

Implementación Hardware de un Sistema de Localización en Interiores basado en Redes Sensoriales Inalámbricas

José Antonio Palazón⁽¹⁾, Javier Gozalvez⁽¹⁾, Gonzalo Prieto⁽²⁾

jpalazon@umh.es, j.gozalvez@umh.es, gprieto@indra.es

⁽¹⁾ Uwicore, Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory, www.uwicore.umh.es
Universidad Miguel Hernández de Elche. Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche, España.

⁽²⁾ INDRA Sistemas, S.A. C/Anabel Segura 7, 28108 Alcobendas, Madrid, España.

Abstract- Improving the worker's health and safety in the new Factory of the Future concept requires continuously monitoring the working environment and the worker's health and safety conditions, for which their accurate location and tracking can be crucial. However, the implementation and deployment of location systems in industrial environments represent significant challenges derived from the unavailability of the GPS system indoors, and the adverse propagation conditions. In this context, this paper presents the hardware implementation of an indoor location system based on wireless sensor networks that enables the workers' location indoors. The results obtained in different tests demonstrate the potential of this technology and the validity of the system implemented.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto FASyS (Fábrica Absolutamente Segura y saludable) [1] tiene por objetivo el desarrollo de un nuevo modelo de fábrica, capaz de minimizar los riesgos para la salud y la seguridad de los trabajadores, siguiendo el nuevo marco Europeo sobre la Fábrica del Futuro. Un aspecto crucial para poder garantizar dicha seguridad es el adecuado conocimiento en todo momento de la posición donde se encuentra el trabajador en riesgo o incluso la localización del riesgo detectado. Sin embargo, el diseño de sistemas de localización en interiores presenta desafíos significativos. Por un lado, la localización en interiores se ve dificultada por la no disponibilidad de sistemas de posicionamiento como GPS y su baja precisión. Por otro lado, las difíciles condiciones de propagación radio en interior (obstáculos, reflexiones, etc.) dificultan el establecimiento de enlaces inalámbricos robustos. Además, el sistema debe ser capaz de realizar el seguimiento de trabajadores así como de vehículos industriales que operen en movilidad en el interior de la fábrica.

Las soluciones empleadas para la implementación de los sistemas de localización en interiores son muy diversas y atienden a múltiples clasificaciones en función de las tecnologías y métodos de estimación empleados. En [2], realizan una clasificación de sistemas de localización en base a la tecnología utilizada, como por ejemplo, infrarrojos, ultrasonidos o radiofrecuencia. Para esta última, existen soluciones basadas en RFID, Bluetooth o UWB. En este contexto, el despliegue de redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Networks*) no solo provee un medio flexible para la monitorización en tiempo real de los sensores desplegados sino que también de una solución para la localización en interior de nodos móviles como trabajadores,

reutilizando el hardware de los nodos de la WSN para comunicar y localizar. En efecto, las soluciones de localización que explotan las capacidades de comunicación inalámbrica de redes ya desplegadas presentan un gran interés en la actualidad por no requerir el despliegue de nodos específicos adicionales. Por este motivo y dado su reducido coste y consumo energético, las WSN basadas en el estándar IEEE 802.15.4 se presentan como buenas candidatas para la implementación de sistemas de localización en interiores.

Los sistemas de localización basados en radiofrecuencia calculan la posición de los nodos objetivo en base a su distancia a una serie de nodos estáticos desplegados, utilizados como nodos estáticos de referencia. La distancia entre un nodo objetivo y cada uno de los nodos de referencia puede calcularse gracias a la transmisión periódica de paquetes de señalización en modo *broadcast*. En particular, dicha distancia se estima a partir del nivel de señal (*RSS*, *Received Signal Strength*) con el que se reciben dichos paquetes. Basándose en la estimación de la distancia mediante el indicador de *RSS* (*RSSI*) entre dos nodos, los sistemas descritos en [3][4], utilizan un método simple no paramétrico conocido como *fingerprinting*. Este método realiza en primer lugar una calibración generando una base de datos con los *RSSI* y las distancias a cada nodo de referencia para cada posición del despliegue. La estimación de la posición de los nodos objetivos se realiza posteriormente comparando los *RSSI* recogidos por este nodo y los valores almacenados en la base de datos durante la calibración. Este método es poco robusto frente a cambios del entorno, con costes de despliegue bastante elevados.

