

LOCALIZACIÓN DE VEHÍCULOS: FUSIÓN DE MEDIDAS GPS Y ODOMETRÍA

A.Pozo-Ruz*, M.C.García-Alegre, A.Ribeiro, L.García, D.Guinea, F.Sandoval*

Instituto de Automática Industrial
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
28500 Arganda. Madrid.
{maria, angela, lia, domingo}@iai.csic.es

* Dpto. de Tecnología Electrónica
E.T.S. Ingenieros de Telecomunicación. Universidad de Málaga.
{anapozo, sandoval}@dte.uma.es

Palabras clave: Fusión sensorial, Sensores internos, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Errores GPS, Transformaciones aproximadas.

RESUMEN:

En este artículo se presenta una aproximación a la estimación de la localización precisa de vehículos basada en la fusión de las medidas suministradas por un receptor GPS diferencial y por los sensores internos del vehículo. El objetivo del método de fusión propuesto es lograr un compromiso entre fiabilidad y precisión de las medidas y precio de los dispositivos sensoriales. En el algoritmo de fusión propuesto se parte de una caracterización de los errores asociados a las medidas suministradas por los distintos sensores a bordo del vehículo, así como de las relaciones de dependencia existentes entre ellas. Finalmente, optimizando la función de probabilidad conjunta de los errores de odometría y GPS, se obtiene la mejor estimación de la posición en cada instante. El método supone una generalización del filtro de Kalman en aquellos casos en los que las medidas no verifican los requerimientos de ser independientes entre sí y de estar afectadas únicamente por ruido blanco.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los campos más prometedores de la robótica móvil es aquél cuyo objetivo es dotar de autonomía a vehículos terrestres para realizar una navegación inteligente encaminada a reducir la intervención de operadores humanos en tareas rutinarias o bajo condiciones tóxicas o climáticas adversas. La autonomía conlleva la existencia de una dotación sensorial para percibir y modelar el entorno, a fin de tomar decisiones en la planificación de estrategias de movimiento. Es además el concepto **autonomía** el que subyace y ha dirigido los cambios consecutivos de denominación que han sufrido los sistemas artificiales de locomoción, desde vehículos tripulados a robots móviles autónomos pasando por robots móviles teleoperados.

Un aspecto clave en el desarrollo de estos sistemas autónomos es **el conocimiento en tiempo real de la posición precisa del vehículo**. Esto permite optimizar la planificación de las trayectorias ante situaciones imprevistas, garantizando el éxito de una misión [1] [2]. Ahora bien, la determinación de la posición de un vehículo en ambientes poco estructurados, como son los entornos naturales, es un problema complejo por la variedad de situaciones e interacciones imprevisibles que se pueden presentar en el entorno de trabajo[3]; unido a la imprecisión propia de los dispositivos sensoriales y de control, así como a la de los algoritmos de toma de decisión utilizados [4].

En los últimos años se han propuesto una gran variedad de técnicas de posicionamiento de robots móviles [5]. Su planteamiento varía considerablemente en función del medio en el cual se mueve el robot, del conocimiento que se posea tanto del entorno como de la tarea a realizar, y del conjunto de sensores disponible. En general, la posición puede determinarse a través de sensores, tanto internos como externos [6]. Los primeros proporcionan de forma continua e inmediata la localización del robot sin conocimiento alguno del entorno, calculando la distancia recorrida a través del número de vueltas dadas por las ruedas en cada ciclo de control de movimiento. Dentro de este grupo se incluyen tanto los sensores basados en la odometría del vehículo (codificadores de posición situados en los ejes de las ruedas para medir su giro), como los sistemas de navegación inercial (giróscopos, brújula, inclinómetros y acelerómetros). Ahora bien, a pesar de su continuidad y bajo coste, no se utilizan como único sensor en entornos que carecen de referencias fijas pues las condiciones abruptas del terreno y la extensión de los recorridos a realizar hacen que sus estimaciones de posición lleven asociado un error elevado. Estos errores tienen su origen en deslizamientos de las ruedas, desajustes en el alineamiento, existencia de más de un punto de contacto entre la rueda y el suelo, baja resolución de un sensor o baja frecuencia de muestreo. De todos los errores, sólo aquellos debidos a imperfecciones en el diseño mecánico y sensorial del vehículo se mantienen constantes, pudiendo ser eliminados en el proceso de calibrado [7].

