

Módulo de posicionamiento y localización para un sistema integral de guiado y localización de objetivos en interiores para discapacitados visuales, basado en dispositivos móviles y software libre

Abstract- La persona y el espacio se relacionan e interactúan permanentemente. En esta relación persona-espacio, la capacidad de desplazamiento se puede reducir por insuficiencia de la persona para acceder y comunicarse, o por impedimentos del espacio para posibilitar el acceso a la comunicación. La accesibilidad para personas con limitaciones sensoriales como es la visión, además de la necesidad de que los elementos arquitectónicos estén libres de obstáculos, es necesario determinar el posicionamiento que tiene la persona o los elementos arquitectónicos para poder desplazarse. El posicionamiento presenta dos posibilidades: exteriores e interiores. El posicionamiento exterior ha sido resuelto de manera satisfactoria mediante los sistemas de posicionamiento global, también conocidos como GPS. Sin embargo, el posicionamiento interior presenta una problemática más compleja debido a la pérdida de precisión que provocan las barreras que encuentra la transmisión de señales. Para resolver este problema se han aplicado diferentes soluciones basadas tecnologías como infrarrojos, bluetooth, señales de banda ancha, entre otros, pero estas técnicas han presentado problemas de sensibilidad a las interferencias debido a las barreras físicas, el consumo energético del nodo móvil que es el encargado de recibir la señal de los nodos de referencia, y el problema del camino múltiple que no permite distinguir la posición de referencia debido a las distintas posibilidades de incidencias de la señal. En este trabajo, se propone un sistema de posicionamiento interior basado en redes wifi 802.11, que permite una precisión suficiente, consumo energético mínimo y robusto a las interferencias.

Palabras clave: wifi, posicionamiento, RSSI, calibración.

1. Introducción

La persona y el espacio se relacionan e interactúan permanentemente. En esta relación persona-espacio, la capacidad de desplazamiento se puede reducir por insuficiencia de la persona para acceder y comunicarse, o por impedimentos del espacio para posibilitar el acceso a la comunicación debido a las barreras físicas en la accesibilidad.

En general, una barrera de accesibilidad es un obstáculo que impide o dificulta la realización de una determinada tarea o actividad, afectando de esta manera a la plena integración social de esa persona.

La sociedad se ha dado cuenta de que además de tratarse de una cuestión ética, el crear medios accesibles es beneficioso desde un punto de vista económico ya que aumenta el número de clientes capaces de obtener el producto, así como el número de posibles trabajadores.

Acciones como ir de compras a un supermercado, buscar un objeto en un almacén, o en cualquier entorno desconocido para el usuario pero controlado, no deberían significar un inconveniente. Para las personas con discapacidades visuales es necesario disponer de un sistema que sea capaz de guiarlos, darles indicaciones, y, en la medida de lo posible, ayudarles a encontrar lo que necesitan de forma independiente. Con este proyecto se pretende ayudar a las personas con discapacidad visual a desenvolverse en un entorno cerrado, desconocido, y con obstáculos.

El problema del posicionamiento y localización en interiores está siendo caso de estudio en los últimos años, pudiendo encontrarse gran cantidad de investigaciones y artículos que proponen la aplicación de diversas tecnologías y técnicas de posicionamiento y algorítmicas. En el desarrollo de un sistema integral que pretende guiar a personas con discapacidad para que puedan alcanzar una serie de hitos en un mapa, posicionar de manera óptima al sujeto es fundamental.

Muchos de los estudios y sistemas propuestos se basan en tecnologías propietarias, necesitan la instalación de redes de sensores complejas, se sirven para estimar la localización de los nodos móviles de redes de sensores específicos para este fin, o bien se destinan a la localización de un solo agente móvil. Todo esto hace poco eficientes a estos sistemas ya que no permite estar al alcance de todos, son intrusivos, y presentan problemas para dar servicio a más de un usuario en tiempo real.

En un sistema de posicionamiento es necesario estudiar varias partes diferenciadas: la topología de la red de nodos de referencia y los nodos mismos, el nodo móvil, la forma de comunicarse entre ellos, la forma de procesar la señal, y el mantenimiento del sistema. Todas estas partes están fuertemente relacionadas, y las decisiones tomadas a la hora de diseñar cada una de ellas influirán en las opciones aplicables en las demás.

