

CAPTURA DE MOVIMIENTO Y LOCALIZACIÓN EN INTERIORES APLICADAS A ENTORNOS INDUSTRIALES

Juan Antonio Corrales Ramón, Francisco Andrés Candelas Herías y Fernando Torres Medina
Grupo de Automática, Robótica y Visión Artificial
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante
Apartado de Correos 99, 03080 Alicante
[jcorrales, Francisco.Candelas, Fernando.Torres]@ua.es

Resumen

La aplicación de la Inteligencia Ambiental en el ámbito industrial mejora la interacción entre los operadores humanos y la maquinaria industrial. En particular, el desarrollo de entornos industriales inteligentes favorece la cooperación entre los operadores y los robots industriales. Sin embargo, para que esta cooperación sea posible, el sistema debe localizar al operador humano con precisión. Para ello, se propone la utilización de un sistema de captura de movimiento. El análisis de su precisión muestra errores excesivos en las medidas de posicionamiento global. Para corregir estos errores, se utiliza un sistema de localización adicional basado en tecnología de banda ultra-ancha (UWB).

Palabras Clave: captura de movimiento, interacción humano-robot, inteligencia ambiental, banda ultra-ancha, manipulador robótico.

1 INTRODUCCIÓN

La “inteligencia ambiental” (*ambient intelligence*, AmI) es una nueva área de investigación propuesta e impulsada por la UE [2, 6] que se fundamenta en la creación de entornos inteligentes que ofrecen al usuario un conjunto de servicios que se adaptan a sus necesidades. Estos servicios son sensibles al contexto gracias a la recopilación de información del entorno a través de sensores e interfaces inteligentes. La información sensorial permite al sistema AmI detectar la presencia del usuario y adaptar su funcionamiento según su localización. Por otra parte, las interfaces inteligentes permiten al usuario comunicarse con el sistema de una manera sencilla y natural. De este modo, el usuario no debe preocuparse de la complejidad tecnológica subyacente del sistema sino sólo de utilizar los servicios que ofrece.

La inteligencia ambiental constituye una ampliación del término “computación ubicua” (*ubiquitous computing*, *UbiComp* o *pervasive computing*)

acuñado por Weiser en [8]. La computación ubicua pretende integrar sistemas computacionales en objetos cotidianos para que ofrezcan servicios a los usuarios. Así, los ordenadores dejan de concebirse como dispositivos individuales colocados sobre un escritorio a los que el usuario debe prestar una gran atención para hacerlos funcionar. Gracias a la UbiComp, los sistemas computacionales se “diluyen” en el entorno, quedando a la vista del usuario solamente sus funcionalidades [9].

La AmI añade a la visión presentada por la UbiComp dos nuevos componentes [1]: la comunicación ubicua y las interfaces inteligentes. La comunicación ubicua se basa en el uso de redes inalámbricas para interconectar todos los dispositivos del entorno inteligente. Estas redes de comunicación ubicua permiten al usuario acceder a los servicios del sistema desde cualquier lugar. Las interfaces inteligentes permiten al sistema comunicarse con el usuario con el fin de captar sus necesidades para adaptar su funcionamiento (sensibilidad al contexto).

El presente artículo pretende trasladar la visión de la inteligencia ambiental al entorno industrial. En primer lugar, se describen los requerimientos y las ventajas de los entornos industriales inteligentes en el apartado 2. Para que los servicios ofrecidos sean sensibles al contexto se debe localizar al usuario. En celdas de trabajo industriales donde colaboren humanos y robots, esta localización debe ser completa mediante el uso de sistemas de captura de movimiento. En el apartado 3, se comparan diversas tecnologías de captura de movimiento y se elige la más adecuada para los entornos industriales. En el apartado 4, se describen los distintos componentes del sistema desarrollado en esta investigación. La evaluación en el apartado 5 del sistema de captura de movimiento elegido corrobora la necesidad de utilizar un sistema de localización adicional basado en UWB que corrija su escasa precisión traslacional. En el apartado 6, se describe dicho sistema de localización y se estudian las medidas que devuelve. Finalmente, en el apartado 7 se describe el algoritmo de fusión de las medidas de ambos sistemas y en el apartado 8 se enumeran las conclusiones.