En lo que a los sensores externos se refiere, las técnicas de posicionamiento absoluto basan sus medidas en las relaciones del vehículo con elementos externos como son: sistemas de balizas [8], marcas activas o pasivas [9], o satélites [10]. Cada una de estas técnicas proporciona la posición del vehículo respecto a un sistema de referencia global, y puede ser implantada utilizando una gran variedad de métodos y sensores, como cámara de vídeo, sensores de ultrasonido, láser o sistemas de posicionamiento global, como el GPS. Las cámaras de vídeo y los sensores de ultrasonido son más adecuados para la detección de obstáculos próximos en interiores, activando estrategias de navegación local para evitarlos [11]. El láser permite un reconocimiento de estructuras en exteriores así como la localización del vehículo siempre que exista un sistema conocido de balizas. Finalmente, los sistemas de posicionamiento global son extremadamente útiles en la tarea de localización de vehículos en exteriores [12] [13], ya que el error de sus estimaciones se encuentra acotado y no depende de la distancia recorrida por el vehículo ni se ve afectado por cambios en las condiciones ambientales. Además, la información que proporcionan no necesita de un exhaustivo filtrado y análisis. La localización del vehículo, obtenida con una frecuencia menor o igual a un segundo, se calcula mediante técnicas de triangulación empleando como balizas un conjunto de satélites en el espacio, por lo que no requiere modificar el entorno de trabajo. Sin embargo para obtener una precisión aceptable deben emplearse técnicas diferenciales capaces de reducir el error en la posición desde 5 hasta 0.1

metros. Por supuesto que cuanto mayor sea la precisión requerida mayor será el coste del sistema, ascendiendo a varios millones cuando se requiera una precisión de unos pocos centímetros. No sólo el coste asociado a un receptor GPS puede ser en algunos casos un problema, además existe el problema de la localización continua del vehículo. Así, para obtener una posición precisa se necesita recibir señales de un número elevado de satélites y en algunos casos esto resulta imposible por la presencia de obstáculos (árboles, montañas, edificaciones, y terreno irregular) que las apantallan. Durante el tiempo en el que se mantienen estas circunstancias se desconoce la localización del móvil.

2. NECESIDAD DE UNA INTEGRACIÓN SENSORIAL

Las consideraciones expuestas hasta el momento dejan entrever que no siempre es posible conseguir una buena estimación de la posición empleando un único tipo de sensor. En la mayoría de los casos resulta conveniente, para navegar con seguridad, disponer de varias estimaciones de posición provenientes de distintos sensores, por ejemplo un receptor GPS y sensores odométricos. En este caso, los sensores internos junto con los GPS proporcionan redundancia y complementariedad al calcular la posición instantánea del vehículo por vías muy distintas y a frecuencias diferentes. De este modo, mientras los sensores internos actúan como estimadores de posición a frecuencias de 10-100 Hz, el GPS calcula la posición en un tiempo más largo [14].

Para obtener la mejor estimación de la posición con una dotación sensorial como la descrita, hay que combinar los datos procedentes de los distintos sensores mediante algoritmos de fusión sensorial como son el filtro de Kalman [15], los algoritmos basados en comportamientos [16] y las técnicas basadas en lógica borrosa [17] o bien en redes neuronales [18]. En el caso de disponer de sensores GPS y odómetros, existen tres posibles modos de utilizarlos conjuntamente en la estimación de la posición de un vehículo: 1) Utilizar la odometría como estimador de la posición hasta que la distancia recorrida sea superior a un umbral (por ejemplo 10m.) y entonces acudir a la estimación que proporciona el GPS. Presenta el inconveniente de que en ausencia de señal GPS en el momento de la corrección, el vehículo se ve obligado a navegar con la estimación de la posición dada por el odómetro, afectada por un error alto. 2) Emplear como estimador de posición el GPS y cuando no se reciba señal, acudir a la estimación del odómetro; pero esta estimación en recorridos largos no es fiable debido a su elevada imprecisión. 3) Utilizar el GPS para **mejorar continuamente** la estimación proporcionada por el odómetro. La ventaja que presenta este método es que si desaparece la señal del GPS durante un periodo de tiempo la estimación del odómetro será fiable por haberse corregido en cada iteración con las estimaciones previas del GPS. En este modo de funcionamiento los problemas surgen solo si la señal GPS desaparece durante largos periodos de tiempo, y aun en este caso una reducción drástica en la velocidad del vehículo paliaría el problema de la localización.

Este artículo presenta una contribución innovadora al tercer modo de utilización conjunta de sensores. Por ello, inicialmente se analizan los errores asociados a las medidas provenientes de receptores GPS, odómetros y giróscopos. Conocida la distribución del error en la estimación de la posición, se modela en el tiempo la incertidumbre espacial de cada sensor, utilizando como representación las transformaciones aproximadas. Finalmente, se calcula la función de probabilidad conjunta del error en la posición a partir de las funciones de probabilidad del mismo obtenidas de forma independiente para cada uno de los distintos sensores. A partir de ella se calcula la mejor estimación de la posición del vehículo, determinando el valor máximo de la función de probabilidad conjunta, asociándole su valor de incertidumbre como indicador de fiabilidad

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ERRORES

A fin de proponer un modelo de fusión sensorial que permita obtener la mejor estimación de la posición del vehículo en cada instante, teniendo como medida base aquella que proporcionan los odómetros, es imprescindible realizar una caracterización del ruido asociado a cada una de las estimaciones proporcionadas por los distintos sensores que se desea integrar.

