

MODELADO DE LA INCERTIDUMBRE ESPACIAL PARA LA LOCALIZACIÓN DE MÓVILES EN EXTERIORES¹

Ana Pozo-Ruz*, Ángela Ribeiro⁺, María García-Alegre⁺, Lía García⁺, Domingo Guinea⁺, Francisco Sandoval*

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

* Universidad de Málaga. Dpto. de Tecnología Electrónica.
Plaza El Ejido, s/n. 29013- Málaga
{anapozo, sandoval} @dte.uma.es

Palabras claves: fusión sensorial, sensores internos, gps, errores gps, transformaciones aproximadas.

Resumen: Este trabajo presenta un método de estimación conjunta de la posición de un vehículo en exteriores para su aplicación en tareas agrícolas, a partir de las medidas suministradas por odómetros, giróscopo y receptor GPS. Se propone la utilización de un receptor GPS submétrico en conjunción con dos odómetros y un giróscopo, a fin de obtener una localización continua y precisa, incluso en aquellas situaciones en las que los satélites no sean visibles. El método de fusión propuesto desarrolla una solución innovadora que mejora la precisión de la localización continua mediante la utilización de un algoritmo de fusión que maximiza la función de probabilidad conjunta de las estimaciones odométrica y GPS/giróscopo, empleando como espacio de representación de transformaciones aproximadas.

1. Introducción

Uno de los campos más prometedores de la robótica móvil es aquél cuyo objetivo consiste en dotar de un cierto grado de autonomía a vehículos. Esta mayor autonomía permite realizar una navegación inteligente encaminada a reducir la intervención de operadores humanos en tareas rutinarias o realizadas bajo condiciones tóxicas o climáticas adversas. La autonomía conlleva la existencia de una dotación sensorial para percibir y modelar el entorno, a fin de planificar estrategias de movimiento y tomar decisiones. 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 [3]; unido a la imprecisión propiamente de los dispositivos sensoriales y de control, como de los algoritmos utilizados para la toma de decisiones [4].

En los últimos años se han desarrollado distintas 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 posee tanto del entorno como de la tarea a realizar, y del conjunto de sensores disponible. En general, la posición puede obtenerse 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, estimando la distancia recorrida por el número de vueltas de 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). Sin embargo, a pesar de su

¹ Comunicación basada en el artículo "Localización de vehículos: fusión de GPS y odometría", aceptado para su publicación en Mundo Electrónico 308/Abril, 2000.

continuidad y bajo coste, no se utilizan de forma exclusiva en entornos que carecen de referencias fijas, pues las condiciones abruptas del terreno y la extensión de los recorridos dan lugar a estimaciones de posición muy imprecisas. 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 del 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 y pueden ser eliminados mediante un proceso de calibración [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 con luz blanca o láser, sensores de ultrasonido y sistemas de posicionamiento global, como el GPS. Las cámaras de vídeo y los sensores de ultrasonido se utilizan en la detección de obstáculos próximos en interiores, activando estrategias de navegación para evitarlos [11]. El láser permite reconocer estructuras en exteriores así como la localización del vehículo siempre que exista un mapa 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, no depende de la distancia recorrida por el vehículo ni se ve afectado por cambios en las condiciones ambientales y la información que proporciona no necesita un filtrado y análisis exhaustivo. La localización del vehículo 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. Para obtener una precisión aceptable deben emplearse técnicas diferenciales capaces de reducir el error en la posición de 5 a 0.1 metros, y cuanto mayor sea la precisión requerida mayor será el coste del sistema. Ahora bien no sólo el coste asociado a un receptor GPS puede ser en algunos casos un problema, además si se desea tener una localización continua y precisa del vehículo se necesita recibir la señal de un número elevado de satélites y en algunos casos esto resulta imposible por el apantallamiento producido por obstáculos (árboles, montañas, edificaciones), que impiden la localización del móvil durante amplios intervalos de tiempo.

2. Necesidad de una integración sensorial

Las restricciones debidas a cada sensor, indican que no siempre es posible conseguir una buena estimación de la posición empleando un único tipo de dispositivos de medida. En la mayoría de los casos, para navegar con seguridad, conviene disponer de estimaciones de posición provenientes de distintos tipos de sensores, por ejemplo un receptor GPS y sensores internos: odómetros y giróscopo. En este caso, los sensores internos junto con el GPS proporcionan redundancia y complementariedad al estimar la posición instantánea del vehículo por vías y frecuencias muy 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 periodos de tiempo más largos [14].