2 ENTORNOS INDUSTRIALES INTELIGENTES

Pese a que la visión de futuro presentada por la inteligencia ambiental es muy amplia y se puede aplicar en ámbitos muy diversos, la mayoría de sistemas que se han desarrollado hasta ahora han restringido su área de aplicación al hogar digital. Éste ofrece a sus inquilinos servicios domóticos (iluminación, calefacción, vigilancia, alarmas...), servicios multimedia (TV, música...) y servicios informáticos (acceso a Internet, compartición de impresoras, sincronización de dispositivos...).

No obstante, las ventajas de la inteligencia ambiental son muy interesantes para su aplicación en entornos industriales. La creación de entornos industriales inteligentes capaces de adaptar su funcionamiento a cambios inesperados y a la interacción con los operadores humanos conllevan las siguientes ventajas respecto a los sistemas industriales tradicionales:

- *Aumento de la seguridad:* El sistema industrial monitoriza en todo momento el estado de sus componentes y la interacción con el operador humano. En el caso de que se dé una situación de peligro, el sistema reaccionará adecuadamente para proteger la integridad del humano.

- *Aumento de la productividad:* El sistema de producción se optimiza mediante un uso racional de los productos y mediante una interacción inteligente con los trabajadores.

- *Cadena de producción robusta:* El sistema es capaz de reaccionar en tiempo real ante cambios imprevistos en la cadena de producción. En estos casos, el sistema adecuará su funcionamiento para maximizar la cadencia de producción.

- *Mantenimiento fácil:* La monitorización de todos los componentes del sistema permite detectar rápidamente cualquier avería en alguno de ellos para su reparación.

- *Simplificación y optimización de la interacción hombre-máquina:* El uso de interfaces inteligentes (basadas en muchos casos en sistemas de realidad aumentada y sistemas vestibles) permite una interacción más sencilla y directa entre el humano y el sistema. De este modo, el trabajador no necesitará tener conocimientos sobre tecnologías complejas para usar el sistema.

La adaptación de la inteligencia ambiental a los sistemas industriales no se puede llevar a cabo mediante una simple traslación de los sistemas existentes en los entornos domésticos ya que los

entornos industriales presentan unas condiciones de funcionamiento más exigentes y restrictivas.

Por una parte, los tiempos de respuesta en los sistemas industriales son críticos: retrasos en el funcionamiento del sistema industrial pueden conllevar errores en la cadena de producción e incluso provocar accidentes. Por otra parte, los sistemas industriales deben ser tolerantes a fallos y deben buscar la optimización de la producción, manteniendo la máxima seguridad para el operador humano. Por ello, es necesaria una monitorización constante tanto de los componentes del sistema como de la actividad del humano.

En celdas de trabajo donde colaboren humanos y robots industriales no es suficiente con una monitorización de la posición global de los operadores. En estos entornos, se deben localizar de manera precisa todas las partes del cuerpo del operador para evitar que se produzcan colisiones con el robot. Para ello, se deben usar sistemas de captura de movimiento. Estos sistemas no sólo permiten aumentar la seguridad del entorno industrial sino que también permiten mejorar la interacción humano-robot al poder cambiar los movimientos del robot dependiendo de la posición del operador. En los siguientes apartados se evalúa la utilización de un sistema de captura de movimiento en un entorno industrial con manipuladores robóticos.

3 COMPARATIVA DE SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

La captura de movimiento (*motion capture*, MoCap) es una técnica para registrar digitalmente los movimientos de un actor (generalmente, un ser humano). Los sistemas de captura de movimiento consideran que el cuerpo humano está formado por segmentos rígidos (huesos) interconectados a través de articulaciones que permiten movimientos relativos entre los huesos. El actor cuyos movimientos se desean conocer lleva marcadores (o sensores) cerca de cada articulación. El sistema MoCap se encarga de capturar las traslaciones y rotaciones existentes entre dichos marcadores para así poder obtener la localización de todos los huesos.

Los sistemas de captura de movimiento se implementan mediante distintas tecnologías que presentan una serie de ventajas e inconvenientes dependiendo del principio físico en el que se fundamentan. Las tecnologías MoCap más ampliamente utilizadas actualmente son las siguientes [10]:

- *Sistemas MoCap Mecánicos:* Están compuestos por un conjunto de segmentos rígidos articulados atados

a los miembros del actor e interconectados entre sí mediante transductores electro-mecánicos (potenciómetros). Los movimientos del actor se miden a través de las variaciones de voltaje que experimentan los potenciómetros.

- *Sistemas MoCap Magnéticos*: Este tipo de sistemas instalan un transmisor fijo que induce un campo magnético en el entorno. La dirección e intensidad de este campo son medidas por pequeños receptores sujetos al cuerpo del actor. Las variaciones de estas magnitudes permiten estimar el movimiento del actor.

