su radio de giro, que involucran giros de 360 grados.

Palabras Clave: guiado automatizado de vehículos, sistemas de posicionamiento global, sistema de comunicaciones.

1 INTRODUCCIÓN

La posibilidad de implantar un sistema que sustituya completamente al conductor humano para circular en carretera es un objetivo de los sistemas inteligentes de transporte a largo plazo. Hasta ahora, la mayoría de los avances en automoción se han centrado en sistemas ADAS de ayuda al conductor como el Park Mate desarrollado por Siemens para facilitar el aparcamiento, que se ha empezado a comercializar en este último año, o el control de crucero adaptativo, implementado por BMW, que sustituye al control de crucero y dota al vehículo de capacidad para ajustar su velocidad a la del coche que le precede, a través de la información procedente un radar.

Desde el punto de vista de la investigación, el trabajo tiene dos vertientes. La primera de ellas se centra en el desarrollo de sistemas ADAS de ayuda a la conducción, entre los que podemos reseñar en España los desarrollos de la Universidad Carlos III

para detectar e identificar señales de tráfico [2] y los sistemas de detección de peatones [7] realizados en la Universidad de Alcalá de Henares. La otra línea de investigación se centra en el control del vehículo para llevar a cabo una conducción totalmente automática. Sobre esta línea de trabajo, son significativos los avances logrados por el INRIA francés en los que han desarrollado prototipos de vehículos biplaza que tienen la capacidad de repetir una trayectoria realizada inicialmente de manera manual sorteando obstáculos detectados por las señales provenientes de cámaras y radares [1]. También son de gran interés los resultados obtenidos por la Universidad Carnegie Mellon en Estados Unidos en los que el grupo Navlab trabaja en la construcción y funcionamiento de coches, camiones y autobuses capaces de realizar una conducción autónoma desde 1984. Actualmente, están desarrollando el proyecto CTA Robotics en el que investigan la capacidad del vehículo para interpretar su entorno y hallar la solución óptima para moverse a través de él [5].

El trabajo desarrollado en este artículo se encuadra dentro de la segunda vertiente, esto es, realizar un sistema de control que permita al vehículo seguir un recorrido de forma autónoma.

El contenido del artículo es el siguiente: En la segunda sección se resume el programa AUTOPIA de conducción de vehículos autónomos del IAI-CSIC destacando los sensores involucrados en el control del vehículo. En la tercera sección se presenta el controlador borroso desarrollado para llevar a cabo las maniobras experimentales. La cuarta sección muestra los experimentos realizados en las instalaciones del Instituto de Investigación en Automática e Informática (INRIA) en Paris – Rocquencourt, Francia y, por último, las conclusiones del trabajo realizado y los trabajos futuros.

2 EL PROGRAMA AUTOPIA

El programa AUTOPIA tiene dos grandes objetivos. El primero, implementar una conducción automática de vehículos comerciales por carreteras reales. Aunque este objetivo se antoja lejano en la actualidad, es un ambicioso punto de partida para alcanzar en un futuro. El segundo objetivo es el desarrollo de un sistema de guiado automático formado por componentes modulares que puedan ser incorporados de manera sencilla en la industria del automóvil.

Para llevar a cabo estos dos objetivos, se utilizan las entradas sensoriales que se muestran en la figura 1. La entrada fundamental de información para realizar el guiado automático procede de un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS) que permite determinar la posición exacta de cualquier punto sobre la Tierra en todo momento a través de una red de 24 satélites que se mueven en órbitas geoestacionarias. Representa por tanto un método preciso para determinar la posición de un vehículo. El receptor GPS necesita un mínimo de cuatro satélites para determinar su actual posición con un error inferior a 20 metros. Sin embargo, es posible reducir este error a un valor inferior a dos centímetros si se recibe la señal procedente de cinco satélites a través de un sistema de posicionamiento global con corrección diferencial (DGPS-RTK). Por tanto, a través del GPS y de la cartografía digital de la zona de conducción, podemos indicar al vehículo con gran precisión la trayectoria que debe seguir y el punto exacto en el que se encuentra en cada momento.

El sistema DGPS-RTK constituye la mejor opción para posicionar con exactitud el vehículo pero tiene el inconveniente de la pérdida de las señales de los satélites en zonas donde no es posible tener cobertura, como ocurre en túneles.

