

Interfaz DS-CDMA ultrasónica para posicionamiento en espacios inteligentes

José M. Villadangos, M. Mazo, J. Ureña, C. De Marziani, A. Hernández, A. Jiménez, J.J. García

Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior, Campus Universitario, S/N
Carretera de Barcelona, km 33,700 - CP: 28805 - Alcalá de Henares, Madrid, España
Tel: +34 918856564 / Fax: +34 918856591
villaa@depeca.uah.es

Resumen. El presente trabajo muestra un sistema de posicionamiento local basado en técnicas ultrasónicas, para resolver de forma precisa la posición absoluta de un móvil u objeto en interiores. El sistema propuesto trata de resolver, por un lado, el problema de la emisión simultánea de las balizas ultrasónicas, empleando la técnica DS-CDMA mediante la cual se modula la señal ultrasónica (50 kHz) de cada baliza con una secuencia o código pseudoaleatorio que la identifica. De esta forma, llevando a cabo la correlación de la señal recibida con cada uno de los códigos asignados a cada baliza, se puede detectar el instante de llegada al receptor de la señal ultrasónica procedente de cada baliza. Por otro lado, para determinar la posición absoluta se empleará la técnica de triangulación a partir de las diferencias de tiempos de vuelo (DTOAs) obtenidas entre una baliza de referencia y el resto. De esta manera, será suficiente con que exista un sincronismo en la emisión de las balizas, que garantice una emisión periódica y simultánea de todas ellas, no siendo necesario por parte del móvil u objeto a posicionar el conocimiento del instante de emisión. Esto es particularmente útil en un entorno donde puedan coexistir varios móviles u objetos a posicionar.

1 Introducción

Actualmente la tecnología dedicada a la determinación de la posición de un objeto, robot, persona, etc., ya sea en un espacio exterior como en uno interior (edificio, local o habitación) está experimentando un gran auge. Tradicionalmente, la determinación de la posición sólo se aplicaba a la navegación de vehículos, pero desde la pasada década se ha introducido en los sistemas de navegación aplicados a la industria del automóvil, en los sistemas portátiles de posicionamiento basados en satélite y en los servicios de localización que las compañías de telefonía móvil vienen ya ofreciendo a los usuarios.

En los últimos cinco años está tomando cuerpo un nuevo área de trabajo interdisciplinar cuyos resultados a medio plazo van a cambiar de forma radical la vida diaria

de las personas. Esta área se ha denominado recientemente como Inteligencia Ambiental, aunque sus resultados se conocen también como "entornos inteligentes". La visión de la inteligencia ambiental es la creación de espacios habitables en los que los usuarios interactúen de manera natural con servicios computacionales que les faciliten la realización de sus tareas diarias, ya sean de ocio o de trabajo. Sus fundamentos se remontan al concepto de computación ubicua (ubiquitous computing) propuesto por Weiser [1] en 1991, y se alimentan de los resultados de muchas otras áreas de investigación, como son las comunicaciones y dispositivos ubicuos, las interfaces de usuario multimodales, los sistemas de agentes artificiales, los sensores, la visión artificial y la domótica, entre otras. Inteligencia ambiental implica que a través de la tecnología sensorial, dispositivos electrónicos de consumo puedan reconocer el contexto (context-aware)[2],[3]: quién los utiliza, dónde están utilizándose, o cuándo se utilizan. Es por esta razón que los sistemas de localización en interiores sean hoy en día un campo investigación importante dentro de la nueva disciplina de computación ubicua [4], y por supuesto ya desde hace años en la robótica móvil.

El objetivo de este trabajo es abordar un sistema de posicionamiento absoluto basado en ultrasonidos para determinar la posición absoluta de un móvil u objeto a partir de la medida de la diferencia de tiempos de vuelo (DTOA) entre una baliza de referencia y el resto de ellas, considerando que todas emiten de forma simultánea y continuamente. Para resolver el problema de la emisión simultánea de las balizas se empleará la técnica multimodo DS-CDMA con una secuencia pseudoaleatoria diferente para cada baliza. La principal contribución del trabajo radica en que el móvil u objeto a posicionar no necesita conocer el instante de emisión de las balizas, o dicho de otro modo, no es necesario ningún tipo de sincronismo (RF, IR, etc.) con el sistema de balizamiento.