- *Sistemas MoCap Ópticos*: Estos sistemas se basan en la instalación de tres o más cámaras calibradas que registran imágenes de un conjunto de marcadores pegados al cuerpo del actor. La posición de cada marcador se calcula mediante triangulación de tres o más imágenes que contengan el marcador.

- *Sistemas MoCap Inerciales*: Este tipo de sistemas usa sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) sujetos al cuerpo del actor. Las posiciones de las extremidades del actor se calculan mediante una doble integración de las aceleraciones devueltas por los acelerómetros. Las orientaciones se calculan mediante la integración de las velocidades angulares devueltas por los giroscopios.

Todos estos sistemas proporcionan la precisión y nivel de detalle necesario para localizar los operadores humanos en entornos industriales. Sin embargo, no todas las tecnologías comentadas son adecuadas para las aplicaciones industriales. Los sistemas mecánicos son demasiado incómodos para el usuario y el trabajo diario. La precisión de las medidas de los sistemas magnéticos se reduce drásticamente ante la influencia de los campos magnéticos generados por la maquinaria industrial. Los sistemas ópticos sufren de problemas de

oclusiones que disminuyen su precisión. Para reducir las oclusiones, se debe utilizar una infraestructura de cámaras compleja que no podrá ser instalada en muchos entornos industriales. En la Tabla 1 se comparan las ventajas e inconvenientes de las tecnologías utilizadas para implementar los sistemas MoCap.

Debido a los inconvenientes del resto de tecnologías, los sistemas inerciales son los más adecuados para su utilización en entornos industriales, siempre que se resuelvan los problemas de acumulación de error (drift) de los sensores inerciales. Los sistemas inerciales se caracterizan por utilizar sensores pequeños que permiten la movilidad del operador humano. Además, no requieren de una infraestructura compleja para su instalación y no sufren de ningún tipo de oclusión. En los siguientes apartados se estudia en detalle la utilización de un sistema de captura de movimiento inercial en una celda de trabajo industrial.

4 COMPONENTES DEL ENTORNO INDUSTRIAL PROPUESTO

El entorno industrial desarrollado para la siguiente investigación se compone de dos elementos fundamentales (véase Figura 1): un brazo robótico PA-10 de la empresa *Mitsubishi* y un sistema de captura de movimiento inercial *GypsyGyro-18* de la empresa *Animazoo*.

El PA-10 es un brazo robótico que se caracteriza por su gran versatilidad. Por una parte, es capaz de levantar 10Kg a pesar de sólo pesar 38Kg. Por otra, es un robot redundante de 7 articulaciones, lo que le permite evitar obstáculos y llegar a lugares inaccesibles para otros robots.

Tabla 1: Comparativa de tecnologías de captura de movimiento.

Tecnología	Funcionamiento	Ventajas	Inconvenientes
Mecánica	Variación de voltaje de potenciómetros en estructura mecánica.	-Robustez. -Precisión. -Latencia baja.	-Incómodo para el actor. -Medidas relativas.
Magnética	Variación de campo magnético medido en receptores del actor.	- Medidas absolutas precisas. -Sin oclusiones.	-Errores antes distorsiones magnéticas.
Óptica	Triangulación de marcadores en imágenes captadas por cámaras.	-Aumento de precisión con adición de marcadores pasivos. -Medidas absolutas precisas.	-Oclusiones. -Infraestructura compleja. -Necesidad de calibración.
Inercial	Integración de velocidad angular de giroscopios.	-Precisión. -Sin oclusiones. -Sensores pequeños.	-Medidas relativas. -Acumulación de error (drift).



Figura 1: Componentes del entorno industrial: robot PA-10 (izq.) y sistema MoCap GypsyGyro-18 (der.).

El GypsyGyro-18 es un sistema de captura de movimiento compuesto por un traje de lycra sobre el que se adhieren 18 sensores inerciales. Estos sensores se denominan IMUs (*Inertial Measurement Units*) y son el producto comercial *InertiaCube3* de la empresa *Intersense*. Estas IMUs miden la orientación (alabeo, cabeceo y guiñada) del segmento (hueso) del actor sobre el que se encuentran sujetas. Esta información de orientación se transmite de manera inalámbrica a un PC controlador donde se calcula la posición global del actor mediante un algoritmo de extrapolación de pasos. De este modo, el sistema no sólo registra la orientación de cada una de las partes del cuerpo del actor (cabeza, cuello, hombros, codos, muñecas, pecho, caderas, rodillas y tobillos) sino que también estima el desplazamiento global del cuerpo. Todos estos datos de localización pueden ser accedidos desde el PC controlador mediante una librería DLL y pueden ser almacenados en ficheros con el formato estándar BVH.

