

# Implementación de un sistema de localización para vehículos sin conductor

Jorge Godoy, Vicente Milanés, Joshué Pérez, Jorge Villagra, Teresa de Pedro, Carlos González

Centro de Automática y Robótica

UPM - CSIC

28500 Madrid, España

Email: {jorge.godoy,vmilanes,jperez}@iai.csic.es, {jorge.villagra,teresa.pedro,carlos.gonzalez}@car.upm-csic.es

**Resumen**—El paso del tiempo y la creciente evolución de la tecnología ha provocado que cada vez más proyectos y grupos de investigación centren sus esfuerzos en transformar la conducción autónoma de vehículos en una idea menos utópica. Muchas de estas investigaciones conducen a la integración de sensores de posicionamiento en los vehículos, siendo el GPS el más utilizado debido a que existen en la actualidad diversos sistemas de corrección que permiten mejorar la precisión de este sensor hasta el orden de los 50 centímetros. Sin embargo, es posible mejorar aun más esta precisión si se cuenta con una referencia de corrección cercana a los receptores. En este artículo se describe la instalación y validación de una estación de referencia dentro de las instalaciones del CAR en Madrid para la localización de los vehículos autónomos del grupo AUTOPIA. Las pruebas experimentales con vehículos reales muestra el buen comportamiento del sistema diseñado.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha visto un incremento notable en la automatización de nuestras tareas cotidianas, desde las más simples hasta las más complejas, y el sector automotriz no ha sido la excepción a esta regla. Si se observan detenidamente algunos de los últimos modelos disponibles en el mercado se encuentra una amplia gama de sistemas integrados que permiten desde aparcar el coche de manera automática hasta determinar rasgos y patrones de fatiga en los conductores para reducir el número de accidentes.

Más allá de la asistencia en la conducción, hoy por hoy existen numerosos proyectos que tienen la meta, aparentemente utópica, de automatizar totalmente la conducción de los vehículos. Entre los esfuerzos realizados en este sentido, tiene especial relevancia el DARPA Urban Challenge [1], competición financiada por el departamento de defensa de los Estados Unidos que tiene como principal objetivo el desarrollo de vehículos autónomos para el desempeño en labores militares reales en 2015. Grupos de todo el mundo participan en dicha competición con vehículos capaces de conducirse en situaciones reales de tráfico y realizar maniobras complejas como el seguimiento de un vehículo precedente, adelantamiento, aparcar y negociar la prioridad de paso en una intersección. En la última edición de dicha competición celebrada en 2007, el equipo de la Universidad de Carnegie Mellon con su vehículo BOSS fue capaz de cubrir 85 km de manera autónoma en algo más de cuatro horas [2], [3].

En Europa, la comisión de transportes de la unión ha valorado a finales de 2009 [4] la estrategia impulsada en 2001

para la reducción en el número de accidentes en carretera al 50% para el presente año. A pesar de haber conseguido resultados esperanzadores, está previsto lanzar para mediados de 2010 un nuevo y más ambicioso plan con el objetivo de incrementar la seguridad en las carreteras reduciendo así el número de accidentes. Dentro de los diversos planes lanzados a lo largo de los últimos años, cabe destacar la iniciativa *e-safety* [5] que engloba más de 60 proyectos incluidos dentro del sexto y séptimo Programa Marco que analiza la seguridad vial desde diversos puntos de vista como las comunicaciones entre vehículos, los sistemas de seguridad activa y pasiva o, en último término, la completa automatización de los vehículos.

La mayoría de los proyectos de conducción autónoma logra construir sistemas fiables y robustos al instrumentar los vehículos con varios sensores externos como cámaras de visión estereoscópica, GPS, unidades de medición inercial (IMU por sus siglas en inglés) entre otros [6], [7]; siendo casi siempre el GPS el sensor imprescindible en la navegación debido a su capacidad de proporcionar la posición con una precisión que no se degrada con el tiempo.

El GPS es un sistema que, mediante triangulación, permite conocer la posición exacta sobre la tierra en cualquier punto utilizando una red de satélites como referencia. La red está formada por 27 satélites, donde solo 24 están activos y los 3 restantes de respaldo en caso de falla de alguno de los anteriores. Actualmente, la operación de la red depende del departamento de defensa de los Estados Unidos, por lo que en los últimos años se han propuesto e implementado sistemas alternativos como GLONASS y Galileo por parte de la Federación Rusa y la Unión Europea respectivamente; este último aún se encuentra en etapa de implementación[8].