3.1 Error odométrico y de giróscopo

Las medidas de la posición del robot obtenidas a partir de los odómetros pueden considerarse afectadas por ruido blanco [19] siempre que se hayan eliminado los errores sistemáticos mediante un proceso de calibración. En cuanto al giróscopo o estimador de la orientación, el error obedece fundamentalmente a las derivas y al factor de escala que dependen del número de giros que realiza el vehículo y de la amplitud de los mismos, respectivamente. Sin embargo, ambos errores tienen carácter sistemático y pueden eliminarse con una calibración. Aunque menos frecuentes, pues en la mayoría de las aplicaciones el vehículo cambia su aceleración en un intervalo pequeño o bien se mueve a velocidad constante, las aceleraciones bruscas también pueden ser una fuente de error para este tipo de sensores. En definitiva, una vez eliminados los errores sistemáticos, se puede considerar que las medidas de los odómetros y del giróscopo se ven afectadas únicamente por ruido blanco [12].

3.2 Error GPS

Para analizar el tipo de error que afecta a las medidas GPS se registraron en intervalos de un segundo y durante 24 horas consecutivas, las estimaciones suministradas por tres tipos de receptores diferenciales situados en posiciones fijas y que recibían las correcciones por tres vías distintas: de una estación base propia, de un satélite geoestacionario (estación base virtual, sistema Omnistar) y de una emisora de radio comercial en FM (sistema Rasant) [20]. A fin de verificar si el ruido era blanco, se calcularon las funciones de autocorrelación sobre la serie temporal de medidas de latitud y longitud obtenidas, para cada uno de los tres sistemas diferenciales enunciados, con un desplazamiento $k=1200$ equivalente a 20 minutos, Figura 1 y 2.

Figura 1. Función de autocorrelación de la latitud: (a) Base fija, (b) Estación base virtual, (c) Estación de radio en FM.

Figura 2. Función de autocorrelación de la longitud: (a) Base fija, (b) Estación base virtual, (c) Estación de radio en FM.

Se observa que tanto la componente latitud como la componente longitud se encuentran correlacionadas consigo mismas, es decir, dependen de la posición calculada en el instante anterior indicando que el ruido no es blanco. Ahora bien, este ruido puede separarse en dos componentes : ruido coloreado y ruido blanco

$$e_{GPS}(t) = \text{ruido_coloreado} + \text{ruido_blanco} = Cov_{\text{Ruido coloreado GPS}} e_{GPS}(t-1) + e_b \quad (1)$$

Donde la matriz $Cov_{\text{Ruido coloreado GPS}}$ es una matriz constante que pondera el ruido desfasado en el tiempo que puede calcularse mediante un ajuste por mínimos cuadrados a partir de las medidas experimentales recogidas [20], y e_b es la componente de ruido blanco.

4. CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE ESPACIAL: MODELO DE TRANSFORMACION APROXIMADA.

A continuación se procede a caracterizar la incertidumbre espacial asociada a las estimaciones de posición odométrica y GPS con la finalidad de abordar un modelo de fusión de estas estimaciones que tenga en cuenta la naturaleza de sus errores. Dado que la mayoría de las aplicaciones de localización para la navegación de vehículos terrestres no se ven afectadas por grandes cambios de altura, el estudio se realiza sobre las variables longitud y latitud, expresadas en metros. El modelo utilizado para cuantificar la incertidumbre en la localización de un móvil, tiene como base una representación mediante transformaciones aproximadas [21]. Una transformación aproximada $T = (x, y, \phi, Cov)$ se define por la posición estimada $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\phi})$ de un sistema de referencia con respecto a otro y la matriz de covarianza Cov que expresa la incertidumbre de esta estimación y se representa geoméricamente mediante una flecha que une los orígenes de los dos sistemas de referencia con dirección a la posición resultante, Figura 3. En esta representación la posición real de un

sistema de referencia con respecto a otro, viene dada por una variable aleatoria (x, y, ϕ) con un valor medio o estimado $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{\phi})$ y un contorno de error o dispersión de la medida caracterizado por la matriz de covarianza Cov , valor medio de los errores al cuadrado.

Figura 3. Transformación aproximada.

En el caso de los sensores odométricos, se fija una **posición inicial con respecto a un sistema de referencia global** representada por $T_p(t-1)$ y tras realizar un desplazamiento se obtiene la estimación de la posición con los odómetros, $T_{op}(t)$. Ahora se trata de calcular la posición del vehículo, respecto al sistema de referencia global, representada por la transformación aproximada $T_{og}(t)$, que viene dada por la posición estimada $(\hat{x}_{op}(t), \hat{y}_{op}(t), \hat{\phi}_{op}(t))$ y la matriz de covarianza¹ $Cov_{og}(t)$, Figura 4.