Las IMUs del GypsyGyro-18 están compuestas internamente por giroscopios, acelerómetros y magnetómetros que miden, respectivamente, velocidades angulares, aceleraciones lineales y la magnitud del campo magnético a lo largo de tres ejes perpendiculares. Las velocidades angulares devueltas por los giroscopios son integradas para obtener la orientación de los segmentos del actor. Sin embargo, los giroscopios acumulan rápidamente errores (denominados *drift*) de varios grados. Para corregir este error acumulado, las librerías de las IMUs implementan un Filtro de Kalman que utiliza las medidas de los acelerómetros y los magnetómetros [5, 7]. Las componentes de alabeo y cabeceo son corregidas mediante la aceleración gravitacional

obtenida a partir de los acelerómetros y la componente de guiñada es corregida con el campo magnético terrestre medido por los magnetómetros.

5 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

Para poder aplicar el sistema de captura de movimiento GypsyGyro-18 en un entorno industrial, se debe evaluar su precisión de manera detallada. A continuación, se va a analizar tanto la precisión de las medidas de orientación de los segmentos como la precisión de las medidas de desplazamiento global del actor.

5.1 EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN ROTACIONAL

Las especificaciones técnicas de las IMUs [7] identifican la precisión de sus medidas en condiciones normales: 1° para la componente de guiñada y 0.25° para las componentes de alabeo y cabeceo. Sin embargo, la precisión de la guiñada puede disminuir sustancialmente si existen campos magnéticos cerca de los sensores que interfieran en las medidas de los magnetómetros. En particular, los campos magnéticos inducidos por los motores del robot PA-10 pueden influir negativamente en la componente de guiñada.

Para cuantificar las influencias de los campos magnéticos del robot sobre las medidas de los sensores, se ha realizado un conjunto de experimentos. Estos experimentos consistían en colocar una IMU a distintas distancias de cada una de las articulaciones del robot mientras se movían. Estas pruebas han corroborado que los campos magnéticos de los motores del robot influyen negativamente sobre la guiñada, provocando errores que oscilan desde 2° para los motores menos potentes del robot (130W) hasta más de 30° para los motores más potentes (250W).

Mediante estos experimentos se han podido determinar unos umbrales de distancia a partir de los que las influencias magnéticas del robot son despreciables. Si se establece una esfera alrededor de cada articulación del robot usando como radio dichos umbrales, se generará una superficie tridimensional (véase Figura 2) dentro de la que la componente de guiñada de las medidas de orientación de las IMUs no es fiable. Para eliminar estas interferencias, se deberá deshabilitar la corrección de los magnetómetros cuando las IMUs estén dentro de esta superficie. No obstante, esta operación se deberá realizar durante el menor tiempo posible para evitar la acumulación de drift en la guiñada.

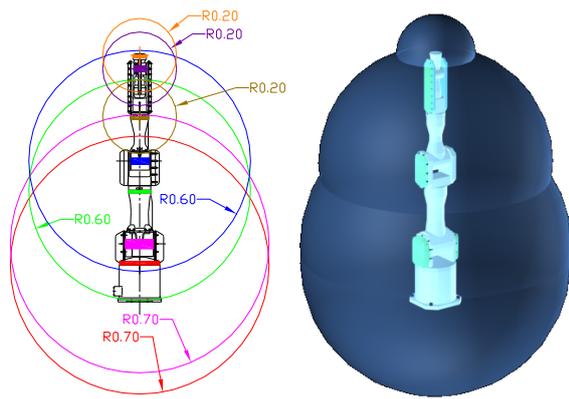


Figura 2: Superficie tridimensional de influencia magnética del PA-10.

5.2 EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN TRASLACIONAL

Las IMUs del GypsyGyro-18 son capaces de medir los ángulos de rotación de las articulaciones del actor con una gran precisión. Sin embargo, no son capaces de calcular los desplazamientos que ha realizado el usuario. Por ello, la traslación global del actor es estimada internamente por la librería DLL del GypsyGyro-18 mediante un algoritmo que se basa en el estudio de los pasos del actor.