Desde un punto de vista general, la red GPS permite obtener la posición sobre el globo de manera bastante precisa, sin embargo, para el desarrollo de una aplicación de conducción autónoma de vehículos, el error de posicionamiento representa un gran obstáculo, por lo que conviene implementar un sistema GPS diferencial (DGPS por sus siglas en inglés) en los vehículos. Para ello, es necesario contar al menos con una estación de referencia cercana a la zona de conducción de los mismos.

En este artículo, se describe la instalación de una estación de referencia en el Centro de Automática y Robótica sede Arganda para ser utilizada por los investigadores en la conducción

autónoma de vehículos.

## II. DESCRIPCIÓN E IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA

Cuando se utiliza un GPS convencional para determinar la posición de un objeto cualquiera, la precisión del valor obtenido es del orden de los 5-10 metros. Este error es totalmente aleatorio y depende de varios factores al mismo tiempo: condiciones atmosféricas, la geometría o posición de los satélites utilizados en la medición y los errores en el reloj interno de los satélites y/o receptores. Sin embargo, es posible aumentar la precisión de la medida hasta el orden de los 4-8 cm. si se implementa un sistema DGPS [9].

Un sistema DGPS está compuesto por un mínimo de 2 receptores GPS: uno que se encuentra en una posición fija conocida del espacio y es utilizado como referencia para reducir el error en las medidas realizadas por el segundo receptor. Esto se logra midiendo continuamente la posición del receptor estático (a partir de ahora nombrado estación de referencia), y calculando el error que existe entre la medición y el valor real; para luego informar de este error al otro receptor y que el mismo pueda compensar su medición.

Una misma estación de referencia puede ser utilizada con múltiples receptores sin ningún inconveniente siempre que se encuentren dentro del alcance de la misma. De hecho, existen sistemas de corrección complementarios a la red GPS, conocidos como sistemas de aumentación basados en satélites (SBAS por sus siglas en inglés) como el WAAS (Wide Area Augmentation System), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) y MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) para abarcar las zonas de Estados Unidos, Europa y Asia respectivamente. Sin embargo, se debe resaltar que a medida que aumenta la distancia entre la base y el receptor, disminuye la correlación del error de las mediciones base-receptor, disminuyendo así la precisión de la medida del receptor. Por esta razón es conveniente, en algunas aplicaciones, instalar una estación de referencia propia, cercana a la zona donde se realizaran las mediciones.

Para instalar una estación de referencia DGPS convencional, se debe contar al menos con los siguientes componentes:

- Receptor GPS: Realiza mediciones continuas de la “posición” de la estación de referencia, procesa los datos y calcula el error en la medida.
- Transmisor: Transmite la información a los receptores dentro del alcance.

En el caso del Centro de Automática y Robótica, se plantea instalar una estación de referencia compuesta del receptor GPS y un ordenador, este último recibe el error intrínseco de la posición y lo transmite a través de la red WiFi al resto de los equipos.

### A. Sistema Previo:

Dentro del Centro de Automática y Robótica se había instalado con anterioridad una estación de referencia, sin embargo, debido a la ubicación poco favorable de la misma (muy cercana a los edificios y árboles de las instalaciones),