Figura 4. Composición de transformaciones aproximadas.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{og}(t) \\ \hat{y}_{og}(t) \\ \hat{\phi}_{og}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_p(t-1) + \hat{x}_{op}(t) \cos(\hat{\phi}_p(t-1)) - \hat{y}_{op}(t) \sin(\hat{\phi}_p(t-1)) \\ \hat{y}_p(t-1) + \hat{x}_{op}(t) \sin(\hat{\phi}_p(t-1)) + \hat{y}_{op}(t) \cos(\hat{\phi}_p(t-1)) \\ \hat{\phi}_p(t-1) + \hat{\phi}_{op}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Cov_{og}(t) = J \begin{bmatrix} Cov_p(t-1) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Cov_{op}(t) \end{bmatrix} J^T \quad (3)$$

De igual forma, se procede a caracterizar la incertidumbre asociada a las estimaciones de posición obtenidas con el GPS. A partir del cálculo del error en las estimaciones se obtiene la evolución temporal de la matriz de covarianza:

$$Cov_{GPS}(t) = Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS} Cov_{GPS}(t-1) Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS}^T + Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} \quad (4)$$

Nótese que en la ecuación (4) se aplica por primera vez en $t=1$ calculándose $Cov_{GPS}(t-1)$ a partir de los valores experimentales recogidos [22]. La matriz de covarianza $Cov_{GPS}(t=0)$ se ha calculado para cada uno de los tres receptores GPS, con corrección diferencial, analizados.

5. FUSIÓN DE MEDIDAS SENSORIALES DE POSICIÓN

Una vez analizada la incertidumbre inherente a los sensores odométricos y GPS, se plantea la localización autónoma de un vehículo como un problema de estimación de la posición a través de un proceso de fusión basado en probabilidades. La fusión de medidas sensoriales de posición permitirá encontrar la mejor estimación, en otras palabras $T_f(t) = (\hat{x}_f(t), \hat{y}_f(t), \hat{\phi}_f(t), Cov_f(t))$, a través del análisis de la incertidumbre asociada a estas medidas (matriz de covarianza)², Figura 5.

¹ La matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$, ecuación (3), es diagonal por ser independientes las transformaciones *aproximadas* $T_p(t-1)$ y $T_{op}(t)$ al eliminarse los errores sistemáticos de los odómetros.

² Se denomina $\hat{LOC}_{og}(t)$ a la posición odométrica del vehículo en el instante t , $\hat{LOC}_{GPS}(t)$ a la posición estimada mediante GPS y $\hat{LOC}_f(t)$ a la mejor estimación de la posición real del vehículo, $Loc_f(t)$. Además las transformaciones aproximadas las denominaremos como sigue:

$$T_{og}(t) = \{ \hat{LOC}_{og}(t), Cov_{og}(t) \}, T_{GPS}(t) = \{ \hat{LOC}_{GPS}(t), Cov_{GPS}(t) \} \text{ y } T_f(t) = \{ \hat{LOC}_f(t), Cov_f(t) \}.$$

Figura 5. Combinación de transformaciones aproximadas.

Para calcular la probabilidad es preciso asumir una determinada función de distribución del error. Para el sistema sensorial seleccionado la función de distribución del error se ajusta a una distribución normal, ya que se han eliminado los errores sistemáticos de los sensores internos mediante un proceso de calibración y las medidas obtenidas con el receptor GPS corresponden a un periodo largo de tiempo.

Así pues, en cada instante, la mejor estimación de la posición del vehículo será aquella cuya probabilidad de pertenencia a las distribuciones normales de las medidas odométricas y GPS, distribución de probabilidad normal conjunta, sea máxima. Es decir, la mejor estimación de la posición se encontrará en la intersección de las elipses de incertidumbre del odómetro y del GPS, tal y como se muestra en la Figura 5.

La expresión de la función de probabilidad conjunta se complica debido a la propuesta inicial de corregir en cada ciclo la estimación odométrica con la mejor estimación de la posición en ese instante. Por esta razón, existe una dependencia entre la posición odométrica en el instante t y la calculada por el GPS en el instante anterior $t-1$, que viene cuantificada por la matriz $Cov_{og-GPS}(t)$, Figura 6.

Figura 6. Proceso de corrección de la estimación de posición odométrica.