En este trabajo se propone la creación de una red wifi que, mediante el estudio de la fuerza de la señal, y con la aplicación de una función difusa a un algoritmo de k nodos más cercanos con peso, sitúe con precisión suficiente al nodo móvil en un entorno interior.

Para ello el trabajo ha sido organizado como sigue: En la segunda sección se presentan los preliminares; en la tercera sección se realiza un análisis de las

tecnologías y técnicas usadas en los sistemas de posicionamiento; En la cuarta sección se propone un sistema de posicionamiento alternativo para interiores basado en tecnología wifi; y finaliza el trabajo con las conclusiones, trabajo futuro y bibliografía.

2. Preliminares

2.1. Interpretación de las señales Wifi

Son muchas las técnicas empleadas para procesar las señales enviadas o recibidas por los nodos de referencia. Es posible utilizar técnicas que utilizan el retardo de la señal (*Time of Arrival, Time Difference of Arrival, Roundtrip Time of Flight*), técnicas que se basan en la forma en que llega la señal (*Angle of Arrival, Triangulación*), y técnicas que se basan en la atenuación de la señal (*Received Signal Strength based*).

Las técnicas que se basan en el retardo de la señal para el cálculo de la posición del nodo móvil, necesitan una sincronización perfecta del tiempo de transmisión de la señal [6]. Los entornos interiores presentan el problema de la reflexión de la señal, y dificultan en gran medida el uso de estas técnicas.

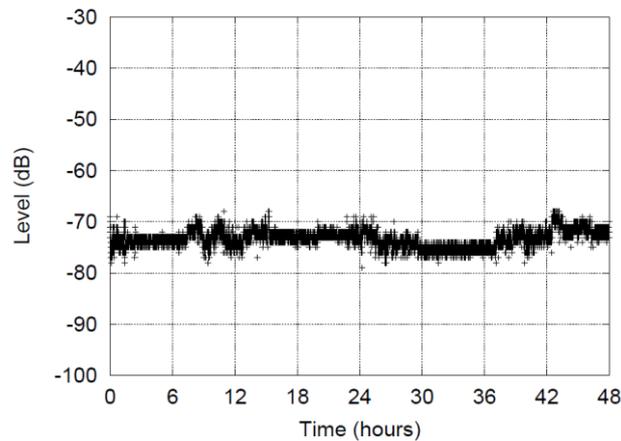
2.2. Problema del camino múltiple

El problema ampliamente conocido como del camino múltiple o multipath [4] [6] [8] [11] [12] [13] [14] [19] [20], establece que la señal puede llegar al nodo móvil desde varios lugares y con distintos ángulos, lo que dificulta establecer la posición exacta del nodo emisor de la señal. Es objeto de distinto tratamiento en prácticamente todos los estudios con independencia de la técnica que se aplique,

Este problema impide que un sistema de posicionamiento en un entorno interior pueda basarse en las técnicas que estudian la forma en que llega esta señal, por el problema de los rebotes que se producirán en el entorno.

2.3. Fluctuación de la señal

Otro de los grandes problemas en un sistema de posicionamiento es la fluctuación de la potencia de la señal [6]. Incluso en una localización fija, la fuerza de la señal en un punto puede presentar grandes variaciones. Howard, Siddiqi y Sukthane [19] han demostrado que esta variación se mantiene en un rango de 10 dB:



Este problema, que incide directamente en la pérdida de precisión en la estima de la localización, trata de minimizarse mediante la aplicación de los algoritmos escogidos para el proceso de las señales.

2.4. Algoritmos de localización

Para posicionar el nodo móvil en un punto de una red, se pueden utilizar muchos algoritmos y variaciones de estos. Entre los algoritmos más utilizados [5] [10] se pueden destacar:

- En base al nodo más próximo. Considera las coordenadas del nodo de referencia más próximo como la coordenada actual del nodo móvil.
- K nodos más próximos. Se usa la media de las coordenadas de los k nodos de referencia más cercanos.
- K nodos más próximos con peso. Se posiciona mediante la media ponderada de los k nodos de referencia más cercanos. Dentro de este sistema, se pueden estimar pesos de forma lineal, mediante lógica difusa [10] [20], o incluso por redes neuronales, como el perceptrón multicapa [8].

3. Análisis de las técnicas

Para construir el sistema, se ha descartado el uso de infrarrojos, porque por las características de emisión de la señal [1] las interferencias harían imposible el funcionamiento del sistema.