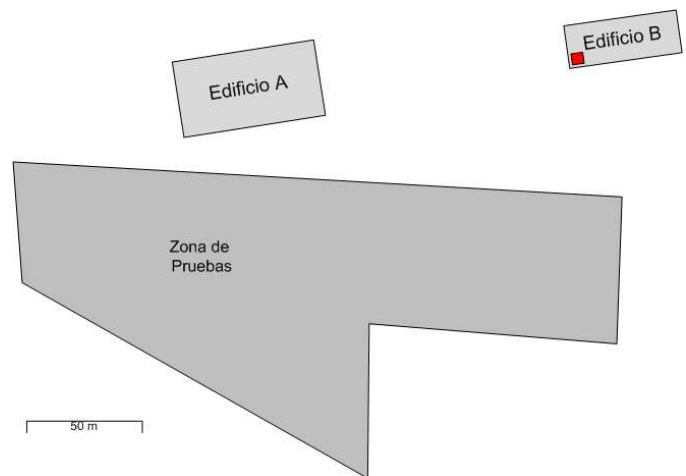


Figura 1. Ubicación de la antigua estación de referencia en el CAR



Figura 2. Torre y caseta de control

comúnmente se presentaban inconvenientes durante las pruebas realizadas por los grupos de investigación dependientes de equipos DGPS para obtener una buena recepción de los satélites y establecer la comunicación con los demás receptores, generando retrasos en la obtención de los resultados. Por esta razón, se decidió instalar una nueva estación de referencia con mayores prestaciones.

### B. Sistema Nuevo

A fin de maximizar el rendimiento de la nueva estación de referencia, se decidió instalar una torre de 15 metros de altura lo más cerca posible al centro geométrico de la zona de pruebas del CAR, donde se instalarían la antena de comunicación WiFi y la antena del receptor GPS, permitiendo a esta última obtener una mejor vista del cielo y por ende de los satélites. Además de esta torre, se colocó una caseta que alberga el receptor GPS y el ordenador de la estación de referencia.

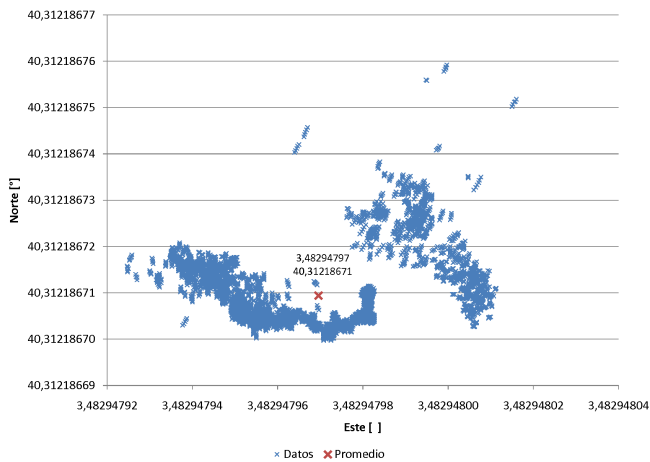


Figura 3. Determinación de la posición de la estación

### III. PUESTA EN MARCHA

Una vez instaladas la torre y la caseta, se procedió a colocar la antena del receptor GPS a un costado de la torre. La altura a la cual colocar la antena se decidió considerando la posibilidad de caída de rayos y la proporcionalidad con la vista del cielo y la recepción de los satélites. Finalmente se decidió colocarla a 13 metros de altura, 2 metros por debajo del punto más alto de la torre.

La mejor posición para la antena WiFi se determinó experimentalmente, probando distintas posiciones desde 3 a 10 metros de altura y comprobando que se pudiera establecer la comunicación con equipos en cualquier punto de la zona de pruebas. Para valores cercanos a los 3 metros se presentaban problemas de recepción en las zonas más alejadas a la torre, mientras que para valores cercanos a los 10 metros los problemas ocurrían en la zona cercana a la torre.

Luego de instalar el resto de los componentes de la estación de referencia (ordenador y receptor GPS), el siguiente paso consistió en determinar la posición exacta de la estación a fin de configurar la misma en el receptor GPS para calcular los errores de medición. Para ello fue necesario configurar la estación como un receptor DGPS y, utilizando la antigua estación de referencia, tomar la información de la posición de la torre durante 24 horas. Finalmente, se calculó el valor medio de la nube de puntos obtenida y el resultado se estableció como la posición de referencia de la nueva estación (Figura 3).

### IV. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Para realizar la validación del funcionamiento de la nueva estación de referencia se realizaron pruebas, estáticas y dinámicas, utilizando uno de los vehículos del grupo AUTOPIA. Este grupo de investigación cuenta con más de 10 años de experiencia en diseño, desarrollo e implantación de sistemas de control para la conducción autónoma de vehículos, derivados de las técnicas aplicadas por más de 30 años en robots autónomos y manteniendo como principio el modificar lo menos posible los vehículos y el entorno de los mismos [10].