Para solucionar este problema, disponemos de dos entradas que se combinan para conocer la posición del vehículo de forma fiable. Estas entradas son una unidad de medida inercial (IMU) que nos permite conocer la orientación del vehículo respecto a la trayectoria en cada instante y los sensores internos del vehículo y cuyos valores son accesibles a través del bus CAN.

Como última entrada al sistema de control, contamos con una red WiFi inalámbrica que nos permite establecer la comunicación entre la estación base del GPS y el receptor embarcado en el coche, obteniendo así corrección diferencial centimétrica en un rango de 400 metros.

Estas son las entradas al sistema de control que está gestionado por un PC embarcado en el vehículo y un programa que trata de emular el comportamiento de un conductor humano. El programa de control utiliza reglas y variables borrosas que corrigen las desviaciones de la trayectoria del vehículo y adecuan la velocidad. El seguimiento de la trayectoria se consigue comparando las medidas de posición del receptor GPS embarcado con la posición deseada del vehículo sobre un mapa cartográfico digital de alta precisión, en el que se fija el objetivo y la ruta hasta el mismo.

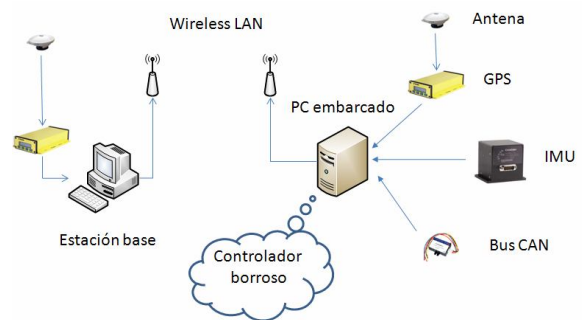


Figura 1. Esquema sensorial del sistema de control del programa AUTOPIA.

En la figura 2 se muestra la imagen trasera del vehículo con el equipamiento necesario para realizar los experimentos. Se trata de un Citroën C3 Pluriel al que se ha bautizado con el nombre de Clavileño. Este automóvil es exactamente igual a cualquiera de los que salen de la fábrica de Citroën, ya que uno de los objetivos del programa AUTOPIA es introducir los sistemas de control en coches comerciales de serie a los que se le añaden los sistemas sensoriales y de actuación necesarios.



Figura 2. Sistema embarcado en Clavileño, un Citroën C3 Pluriel.

Las salidas del sistema de guiado borroso están conectadas a los actuadores del coche, esto es, al

volante para llevar a cabo el control lateral, y a los pedales del acelerador y del freno para realizar el control longitudinal.

3 ORBEX: EL CONTROLADOR BORROSO

ORBEX [3, 4] (ORdenador Borroso EXperimental) se usa para la construcción y posterior ejecución de los controladores difusos usados por el vehículo. ORBEX trabaja con controladores difusos del tipo TSK, con consecuentes *singleton*, lo que permite tomar decisiones de control en un corto período de tiempo y con muy buena precisión; cualidades más que deseables para sistemas de tiempo real, donde el tiempo de inferencia es un aspecto vital, tal y como puede ser la conducción de un coche.

La estrategia de conducción puede ser definida e implementada gracias al ORBEX, modelo computacional de un ordenador borroso, mediante reglas simples del tipo

SI ... ENTONCES ...

Para el control del volante del vehículo, también llamado control lateral, nos basaremos en dos variables de entrada, *Cabeceo* y *Deriva*, calculadas mediante la diferencia entre la posición actual del vehículo, obtenida gracias al GPS, y la posición deseada dentro de la ruta predefinida, que se obtiene a través de la cartografía digital. El *Cabeceo*, también conocido como error angular, es la orientación, en grados, del vehículo con respecto a la línea de referencia de la trayectoria; la *Deriva*, también conocida como error lateral, es la distancia (en metros) de un punto determinado del vehículo a su posición deseada en la trayectoria de referencia. En la figura 3 podemos ver una representación gráfica de ambas variables de entrada al controlador.

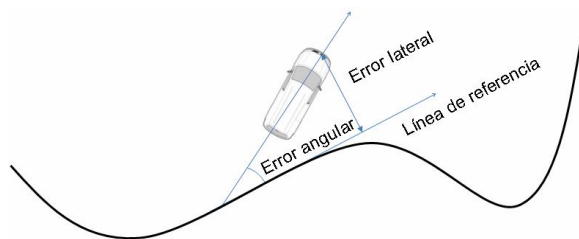


Figura 3. Representación gráfica de las variables de entrada.