Por lo tanto, resulta necesario analizar la precisión de las medidas devueltas por este algoritmo. Se han realizado un conjunto de experimentos que consistían en que un actor recorriera distintas distancias en línea recta y luego se comparaba la distancia devuelta por el GypsyGyro-18 con la real. En la Tabla 2 se presenta la evolución estadística del error traslacional obtenido en estas pruebas según las distancias recorridas por el actor (200, 300 y 400 cm).

Tabla 2: Evolución estadística del error traslacional.

	200cm	300cm	400cm
Error Mínimo	16.70	15.33	35.43
Error Máximo	66.04	69.54	64.23
Error Medio	40.10	37.92	51.09
Desviación. Estándar	17.92	20.97	10.67

Los errores obtenidos son demasiado elevados (entre 15 y 70 cm) para un entorno industrial donde deben colaborar humanos y robots. Se debe buscar un sistema de localización alternativo que permita estimar la posición global del actor dentro del entorno de una forma más precisa. En los siguientes apartados se presenta el sistema basado en tecnología UWB seleccionado.

6 SISTEMA DE LOCALIZACIÓN BASADO EN UWB

6.1 LA TECNOLOGÍA UWB

Para suplir la falta de precisión en el desplazamiento global estimado por el GypsyGyro-18, se ha utilizado un sistema de localización en interiores basado en señales de banda ultra-ancha (*Ultra-Wide Band*, UWB). Se denomina señal UWB a toda aquella señal de radio-frecuencia que tiene un ancho de banda B superior a 500MHz (Ec. 1) o un ancho de banda fraccional B_f superior al 20% (Ec. 2) [4]:

$$B = f_{\max} - f_{\min} > 500\text{MHz} \quad (1)$$

$$B_f = \frac{B}{f_c} = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{\frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}} > 0.20 \quad (2)$$

Las transmisiones UWB se caracterizan por la utilización de pulsos de muy corta duración que ocupan un amplio rango de frecuencias.

La tecnología UWB tiene las siguientes ventajas que justifican su elección respecto a otras tecnologías de localización en interiores:

- *Mayor precisión respecto a otras tecnologías RF:* El uso de pulsos cortos permite distinguir los pulsos originales de los pulsos que se han reflejado en el entorno (efecto multicamino). De este modo, se pasa de errores superiores a 1m en los sistemas RF tradicionales (p. ej., WiFi) a errores inferiores a 15cm en los sistemas UWB.

- *Reutilización del espectro radio-eléctrico:* Las señales UWB utilizan el espectro ocupado por otras tecnologías inalámbricas debido a su amplio ancho de banda. Esta convivencia es posible ya que los organismos reguladores de los EE.UU. [4] y la UE [3] han establecido unos umbrales de potencia máxima para las señales UWB muy inferiores a las potencias del resto de señales RF.

- *Infraestructura reducida respecto a tecnologías de ultrasonidos:* Mientras que los sistemas basados en ultrasonidos necesitan una instalación densa de sensores en el entorno, los sistemas UWB abarcan un área amplia con un número reducido de sensores.

- *Ausencia de oclusiones frente a sistemas ópticos:* Si no existe una línea de visión libre entre el elemento a localizar y la cámara, los sistemas ópticos pierden precisión o incluso son incapaces de realizar la localización. Los sistemas UWB no sufren esta restricción.

6.2 EL SISTEMA UBISENSE

El *Ubisense* es un sistema de localización en interiores basado en señales UWB comercializado por la empresa *Ubisense*. Se compone de dos tipos de dispositivos hardware: sensores y etiquetas (*tags*). Los sensores se colocan en posiciones fijas de la zona que se desea cubrir. En el entorno presentado en este artículo se han instalado 4 sensores formando un área rectangular de 6.4x3.8m. Las etiquetas son dispositivos pequeños (del tamaño de una tarjeta de crédito) que llevan los usuarios cuya posición se desea monitorizar. Las etiquetas mandan pulsos UWB a los sensores, que utilizan una combinación de técnicas TDOA (*Time-Difference of Arrival*) y AOA (*Angle of Arrival*) para estimar la posición 3D del usuario.

Los sensores están conectados a través de una red Ethernet a un PC controlador que contiene la plataforma software del sistema para registrar los datos de localización. Estos datos pueden ser de dos tipos: medidas de localización sin filtrar (datos de tipo "Tag") y medidas de localización filtradas (datos de tipo "Persona"). El principal objetivo de los filtros utilizados es eliminar las medidas atípicas (*outliers*) o con un error muy elevado. Para ello, estos filtros modelan las características de movimiento del elemento que lleva la etiqueta (generalmente, una persona) y adaptan las medidas sin filtrar a este modelo.