Figura 4. Clavileño - Grupo AUTOPIA

El vehículo, mostrado en la figura 4 y conocido como Clavileño, es el tercero instrumentado por el grupo [11]. Es un modelo convencional C3 Pluriel de Citroën al cual se le ha integrado un receptor DGPS, una unidad de medición inercial (IMU) y cámaras estereoscópicas para la detección de peatones. El control del coche lo realiza un ordenador a bordo que, basado en lógica borrosa, toma la lectura de los sensores y decide las acciones de control que se deben enviar al volante, freno y acelerador. Cada uno de estos actuadores finales cuenta con un interruptor, al alcance del conductor, que permite activarlos o no según la prueba de conducción que desee realizar. El guiado del vehículo se realiza utilizando cartografía digital.

#### A. Prueba Estática:

Para esta prueba se colocó el coche parado en un punto de la zona de pruebas y, conectado a la antigua estación de referencia, se tomaron los datos de la posición de Clavileño por 20 minutos. Posteriormente y sin mover el vehículo, se cambió la conexión de la antigua estación a la nueva y se repitió la prueba. Como se puede apreciar en la figura 5, el valor medio de las medidas de posición del vehículo no experimenta mayores variaciones al pasar de una estación a otra, sin embargo, al utilizar la nueva estación como referencia, las mediciones en un mismo punto tienden a dispersarse un poco más, alrededor de 1 centímetro. A pesar de que se sabía que este incremento de la dispersión no afectaría el rendimiento del vehículo durante la conducción autónoma, se precisó conocer la causa del mismo.

La explicación más razonable para este fenómeno es la altura de la torre. Se sabe que el viento es capaz de balancear un edificio unos cuantos centímetros, por lo que al estar ubicada la antena del receptor GPS a 13 metros de altura en la torre, el viento sería capaz de causar ligeros movimientos de la antena respecto a la tierra, siendo esto interpretado por el receptor como un error en la medida, ya que este asume que la antena se encuentra totalmente estática. Para verificar esta hipótesis, se realizaron mediciones de la posición de la torre en un día con predicciones de vientos de entre 30 y 40

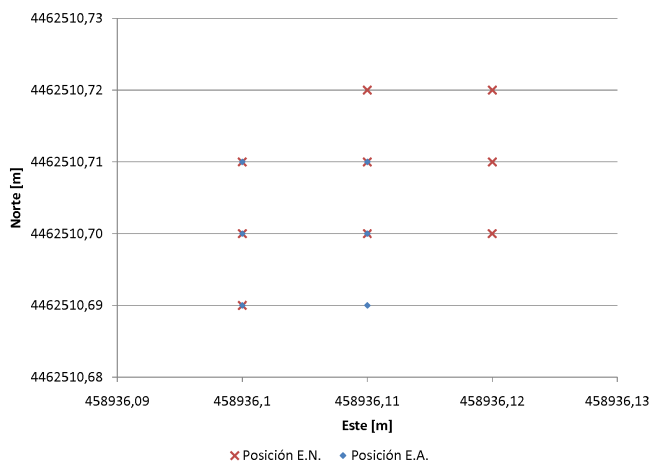


Figura 5. Posición del vehículo con ambas estaciones de referencia.

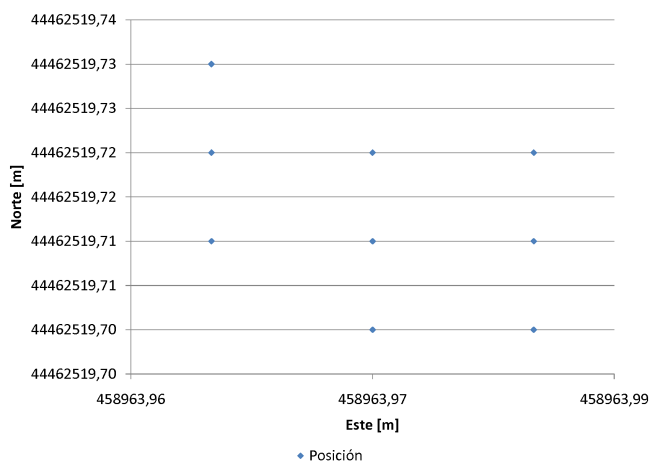


Figura 6. Medición de la posición de la torre en coordenadas UTM.