Las variables de salida serán representadas mediante los singletons -1 y +1 [8]. Los valores de la salida están normalizados en el intervalo [-540, 540], que define el rango máximo de giro del volante, así una salida del controlador de 1, representará un giro

completo del volante hacia la derecha (540°) y, análogamente, el valor -1 un giro completo hacia la izquierda (-540°).

Las variables de entrada estarán codificadas mediante las etiquetas lingüísticas duales que podemos ver en la figura 4; para cada variable de entrada usaremos una para indicar que el error producido representa que el vehículo está situado o girado hacia la derecha de la trayectoria y la dual para indicar que el vehículo está situado o girado hacia a la izquierda.

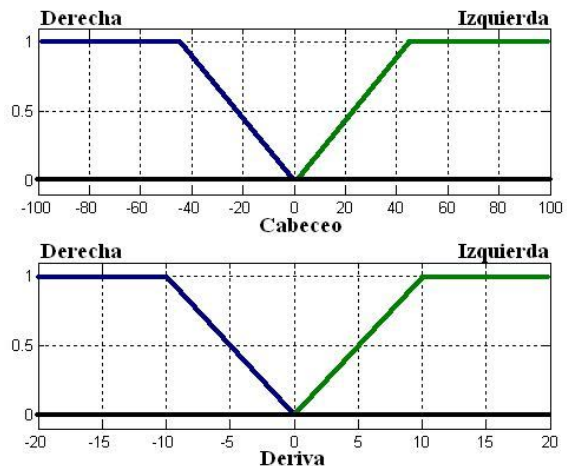


Figura 4. Variables de entrada del controlador borroso para el control lateral del vehículo.

Una vez definidas las entradas y salidas del controlador, se ha generado la siguiente base de reglas:

**Si (Cabeceo = Derecha)
Entonces (Volante = Izquierda)**
**Si (Cabeceo = Izquierda)
Entonces (Volante = Derecha)**
**Si (Deriva = Derecha)
Entonces (Volante = Izquierda)**
**Si (Deriva = Izquierda)
Entonces (Volante = Derecha)**

Este controlador tan sencillo permite girar adecuadamente el volante del vehículo, tal y como veremos en la sección de experimentación.

Para el control del acelerador y freno, usaremos como entradas las siguientes variables, obtenidas mediante la lectura del bus CAN del vehículo:

- Error de Velocidad: la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad actual, en km/h.
- Aceleración: será la derivada de la velocidad respecto al tiempo, en m/s².

Codificaremos cada una de las entradas mediante tres etiquetas lingüísticas, tal y como podemos ver en la figura 5.

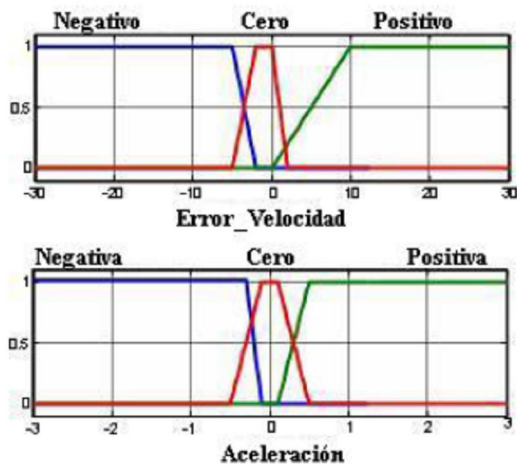


Figura 5. Variables de entrada del controlador borroso para el control longitudinal del vehículo.

Las salidas del controlador representarán, de forma normalizada, la presión a aplicar sobre cada uno de los pedales, acelerador y freno, para llevar a cabo el control de velocidad; por ejemplo, una salida acelerador = 0.1, representará aplicar sobre el pedal del acelerador una actuación correspondiente a pisar el pedal el 10%. Para codificar las salidas se usarán los siguientes singletons: $a00 = 0$, $a01 = 0.1$, $a02 = 0.2$ y $a04 = 0.4$ para el acelerador, que se corresponden a pisar el pedal el 0%, 10%, 20% y 40%, respectivamente; y $f00 = 0$, $f01 = 0.1$ y $f02 = 0.2$ para el freno, que se corresponden a pisar el pedal del freno el 0%, 10% y 20%. Usamos rangos de salidas inferiores al 50% debido a que, se ha probado experimentalmente que, valores superiores producirían aceleraciones y deceleraciones del vehículo muy bruscas, por lo que resultarían incómodas para los ocupantes.