Para obtener la mejor estimación de la posición en el plano con una dotación sensorial compuesta por odómetro, giróscopo y GPS, hay que combinar los datos procedentes de los distintos sensores mediante algoritmos de fusión sensorial como son el filtro de Kalman [15], algoritmos basados en comportamientos [16], técnicas basadas en lógica borrosa [17] o bien en redes neuronales [18]. En el caso de disponer de sensores GPS/giróscopo y odómetros², 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 supere un umbral (por ejemplo 10 m.) y entonces acudir a la estimación que proporciona el GPS/giróscopo. Presenta el inconveniente de que en ausencia de señal GPS se navegaría con una estimación (x, y) odométrica de error alto. 2) Guiarse de la estimación de posición del GPS/giróscopo y cuando no se reciba señal GPS, acudir a la estimación del odómetro. En este caso, la estimación del odómetro en recorridos largos es muy imprecisa. 3) Utilizar el GPS/giróscopo para mejorar continuamente la posición del odómetro. Este método posee la ventaja de que en ausencia de señal GPS durante un periodo de tiempo, la estimación (x, y) del odómetro será fiable al estar corregida en cada iteración con las estimaciones previas del GPS. En

² Se entiende por posición de un vehículo en el plano la terna (x, y, ϕ) , es decir, sus coordenadas en el plano (x, y) y su ángulo de orientación ϕ . Los odómetros proporcionan la posición (x, y, ϕ) del vehículo, mientras que el GPS proporciona únicamente las coordenadas del vehículo, y el giróscopo sólo informa acerca de su orientación. Por ello, a lo largo de este trabajo, se considerará definida la posición del vehículo, por un lado, por los sensores odométricos, y por otro, por los sensores GPS/giróscopo.

el peor de los casos, si la señal GPS desapareciera durante largos periodos de tiempo, una reducción drástica de la velocidad del vehículo paliaría el problema de su localización precisa.

Este artículo presenta una contribución innovadora al tercer modo de utilización conjunta de sensores para el posicionamiento de un vehículo en exteriores. Para ello, se analizan en primer lugar los errores asociados a las medidas provenientes de GPS, odómetros y giróscopo. Conocido el tipo de errores presentes en las estimaciones, se modela en el tiempo la incertidumbre espacial de cada sensor independientemente, utilizando como representación las transformaciones aproximadas. Finalmente, se calcula la función de probabilidad conjunta de la posición a partir de las funciones de probabilidad de las estimaciones dadas por los distintos sensores. Se obtiene así, para cada instante, la mejor estimación de la posición del vehículo como el valor máximo de la función de probabilidad conjunta, y la incertidumbre asociada a esta estimación conjunta como indicador de la fiabilidad de la posición. El método de posicionamiento desarrollado se encuentra actualmente en fase de experimentación en un robot tractor autónomo en el Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAI-CSIC), en el marco del Proyecto CICYT-TAP98-0781 “Arquitectura multiagente: generación de comportamiento complejo para un robot de pulverización en exteriores”.

3. Caracterización de los errores

Para proponer un modelo de fusión sensorial que permita obtener la mejor estimación de la posición del vehículo en cada instante, es imprescindible conocer con detalle el ruido asociado a las estimaciones proporcionadas por cada uno de los sensores que se desean 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 previamente 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 son sistemáticos y pueden eliminarse mediante un proceso de calibrado. Aunque menos frecuentes, pues en la mayoría de las aplicaciones el vehículo cambia su aceleración dentro de un intervalo pequeño o bien se mueve a velocidad constante, las aceleraciones bruscas constituyen otra fuente de error para este tipo de sensores. En definitiva, una vez eliminados los errores sistemáticos, podemos considerar las medidas de los odómetros y del giróscopo afectadas únicamente por ruido blanco [12].

3.2 Error GPS

Para analizar el tipo de error que afecta a las medidas GPS se registraron, durante 24 horas con frecuencia de un segundo, las estimaciones suministradas por tres tipos de receptores diferenciales situados en posiciones fijas, 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 Figura 2.

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, por lo que el ruido no es blanco. Ahora bien, este ruido puede separarse en dos componentes:

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

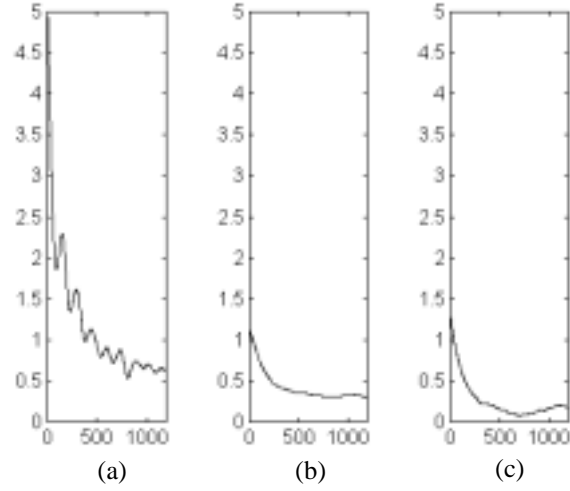


Figura 1: Función de autocorrelación de la latitud: (a) Base fija, (b) Estación base virtual, (c) Estación de radio en FM.