Por otro lado, existen métodos de localización paramétricos como los propuestos en [5] y [6], que asumen explícitamente el conocimiento del modelo de propagación que relaciona el *RSSI* con la distancia entre dos nodos. Del mismo modo que para *fingerprinting*, estos métodos también necesitan una fase de calibración durante su despliegue. Todo lo contrario ocurre en [7], donde se obtiene la distancia entre el nodo objetivo y cada nodo de referencia en base a los niveles de *RSSI* medidos de forma dinámica entre el nodo objetivo y todos los nodos de referencia desplegados y un modelo que relaciona dichos niveles de *RSSI* y la distancia. En este caso, el modelado del *RSSI* con la distancia se parametriza a partir de las medidas de niveles de *RSSI* obtenidas en los paquetes que intercambian los nodos de referencia, dado que la distancia entre ellos es fija y conocida, reduciendo de esta manera los costes de puesta en

marcha del sistema con respecto al método de *fingerprinting*. Además, la realización periódica de esta parametrización aumenta la robustez del sistema de localización frente a cambios del entorno de propagación.

En este contexto, este trabajo describe la implementación hardware de un sistema de localización en interiores basado en WSN. El sistema obtiene la posición del nodo objetivo a partir de su distancia a cada nodo de referencia desplegado mediante multilateración. La distancia a cada nodo de referencia se calcula utilizando el RSSI de los paquetes transmitidos por el nodo objetivo y la parametrización dinámica del entorno adoptada de [7].

II. ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN

El algoritmo de localización implementado está formado por tres fases diferentes. En la primera fase, se realiza una parametrización dinámica del entorno que tiene como objetivo parametrizar la relación entre los niveles de RSSI y las distancias. Esta parametrización se emplea en la segunda fase para estimar la distancia entre cada nodo de referencia y cada nodo objetivo. Finalmente, en la tercera y última fase, se calcula la posición de cada nodo objetivo utilizando el método de multilateración y las distancias a cada nodo de referencia estimadas en la segunda fase.

A. Parametrización dinámica del entorno

Para que la estimación de la distancia entre cada nodo de referencia y cada nodo objetivo tenga en cuenta posibles variaciones en el escenario, se requiere realizar una parametrización dinámica del entorno. Esta parametrización permite obtener una relación entre los niveles de señal recibida y la distancia de transmisión de forma dinámica, y se realiza únicamente a partir del intercambio de mensajes entre los nodos de referencia, puesto que sus posiciones y la distancia entre ellos son conocidas.

La parametrización dinámica implementada se basa en el trabajo presentado en [7]. Esta implementación considera la matriz D como la matriz de distancias entre los nodos de referencia, en la que el elemento d_{ij} representa la distancia euclídea entre los nodos de referencia i y j . Si N es el número de nodos de referencia, la matriz D tiene $N \times N$ elementos, y $1 \leq i \leq N$, $1 \leq j \leq N$. De forma similar, se define la matriz S de $N \times N$ elementos como la matriz de niveles de señal recibidos, donde cada elemento de dicha matriz, $RSSI_{ij}$ representa el nivel de señal con el que el nodo de referencia i recibe los paquetes transmitidos por el nodo de referencia j . Mientras la matriz D es constante, la matriz S se actualiza periódicamente a partir de los niveles de señal con el que cada nodo de referencia recibe paquetes del resto de nodos de referencia.

La parametrización dinámica busca establecer una relación entre las matrices D y S empleando la siguiente ecuación matricial [7]:

$$\log(D) = TS \quad (1)$$

En esta ecuación, T es la matriz $N \times N$ que define dicha relación y se calcula mediante mínimos cuadrados a partir de la siguiente expresión matricial [7]:

$$T = \log(D)S^T(SS^T)^{-1} \quad (2)$$

El cálculo de la matriz T a partir de la ecuación (2) es el resultado de la parametrización dinámica del entorno.