Se han realizado un conjunto de experimentos para analizar las características de las medidas devueltas por el *Ubisense*. Para ello, una persona que llevaba una etiqueta realizaba una trayectoria en línea recta. Después, se representaba gráficamente sobre la trayectoria real las medidas devueltas por el sistema para comprobar sus coincidencias. En la Figura 3 se muestra un gráfico representativa de estas pruebas.

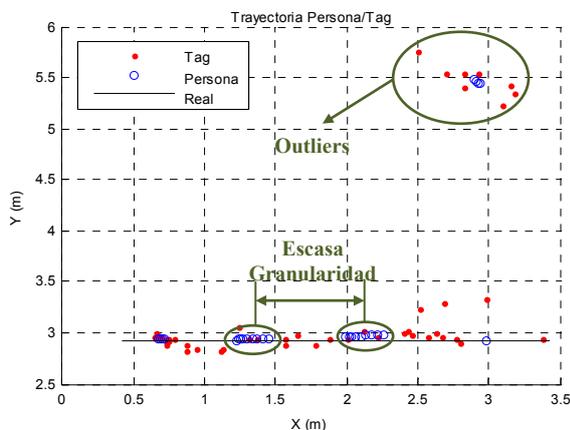


Figura 3. Comparación entre la trayectoria real y las trayectorias de las medidas del *Ubisense*: medidas sin filtrar (Tag) y medidas filtradas (Persona).

La Figura 3 muestra los dos principales problemas de las medidas del sistema *Ubisense*:

- *Presencia de outliers*: La utilización de medidas filtradas (tipo "Persona") ha reducido el número de outliers pero no los ha eliminado. La precisión de las medidas que no son outliers se mantiene dentro de las especificaciones técnicas del sistema (15cm).

- *Reducida granularidad en la definición de trayectorias*: Uno de los principales inconvenientes de la aplicación de filtros a las medidas es que se reduce el número de medidas y aparecen agrupadas. Estos grupos de medidas se encuentran demasiado separados unos de otros tanto temporal como espacialmente. Este hecho provoca que las trayectorias obtenidas a partir de estas medidas no sean continuas y aparezcan muchos saltos (huecos sin medidas) en ellas.

Debido a estos problemas, no se pueden utilizar únicamente las medidas obtenidas del *Ubisense* para posicionar al usuario en el entorno de trabajo. Se deberán combinar las medidas de posición del *Ubisense* con las medidas de desplazamiento global del *GypsyGyro-18*.

7 FUSIÓN MoCap-UWB

Las medidas traslacionales del *GypsyGyro-18* y las medidas de localización del *Ubisense* tienen propiedades complementarias. Así, mientras que la frecuencia de registro de medidas del *Ubisense* es baja y variable (4-9Hz), en el *GypsyGyro-18* es alta y estable (30-120Hz). Por otra parte, el *GypsyGyro-18* presenta errores sustanciales (entre 15 y 70cm) en los datos de traslación global del usuario mientras que el *Ubisense* registra con precisión la localización del usuario (con un error inferior a 15cm). Las ventajas de un sistema mitigan las deficiencias del otro. Por una parte, la alta frecuencia de muestreo del *GypsyGyro-18* permitirá paliar las altas latencias del *Ubisense*. De este modo, en los intervalos temporales donde no se reciban medidas del *Ubisense*, se podrán utilizar las medidas del *GypsyGyro*. Por otra parte, las medidas del *Ubisense* permitirán corregir el error acumulado por las medidas traslacionales del *GypsyGyro-18*.

Para combinar las medidas de ambos sistemas, primero se tienen que expresar en el mismo sistema de referencia. Se utilizará como sistema de referencia base el sistema del *Ubisense* (*U*) ya que es un sistema fijo y absoluto en el entorno. El sistema *GypsyGyro-18* define un sistema de coordenadas dinámico (*G*) que es establecido cada vez que se inicializa el sistema. Por ello, todas las medidas devueltas por el *GypsyGyro-18* serán transformadas al sistema de

coordenadas del Ubisense para poder localizar al usuario de manera absoluta en el entorno.