Se trata pues de calcular el valor de la posición que hace máxima la probabilidad de pertenencia de la posición a la distribución de probabilidad conjunta, del error de odometría y del error GPS. Para ello se deriva esta función respecto a $Loc_f(t)$ e igualando a cero el resultado se obtiene la **mejor estimación de la posición del vehículo por fusión sensorial** [22]:

$$\hat{Loc}_f(t) = \check{Loc}_{og}(t) + G(t) (\hat{Loc}_{GPS}(t) - \check{Loc}_{og}(t)) \quad (5)$$

donde el término $\check{Loc}_{og}(t)$ muestra la dependencia entre las medidas de los sensores internos y externo al intervenir en su expresión la matriz $Cov_{og-GPS}(t)$:

$$\check{Loc}_{og}(t) = \hat{Loc}_{og}(t) + Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) (Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS}(t)) \quad (6)$$

El término $G(t)$ de la expresión (5) constituye un factor de ponderación de la diferencia existente entre la mejor estimación obtenida por GPS y por odometría; y pone de manifiesto tanto la dependencia entre las medidas odométrica y GPS, como la presencia de ruido coloreado o autocorrelacionado en la estimación GPS:

$$G(t) = I - [Cov_{GPS}^{-1}(t) + \check{Cov}_{og}^{-1}(t) - (I - Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t)) \check{Cov}_{og}^{-1}(t) Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) - Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) \check{Cov}_{og}^{-1}(t)]^{-1} (\check{Cov}_{og}^{-1}(t) - Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) \check{Cov}_{og}^{-1}(t)) \quad (7)$$

$$\check{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t) - Cov_{og-GPS}(t) Cov_{GPS}^{-1}(t) Cov_{og-GPS}^T(t) \quad (8)$$

Por tanto, el término de ganancia $G(t)$ así obtenido puede considerarse como una extensión del término ganancia del filtro de Kalman, para aquellos casos en los que el ruido asociado a la medida no cumple la condición ideal de ser blanco y las variables se encuentran correlacionadas. En estos casos, sólo se requiere que la distribución de probabilidad asociada al error de la medida sea normal. Para comprobar el paralelismo de este método con el filtro de Kalman, que exigiría que $Cov_{og-GPS}(t) = 0$ y $\check{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t)$, se sustituyen estos valores en la expresión (7) y se obtiene:

$$G(t) = C_{og}(t) [C_{og}(t) + C_{GPS}(t)]^{-1} = K(t) \quad (9)$$

que corresponde a la ganancia del filtro de Kalman, expresada en el espacio de las transformaciones aproximadas [23].

Por último, la matriz de covarianza $Cov_f(t)$, o **incertidumbre en la estimación de la posición óptima del vehículo**, viene dada por la expresión:

$$Cov_f(t) = E[e_f(t) e_f^T(t)] = Cov_{og}(t) + Cov_{og-GPS}(t)G^T(t) - Cov_{og}(t)G^T(t) + G(t)Cov_{og-GPS}^T(t) + G(t)Cov_{GPS}(t)G^T(t) - G(t)Cov_{og-GPS}^T(t)G^T(t) - G(t)Cov_{og}(t) - G(t)Cov_{og-GPS}(t)G^T(t) + G(t)Cov_{og}(t)G^T(t) \quad (10)$$

De acuerdo con el modelo de fusión aquí propuesto, la transformación aproximada $T_f(t)$, obtenida de forma conjunta por el método de fusión de las medidas GPS y odométrica, se convierte en la nueva transformación aproximada inicial $T_p(t)$ para el cálculo de la posición en el instante $(t+1)$ y así sucesivamente.

6. CONCLUSIONES

Con el método propuesto, basado en la utilización conjunta de varios sensores, odómetros, giróscopo y GPS, para la estimación de la posición de un vehículo, se ha logrado un compromiso entre, por una parte, la fiabilidad y precisión de las estimaciones de posición y, por otra, el precio de los dispositivos sensoriales involucrados. Cabe resaltar que los sensores odométricos mejoran substancialmente las prestaciones del GPS en situaciones de visibilidad adversa, consiguiendo con ello, en escenarios naturales una localización continua. El receptor GPS actúa aquí como segundo estimador de la posición calculada por el odómetro, de forma que si desaparece la señal GPS durante un período de tiempo la estimación del sensor interno resulta fiable por estar actualizada, en cada iteración, por el valor de la mejor estimación de la posición.