B. Estimación de distancias

Una vez determinada la parametrización a partir del cálculo de T , la estimación de la distancia entre un nodo objetivo y cada uno de los nodos de referencia se realiza a partir de las medidas de RSSI tomadas por estos últimos de los paquetes transmitidos por el nodo objetivo. Así, es posible construir un vector \hat{s} con los valores de RSSI que los nodos de referencia reciben de un nodo objetivo. A partir del vector \hat{s} y la matriz T calculada con la ecuación (2), puede calcularse el vector \hat{h} que contiene las distancias entre el nodo objetivo y cada nodo de referencia mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\hat{h} = \exp(T\hat{s}) \quad (3)$$

C. Multilateración

El método de multilateración implementado estima la posición \hat{p} de un nodo objetivo, a partir de su distancia a los nodos de referencia, \hat{h} , y la posición de dichos nodos de referencia $p_i = (x_i, y_i)$, con $1 \leq i \leq N$. En particular, la posición del nodo objetivo se calcula como la intersección de los círculos que se forman tomando como centro la posición de los nodos de referencia y como radios las distancias estimadas en \hat{h} , resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones para $1 \leq i \leq N$:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = \hat{h}_i^2 \quad (4)$$

La precisión en la estimación de la distancia se ve afectada por el ruido y los efectos de propagación radio (*pathloss, shadowing, multipath, etc.*), por lo que los círculos pueden no intersectar en un único punto. Con el fin de obtener una solución al sistema de ecuaciones de la ecuación (4) se aplica el método de mínimos cuadrados que minimiza la función:

$$\hat{p} = \arg \min \sum_{i=1}^N (\hat{h}_i - \|p - p_i\|)^2 \quad (5)$$

La solución a la ecuación (5) puede expresarse de la forma [8]:

$$\hat{p} = \frac{1}{2}(H^T H)^{-1} H^T b \quad (6)$$

donde

$$H = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \dots & \dots \\ x_N - x_1 & y_N - y_1 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} K_2^2 - K_1^2 - \hat{h}_2^2 + \hat{h}_1^2 \\ K_3^2 - K_1^2 - \hat{h}_3^2 + \hat{h}_1^2 \\ \dots \\ K_N^2 - K_1^2 - \hat{h}_N^2 + \hat{h}_1^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

siendo $K_i = x_i^2 + y_i^2$. Para una estimación de la posición en dos dimensiones como la propuesta, el algoritmo de multilateración necesita conocer la distancia entre el nodo objetivo y al menos tres nodos de referencia.

III. ARQUITECTURA E IMPLEMENTACIÓN

La arquitectura del sistema de localización implementado se muestra en la Fig. 1. Se trata de un sistema centralizado con una arquitectura de red en estrella formada por nodos objetivo, nodos de referencia y el nodo coordinador de la WSN, que a su vez lo es del sistema de localización. Es en este último donde se implementa el algoritmo de localización. Siguiendo el diagrama de la figura, los nodos desplegados

intercambian tres tipos de paquetes: (1) señalización, (2) parametrización, y (3) localización. Los paquetes de señalización son transmitidos periódicamente por los nodos objetivos y los nodos de referencia para la medida de niveles de *RSSI*. Los paquetes de parametrización se envían desde los nodos de referencia hacia el nodo coordinador, y contienen los niveles de *RSSI* medidos entre los nodos de referencia. Finalmente, los paquetes de localización también se envían por los nodos de referencia hacia el coordinador, pero contienen los niveles de *RSSI* medidos sobre los paquetes transmitidos por los nodos objetivo. Una vez en el coordinador, los niveles de *RSSI* de los paquetes de parametrización, junto con las posiciones conocidas de los nodos de referencia, son utilizados para realizar la parametrización dinámica. Por otro lado, los *RSSI* que contienen los paquetes de localización son utilizados junto con la parametrización, para estimar las distancias entre el nodo objetivo y los nodos de referencia. Por último, se calcula la posición del nodo objetivo utilizando estas distancias y el algoritmo de multilateración presentado.