Entre el sistema de coordenadas del GypsyGyro-18 (G) y el sistema de coordenadas del Ubisense (U) existe sólo una traslación (x_G^U, y_G^U, z_G^U) y una rotación de un ángulo α alrededor del eje Z . Con las siguientes ecuaciones se puede transformar un punto p del sistema del GypsyGyro-18 p^G al sistema del Ubisense p^U :

$$p^U = {}^U T_G \cdot p^G \quad (3)$$

$$p^U = \text{Trans}(x_G^U, y_G^U, z_G^U) \cdot \text{Rot}(z^U, \alpha) \cdot p^G \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x^U \\ y^U \\ z^U \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & x_G^U \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & y_G^U \\ 0 & 0 & 1 & z_G^U \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^G \\ y^G \\ z^G \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Cuando se obtengan las dos primeras medidas de ambos sistemas, se tendrá que calcular la matriz de transformación anterior ${}^U T_G$ entre ambos sistemas. El ángulo α será un parámetro conocido y sólo se tendrá que calcular la traslación entre ambos sistemas, despejando en la ecuación 5:

$$x_G^U = x^U - x^G \cos(\alpha) + y^G \sin(\alpha) \quad (6)$$

$$y_G^U = y^U - x^G \sin(\alpha) - y^G \cos(\alpha) \quad (7)$$

$$z_G^U = z^U - z^G \quad (8)$$

Si la matriz de transformación ${}^U T_G$ sólo se calculara cuando el sistema se inicializa, el error traslacional del GypsyGyro-18 se iría acumulando a lo largo del tiempo. Por ello, la matriz de transformación entre ambos sistemas de coordenadas se debe recalculer cada vez que se reciba una nueva medida del Ubisense. De este modo, las medidas del Ubisense corregirán el error acumulado por el GypsyGyro-18. Por otra parte, entre cada par de medidas del Ubisense, se utilizarán las medidas del GypsyGyro-18 para salvar el problema de la baja frecuencia de muestreo del Ubisense.

En la Figura 4 se muestra un esquema del algoritmo de fusión. Inicialmente, se obtienen dos medidas de ambos sistemas para calcular la matriz de transformación (Ec. 6-8). Después, cuando se reciba una nueva medida del GypsyGyro-18, se transformará al sistema de coordenadas del Ubisense (Ec. 3-5). Si se obtiene una nueva medida del Ubisense, se recalculará la matriz de transformación.

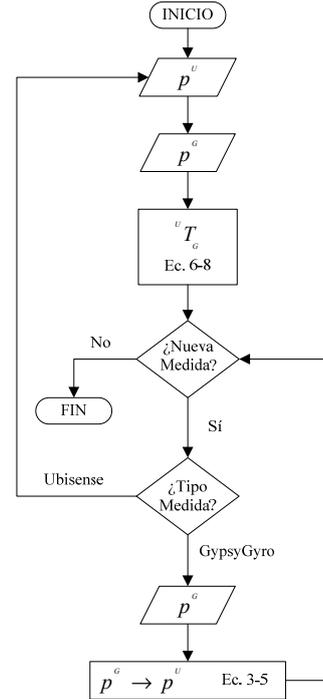


Figura 4. Esquema del algoritmo de fusión MoCap-UWB.

Se han realizado un conjunto de experimentos donde una persona que llevaba el GypsyGyro-18 y una etiqueta del Ubisense se desplazaba a lo largo de una trayectoria lineal horizontal en el sistema de coordenadas del Ubisense. La Figura 5 muestra la trayectoria devuelta por el GypsyGyro-18 en uno de estos experimentos. Aunque la trayectoria es horizontal en el sistema de coordenadas del Ubisense, aparece oblicua en esta gráfica ya que se representa en el sistema de coordenadas del GypsyGyro-18. El error es de 34cm respecto a la trayectoria real. Este hecho demuestra la necesidad de utilizar las medidas del Ubisense para corregirlo.

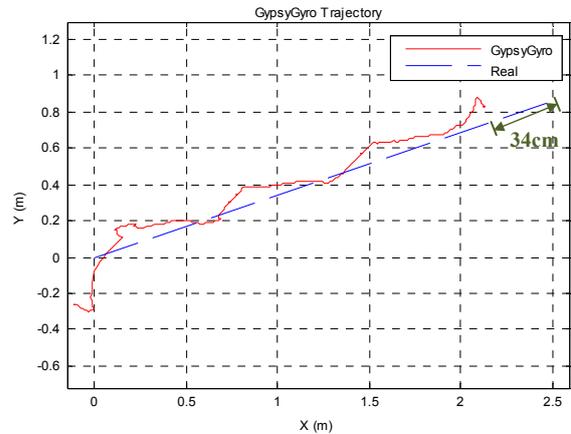


Figura 5. Trayectoria obtenida por el GypsyGyro-18 frente a trayectoria real.