Tradicionalmente se ha utilizado la técnica del filtro de Kalman para la fusión sensorial de las estimaciones provenientes de diferentes sensores, si bien esto supone asumir que el error asociado a las medidas se encuentra contaminado por ruido blanco o no correlacionado y que no existe relación de dependencia alguna entre las variables medidas. Sin embargo, el análisis del error asociado a las medidas obtenidas por cada uno de los sensores empleados, demuestra la existencia de ruido coloreado en las medidas GPS y además una dependencia entre las estimaciones odométricas y GPS, ya que en cada ciclo los odómetros se corrigen en base a la mejor estimación de la posición en ese ciclo. El incumplimiento de estas dos condiciones impide, en este caso, la utilización directa del filtro de Kalman. Debido a ello, se ha desarrollado un algoritmo de fusión para la estimación de posición en base al cálculo del valor máximo de la función de probabilidad conjunta de las estimaciones odométrica y GPS. De este modo, se acota el error de las medidas odométricas en conjunción con las proporcionadas por un receptor GPS, hasta el límite del error del receptor GPS utilizado. Por la naturaleza de los sensores empleados, el modelo propuesto es extremadamente útil cuando se desea una localización continua de vehículos en navegación en campo abierto con grandes recorridos. El algoritmo desarrollado es de carácter iterativo, de fácil desarrollo y reducido coste computacional y proporciona, en cada ciclo de control, la mejor estimación de la posición del vehículo y la incertidumbre asociada a dicha estimación. Tanto la posición como la incertidumbre, vienen expresadas en función de un término $G(t)$, que se transforma en la ganancia del filtro de Kalman cuando se cumplen las condiciones ideales. Por tanto, se puede afirmar que el método de fusión propuesto constituye una extensión del filtro de Kalman, en la fusión de variables dependientes entre sí y afectadas por ruido coloreado.

Agradecimientos

A la Unión Europea y a la CICYT por la financiación recibida a través de los Proyectos de investigación “Multitrack: Supervisión inteligente de mercancías en transporte abierto e intermodal”, Telematics for Transport- 2304, “Arquitectura multiagente para generación de comportamiento complejo en un robot de fumigación en exteriores”, TAP98-0781 y “Sistema de Exploración Autónomo basado en Visión Activa y Foveal”, TIC98-0562. A la Fundación Ramón Areces por la subvención recibida a través de una Beca de investigación.

Referencias

- [1] J. Gasós, M. C. García-Alegre, R. Garcia, *Fuzzy strategies for the navigation of autonomous mobile robots*, Proc.: Fuzzy Engineering Toward Human Friendly Systems, IOS Press, Amsterdamm, 1992, pp.1024-1034.
- [2] M. C. García-Alegre, D. Guinea, *Building an architecture for a farming robot*, Proc.: International Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Productions, Gandía 1997, pp.255-260.
- [3] *The Atacama Desert Trek*, <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/lri-13/www/atacama-trek/>
- [4] D. Guinea, *Comportamiento autónomo de robots en entornos con complejidad e incertidumbre*, Proc.: Jornadas de Robótica e Inteligencia Artificial, Alcalá de Henares, 1996, pp. 11-16.
- [5] J. González, A. Ollero, *Estimación de la posición de un Robot Móvil*, Informática y Automática, vol. 29-4, 1996, pp. 3-18.
- [6] J. Borenstein, B. Everett, L. Feng, *Navigation mobile robots: systems and techniques*, Wellesley, MA: A. K. Peters, 1996.
- [7] J. Borenstein, L. Feng, *Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 6, 1996, pp. 869-880.
- [8] H. R. Beom, H. S. Cho, *Mobile robot localization using a single rotating sonar and two passive cylindrical beacons*, Robótica, vol. 13, 1995, pp. 243-252.
- [9] M. Betke, L. Gurvits, *Mobile Robot Localization using landmarks*, Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 2, 1997, pp. 251-263.
- [10] P. Misra, B.P. Burke, M.M. Pratt, *GPS Performance in navigation*, Proceeding of the IEEE, vol. 87, no. 1, 1999, pp. 65-85.
- [11] M. C. Garcia-Alegre, A. Ribeiro, J. Gasós, J. Salido, *Optimization of fuzzy behavior-based robots navigation in partially known industrial environments*, Proc.: IEEE International Conference on Industrial Fuzzy Control & Intelligent Systems, Houston, USA, 1993, pp.50-54.
- [12] E. Abbott, D. Powell, *Land vehicle navigation using GPS*, Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 1, 1999, pp. 145-162.
- [13] L. Cordesses, P. Martinet, B. Thuilot, M. Berducat, *GPS-Based Control of Land Vehicle*, Proceedings of 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC'99, Madrid, Spain, September 1999, pp. 41-46.