El núcleo del controlador difuso para controlar el acelerador está formado por el siguiente conjunto de reglas:

```

Si (error_velocidad = positiva)
Entonces acelerador a00
Si (error_velocidad = negativa) Y
(aceleracion = positiva) Entonces
(acelerador = a01)
Si (error_velocidad = negativa) Y
(aceleracion = cero) Entonces
(acelerador = a02)
Si (error_velocidad = negativa) Y
(aceleracion = negativa) Entonces
(acelerador = a04)

```

```

Si (error_velocidad = cero) Y
(aceleracion = positiva) Entonces
(acelerador = a00)
Si (error_velocidad = cero) Y
(aceleracion = cero) Entonces
(acelerador = a01)
Si (error_velocidad = cero) Y
(aceleracion = negativa) Entonces
(acelerador = a01)

```

Finalmente, el núcleo del controlador difuso para controlar el pedal de freno se lleva a cabo con las siguientes reglas:

```

Si (error_velocidad = negativa)
Entonces (freno = f00)
Si (error_velocidad = cero)
Entonces (freno = f00)
Si (error_velocidad = positiva) Y
(aceleracion = positiva) Entonces
(freno = f02)
Si (error_velocidad = positiva) Y
(aceleracion = cero) Entonces
(freno = f01)
Si (error_velocidad = positiva) Y
(aceleracion = negativa) Entonces
(freno = f01)

```

4 EXPERIMENTOS REALIZADOS

El sistema de control descrito ha sido probado exhaustivamente en las instalaciones del IAI, donde disponemos de una pista de pruebas para vehículos autónomos, dedicada exclusivamente a tareas de investigación. Tiene una forma reticulada, con alguna irregularidad, ya que se han respetado todos los árboles, olivos, que había en el terreno en el que se ha construido, con calles de seis metros de ancho.

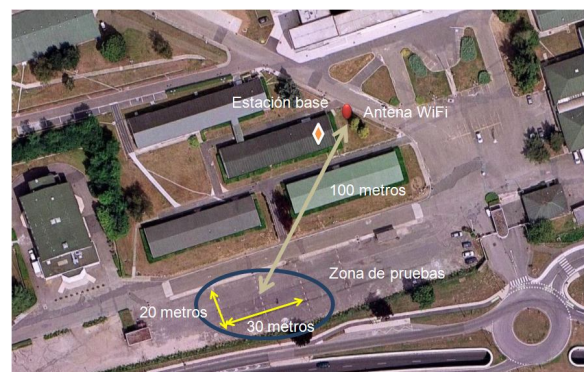


Figura 6. Zona de pruebas del INRIA en Rocquencourt, Francia.

Estas instalaciones nos han permitido realizar pruebas de guiado con resultados satisfactorios [6] en circuitos con rectas y curvas de 90 grados pero no es

posible realizar giros completos de 360 grados debido a que la anchura de las calles no lo permite.

En este artículo se presentan los experimentos llevados a cabo en las instalaciones del Instituto de Investigación en Automática e Informática (INRIA) en Paris – Rocquencourt, Francia. En la figura 6 se muestra la zona de pruebas que estaba formada por un área rectangular de 30 metros de largo por 20 de ancho dividida en dos carriles por árboles espaciados una distancia de cinco metros.

Una conducción automática requiere construir una representación digitalizada de la trayectoria a seguir. Para ello se realizó un recorrido manual previo en la zona de pruebas que permitiese obtener los segmentos de referencia de la trayectoria.

Procedimos como sigue. Situamos la base del GPS y la comunicamos con el receptor GPS del vehículo para obtener la corrección diferencial y así disponer de su localización con precisión centimétrica. Una vez conseguida la comunicación se realizó la vuelta al circuito guardando todos los puntos suministrados por el GPS, cuya frecuencia de muestreo es de cinco hercios. Posteriormente, se eliminaron puntos para no cargar de información redundante al mapa dejando sólo aquellos puntos que aportaran información necesaria para el guiado.