En la Figura 6 se muestra la trayectoria devuelta por el sistema Ubisense y la trayectoria obtenida a partir del algoritmo de fusión de las medidas de ambos sistemas. La trayectoria del algoritmo de fusión transforma todas las medidas al sistema de coordenadas del Ubisense, corrige el error anterior del GypsyGyro-18 y completa con las medidas del GypsyGyro-18 la baja frecuencia del Ubisense.

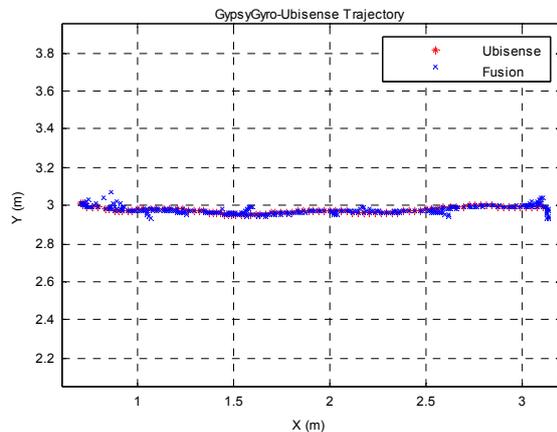


Figura 6. Trayectoria obtenida por el Ubisense frente a trayectoria calculada con el algoritmo de fusión.

8 CONCLUSIONES

El presente artículo analiza la utilización de un sistema de captura de movimiento inercial para localizar de manera precisa al operador humano en un entorno industrial donde debe colaborar con un manipulador robótico. La presencia de errores elevados en la medida del desplazamiento ha mostrado la necesidad de utilizar un sistema de localización adicional. Se ha usado un sistema UWB que ha permitido atenuar estos errores. La combinación de las medidas de ambos sistemas ha permitido seguir el movimiento del operador con una mayor precisión que con las medidas de los sistemas por separado.

En trabajos futuros, sería conveniente la utilización de algoritmos de fusión más complejos que no sólo combinen las medidas sino que también permitan predecir los outliers para reducir sus efectos sobre las trayectorias obtenidas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España mediante la beca de postgrado FPU AP2005-1458 y el proyecto de investigación DPI2005-06222: "Diseño, Implementación y Experimentación de Escenarios de Manipulación Inteligentes para Aplicaciones de Ensamblado y Desensamblado Automático".

Referencias

- [1] Alcañiz, M. y B. Rey, (2005) "New Technologies For Ambient Intelligence", En: *Ambient Intelligence*, Eds. G. Riva, F. Vatalaro, F. Davide y M. Alcañiz, pp. 3-5, IOS Press, Amsterdam, Holanda.
- [2] Ducatel, K., M. Bogdanowicz, F. Scapolo, J. Leijten y J.C. Burgelman, (2001) "Scenarios for Ambient Intelligence 2010 (ISTAG Report)", *Informe Técnico*, Institute for Prospective Technological Studies (Comisión Europea), Sevilla, España.
- [3] European Commission, (2007) "2007/131/EC: On Allowing the Use of the Radio Spectrum for Equipment Using Ultra-Wideband Technology in a Harmonised Manner in the Community", *Official Journal of the European Union*.
- [4] FCC, (2002) "Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems", *Informe Técnico*, Washington, EE.UU.
- [5] Foxlin, E.M., M. Harrington y Y. Altshuler, (1998) "Miniature 6-DOF Inertial System for Tracking HMDs", En: *Helmet and Head-Mounted Displays III*, Eds. R.J. Lewandowski, L.A. Haworth y H.J. Girolamo, vol. 3362, pp. 214-228, Orlando, EEUU.
- [6] FP7 Programme Committee, (2006) "ICT FP7 Work Programme 2007-2008", *Informe Técnico*, Comisión Europea, Bruselas, Bélgica.
- [7] Intersense, (2005) "Product Manual for Use with InertiaCube3 and the InertiaCube3 Processor", *Informe Técnico*, Bedford, Reino Unido.
- [8] Weiser, M., (1991) "The Computer for the 21st Century", *Scientific American*, vol. 9, pp. 933-940.
- [9] Weiser, M., (1999) "Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing", *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 3, nº 3, pp. 12-21.
- [10] Welch, G. y E. Foxlin, (2002) "Motion Tracking: No Silver Bullet, but a respectable arsenal", *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 22, nº 6, pp. 24-38.