- [14] K. Rintanen, H. Mäkelä, K. Koskinen, J. Puputti, M. Sampo, M. Ojala, *Development of an autonomous navigation system for an outdoor vehicle*, Control Engineering Practice, vol. 4, no. 4, 1996, pp. 499-505.
- [15] R. Grover Brown, P. Y. C. Hwang, Introduction to random signals and applied Kalman Filtering, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1997.
- [16] R. C. Arkin, *Behaviour-based robotics*, Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [17] H. R. Beom, H. S. Cho, *A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 25, 1995, pp. 464-477.
- [18] A. M. S. Zalzalá, A. S. Morris, *Neural networks for robotics control*, Ed. Ellis Horwood, U.K., 1996.
- [19] S. Scheduling, G. Dissanayake, E. M. Nebot, H. Durrant-Whyte, *An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, no. 1, 1999, pp. 85-95.
- [20] A. Pozo-Ruz, L. García, A. Ribeiro, D. Guinea, M. C. García-Alegre, *Análisis comparativo de tres receptores GPS en modo diferencial: Caracterización de ruidos*, Technical Report, IAI-CSIC TR-12/98b, Instituto de Automática Industrial, Departamento de Sistemas, 1998. <http://www.iai.csic.es/gpa>
- [21] R. Smith R., P. Cheeseman, *On the representation and estimation of spatial uncertainty*, The International Journal of Robotics Research, vol. 5, nº 4, 1986, pág. 56-68.
- [22] A. Pozo-Ruz, A. Ribeiro, M. C. García-Alegre, D. Guinea, *Modelado de la incertidumbre espacial en el posicionamiento de vehículos autónomos*, Technical Report IAI-CSIC TR-01/99, Instituto de Automática Industrial, Departamento de Sistemas, 1999. <http://www.iai.csic.es/gpa>
- [23] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatme, G. A. Bekey, *Circumventing dynamic modeling: evaluation of the error-state Kalman filter applied to mobile robot localization*, Proc.: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, Michigan, 1999, pp. 1656-1663.