Km/h y se comparó esta medida con los datos de la figura 3 transformados a coordenadas UTM. Los resultados obtenidos se muestran de forma comparativa en la figura 6, y verifican la hipótesis planteada.

### B. Prueba Dinámica:

Debido a que la estación de referencia fue instalada para pruebas de conducción autónoma de vehículos, fue necesario comprobar que no se alteró el desempeño de los mismos durante las pruebas. Para ello se realizaron recorridos autónomos con Clavileño utilizando solo el controlador borroso y el receptor DGPS con ambas estaciones.

El primer paso fue la creación del mapa de la trayectoria a seguir. Para ello se tomaron las medidas de la posición del coche durante un recorrido manual sobre la trayectoria deseada y, utilizando un programa de planificación óptima de trayectorias [12], se procedió a determinar los puntos críticos del recorrido que permiten reconstruir la línea de referencia del vehículo. Esto permite reducir el número de puntos que definen el mapa de forma óptima, ya que una trayectoria curva

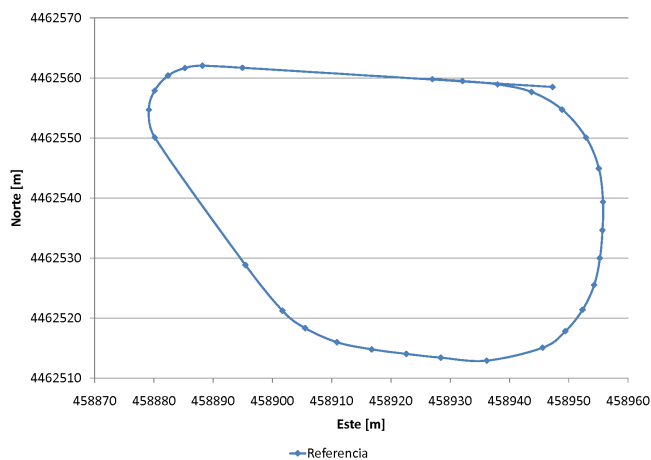


Figura 7. Trayectoria de referencia

necesita más puntos para ser definida que una recta. En la figura 7 se muestra el mapa resultante, resaltando los puntos que definen la trayectoria.

Luego de definir el mapa, se realizó un primer recorrido autónomo utilizando la antigua estación de referencia como origen de los datos de corrección diferencial. Posteriormente, se seleccionó la nueva estación como referencia y se repitió el recorrido. La figura 8 muestra ambos recorridos, en sentido antihorario, junto a la línea de referencia.

A pesar de ser bastantes similares, se puede observar una diferencia aproximada de 30 centímetros en el punto más alejado entre las trayectorias; sin embargo, esta separación es causada por condiciones ajenas al sistema de localización como las condiciones iniciales del recorrido y la dinámica del vehículo durante el mismo. En cuanto a la diferencia del orden de 1,60 metros que existe entre ambas trayectorias y la línea de referencia en la zona cercana a la primera curva, se debe considerar que esta curva representa un giro cercano a los 140 grados en un corto recorrido (poco más de 10 metros), lo cual obliga al vehículo a alejarse un poco de la trayectoria de la misma forma que tendría que hacer un conductor humano al recorrer esa curva. Teniendo en cuenta que el ancho promedio de las carreteras es de 3,5 metros aproximadamente y el ancho del vehículo es de 2 metros, se puede concluir que esta maniobra puede ser ejecutada normalmente sin mayores inconvenientes.

Estos resultados permiten corroborar el correcto funcionamiento del vehículo durante los recorridos autónomos sin importar la estación de referencia que sea utilizada para obtener los datos de corrección diferencial.