También se descarta el posicionamiento por GPS, ya que debido a lo débil de la señal [1] [3] en interiores, no es posible garantizar una precisión suficiente en el posicionamiento del nodo móvil, y en el mejor de los casos se obtiene una precisión de entre 5 y 10 metros [3].

Otra propuesta de varios autores es utilizar Bluetooth (IEEE 802.15.1), que es un estándar muy extendido, con un muy fácil acceso en el mercado tanto a la hora de seleccionar tanto los nodos de referencia como los posibles nodos móviles. Pero presenta el gran inconveniente del alto consumo de energía en los nodos móviles, lo que lo hace de entrada inviable para este sistema, donde no se prevé un límite de tiempo de conexión al sistema.

El posicionamiento usando señales de radio de frecuencia ultra ancha fue en un principio seleccionado como un posible candidato. La posibilidad de transmitir la señal sobre múltiples frecuencias [8] [12], de 3.1GHz a 10.6GHz, permite que el posicionamiento de la señal, realizado mediante la técnica de TOA (*Time of Arrival*) [1], se lleve a cabo mediante pulsos ultracortos (menores de 1ns).

Estos pulsos ultracortos permiten una buena depuración del ruido para tomar una medida bastante exacta del TOA [8], con lo que se podría obtener una buena precisión en la estimación de la localización en tiempo real, en entornos de dos y tres dimensiones, incluso en el rango de centímetros [12].

Como punto positivo cabe también mencionar que es una tecnología barata, de fácil acceso en el mercado, y con estándares abiertos.

Sin embargo las señales de banda ultra ancha son especialmente sensibles a las interferencias producidas por el entorno. Xu, Ma y Law [12] distinguen entre los ruidos producidos por las variaciones características de la señal, y las interferencias que impiden el paso de la misma. Aunque su frecuencia ultra ancha la hace capaz de atravesar paredes y otros obstáculos sin problemas [11][8], su especial sensibilidad a las desviaciones en la señal producidas por metales y líquidos [8], que previsiblemente estarán en gran cantidad en el entorno al que va dirigido al sistema, harían inviable una estimación precisa de la localización del nodo móvil.

Otra tecnología considerada en el proyecto es la localización mediante radiofrecuencia o RFID. Es también un estándar abierto, y muy extendido en el mercado. Las estimaciones de IDTechEx [7] prevén que en 2018 habrá en el mercado 540 millones de smartphones con esta tecnología.

Además las etiquetas RFID permiten el almacenamiento de la información en formatos XML [7], con lo que trabajar con esa información no es complicado, e incluso es posible almacenar mensajes audibles, en formato AMR (*Adaptive Multi Rate*).

Pero para este proyecto esta tecnología presenta dos problemas importantes: el rango de funcionamiento, con una distancia efectiva sin antena de unos 3 metros [1], y que estas etiquetas activas tienen un tiempo de vida limitado [8], por lo que habría que reponerlas con una frecuencia determinada.

Si bien el primer problema puede ser solventado en parte por las nuevas etiquetas RFID-UWB [13], que tienen una mayor área de cobertura, una sensibilidad a las interferencias mejorada, y con una mejor capacidad para soportar múltiples accesos, el problema de la duración de la batería en las etiquetas activas hace que en la práctica sea inviable el uso de etiquetas RFID o NFC (Near Field Communicator, una mejora del estándar) para un sistema de posicionamiento, ya que la potencia de la señal variará a lo largo de la vida de la batería, y a lo costoso que sería la sustitución de las etiquetas fijadas como nodos de referencia en el sistema.

También ha sido considerado el uso de redes de sensores Zigbee, basadas en el estándar IEEE 802.15.4, orientadas a aplicaciones que requieran una baja tasa de envío de datos y la maximización de la vida útil de las baterías [2]. El bajo consumo de estas unidades es debido en gran parte a la velocidad de transferencia de datos (solo hasta 250kb/s), en un rango de 10 a 100 metros [15].

La estimación de la posición usando estos tipos de nodos puede realizarse usando TDOA (*Time Difference-of-arrival*) [14], o basándose en la pérdida de fuerza de la señal o RSS (*Received Signal Strength*) [15] [2].

En este tipo de redes la precisión de la estimación dependerá del número de nodos disponibles en el área concreta donde se encuentre el nodo móvil [2] [20].