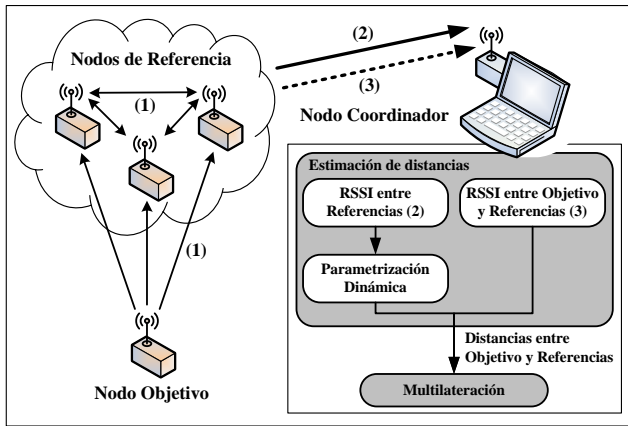


Fig. 1. Arquitectura del sistema de localización implementado

Para la implementación de los nodos de la WSN del sistema de localización se ha seleccionado como dispositivo el mote IRIS del fabricante MEMSIC. Estos dispositivos trabajan en la banda de frecuencia de 2.4GHz con una velocidad de transmisión de hasta 250kbps y con una potencia máxima de 3dBm. Además, se caracterizan por una sensibilidad de hasta -91dBm. Estos motes implementan las capas PHY y MAC definidas en el estándar IEEE 802.15.4, así como capas superiores compatibles con *ZigBee*. Tanto los nodos objetivo como los de referencia son dispositivos IRIS alimentados por baterías y configurados como nodos enrutadores *ZigBee*. Por último, el nodo coordinador está formado por un dispositivo IRIS, configurado como coordinador de la red, conectado a un PC. En esta ocasión, la aplicación embebida en el dispositivo reenvía hacia el PC, los paquetes recibidos vía radio a través de una conexión USB. En el PC, la información recibida es procesada para ser utilizada por el algoritmo de localización implementado con tecnología Java sobre el estándar para servidores de aplicaciones OSGI (*Open Service Gateway Initiative*).

IV. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Con el objetivo de mostrar el rendimiento del sistema de localización implementado, se presentan a continuación dos de los experimentos realizados considerando un nodo objetivo estático y dos densidades de nodos de referencia diferentes

(las diferentes densidades se obtuvieron variando la superficie de despliegue de nodos de referencia). En cada experimento se distribuyeron 9 nodos de referencia de forma uniforme, en una superficie interior diáfana de 100m² y 200m², respectivamente. La Fig. 2 muestra este escenario para la superficie de 100m². Con los nodos de referencia desplegados, se estimó la posición del nodo objetivo durante 60 segundos en un total de 16 puntos de prueba en una rejilla centrada en el área de despliegue (ver *Puntos de Prueba* en Fig. 2). En la Fig. 2, se muestra, a modo de ejemplo, el resultado de una estimación de localización obtenido para un nodo objetivo. Además, se muestran en forma de circunferencias las distancias estimadas a los tres nodos de referencia más cercanos al nodo objetivo. Mientras las distancias estimadas a los nodos de referencia 2 y 4 (\hat{h}_2 y \hat{h}_4), se aproximan considerablemente a la posición real del nodo objetivo, el error en la estimación de \hat{h}_1 es significativo, afectando en gran medida al resultado final de localización.

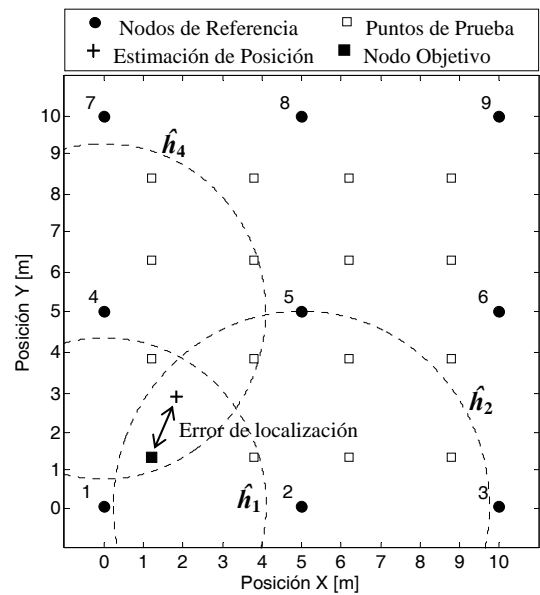


Fig. 2. Despliegue de nodos de referencia y puntos de prueba para una superficie de 100m² mostrando las distancias y posición estimadas para un nodo objetivo.