2 Sistemas de posicionamiento basados en balizas ultrasónicas

Los sistemas de posicionamiento basados en ultrasonidos son ampliamente conocidos en el ámbito de la robótica para proporcionar una estimación de la posición absoluta de robots en espacios interiores. Se basan en utilizar varias balizas ubicadas en posiciones conocidas en el entorno donde el robot se va a mover. Cada baliza emite un pulso ultrasónico que es detectado por un receptor ubicado en el robot. A partir del tiempo de llegada (Time Of Arrival, TOA) o tiempo de vuelo de la señal ultrasónica es posible determinar la distancia a cada baliza y por trilateración se consigue determinar de forma sencilla la posición absoluta del robot móvil (RM) [5].

Uno de los problemas que plantea este sistema es la sincronización de las balizas, para lo cual se suele emplear o bien una señal de radiofrecuencia o de infrarrojos emitida desde el RM. Para que las balizas detecten esta señal necesitan incorporar el receptor correspondiente. De esta forma, a partir de un código de identificación asignado a cada baliza es posible seleccionar desde el RM en un determinado instante de tiempo, (inicio de una medida) aquella baliza que ha de emitir el pulso ultrasónico.

Otro problema lo constituye el hecho de que para obtener las distancias a las balizas se necesita disparar cada una de ellas de forma independiente, disminuyendo la frecuencia máxima de adquisición de la posición absoluta del móvil en un factor igual

al número de balizas utilizadas, que por otro lado va a estar condicionada por el tamaño del recinto donde se mueva el RM, o dicho de otra forma, por el TOA máximo de los ultrasonidos que pueda ser obtenido cuando el RM esté en el punto más alejado a alguna de las balizas.

Este problema se solucionaría fácilmente cambiando la estrategia de las balizas: si las balizas actúan como receptores y el RM como emisor de ultrasonidos, sólo es necesario enviar un pulso ultrasónico para obtener los TOAs a cada baliza. El problema radica en que las balizas receptoras deben estar comunicadas con un sistema procesador fuera del RM que es el que se encarga de determinar la posición absoluta. Además, será necesario enviar a través de algún medio la posición obtenida al RM.

Uno de los primeros sistemas de posicionamiento 3D centralizado basado en ultrasonidos y que añade un sistema de sincronismo por RF es el "Active Bat System" desarrollado por el centro de investigación ORL de Cambridge [6]. Cada objeto, persona o móvil a posicionar lleva adosado un dispositivo de pequeño tamaño (7.5cm x 3.5cm x 1.5cm) que incorpora un transceiver de RF (433 Mhz) y un emisor de ultrasonidos. Cada dispositivo tiene un código único de 48-bits que le identifica. Los receptores que detectan la señal ultrasónica se ubican en el techo formando una rejilla de 1,2 metros, y están conectados entre sí a través de una red local de alta velocidad con un ordenador central. Una unidad central de proceso coordina los dispositivos a posicionar y la red de receptores. Cuando un dispositivo debe ser localizado, la unidad central lo interroga a través de su código mediante una emisión por RF, transmitiendo este un pulso ultrasónico que detectan los receptores ubicados en el techo. El ordenador central recoge los resultados de los TOAs y por trilateración calcula la posición del transmisor, siendo el error mínimo en torno a los 3 centímetros.

El sistema Cricket Location Support System, es el sistema de posicionamiento complementario al sistema Active Bat System descrito anteriormente. El sistema de balizamiento está formado por balizas emisoras ultrasónicas sin interconexión alguna [7]. Las balizas emiten una señal de RF simultáneamente con un pulso ultrasónico. Con objeto de que varias balizas puedan coexistir en el mismo entorno, la emisión se hace de forma aleatoria para así disminuir las posibles colisiones. Los receptores son los que estiman la posición a partir de los TOAs con precisiones, que en el mejor de los casos son del orden de 6cm. Este sistema tiene la ventaja de ser un sistema descentralizado. El problema que presenta este sistema es la velocidad de adquisición, pues está condicionada en el mejor de los casos, a la ausencia de colisiones en las emisiones ultrasónicas. Para garantizar el posicionamiento con un error aceptable se necesitaban del orden de 25 medidas de distancia a cada baliza, y considerando que son necesarias cuatro balizas para obtener un posicionamiento en 3D, el periodo de adquisición es del orden de cinco segundos.