Las ventajas de una red de nodos Zigbee en coste y consumo de energía, que a priori le hacían una candidata ideal, no son suficientes para ser seleccionada en este proyecto, ya que no son capaces de manejar una cantidad importante de datos en tiempo real por la baja velocidad de transferencia, y, además, pero no menos importante, requeriría dispositivos especiales para el nodo móvil, ya que no es una tecnología que se encuentre disponible en los dispositivos estándares del mercado.

Aunque hay muchas investigaciones y artículos sobre posicionamiento en interiores, la arquitectura de estos sistemas no está generalmente bien documentadas [15]. Suelen centrarse en la elección de los nodos de referencia.

La mayoría de estos sistemas, además, solo tratan de establecer la habitación o recinto dentro del entorno en que se encuentra el nodo móvil [3] [6] [7], sin establecer la posición dentro de un recinto concreto. Para un sistema de este tipo, se suele utilizar una topología de red de estrella.

Uno de los grandes problemas de la mayoría de los sistemas basados en redes de sensores es la calibración. La calibración de estos sistemas presenta, a su vez, dos problemas distintos: la calibración inicial, y la calibración periódica de mantenimiento. Esto puede llegar a ser un problema muy costoso, en tiempo y recursos, para el que algunos autores proponen el uso de robots [2] [18] [19], de agentes humanos, o mezcla de ambas soluciones en las distintas fases, que van recorriendo el entorno para crear el mapa inicial de potencias (calibración inicial), y posteriormente de manera periódica para mantenerlo calibrado.

Esto supone un coste tanto en tiempo como en recursos, y limita la calibración del sistema a las mediciones periódicas hechas por el aparato móvil de medición.

Una de las propuestas más interesantes en este sentido es la realizada por Bernardos, Casar, y Tarrío [4], que proponen usar el método del gradiente de Media de mínimos cuadrados, usando una función hiperbólica como filtro para minimizar el error de localización, relativa al canal de propagación de la señal, para calibrar el sistema

4. Propuesta de solución

Se ha de tener en cuenta que si se pretende diseñar un sistema susceptible de ser usado por cualquiera, ha de basarse en tecnologías estándares que se encuentren disponibles a bajo coste en el mercado, particularmente en lo que se refiere a los nodos móviles que habrán de ser adquiridos por los usuarios finales. Esta misma premisa es válida respecto a la parte a instalar en el recinto en el que el sistema vaya a implantarse, donde unos costes bajos de implantación y mantenimiento son fundamentales para una posible expansión del sistema.

4.1. Hardware

Una de las consideraciones más importantes a la hora de diseñar el sistema son los componentes hardware, específicamente los nodos de referencia del sistema y los distintos nodos móviles que puedan ser empleados por los usuarios para poder comunicarse con el sistema.

Esta elección tendrá una clara influencia en el diseño del resto del sistema, ya que según se escoja una u otra tecnología se abrirán o cerrarán posibilidades. Para tomar esta decisión, han sido tenidas en cuenta varias características que el sistema debe tener para ser susceptible de implantarse con éxito en el mercado. Algunas de estas cuestiones han de ser observadas tanto por el sistema de localización como por el nodo móvil:

- **Bajo coste.** Tanto si se habla de los usuarios finales del sistema, como de la implantación del sistema en sí, para diseñar un sistema con vistas a una posible salida al mercado es necesario escoger unos componentes hardware que no obliguen a las partes implicadas a realizar un desembolso importante. El posible número de nodos, el precio de los mismos y su instalación no deberían suponer un obstáculo para la implantación del sistema de localización y guiado. Más importante para la selección de la tecnología es que ésta permita a los usuarios finales escoger nodos móviles que no supongan un elevado coste de adquisición, si se pretende alcanzar un nivel importante de utilización del sistema.
- **Fácilmente accesible.** Por la misma razón que el punto anterior, la tecnología escogida ha de ser fácilmente adquirible en el mercado, tanto para el usuario final, de forma que se le facilite el acceso al sistema en la mayor medida posible, como para el poseedor del mismo, de forma que el acceso a la tecnología no suponga un problema tanto a la hora de implantarse, como a la hora de reponer nodos, bien sea por averías o por un aumento en tamaño de la red de nodos del sistema.
- **Estándares.** En un sistema orientado hacia la mayor implantación posible, es necesario basarse en estándares reconocidos, lo que nos facilitará el diseño y desarrollo de todos los ámbitos del sistema, y la comunicación entre sus partes.
- **Compatibilidad.** Otra característica más a tener en cuenta es las opciones de compatibilidad en la comunicación de señales entre

distintos tipos de nodos referencia y móviles. Cuantas más opciones y facilidades se ofrezcan, mejor resultado se obtendrá en la implantación del sistema.