Para el escenario mostrado en la Fig. 2, la Fig. 3a muestra los niveles de *RSSI* de los paquetes que transmite el nodo objetivo ubicado en $x=1.2m$ y $y=1.2m$ y son recibidos por los nodos de referencia 1, 2 y 4. A partir de dichos niveles y la parametrización del entorno obtenida, la Fig. 3b muestra el error que se obtiene entre la estimación de las distancias entre el nodo objetivo y los nodos de referencia 1, 2 y 4, y la distancia real entre ellos. Como puede observarse, la variabilidad del nivel de *RSSI* medido por los diferentes nodos de referencia se traduce en una variación en la distancia estimada a cada uno de ellos, a pesar de que el nodo objetivo se encuentre estático. Esas variaciones en la estimación de las distancias se traducen en errores en la estimación de la localización, como puede observarse en la Fig. 4. En la Fig. 4 se muestra la posición real del nodo objetivo y las distintas estimaciones de localización realizadas para la superficie de 100m². La distancia euclídea entre cada una de las estimaciones y la posición real del nodo objetivo representa el error de localización. El círculo marcado en la figura representa la precisión del sistema de localización para el punto testeado, puesto que contiene el 90% de las muestras y tiene un radio inferior a los 2m. Estas variaciones del nivel

de RSSI, así como otro tipo de limitaciones introducidas por el hardware en los propios procesos de fabricación (por ejemplo diferentes niveles de sensibilidad en distintos nodos, etc.), reducen la precisión del sistema.

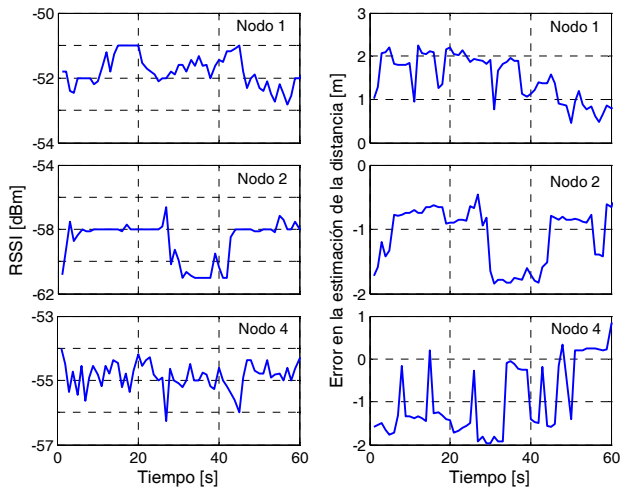


Fig. 3. Niveles de RSSI (a) y el error en la estimación de la distancia (b) entre los nodos de referencia 1, 2 y 4 y el nodo objetivo ubicado en la posición $x=1.2m$ e $y=1.2m$ del escenario ilustrado en la Fig. 2.

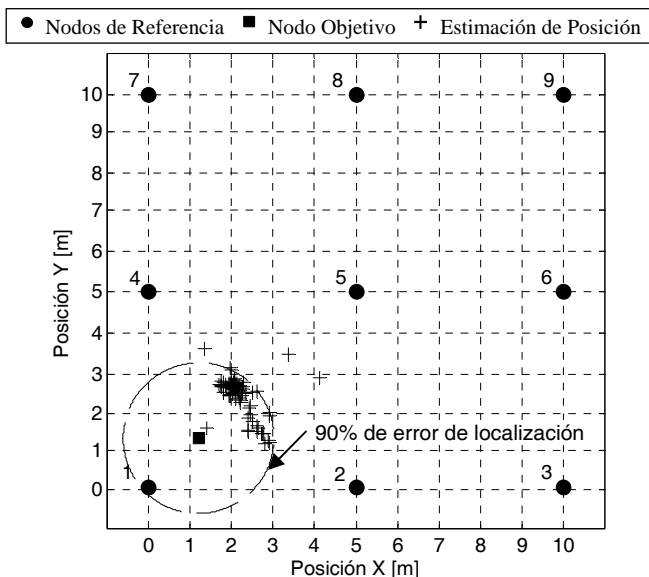


Fig. 4. Estimaciones de posición cuando el nodo objetivo se ubica en la posición $x=1.2m$ e $y=1.2m$ del escenario ilustrado en la Fig. 2.