### V. CONCLUSIONES

La aparición del GPS, y de sus equivalentes GLONASS y Galileo, ha revolucionado sin lugar a dudas la navegación como se conocía. Además de ello, la implementación de sistemas de corrección diferencial (WAAS, EGNOS, MSAS, estaciones locales) ha permitido extender el uso del mismo a aplicaciones donde la precisión juega un papel clave, como

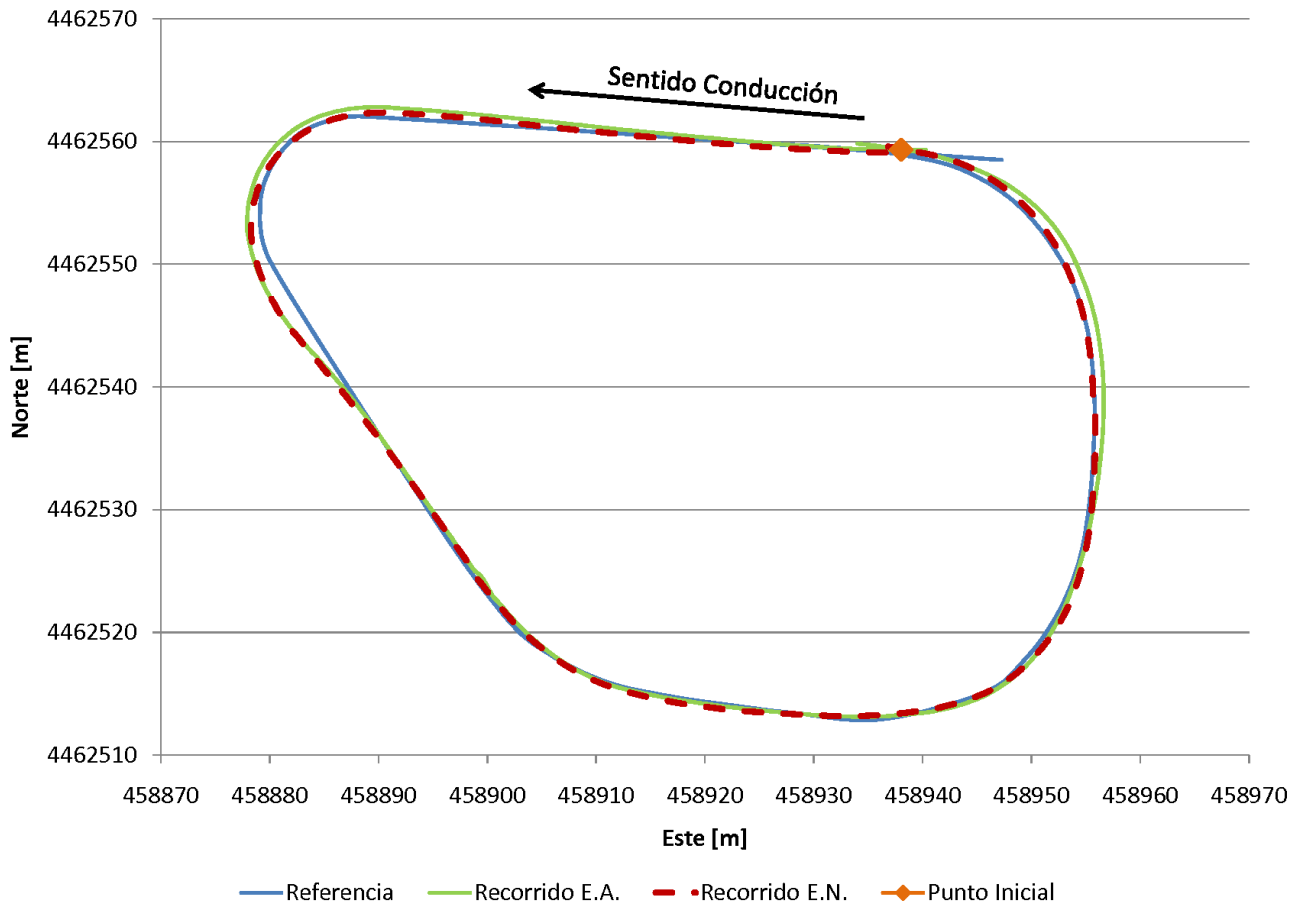


Figura 8. Recorridos realizados por Clavileño.

ocurre en la conducción autónoma de vehículos. Sin embargo, para alcanzar estos resultados óptimos es necesario contar con un sistema de corrección bastante fiable como el descrito en este artículo.