Estas premisas solo contemplan la necesidad de diseñar un sistema altamente compatible y muy fácilmente accesible. En los siguientes puntos se ven las características concretas que han de tener los nodos de referencia y los nodos móviles desde el punto de vista de la tecnología hardware.

4.1.1. Nodos de referencia

Los nodos de referencia o fijos del sistema son los que nos permitirán establecer la posición del nodo móvil.

De la elección de estos nodos dependerá la forma en que deban comunicarse el sistema y el nodo móvil o cliente: el tipo de señales que puedan utilizarse para ello, el tipo de procesamiento aplicable para el tratamiento de estas señales, la disposición y espesor de la red de nodos, y además tendrá una incidencia muy importante en la precisión del sistema a la hora de establecer la posición del nodo móvil.

Para esta elección, además de los puntos mencionados con anterioridad, se ha de contar con:

- **Interferencias.** El sistema operará en un entorno que, si bien estará controlado y del que se dispondrá de un mapa en tiempo real, presentará un número importante de elementos que supondrán una fuente de interferencia con las señales usadas para el establecimiento de la posición del nodo móvil. Estarán presentes estanterías repletas de materiales de distinta opacidad para estas señales, de metales, líquidos, etc., habrá más clientes del sistema interoperando con él, o personas que, aunque no usen el sistema de localización, si supondrán un elemento a tener en cuenta. La elección ha de venir, por fuerza, condicionada por la necesidad de evitar la influencia de estas interferencias, o minimizar la posible pérdida de precisión que supongan.
- **Capacidad de controlar varios nodos móviles.** No todas las tecnologías estudiadas a lo largo de la elaboración de este proyecto son capaces de gestionar la información y/o las señales de forma que puedan establecer de forma simultánea la posición de varios nodos móviles. Es necesario que el sistema pueda realizar esta tarea en paralelo sin ver

afectado por ello su rendimiento ni precisión, y hacerlo de forma que el número de nodos móviles a posicionar no suponga incrementar el número de nodos de referencia del sistema.

Por lo mencionado en análisis de las técnicas en la sección anterior, y con base también en las pruebas de rendimiento y posibilidades entre Bluetooth, UWB, ZigBee, y, 802.11, realizada por Lee en [16], y entre redes 802.11, Zigbee y Wimax en [17], también tenidas en cuenta en este proyecto, se han seleccionado las redes **802.11 (IEEE 802.11a, 802.11b, 802.11g)** como las idóneas para este proyecto, ya que:

- Estas redes pueden dar servicio simultáneamente a muchos clientes sin ver afectado su rendimiento, un requisito fundamental para un sistema de estas características.
- Es una tecnología de muy fácil acceso en el mercado.
- El coste es relativamente bajo, tanto por los precios de los nodos, como por la cantidad de nodos necesarios, dado que presentan un amplio rango de cobertura en este tipo de entornos.
- No presenta ningún problema a la hora de incorporar o suprimir nodos en el sistema, y no presenta un tamaño máximo en el número de nodos. Es un principio básico para construir un sistema fácilmente escalable.

Además, estos nodos ofrecen una huella única, basada en la dirección física de red, para identificarlos dentro del mapa de potencias. Esta característica supone que no se necesita ninguna operación extraordinaria para su identificación, tanto en el caso de sustituciones como de modificaciones en el tamaño del sistema.

Se propone aprovechar la base de la red wifi disponible en el entorno, ya que no se necesita una infraestructura específica para el sistema de posicionamiento, al contrario de lo que sucede con la mayoría de las tecnologías antes mencionadas. Con un coste mínimo en recursos y tiempo, es posible convertirla en una red de sensores capaces de dotar de información al nodo móvil, y obtenerla de él, en cualquier parte del mapa.

Siendo esta, además, una infraestructura fácilmente escalable a las necesidades reales del entorno, tanto si ha de crecer como decrecer, y que además es completamente compatible con la red de datos propia del sistema, permitirá

aprovechar los recursos en ambos sentidos, lo que es una ventaja añadida, tanto en los costes como en la funcionalidad para el sistema de localización.