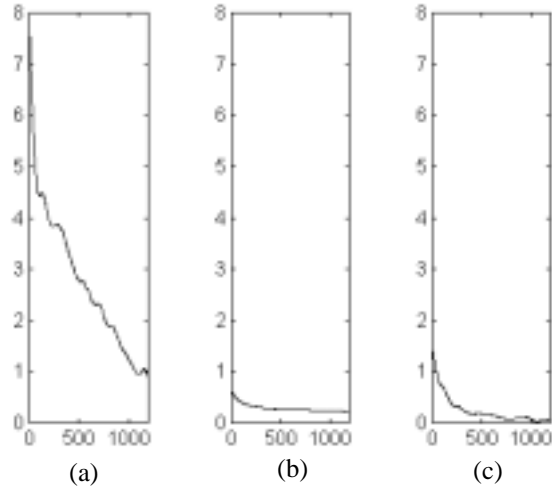


Figura 2: Función de autocorrelación de la longitud: (a) Base fija, (b) Estación base virtual, (c) Estación de radio en FM.

La matriz $Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS}$ es una matriz constante que pondera el ruido desfasado en el tiempo y puede calcularse mediante un ajuste por mínimos cuadrados a partir de las medidas experimentales recogidas [20], e_b representa la componente de ruido blanco, cuya matriz de covarianza es también constante e igual a:

$$Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} = E[e_b e_b^T] \quad (2)$$

Los valores obtenidos para las matrices $Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS}$ y $Cov_{Ruido\ blanco\ GPS}$ con los sistemas descritos son:

a) Base fija:

$$Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.9984 & -0.0001 \\ -0.0003 & 0.9980 \end{bmatrix} \quad Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.0159 & 0.0029 \\ 0.0029 & 0.0336 \end{bmatrix} \quad (3)$$

b) Estación base virtual:

$$Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.9873 & 0.0007 \\ -0.0004 & 0.9785 \end{bmatrix} \quad Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.0288 & -0.0036 \\ -0.0036 & 0.0260 \end{bmatrix} \quad (4)$$

c) Estación de radio en FM:

$$Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.9977 & -0.0005 \\ -0.0001 & 0.9964 \end{bmatrix} \quad Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} = \begin{bmatrix} 0.0067 & 0.0018 \\ 0.0018 & 0.0108 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Obsérvese que las diagonales principales de las matrices $Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS}$ son prácticamente iguales a la unidad, corroborando la dependencia de las medidas calculadas con las obtenidas en el instante anterior. De igual modo, los valores de las diagonales principales de las matrices $Cov_{Ruido\ blanco\ GPS}$ de los diferentes sistemas son próximos a cero, por estar asociadas dichas matrices a ruido blanco, esto es, no correlacionado consigo mismo.

4. Cálculo de la incertidumbre espacial: modelo de la transformación aproximada

Una vez que se ha analizado el tipo de error de las medidas GPS, odométricas y del giróscopo se procede a la caracterización de la incertidumbre espacial asociada a las estimaciones de posición. Dado que la mayoría de las aplicaciones de localización de vehículos terrestres para tareas de navegación, no se ven afectadas por grandes cambios de altura, este estudio se realiza sólo para las variables longitud y latitud expresadas en metros. El modelo utilizado para cuantificar la incertidumbre en la localización de móviles, se basa en una representación mediante transformaciones aproximadas [21].

Una transformación aproximada $T = (x, y, \hat{\phi}, Cov)$ 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 la estimación y que se representa geoméricamente por 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 , que es el valor medio de los errores al cuadrado.

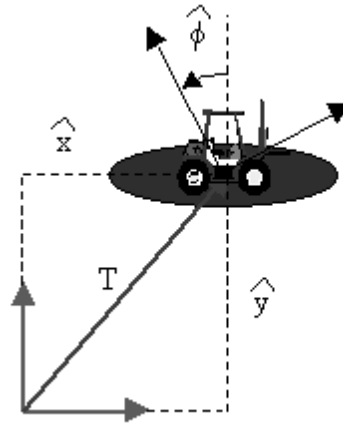


Figura 3: Transformación aproximada.

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 después de 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 covarianza $Cov_{og}(t)$, Figura 4.