Existen varios trabajos previos que han utilizado la codificación de la señal ultrasónica para implementar sensores avanzados en robótica para la detección de obstáculos empleando secuencias pseudoaleatorias [8], códigos Barker o secuencias Golay [9].

En posicionamiento absoluto con ultrasonidos ha sido Hazas [10] el primero en utilizar secuencias Gold para codificar la señal ultrasónica. Una señal de RF sirve de sincronismo para provocar la emisión simultánea de todas las balizas ultrasónicas. La correlación de la señal recibida con cada una de las secuencias Gold asignadas a cada

baliza permite detectar los tiempos de vuelo (TOA) y extraer a partir de estos la posición absoluta del móvil u objeto a posicionar. La precisión obtenida es inferior a 2 centímetros en el 95% de las medidas.

3 Sistema de posicionamiento absoluto propuesto

Uno de los objetivos perseguidos es hacer que todas las balizas emitan de forma simultánea para así garantizar en un tiempo mínimo la adquisición de la posición, para lo cual se ha de emplear alguna de las técnicas multiacceso que hoy día se utilizan en comunicaciones. Se ha optado por la técnica de Acceso Múltiple por División de Código, o CDMA, como mejor solución. El hecho de poder utilizar un mismo ancho de banda para la emisión simultánea de todas las balizas permitirá reducir el tiempo de adquisición de la posición, a la vez que nos permitirá una mayor tolerancia al ruido al trabajar con códigos o secuencias pseudoaleatorias en la codificación de la señal ultrasónica. Esta técnica nos permitirá una detección incluso por debajo de valores que supuestamente se consideraran como ruido, incluido algún tipo de ruido impulsivo cuyos límites de tiempo no sean excesivamente elevados.

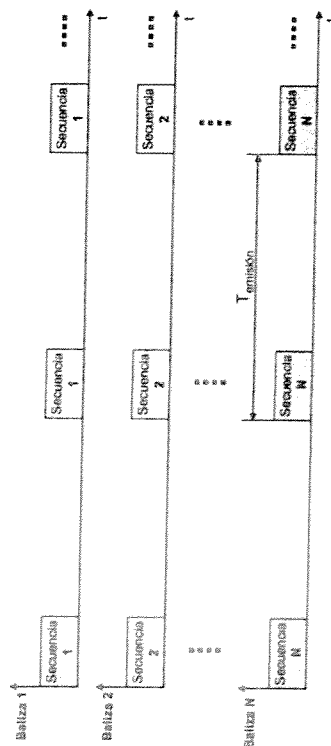


Fig. 1. Emisión periódica de las balizas

Para poder detectar la emisión de cada baliza, se le asignará un código o secuencia que presente unas buenas propiedades de autocorrelación y correlación cruzada, a efectos de garantizar una buena detección, siendo las secuencias *Kasami* las que mejores propiedades presentan. Con una longitud de 255 bits, disponemos de 16 códigos o secuencias con unas propiedades óptimas de autocorrelación y correlación cruzada. El símbolo formado por un ciclo de portadora de 50kHz ($T_c=20\mu s$) se modula en BPSK mediante un código *Kasami* de 255 bits, dando así lugar a una secuencia de 5,1ms de duración que se repite de forma periódica cada 40ms. Todas las balizas emitirán por tanto de forma periódica y sincronizada tal como muestra la figura 1, a partir de un reloj común de 500kHz, evitando que exista algún tipo de sincronismo entre el móvil u objeto a posicionar y el sistema de balizamiento.

3.1 Detección de la señal y determinación de las DTOAs

La unidad receptora que irá a bordo del móvil u objeto a posicionar es totalmente asíncrona con el sistema de balizamiento. Esta unidad está basada en un sistema de adquisición formado por el sensor ultrasónico receptor, un ADC de 8 bits, una memoria FIFO de 32 Kbytes y una CPU que controla el sistema de adquisición y se encarga de detectar el instante de llegada de la señal ultrasónica de cada baliza, determinar las diferencias de tiempos de vuelo (DTOAs) y aplicar el algoritmo de posicionamiento para obtener una estimación de la posición.