4.1.2. Nodo móvil

Como se ha mencionado en anteriores ocasiones, una de las motivaciones del proyecto es diseñar un sistema al alcance de todos. El nodo móvil es la única parte del sistema que ha de ser adquirida por los usuarios finales, por lo que es imprescindible maximizar la facilidad de acceso al mismo.

Se ha contemplado desde el principio este objetivo, lo que ha llevado a diseñar un sistema que debería funcionar en cualquier dispositivo con capacidad de gestionar redes 802.11, y para el que puede diseñarse un interfaz de comunicación con el sistema. No obstante, se ha seleccionado como modelo de nodo móvil para el posterior desarrollo del sistema un smartphone con sistema operativo Android.

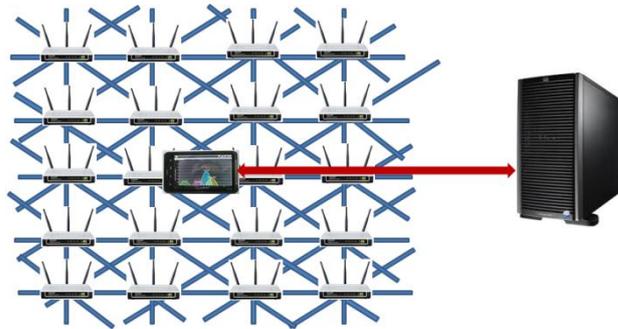
Las motivaciones para esta elección son varias:

- Por facilidad de acceso en el mercado y por su alto nivel de implantación.
- Por la incorporación y mejora constantes de las prestaciones y características, que facilitarían el camino para igualmente mejorar el sistema, y dotarlo de más funcionalidades.
- Su diseño es prácticamente un estándar en el mercado.
- Todos incorporan sensores Wifi capaces de gestionar redes, y tienen capacidad de cómputo más que suficiente para lo que se necesita.
- Por último, pero no menos importante, es mucho más fácil obtener mayor aceptación a una solución implementada en un móvil. El uso de un teléfono no incurre en un estigma social [18], y mucha gente ya usa estos teléfonos.

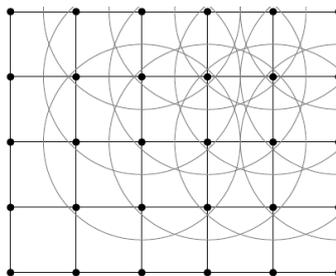
También presenta una ventaja nada desdeñable, y es la facilidad de recarga de las baterías, la duración de la carga, y la facilidad de sustitución de la misma una vez finalizada su vida útil.

4.1.3. Red de nodos

La propuesta es una red con topología de malla, con el fin de disponer de mayor información para estimar la localización del nodo móvil, mayor fiabilidad y mayor cobertura [2], ya que al recibir la señal de múltiples dispositivos y por múltiples caminos se garantiza siempre su recepción por el nodo móvil:



Se ha considerado que la distancia idónea entre un nodo de referencia y sus adyacentes debe ser un máximo de 10m., para garantizar que el nodo móvil reciba señal de un número suficiente de estos nodos de referencia, lo que constituye un requisito necesario para la correcta estimación de la posición del nodo móvil. Suponiendo una gran superficie de 2000 m², esto implicaría que para que el sistema diese cobertura a todos los puntos de la misma, habría que colocar un total de 30 puntos de acceso, con lo que el esquema de coberturas quedaría así:



Según muestran Bahl y Padmanabhan en su estudio RADAR [20], el número de nodos de referencia idóneo para el posicionamiento es 5, que supone una mejora del 22% respecto de los cálculos realizados para 3 nodos. En RADAR también se indica que utilizar más nodos supondría una pérdida de precisión, porque los más lejanos corromperían el proceso de cálculo de la media de la señal. Se volverá a hacer mención a esto en el punto 2.2.1, sobre algoritmos de localización.

Los nodos de referencia deberán ir colocados en el techo del recinto para evitar las interferencias en la medida de lo posible, y porque de esta manera no será

necesaria la modificación de la malla ni la recolocación de los nodos si se cambiase la disposición del entorno.

4.2. Posicionamiento

Se trata de estimar de la manera más exacta posible la posición del nodo móvil en tiempo real, enfocando el problema de manera que la solución propuesta no requiera la intervención activa del usuario para ello.