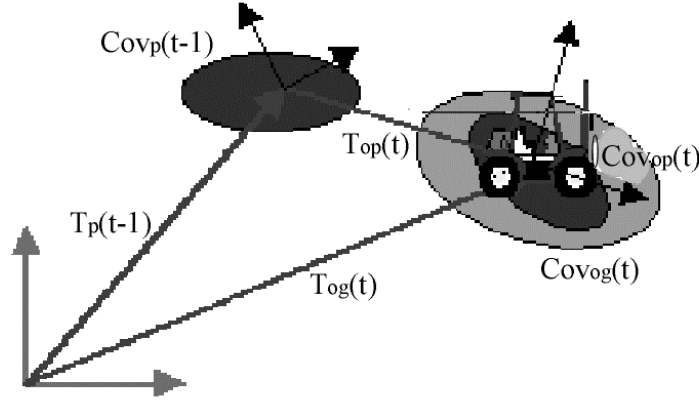


Figura 4: Composición de transformaciones aproximadas.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{og}(t) \\ \hat{y}_{og}(t) \\ \hat{\phi}_{og}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_p(t-1) + \hat{x}_{op}(t) \cos(\hat{\phi}_p(t-1)) - \hat{y}_{op}(t) \sin(\hat{\phi}_p(t-1)) \\ \hat{y}_p(t-1) + \hat{x}_{op}(t) \sin(\hat{\phi}_p(t-1)) + \hat{y}_{op}(t) \cos(\hat{\phi}_p(t-1)) \\ \hat{\phi}_p(t-1) + \hat{\phi}_{op}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Cov_{og}(t) = J \begin{bmatrix} Cov_p(t-1) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & Cov_{op}(t) \end{bmatrix} J^T \quad (7)$$

Nótese que la matriz de covarianza $Cov_{og}(t)$, ecuación (7), es diagonal por ser independientes las transformaciones aproximadas $T_p(t-1)$ y $T_{op}(t)$ al eliminarse los errores sistemáticos de los odómetros. En esta ecuación, J representa a la matriz jacobiana.

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 matriz de covarianza $Cov_{GPS}(t)$:

$$Cov_{GPS}(t) = Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS} Cov_{GPS}(t-1) Cov_{Ruido\ coloreado\ GPS}^T + Cov_{Ruido\ blanco\ GPS} \quad (8)$$

Nótese que la ecuación (8) se aplica por primera vez en $t=1$, calculándose $Cov_{GPS}(t-1)$ a partir de los valores experimentales obtenidos con anterioridad [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

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, partiendo de las estimaciones con incertidumbre proporcionadas por los sensores odométricos, GPS y giróscopo. Este modelo permite encontrar la mejor estimación, $T_f(t) = (\hat{x}_f(t), \hat{y}_f(t), \hat{\phi}_f(t), Cov_f(t))$, a través del análisis de la incertidumbre asociada a estas medidas o matriz de covarianza, Figura 5.

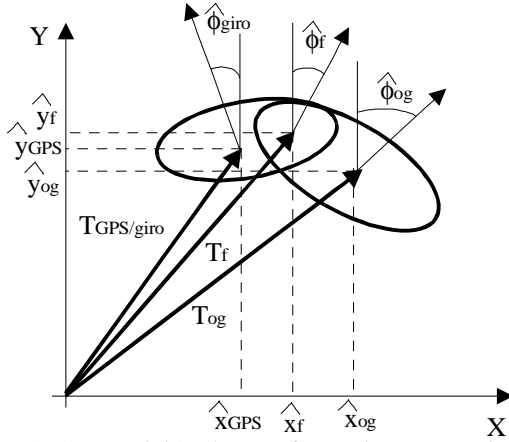


Figura 5: Composición de transformaciones aproximadas.

Para calcular la probabilidad de una localización es preciso asumir una determinada función de distribución del error. Bajo la hipótesis de que se han eliminado los errores sistemáticos mediante un proceso de calibración y que las medidas se obtienen durante un periodo largo, la función de distribución del error se ajusta a una distribución normal. Por tanto, las probabilidades asociadas a la posición odométrica y GPS/giróscopo de un vehículo, $P_{og}(Loc_f(t))$ y $P_{GPS/giro}(Loc_f(t))$, se pueden expresar como⁴:

$$P_{og}(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t)-Loc_{og}(t))^T Cov_{og}^{-1}(t)(Loc_f(t)-Loc_{og}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{og}(t)|}} \quad (9)$$

$$P_{GPS/giro}(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t)-Loc_{GPS/giro}(t))^T Cov_{GPS/giro}^{-1}(t)(Loc_f(t)-Loc_{GPS/giro}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{GPS/giro}(t)|}} \quad (10)$$

donde $Cov_{og}(t)$ y $Cov_{GPS/giro}(t)$ son las matrices de covarianza asociadas a las estimaciones de posición odométrica y GPS/giróscopo respectivamente⁵.