El primer proceso llevado a cabo para detectar el instante de llegada de los códigos asignados a cada baliza se basa en capturar una señal durante un tiempo suficiente que garantice la llegada de todos los códigos. Para ello, será necesario que la ventana de captura sea un poco mayor que el periodo de repetición de las distintas secuencias. Con una frecuencia de muestreo de 500kHz y una FIFO de 32Kbytes, resulta una ventana de 65,536 ms, que en el mejor de los casos permitirá recibir un periodo completo con dos secuencias consecutivas.

A continuación se realiza la detección de las distintas secuencias para lo cual se lleva a cabo un proceso de correlación, también denominado *matched-filter*, entre la señal adquirida y cada una de las secuencias que tendremos previamente memorizadas. Esto permite detectar unos valores máximos en los instantes de llegada de cada una de las secuencias de cada baliza. Un algoritmo de detección de máximos a partir de un umbral dinámico y con una pequeña ventana de análisis, garantiza una óptima detección del instante de llegada de cada secuencia. El máximo más cercano al origen de tiempos de la ventana de captura corresponderá a la baliza más cercana, y podrá ser tomada como referencia. Una vez determinados los instantes de tiempo (en muestras) dentro de la ventana de captura será suficiente con multiplicar por el periodo de muestreo ($T_s=2\mu s$) para determinar las DTOAs.

3.2 Determinación de la posición absoluta

Considerando un conjunto de N balizas ($N \geq 5$), se puede plantear el sistema de ecuaciones que permita obtener la posición absoluta en 3D (x, y, z), a partir de las posiciones conocidas donde se ubiquen las balizas (x_i, y_i, z_i) y de las diferencias de tiempos de vuelo entre una baliza de referencia (por ejemplo, la baliza 1) y el resto, así:

$$\begin{aligned} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 &= d_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 &= (d_1 + c \cdot \Delta T_{12})^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 &= (d_1 + c \cdot \Delta T_{13})^2 \\ &\vdots \\ (x-x_N)^2 + (y-y_N)^2 + (z-z_N)^2 &= (d_1 + c \cdot \Delta T_{1N})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde d_1 es la distancia a la baliza 1 (baliza de referencia), que queda como incógnita, y $\Delta T_{12}, \Delta T_{13}, \dots, \Delta T_{1N}$ son las diferencias de tiempos de vuelo medidas,

entre la baliza de referencia y el resto. Se supone conocida la velocidad de propagación de los ultrasonidos ($c = 342$ m/s).

Desarrollando los cuadrados, restando la primera ecuación al resto de ellas y reagrupando términos, se llega a un sistema lineal de ecuaciones que se puede resolver de forma sencilla, por el método de mínimos cuadrados lineales, si se expresa partir de la ecuación:

$$Ax = b \quad (2)$$

Donde,

$$A = \begin{bmatrix} 2x_1 - 2x_2 & 2y_1 - 2y_2 & 2z_1 - 2z_2 & -2c\Delta T_{12} \\ 2x_1 - 2x_3 & 2y_1 - 2y_3 & 2z_1 - 2z_3 & -2c\Delta T_{13} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2x_1 - 2x_N & 2y_1 - 2y_N & 2z_1 - 2z_N & -2c\Delta T_{1N} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$b = \begin{bmatrix} c^2 \Delta T_{12} + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ c^2 \Delta T_{13} + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \\ \dots \\ c^2 \Delta T_{1N} + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_N^2 - y_N^2 - z_N^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Siendo su solución:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (5)$$

4 Resultados

Para mostrar los resultados reales del sistema de posicionamiento propuesto, el sistema de adquisición de la unidad receptora se ha conectado vía serie a través de un puerto USB con un ordenador personal. Los algoritmos de procesamiento de señal así como los de posicionamiento han sido desarrollados en *Matlab* a partir de la señal adquirida.

La señal mostrada en la figura 2a corresponde a una captura real adquirida en un determinado instante, correspondiente a la emisión simultánea de 5 balizas. Se observa claramente un período de repetición de las secuencias. Dado el entorno próximo en el que se situaron las balizas, resulta que las secuencias están prácticamente superpuestas, pues las DTOAs tienen valores pequeños.