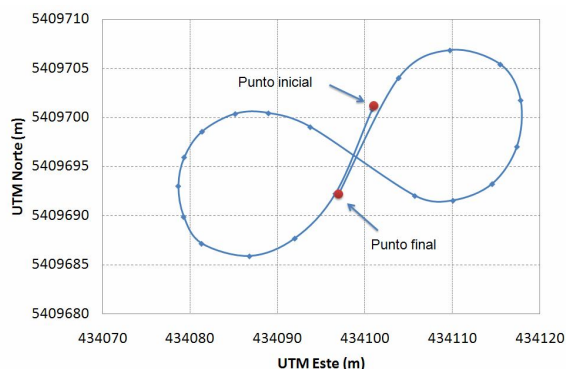


Figura 7. Mapa en coordenadas UTM del circuito de pruebas.

En la figura 7 se muestra el mapa digital obtenido a través de la vuelta realizada manualmente y se muestran los puntos que se usarán como referencial para el guiado automático. El recorrido tiene forma de ocho, debido a la presencia de dos árboles en la pista de pruebas, con un radio de curvatura inferior a nueve metros. Por este motivo, la velocidad para realizar el recorrido se fijó en siete kilómetros a la hora de forma experimental, evitando que una excesiva velocidad provocara que el vehículo se saliera de la trayectoria marcada. Otra característica del recorrido que creó dificultades fue la existencia de un tramo con una ligera pendiente; este hecho,

puede pasar desapercibido en otros casos, pero en este fue un reto para el sistema de control al moverse el vehículo en condiciones límites de curvatura y velocidad.

En cuanto al sistema de guiado, se utilizó en todo momento el GPS como única entrada sensorial, ya que la recepción de las señales de los satélites fue correcta. En todo momento se recibían señales de un número de satélites superior a cinco.

El otro impedimento para utilizar el GPS era la posible pérdida de la precisión centimétrica, debido a la caída de la conexión inalámbrica entre la estación base y el receptor GPS del vehículo. Para asegurar esta conexión en todo momento se realizó una conexión punto a punto entre el servidor de la corrección y el coche y se realizaron pruebas de cobertura en el área obteniendo unos valores superiores a los 12 dB que aseguraban el correcto funcionamiento del sistema RTK-DGPS.

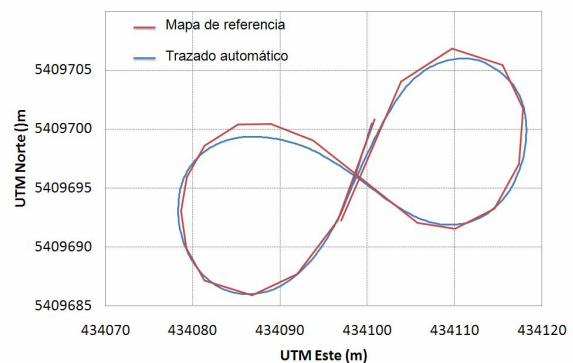


Figura 8. Comparación entre el mapa de referencia y la trayectoria seguida por el vehículo de manera automática.

En la figura 8 se muestra una comparación entre el mapa de referencia y el recorrido seguido por el vehículo de forma automática. El mapa se ha representado como una sucesión de tramos rectos, que son las referencias para el control lateral del vehículo.

Desglosando el recorrido por tramos, podemos ver como en la primera parte del primer lazo del ocho, el recorrido del vehículo presenta un error mínimo mientras que en el segundo tramo, se alcanzan los errores máximos que oscilan alrededor de un metro. Consideramos que este error máximo es un excelente resultado, teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo, longitud cuatro metros y anchura metro y medio.

En el segundo tramo del recorrido, el sistema se vuelve a ajustar al mapa gracias a una de las principales ventajas asociadas al uso del GPS: es un

sistema de posicionamiento cuyos errores no son acumulativos, esto es, que no tenemos problemas asociados a la deriva como ocurre en el caso de utilizar sistemas inerciales donde el error producido es acumulativo.

En la figura 9 se muestran la actuación sobre los pedales del acelerador y freno. Estos valores, están normalizados entre cero y uno. En el instante inicial se alcanza el valor máximo de actuación sobre el pedal del acelerador mientras que el resto del tiempo, la actuación sobre ambos pedales tiene valores muy bajos debido a la baja velocidad de referencia impuesta que viene marcada por los giros tan pronunciados en poco espacio.