En cada instante, la mejor estimación de la posición del vehículo será aquella cuya probabilidad de pertenencia a ambas distribuciones normales o función de probabilidad conjunta, sea máxima. Ahora bien, la función de probabilidad conjunta de dos distribuciones de probabilidad normal es otra distribución normal, definida como:

⁴ Se denomina $\hat{Loc}_{og}(t)$ a la posición odométrica del vehículo en el instante t , $\hat{Loc}_{GPS/giro}(t)$ a la posición estimada mediante GPS/giróscopo 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: $T_{og}(t) = \{\hat{Loc}_{og}(t), Cov_{og}(t)\}$, $T_{GPS/giro}(t) = \{\hat{Loc}_{GPS/giro}(t), Cov_{GPS/giro}(t)\}$ y $T_f(t) = \{\hat{Loc}_f(t), Cov_f(t)\}$.

⁵ La matriz $Cov_{GPS/giro}(t)$ resulta de añadir una tercera fila $[0 \ 0 \ \sigma_{giro}^2]$ y un vector columna $[0 \ 0 \ \sigma_{giro}^2]^T$ a la matriz $Cov_{GPS}(t)$ (ecuación (8)) correspondiente al giróscopo, siendo σ_{giro} la desviación típica de las medidas del giróscopo. De igual forma, el vector $e_{GPS/giro}(t)$ es el resultando de añadir un tercera fila a la ecuación (1): el error, considerado blanco, de la orientación obtenida por el giróscopo.

$$P(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \begin{bmatrix} Loc_f(t) - Loc_{og}(t) \\ Loc_f(t) - Loc_{GPS/giro}(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Cov_{og}(t) & Cov_{og-GPS/giro}(t) \\ Cov_{og-GPS/giro}^T(t) & Cov_{GPS/giro}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Loc_f(t) - Loc_{og}(t) \\ Loc_f(t) - Loc_{GPS/giro}(t) \end{bmatrix}}{(2\pi)^3 \sqrt{\begin{vmatrix} Cov_{og}(t) & Cov_{og-GPS/giro}(t) \\ Cov_{og-GPS/giro}^T(t) & Cov_{GPS/giro}(t) \end{vmatrix}}} \quad (11)$$

Si las medidas odométricas y GPS/giro fuesen independientes entre sí, $Cov_{og-GPS/giro}(t) = 0$, la función de probabilidad conjunta dada por la ecuación (11) podría expresarse como el producto de las distribuciones normales, ecuaciones (9) y (10). Sin embargo, esto no es así, ya que la propuesta inicial de trabajo es que en cada ciclo se considere como punto de partida para la odometría la mejor estimación de la posición obtenida al fusionar la medida odométrica y GPS/giro en el instante anterior, Figura 6.

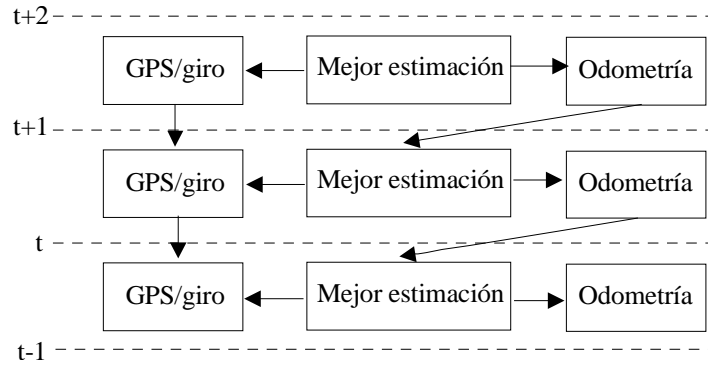


Figura 6: Proceso de corrección de la estimación odométrica

Por tanto, el error $e_{og}(t)$ asociado a la medida odométrica en el instante t está correlacionado con el error $e_{GPS/giro}(t-1)$ en el instante anterior, por lo que:

$$Cov_{og-GPS/giro}(t) = E[e_{og}(t) e_{GPS/giro}(t-1)^T] \quad (12)$$

Por tanto y para poder expresar (11) como el producto directo de dos distribuciones normales, es necesario transformar la matriz de covarianza de la expresión (11) en una matriz diagonal [22].

$$\begin{bmatrix} Cov_{og}(t) & Cov_{og-GPS/giro}(t) \\ Cov_{og-GPS/giro}^T(t) & Cov_{GPS/giro}(t) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -Cov_{GPS/giro}^{-1}(t)Cov_{og-GPS/giro}^T(t) & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Cov_{og}(t) - Cov_{og-GPS/giro}(t)Cov_{GPS/giro}^{-1}(t)Cov_{og-GPS/giro}^T(t) & 0 \\ 0 & Cov_{GPS/giro}(t) \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} I & -Cov_{og-GPS/giro}(t)Cov_{GPS/giro}^{-1}(t) \\ 0 & I \end{bmatrix}$$