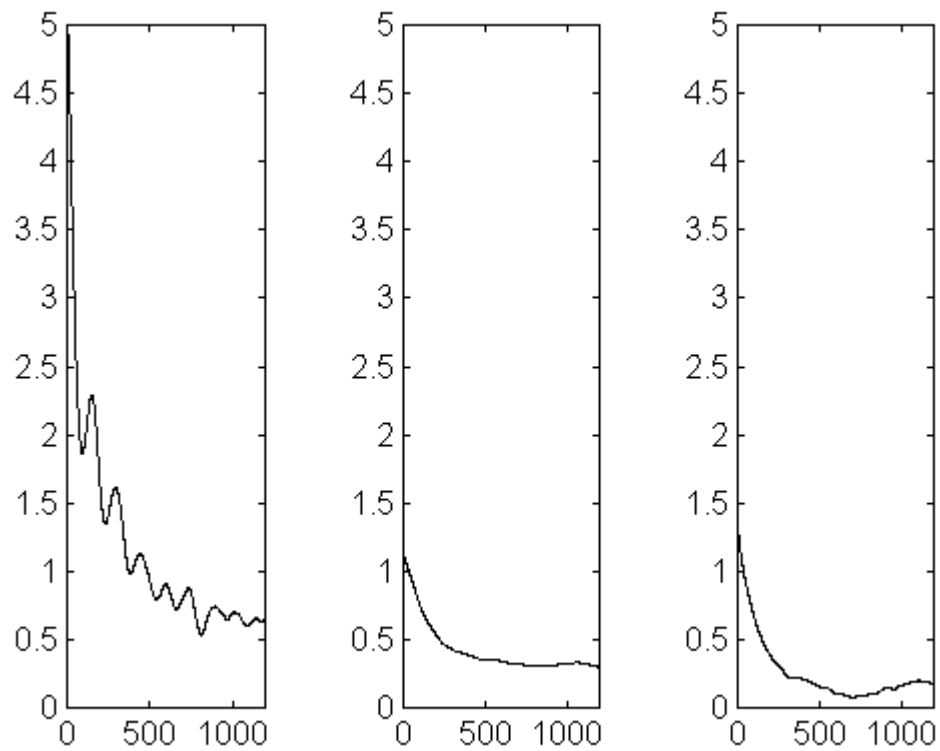


Figura 1

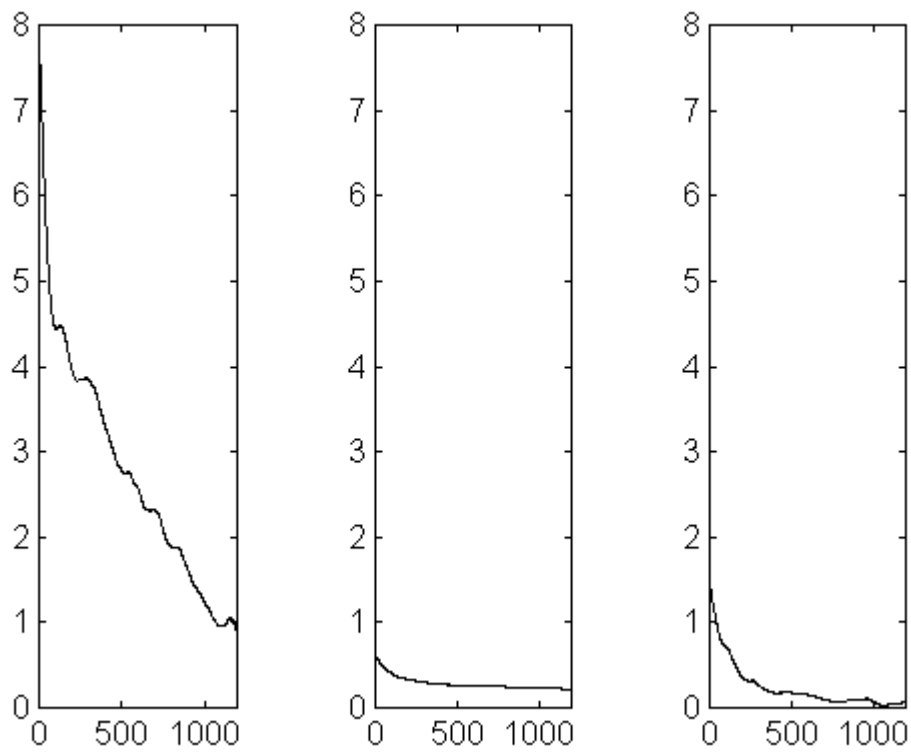


Figura 2

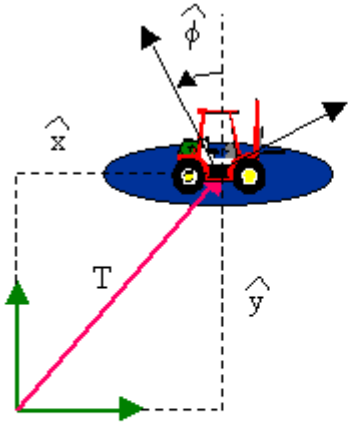


Figura 3

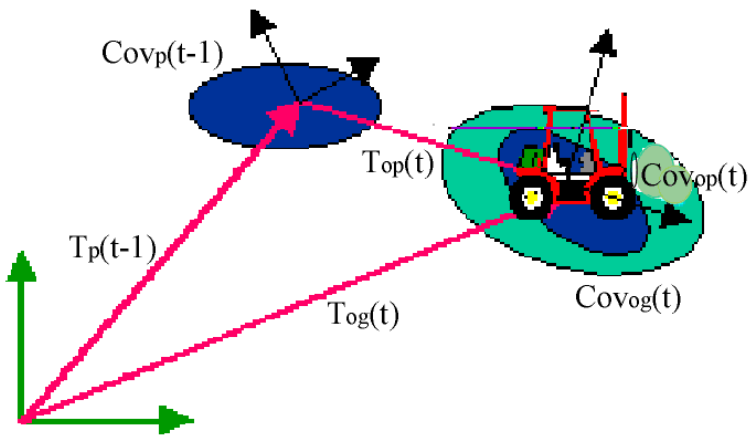


Figura 4

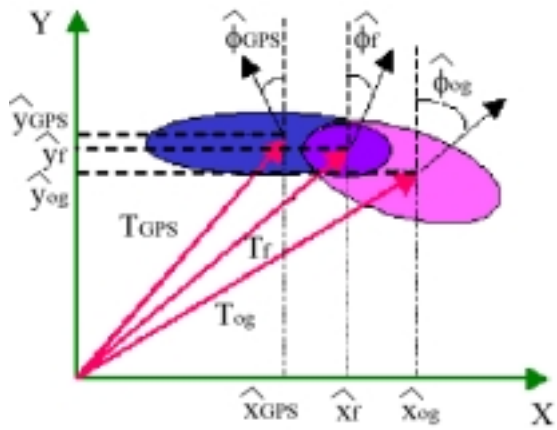


Figura 5

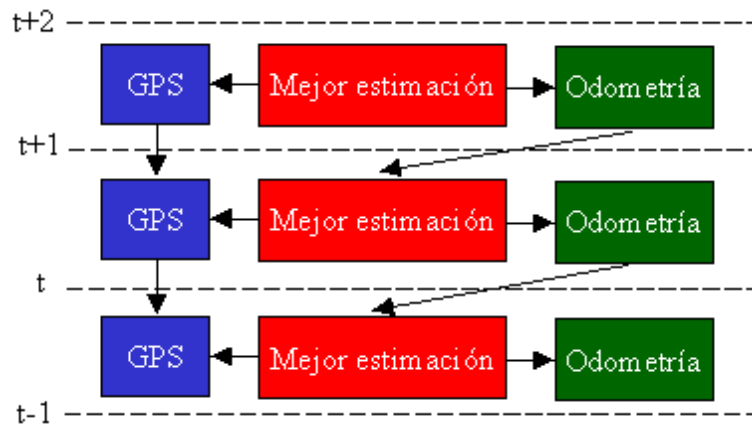


Figura 6