La figura 2b muestra como ejemplo la correlación entre la señal capturada y la secuencia asignada a la baliza 1. Se puede observar el máximo de la función de correlación correspondiente al instante de llegada del código. Después de correlar la señal recibida con el resto de secuencias, se obtuvieron las cuatro medidas correspondientes a las DTOAs entre la baliza 1 (tomada como referencia) y el resto de ellas.

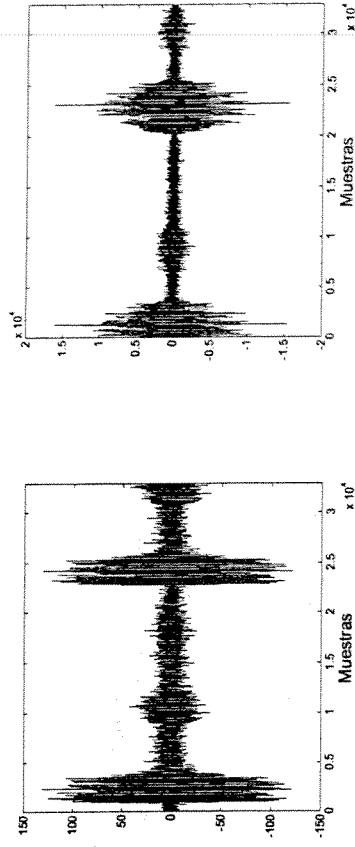


Fig. 2. a) Señal real recibida correspondiente a la emisión simultánea de 5 balizas, y capturada en la memoria interna (32Kbytes, $F_s=500$ kHz). b) Correlación de la señal real recibida en una posición con la secuencia asignada a la baliza 1.

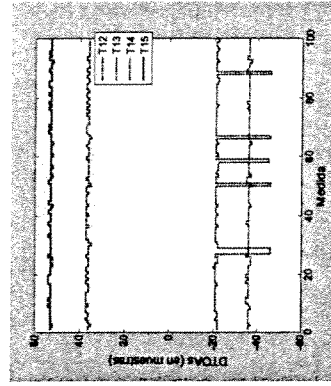


Fig. 3. a) Desviación en las diferencias de tiempos de vuelo (DTOAs) tras repetir 100 veces el proceso de medida en una posición fija (aprox. $x=0.65$ m, $y=0.63$ m, $z=0$). b) Desviación de la posición (x,y) tras repetir 100 veces el proceso de medida en una posición fija (aprox. $x=0.65$ m, $y=0.63$ m, $z=0$)

Tras repetir el proceso de adquisición tomando 100 medidas en un punto fijo sobre el suelo (aprox. $x=0.65$ m, $y=0.63$ m) se ha podido observar que prácticamente no existe desviación en los resultados. Apenas una diferencia de más o menos una muestra (2 microsegundos) en las DTOAs, excepto en el caso de T_{13} (posiblemente debido a

efectos multicamino). No obstante, la estimación de la posición en 2D, apenas sufre variaciones del orden de milímetros. Estos resultados se reflejan en la figura 3.

5 Conclusiones

Se ha presentado un sistema de posicionamiento basado en ultrasonidos que utiliza la emisión simultánea de todas las balizas que forman el sistema de balizamiento. Para resolver el problema de la emisión simultánea se ha utilizado la técnica DS-CDMA empleada en comunicaciones, para modular en BPSK a una portadora de 50 kHz de frecuencia con una secuencia *Kasami* de 255 bits, que identifica a cada baliza. Todas las balizas tienen un reloj común que hace que transmitan la señal ultrasónica modulada de forma periódica y de manera continua hacia el entorno de trabajo. De esta forma es posible detectar el instante de llegada de las secuencias, a partir de la correlación entre la señal capturada y almacenada en un instante con cada una de las secuencias conocidas. A partir de las diferencias de tiempos de vuelo (DTOAs) entre una baliza de referencia y el resto, es posible estimar la posición aplicando la técnica de trilateración hiperbólica. Este procedimiento evita la necesidad de que exista un sincronismo externo (por RF, IR, etc.) entre el móvil u objeto a posicionar y el sistema de balizamiento, acelerando el proceso de adquisición de la posición y mejorando la resolución y precisión en las medidas al utilizar la técnica de modulación DS-CDMA.

6 Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al Ministerio de Educación y Ciencia (proyecto PARMET, ref. DPI2003-08715-C02-01) y a la Comunidad de Madrid (proyecto ANESUS, ref. CAM-UAH2005/016).