⁶ La matriz $Cov_{GPS/giro}(t)$ resulta de añadir una tercera fila $[0 \ 0 \ \sigma_{giro}^2]$ y un vector columna $[0 \ 0 \ \sigma_{giro}^2]^T$ a la matriz $Cov_{GPS}(t)$ (ecuación (8)) correspondiente al giróscopo, siendo σ_{giro} la desviación típica de las medidas del giróscopo. De igual forma, el vector $e_{GPS/giro}(t)$ es el resultado de añadir un tercera fila a la ecuación (1): el error, considerado blanco, de la orientación obtenida por el giróscopo.

Sustituyendo en la ecuación (11) la matriz de covarianza dada en la expresión (13), se consigue expresar la función de probabilidad conjunta como el producto de dos distribuciones normales:

$$P(Loc_f(t)) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t)-\tilde{Loc}_{og}(t))^T \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)(Loc_f(t)-\tilde{Loc}_{og}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|\tilde{Cov}_{og}(t)|}} \cdot \frac{e^{-\frac{1}{2}(Loc_f(t)-Loc_{GPS/ giro}(t))^T Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t)(Loc_f(t)-Loc_{GPS/ giro}(t))}}{(2\pi)^{3/2} \sqrt{|Cov_{GPS/ giro}(t)|}} \quad (14)$$

donde

$$\tilde{Loc}_{og}(t) = \hat{Loc}_{og}(t) + Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) (Loc_f(t) - \hat{Loc}_{GPS/ giro}(t)) \quad (15)$$

$$\tilde{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t) - Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) Cov_{og-GPS/ giro}^T(t) \quad (16)$$

Si las medidas GPS/giro y odométricas fuesen independientes entre sí $Cov_{og-GPS/ giro}=0$, $\tilde{Loc}_{og}(t) = \hat{Loc}_{og}(t)$ y $\tilde{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t)$ y la expresión (14) se correspondería con el producto directo de las expresiones (9) y (10).

La mejor estimación de la posición del vehículo resultante de la fusión sensorial se obtiene calculando el máximo de esta función de probabilidad conjunta, esto es, se trata de hacer máxima la probabilidad de pertenencia de la posición estimada $\hat{Loc}_f(t)$ a las dos distribuciones de probabilidad, la del error de odometría y la del error GPS/giro. Así pues, derivando la expresión (14) respecto a $Loc_f(t)$ e igualando a cero se obtiene:

$$\hat{Loc}_f(t) = \tilde{Loc}_{og}(t) + G(t) (\hat{Loc}_{GPS/ giro}(t) - \tilde{Loc}_{og}(t)) \quad (17)$$

Donde $G(t)$ es igual a:

$$G(t) = I - [Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) + \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t) - (I - Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t)) Cov_{og}^{-1}(t) Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) - Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)]^{-1} (\tilde{Cov}_{og}^{-1}(t) - Cov_{og-GPS/ giro}(t) Cov_{GPS/ giro}^{-1}(t) \tilde{Cov}_{og}^{-1}(t)) \quad (18)$$

El término $G(t)$ es fundamental, pues pondera la diferencia entre la mejor estimación obtenida por GPS/giro y por odometría. Muestra tanto la dependencia entre las medidas odométrica y GPS/giro, como la presencia de ruido coloreado o correlacionado consigo mismo en la estimación GPS. De ahí que el término $G(t)$ pueda considerarse una extensión del término ganancia del filtro de Kalman, para aquellos casos en los que el error 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 $Cov_{og-GPS/ giro}(t)=0$ y $\tilde{Cov}_{og}(t) = Cov_{og}(t)$, se sustituyen estos valores en la expresión (18) y se obtiene:

$$G(t) = Cov_{og}(t) [Cov_{og}(t) + Cov_{GPS/ giro}(t)]^{-1} \quad (19)$$

que corresponde a la ganancia del filtro de Kalman $K(t)$ expresada en el espacio de las transformaciones aproximadas [23].

Por último, para obtener la matriz de covarianza $Cov_f(t)$ se calcula el error cometido en la estimación:

$$e_f(t) = [\Delta x_f(t) \Delta y_f(t) \Delta \phi_f(t)]^T = Loc_f(t) - \hat{Loc}_f(t) = e_{og}(t) + G(t)(e_{GPS/giro}(t) - e_{og}(t)) \quad (20)$$

$$Cov_f(t) = E[e_f(t) e_f^T(t)] = Cov_{og}(t) + Cov_{og-GPS/giro}(t) G^T(t) - Cov_{og}(t) G^T(t) + G(t) Cov_{og-GPS/giro}^T(t) + G(t) Cov_{GPS/giro}(t) G^T(t) - G(t) Cov_{og-GPS/giro}^T(t) G^T(t) - G(t) Cov_{og}(t) - G(t) Cov_{og-GPS/giro}(t) G^T(t) + G(t) Cov_{og}(t) G^T(t) \quad (21)$$

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/giro y odométrica, se convierte en la nueva transformación aproximada inicial $T_p(t)$ para el cálculo de la posición en el instante $(t+I)$ y así sucesivamente.