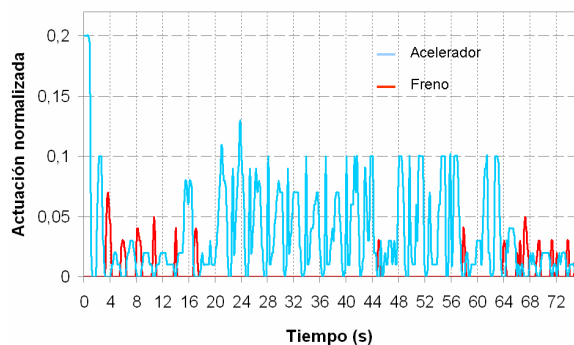


Figura 9. Actuación normalizada sobre los pedales de acelerador y freno a lo largo del recorrido.

Los mayores errores producidos en el seguimiento del mapa se deben a la dificultad de realizar un control de velocidad en valores inferiores a 10 kilómetros por hora que son causados por el motor de inyección de gasolina. Además, la pendiente de la pista de pruebas en esa zona aumentaba la dificultad de controlar la velocidad.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado un sistema de guiado para vehículos autónomos realizado mediante un controlador basado en lógica borrosa y que utiliza como principal entrada sensorial la proveniente de un GPS embarcado en el coche.

El sistema desarrollado permite la portabilidad del mismo de manera sencilla. Únicamente precisa de la instalación de una estación base que proporcione la corrección diferencial y un punto de acceso que nos permita establecer comunicación inalámbrica con el vehículo para que éste pueda recibir la corrección.

Los experimentos realizados muestran la capacidad del sistema para realizar maniobras que incluyen

giros de 360 grados en espacios reducidos con errores inferiores a un metro.

Como trabajo futuro se tratará de realizar un control de velocidad en el que un parámetro del controlador sea la pendiente de la carretera, parámetro que no se ha tenido en cuenta pues las instalaciones del IAI son prácticamente llanas y este problema lo hemos encontrado por primera vez en las instalaciones del INRIA. Para determinar la pendiente usaremos el ángulo obtenido a través de la unidad de medida inercial instalada en el vehículo y que actualmente sólo se utilizaba como ayuda al guiado en caso de fallos en la recepción de la señal GPS.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo de los proyectos CyberCars-2 (UE STREP FP6-028062), SARA (DPI2005 07980 C03-01) ENVITE (Ministerio de Fomento, T7 / 06) y MARTA (CDTI, CENIT 2007).

Referencias

- [1] Benenson R., Petti, S., Fraichard y Parent, M., "Toward Urban driverless vehicles", *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, vol. 6, pp. 4-23, 2008.
- [2] de la Escalera, A., Armingol J. M^a., Pastor, J. M., Rodríguez, F. J. "Visual sign information extraction and identification by deformable models for intelligent vehicles", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol.5, No.2, Junio 2004.
- [3] García, R., de Pedro, T., "First Application of the ORBEX Coprocessor: Control of Unmanned Vehicles", 1999 EUSFLAT-ESTYLF Joint Conference. *Mathware and Soft Computing*, n. 7, vol 1 2-3, pp. 265-273, 2000.
- [4] García, R., de Pedro, T., "Modeling a fuzzy coprocessor and its programming language", *Mathware and Soft Computing*, vol 5, n^o. 2-3, pp 167-174, 1998.
- [5] Lalonde, J., Vandapel, N. y Hebert, M., "Data Structures for Efficient Dynamic Processing in3-D", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 777-796, Agosto 2007.
- [6] Naranjo, J.E., González, C., García, R., de Pedro, T. y Haber, R., "Power Steering Control Architecture for Automatic Driving", *IEEE Trans. On Intelligent Transportation Systems*, n. 4, vol. 7, pp. 406-415, Diciembre 2005.

- [7] Parra, I., Fernández, D., Sotelo, M.A., Bergasa, L., Revenga, P., Nuevo, J., Ocaña, M. y García, M.A., "Combination of Feature Extraction Methods for SVM Pedestrian Detection", IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 8, no.2, pp. 292-307, Junio 2007.
- [8] Sugeno, M., "On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents," IEEE Transactions Fuzzy Systems., vol. 7, pp. 201-224, Abril 1999.