A la hora de escoger las técnicas a emplear en el proyecto también se ha tenido en cuenta la maximización de la vida de la batería del nodo móvil, y que la técnica elegida no requiera el uso de componentes o sensores específicos.

4.2.1. Técnica de posicionamiento

Se ha decidido basar el sistema en una técnica basada en la fuerza de la recepción de la señal (RSS). Concretamente, se ha decidido utilizar uno de los métodos más empleados [1] [6] [20], el método RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). Este método se basa en el modelo de la pérdida de la señal en el camino, que se produce de manera exponencial durante la transmisión [20].

Se menciona con anterioridad el hecho de que los nodos de referencia escogidos ofrecen una huella única o fingerprint, basada en la dirección física de red o MAC (Media Access Control). Como solución al problema del multipath, y basándose en esta huella se filtrarán las señales más débiles de cada nodo, entendiendo que son reflejos de la señal, y no el camino más corto entre los nodos.

4.2.2. Algoritmos de localización

Para estimar la posición del nodo móvil en el sistema, se utiliza un sistema basado en la cercanía a múltiples nodos de referencia. Se usa la fuerza de la señal recibida o RSS en tiempo real para localizar los k nodos más cercanos en localizaciones conocidas, y almacenadas en un mapa de potencias, lo que lo hace idóneo para el proyecto. Es el sistema más usado en sistemas de posicionamiento, como se ve en [5] [8] [10] [20].

Hay varios motivos para tomar esta decisión. En primer lugar no es posible usar el más sencillo posicionamiento basado en un solo nodo porque hay una alta posibilidad de que el nodo móvil, en una malla de red como la propuesta, esté localizado en una posición equidistante a varios nodos de referencia. En segundo lugar, porque el vector de error de correspondiente a cada nodo vecino estará orientado en

una dirección [20], así que un promedio de las coordenadas de los nodos vecinos puede dar una estimación más cercana a la ubicación real del usuario que utilizando un único nodo de referencia.

La medición de la distancia entre dos nodos se realizará usando la distancia euclídea [9] [10]. Concretamente:

$$d_p = \sqrt{\sum_{i=0}^n (P_{r_i} - P_{M(p,r_i)})^2}$$

Donde:

- d_p es la distancia al punto p .
- n será el número de dimensiones del problema, en nuestro caso el número de nodos de referencia empleados en las mediciones.
- P_{r_i} la potencia de señal recibida del nodo de referencia r_i .
- $P_{M(p,r_i)}$ es la potencia almacenada en el mapa de señales (M), para el nodo r_i en el punto p .

Como se menciona con anterioridad, Bahl y Padmanabhan [20] dicen que el número de nodos de referencia idóneo para el posicionamiento es cinco. Si se modifica la fórmula anterior para obtener las coordenadas medias respecto de las distancias obtenidas a los nodos de referencia, la fórmula definitiva será:

$$d_p = \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 (P_{r_i} - P_{M(p,r_i)})^2}$$

Que dará la media de las distancias del nodo móvil.

El problema siguiente viene dado por la asignación de pesos a los nodos tomados como referencia para calcular las coordenadas del nodo móvil. Esto se hará ajustando la influencia de las señales de los nodos mediante distintos pesos. Para esto se usa una función difusa.

Aunque Cheng y YiYuan [5] proponen establecer una función difusa de pesos basados en elementos del entorno y ambientales que afecten a la fuerza de la señal entre los nodos de referencia y el nodo móvil, dada la aleatoriedad de la posición de los elementos que provocan estas interferencias en el entorno (madera, metal, líquido...), y que el entorno es cerrado, es preferible aplicar una función similar a la

presentada por Serodio y Coutinho [10], que se basa en la proximidad de los nodos de referencia, asignando pesos mayores a los nodos más cercanos, que descienden cuando aumenta la distancia desde el nodo móvil.

Como universo de entrada para el mecanismo difusor se han escogido las cinco señales más potentes, como proponen Bahl y Padmanabhan [20]. Para evitar el problema del multicamino, se descartará de cada nodo todas las señales excepto la más fuerte:

$$U = (RSS_i)$$

Donde:

- RSS_i representa la potencia de la señal del nodo i expresada en decibelios (-dB).