Finalmente, la función de distribución (CDF) de la Fig. 5, muestra la distribución del error de localización obtenido en los dos experimentos realizados y teniendo en cuenta todos los puntos de prueba. Los errores de localización obtenidos para el escenario de $100m^2$ fueron inferiores a $4.5m$ en el 90% de los casos. Para el escenario de $200m^2$, el error de localización obtenido al 90% fue inferior a $7m$. Dada la menor densidad de nodos referencia, este segundo escenario presenta mayores errores en la estimación de la localización del nodo objetivo. Estos niveles de error concuerdan con los niveles obtenidos en [7] y [9] para despliegues similares. Por otro lado, es de destacar también que los errores de localización se distribuyen de forma uniforme en los escenarios analizados, de forma que se obtiene aproximadamente el mismo error de localización en los diferentes puntos de prueba analizados.

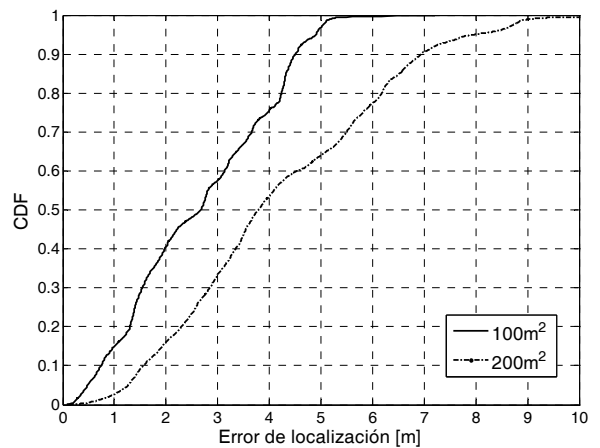


Fig. 5. CDF del error de localización de los dos experimentos realizados para escenarios de $100m^2$ y $200m^2$.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta la implementación hardware de un sistema de localización en interiores basado en WSN. Esta implementación posibilita un despliegue rápido en interiores y de bajo coste, gracias al método de parametrización dinámica adoptado. Los resultados obtenidos muestran que los niveles de precisión alcanzados son similares a los disponibles en la literatura. Asimismo, los resultados muestran los beneficios de incrementar la densidad de nodos de referencia desplegados para la reducción del error de localización. Entre los futuros objetivos se encuentra el homogenizar la sensibilidad de los dispositivos mediante la incorporación de antenas con espectros de radiación más uniformes y mecanismos de calibración hardware que eviten las posibles derivas entre los dispositivos del sistema en la toma de valores de RSSI. En posteriores evoluciones del sistema se incorporarán filtros iterativos que ayuden a mejorar la precisión del sistema en el seguimiento de nodos objetivo móviles a lo largo del tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto CENIT FASyS (CEN-20091034).

REFERENCIAS

- [1] Web oficial del proyecto FASyS: <http://www.fasys.es/en>.
- [2] Y. Gu, et. al, "A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks", *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 11, no 1, 2009.
- [3] S.-Y. Lau, et. al, "A measurement study of zigbee-based indoor localization systems under RF interference", *Proc. of 4th ACM international workshop on Experimental evaluation and characterization*, 2009, pp. 35–42.
- [4] M. D'Souza, et. al, "Wireless localisation network for patient tracking", *Proc. of ISSNIP*, 2008, pp. 79–84.
- [5] X. Li, et. al, "Collaborative localization with received-signal strength in wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 6, 2007, pp. 3807–3817.
- [6] R. Bader, et. al, "BigNurse: A Wireless Ad Hoc Network for Patient Monitoring", *Proc. IEEE in Pervasive Health*, 2006, pp. 1-4
- [7] H. Lim, et. al, "Zero-Configuration, Robust Indoor Localization: Theory & Experimentation", *Proc. IEEE INFOCOMM*, 2006, pp.1-12
- [8] G. Shen, et. al, "Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithm in LOS environment", *Proc. of WPNC*, 2008, pp. 71-78.
- [9] A. Redondi, et. al, "LAURA–LocAlization and Ubiquitous monitoring of pAtients for health care support", *Proc. IEEE PIMRC*, 2010, pp. 218-222.