6. Campo de aplicación

La localización precisa de un vehículo es de vital importancia para el correcto desempeño de tareas de navegación en vehículos autónomos y tripulados, dependiendo en muchos casos el éxito de la misión del grado de precisión de la misma. En los últimos años están adquiriendo un gran protagonismo las líneas de investigación destinadas a liberar al hombre de trabajos tediosos o que supongan un importante riesgo para su salud: transporte pesado de material, tareas agrícolas con manipulación de productos tóxicos, desactivación de explosivos o trabajos en minas a cielo abierto.

Dentro de esta temática, el Grupo de Percepción Activa (GPA) del Instituto de Automática Industrial (IAI) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) incorpora receptores GPSs en un proyecto cuyo objetivo es la automatización de un tractor capaz de navegar de forma autónoma por un campo de olivos para realizar una fumigación selectiva de los mismos, Figura 7.



Figura 7: El robot tractor.

El tractor está equipado con sensores odométricos, un giróscopo y un receptor GPS diferencial. Como sistema odométrico se emplea un sensor magnético de efecto Hall. El sensor detecta la variación del campo magnético generado por un conjunto de bandas imantadas radialmente distribuidas en la zona interna de las ruedas traseras. El giro se cuantifica mediante un giróscopo piezoeléctrico, sensible a las variaciones de la velocidad angular del vehículo. Finalmente, se utiliza un receptor GPS en modo diferencial, que recibe las correcciones a través del sistema Rasant, para la localización absoluta del vehículo. Una de las ventajas del sistema Rasant, además del coste nulo de la señal, radica en el hecho de que el transmisor de correcciones diferenciales se encuentra a bordo del vehículo, eliminando la necesidad de un sistema radio enlace para recibir la corrección diferencial. Además, al encontrarnos en Madrid cerca del centro de generación de las correcciones diferenciales, el error base/línea es pequeño. La información,

complementaria y redundante, de la posición proporcionada por estos sensores se combinará mediante el algoritmo de fusión descrito en este artículo, para obtener en cada ciclo de control del movimiento la mejor estimación de la posición del tractor y la incertidumbre asociada a dicha estimación.

7. Conclusiones

Se ha presentado un método basado en la utilización conjunta de varios sensores, odómetros, giróscopo y GPS, en la estimación de la posición de un vehículo para lograr un compromiso entre la fiabilidad y precisión de las estimaciones de posición y el precio de los dispositivos sensoriales involucrados. El método propuesto utiliza el conjunto GPS/giróscopo para mejorar continuamente la posición odométrica. Esta opción posee la ventaja de que en ausencia de señal GPS durante un periodo de tiempo, la estimación (x, y) del odómetro será fiable al estar corregida en cada iteración con las estimaciones previas del GPS. En el peor de los casos, si la señal GPS desapareciera durante largos periodos de tiempo, una reducción drástica de la velocidad del vehículo paliaría el problema de su localización precisa.

Tradicionalmente se ha utilizado la técnica del filtro de Kalman para la fusión sensorial de las estimaciones provenientes de diferentes sensores, asumiendo 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 estudio del error asociado a las medidas obtenidas por cada uno de los sensores seleccionados, muestra la existencia de ruido coloreado en las medidas GPS y además una dependencia entre las estimaciones odométricas y GPS/giro, cuando en cada ciclo la estimación de posición de los odómetros se corrige sobre la base de la mejor estimación de posición en ese ciclo.

Las dos afirmaciones anteriores impiden en este caso la utilización directa del filtro de Kalman, y apuntan a un algoritmo de fusión para la estimación de posición basado en el cálculo del valor máximo de la función de probabilidad conjunta de las estimaciones odométrica y GPS/giro. De este modo, se acota el error de las medidas odométricas en conjunción con las proporcionadas por un GPS, hasta el límite del error del receptor GPS utilizado.

Por la naturaleza de los sensores utilizados, el modelo propuesto es extremadamente valioso cuando se desea una localización continua de vehículos para navegación en campo abierto con grandes recorridos. El algoritmo es de carácter iterativo, de fácil desarrollo y de reducido coste computacional, proporcionando 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, $K(t)$, 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, “Sistema de Exploración Autónomo basado en Visión Activa y Foveal”, TIC98-0562 y “Sistema KDD de apoyo a la toma de decisiones para control de malas hierbas en base a mapas de riesgos”, AGF99-1125-C03-03.