El paso más crítico al momento de instalar una estación de referencia DGPS es la configuración de la posición de la misma, ya que la precisión con la que se determina y configura este valor juega un papel fundamental en el cálculo del error intrínseco de las señales de los satélites por parte de la estación, por lo que el más mínimo error será heredado continuamente por los receptores enlazados a la estación.

Las pruebas realizadas demuestran que el sistema implementado no altera el desempeño de los vehículos durante su conducción, a pesar de las pequeñas oscilaciones laterales que realiza la antena a causa del viento en algunas oportunidades.

Como línea de trabajo futura se plantea mejorar el sistema de guiado de los vehículos mediante la inclusión de nuevos sistemas de posicionamiento que complementen al GPS en situaciones donde no es posible obtener datos del mismo debido a pérdidas de la señal (circulación en túneles) o a la propagación multitrajecto.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado gracias al apoyo del Plan Nacional, España, bajo el proyecto Tránsito (TRA2008-06602-C03-01); por la Comisión Interministerial de Ciencia y tecnología, España, bajo el Proyecto GUIADE (Ministerio de Fomento T9/08); por el Consorcio Estratégico Nacional en Investigación Técnica, bajo el proyecto Marta (CENIT-20072006) y el Ministerio de Ciencia e Innovación, bajo el Proyecto CityElec (PS-370000-2009-4).

#### REFERENCIAS

- [1] S. Kammel, B. Pitzer, S. Vacek, J. Schröder, C. Frese, M. Werling, and M. Goebel, "Team annieway technical system description," DARPA Urban Challenge Technical Paper, 2007.
- [2] <http://www.tartanracing.org/>.
- [3] C. Urmson, J. Anhalt, H. Bae, J. Bagnell, C. Baker, R. Bittner, T. Brown, M. Clark, M. Darms, D. Demitrish, J. Dolan, D. Duggins, D. Ferguson, T. Galatali, C. Geyer, M. Gittleman, S. Harbaugh, M. Hebert, T. Howard, S. Kolski, M. Likhachev, B. Litkouhi, A. Kelly, M. McNaughton, N. Miller, J. Nickolaou, K. Peterson, B. Pilnick, R. Rajkumar, P. Rybski, V. Sadekar, B. Salesky, Y. Seo, S. Singh, J. Snider, J. Struble, A. Stentz, M. Taylor, W. Whittaker, Z. Wolkowicki, W. Zhang, , and J. Ziegler, "Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge," *Journal of Field Robotics*, vol. 25, no. 8, pp. 425–466, 2008.

- [4] ECT, "Final review of the european commission 2001 transport white paper. a sustainable future for transport," European Commission Transport, Tech. Rep., 2009.
- [5] <http://www.esafetysupport.org/>.
- [6] V. Milanés, J. E. Naranjo, C. González, J. Alonso, and T. de Pedro, "Autonomous vehicle based in cooperative gps and inertial systems," *ROBOTICA*, vol. 26, pp. 627–633, 2008.
- [7] P. Zhang, J. Gu, E. E. Milios, and P. Huynh, "Navigation with imu/gps/digital compass with unscented kalman filter," in *Proc. IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, vol. 3, 2005, pp. 1497–1502.
- [8] <http://ec.europa.eu/transport/galileo>.
- [9] M. G. Soares, B. Malheiro, and F. J. Restivo, "An internet dgps service for precise outdoor navigation," in *Proc. IEEE Conference Emerging Technologies and Factory Automation ETFA '03*, vol. 1, Sep. 16–19, 2003, pp. 512–518.
- [10] J. E. Naranjo, C. Gonzalez, T. de Pedro, R. Garcia, J. Alonso, M. A. Sotelo, and D. Fernandez, "Autopia architecture for automatic driving and maneuvering," in *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference ITSC '06*, 2006, pp. 1220–1225.
- [11] V. Milanés, J. Naranjo, C. González, J. Alonso, R. García, and T. de Pedro, "Sistema de posicionamiento para vehículos autónomos," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 5, no. 4, pp. 36–41, 2008.
- [12] J. I. Serrano, J. Alonso, M. D. del Castillo, and J. E. Naranjo, "Evolutionary optimization of autonomous vehicle tracks," in *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, vol. 2, 2–5 Sept. 2005, pp. 1332–1339.