Referencias

1. Weiser, Mark. "The Computer for the Twenty-First Century," Scientific American, September 1991, 94-10
2. Aarts, E.; Marzano, S. editors. "The New Everyday: Views on Ambient Intelligence". 010 Publishers, Rotterdam, The Netherlands, 2003
3. Dey, A.K. "Understanding and Using Context". Personal and Ubiquitous Computing Journal, 5(1). 2001, 4-7
4. Hightower, J. and Borriello, G. "Location Systems for Ubiquitous Computing". IEEE Computer, 34(8), 2001, 57-66
5. Seiji Aoyagi, Masaharu Takano, Hajime Noto. "Development of Indoor Mobile Robot Navigation System Using Ultrasonic Sensors". Proc. ICV'98, 1998, 345-349
6. Ward, A.; Jones, A.; Hopper A.; "A new location technique for the active office". IEEE Personal Communications, 4(5), October 1997, 42-47

7. Priyantha, Chakraborty, Balakrishnan. "The Cricket location support system". In Proceedings of the Sixth International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom), Boston, Massachusetts, USA, August 2000
8. Klaus-Werner Jörg, Markus Berg. "Using Pseudo-random Codes for Mobile Robot Sonar Sensing". IAV'98, Madrid, Spain; March 25-27, 1998, 231-236
9. A. Hernández, J. Ureña, J. J. García, V. Díaz, M. Mazo, D. Hernanz, J. P. Derutin, J. Serot. Ultrasonic signal processing using configurable computing. 15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC'02), Barcelona, 2002
- 10 M. Hazas and A. Ward. "A novel broadband ultrasonic location system". In Proceedings of UbiComp 2002: Ubiquitous Computing, Goteborg, Sweden, Sept. 2002, 264-280

**II Congreso Iberoamericano
sobre Computación Ubicua**

cicu 06

**7, 8 y 9 de Junio de 2006
Alcalá de Henares (España)**

La Computación Ubicua es un campo de las Ciencias de la Computación que actualmente se encuentra el pleno proceso de maduración, como lo demuestra el hecho de que cada vez resultan más familiares entre la comunidad científica términos, de difícil traducción, como "Mobile Computing", "Wearable Computing", "Pervasive Computing", "Context-Aware Computing" o "Tangible Computing". El rápido desarrollo tecnológico en este campo está permitiendo hacer realidad la idea de conseguir disponer de capacidad de computación en cualquier momento y en cualquier lugar, e incluso de forma invisible para el usuario, llegando a lo que los expertos anuncian como una forma de vida en la que todo estará siempre interconectado.

Algunos de los últimos trabajos de investigación relacionados con la Computación Ubicua y realizados en el ámbito iberoamericano son los incluidos en este libro. Se trata de los artículos presentados en el II Congreso Iberoamericano sobre Computación Ubicua (CICU'06), organizado por el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Alcalá, y celebrado en la ciudad de Alcalá de Henares, cuna de Miguel de Cervantes y Ciudad Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde 1998.

En este libro se incluyen 42 trabajos de 121 autores, provenientes de 29 organizaciones diferentes, entre ellas 21 universidades españolas y americanas. Todos los trabajos aceptados para su publicación han sido evaluados por miembros del Comité Científico de Congreso, según un procedimiento de revisión por pares. Este Comité está compuesto por expertos de España, Portugal y de otros países de América Latina.

Los editores de las actas del Congreso CICU'06 queremos felicitar a los autores de los trabajos por la calidad de los mismos, y agradecer a los miembros del Comité Científico su desinteresada colaboración en el proceso de revisión, por sus acertados comentarios y sugerencias sobre los trabajos recibidos.

Esperamos que este libro sea de utilidad para investigadores e interesados en el tema de la Computación Ubicua, especialmente para aquellos de habla hispana, dado el reducido número de libros que han sido editados en español sobre esta materia.

Los editores

El contenido de este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor.
Todos los derechos reservados.

© Universidad de Alcalá, 2006
Servicio de Publicaciones
Plaza de San Diego, s/n
28801 Alcalá de Henares
www.uah.es

ISBN: 84-8138-703-7

Depósito legal: M-24427-2006

Impresión y encuadernación: Imprenta UAH
Impreso en España