Referencias

- [1]. Gasós, J, García-Alegre, M.C., Garcia, R., 1992. Fuzzy strategies for the navigation of autonomous mobile robots. Fuzzy Engineering Toward Human Friendly Systems, IOS Press, pp.1024-1034, Amsterdam.
- [2]. García-Alegre, M.C., Guinea, D., 1997. Building an architecture for a farming robot. International Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Productions, pp.255-260, Gandía.
- [3]. The Atacama Desert Trek, <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/Iri-13/www/atacama-trek/>

- [4]. Guinea, D., 1996. Comportamiento autónomo de robots en entornos con complejidad e incertidumbre. Jornadas de Robótica e Inteligencia Artificial, pp. 11-16, Alcalá de Henares.
- [5]. González, J., Ollero, A., 1996. Estimación de la posición de un Robot Móvil. *Informática y Automática*, Vol. 29, No. 4, pp. 3-18.
- [6]. Borenstein, J., Everett, B., Feng, L., 1996. *Navigation mobile robots: systems and techniques*. Wellesley, MA: A. K. Peters.
- [7]. Borenstein, J., Feng, L., 1996. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 6, pp. 869-880
- [8]. Beom, H.R., Cho, H.S., 1995. Mobile robot localization using a single rotating sonar and two passive cylindrical beacons. *Robótica*, Vol. 13, pp. 243-252.
- [9]. Betke, M., Gurvits, L., 1997. Mobile Robot Localization using landmarks. *Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 2, pp. 251-263.
- [10]. Misra, P. Burke, B.P., Pratt, M.M., 1999. GPS Performance in navigation. *Proceeding of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 65-85.
- [11]. Garcia-Alegre, M.C., Ribeiro, A., Gasós, J., Salido, J., 1993. Optimization of fuzzy behavior-based robots navigation in partially known industrial environments. *IEEE International Conference on Industrial Fuzzy Control & Intelligent Systems*, pp.50-54, Houston, USA.
- [12]. Abbott, E., Powell, D., 1999. Land vehicle navigation using GPS. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 1, pp. 145-162.
- [13]. Cordesses, L., Martinet, P., Thuilot, B., Berducat, M., 1999. GPS-Based Control of Land Vehicle. *Proceedings of 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC'99*, pp. 41-46, Madrid.
- [14]. Rintanen, K., Mäkelä, H., Koskinen, K., Puputti, J., Sampo, M., Ojala, M., 1996. Development of an autonomous navigation system for an outdoor vehicle. *Control Engineering Practice*, Vol. 4, No. 4, pp. 499-505.
- [15]. Grover Brown, R., Hwang, P.Y., C., 1997. *Introduction to random signals and applied Kalman Filtering*, 3rd Edition, John Wiley & Sons.
- [16]. Arkin, R.C., 1998. *Behaviour-based robotics*, Massachusetts Institute of Technology.
- [17]. Beom, H.R., Cho, H.S., 1995. A sensor-based navigation for a mobile robot using fuzzy logic and reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 25, pp. 464-477.
- [18]. Zalzala, A.M.S, Morris, A.S., 1996. *Neural networks for robotics control*. Ed. Ellis Horwood, U.K.
- [19]. Scheduling, S., Dissanayake, G., Nebot, E.M., Durrant-Whyte, H., 1999. An experiment in autonomous navigation of an underground mining vehicle. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 1, pp. 85-95.
- [20]. Pozo-Ruz, A., García, L., Ribeiro, A., Guinea, D., García-Alegre, M.C., 1998. Análisis comparativo de tres receptores GPS en modo diferencial: Caracterización de ruidos. Informe Técnico, IAI-CSIC TR-12/98b, Instituto de Automática Industrial, Departamento de Sistemas, 1998. <http://www.iai.csic.es/gpa>
- [21]. Smith, R., Cheeseman, P., 1986. On the representation and estimation of spatial uncertainty. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 5, N° 4, pp. 56-68.
- [22]. Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M.C., Guinea, D., 1999. Modelado de la incertidumbre espacial en el posicionamiento de vehículos autónomos. Informe Técnico IAI-CSIC TR-01/99, Instituto de Automática Industrial, Departamento de Sistemas, <http://www.iai.csic.es/gpa>
- [23]. Roumeliotis, S.I., Sukhatme, G.S., Bekey, G.A., 1999. Circumventing dynamic modeling: evaluation of the error-state Kalman filter applied to mobile robot localization. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1656-1663, Detroit, Michigan, USA.