Como difusor, se aplica la función característica:

$$W_i = \left\{ \begin{array}{l} W_0 \text{ si } RSS_i > RSS_j \forall j \neq i \\ W_1 \text{ si } RSS_0 > RSS_i > RSS_j \forall j \neq i, j \neq 0 \\ W_2 \text{ si } RSS_1 > RSS_i > RSS_j \forall j \neq i, j \neq 0 \\ W_3 \text{ si } RSS_2 > RSS_i > RSS_j \forall j \neq i, j \neq 0 \\ W_4 \text{ si } RSS_3 > RSS_i > RSS_j \forall j \neq i, j \neq 0 \\ 0 \text{ si } RSS_4 > RSS_i > RSS_j \forall j \neq i, j \neq 0 \end{array} \right\} \text{ siendo } W_i > W_j \forall i > j$$

Es importante especificar que esto no implica que haya cinco pesos distintos para los cinco nodos de referencia escogidos para establecer la posición del nodo móvil, ya que en un sistema de este tipo es probable que se reciban las señales de dos nodos con la misma potencia. En este caso, podría haber dos nodos con el mismo peso asignado por la función característica. Solo se escogerán los cinco primeros nodos con pesos más altos, pudiéndose desestimar para el cálculo de la posición un nodo con un peso distinto de cero.

Se propone usar como mecanismo de inferencia una función derivada de la medición de la distancia entre los nodos:

$$W_i = 1 / \sqrt{\frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 (RSS_i - RSS_{M(RSS_i)})^2}$$

Donde el peso asignado al nodo de referencia se calculará mediante la comparativa de la señal recibida y la almacenada en el mapa de potencias, y será mayor cuanto menor sea la distancia al nodo.

De manera análoga al estudio de Serodio y Coutinho [10], el desdifusor quedaría así:

$$C_p = \frac{\sum_{j=0}^4 (W_{Mj} x C_j)}{\sum_{i=0}^4 (W_{Mi})}$$

Donde:

- C_p son las coordenadas del nodo móvil.
- W_{Mj} el peso asignado a las coordenadas proporcionadas por el nodo de referencia j dadas por C_j .

4.3. Datos

Una definición correcta de los datos es necesaria no solo para poder establecer la posición del nodo móvil en el entorno, sino también para la definición del mapa de este entorno y la integración del módulo de posicionamiento con el resto de módulos del sistema.

El sistema de posicionamiento tendrá que almacenar los datos necesarios para realizar la posterior estima de la localización del nodo móvil. Estos datos se recogerán en las fases de calibraciones de las que se habla posteriormente, y se enviarán a un servidor central, donde se almacenarán en una base de datos llamada *Mapa de Potencias o Mapa de huellas*.

4.3.1. Mapa de potencias

La parte que afecta al posicionamiento es el Mapa de Potencias. Este mapa contendrá los pares de coordenadas y asociados a cada uno de ellos la lista de potencias de recibidas de los nodos de referencia.

Mientras que autores como Howard, Siddiqi y Sukhatme [19] almacenan solo la información de los nodos que consideran más relevantes mediante un sistema de pesos, se ha optado por almacenar la información de todos los nodos de los que se reciba la señal, dejando al anteriormente visto algoritmo de posicionamiento la elección de los nodos con más peso para estimar la posición del nodo móvil. En una

mailla como la nuestra, esto supone que en la base de datos se tendrá la referencia de la recibida de al menos 7 nodos en los puntos extremos.

El mapa de potencias tendría, por tanto, una estructura así:

<i>Coordenadas/Nodos referencia</i>	<i>nr₁</i>	<i>nr₂</i>	<i>nr₃</i>	<i>nr₄</i>	<i>nr₅</i>	<i>nr₆</i>	<i>nr₇</i>	...	<i>nr_i</i>
(x_0, y_0)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
(x_0, y_1)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
(x_0, y_n)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
(x_1, y_0)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
(x_1, y_1)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
(x_1, y_n)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
(x_n, y_n)	<i>r_{SS}</i>	...	<i>r_{SS}</i>						

Donde cada *r_{SS}* representa la potencia señal recibida en esa coordenada desde el nodo de referenciado por la MAC del nodo de referencia *i* (*nr_i*) en las coordenadas (x_n, y_n) , y estará almacenada en decibelios.

4.3.2. Proceso de los datos

Con el fin de minimizar los requisitos de capacidad de cómputo de los nodos móviles, este realizará básicamente las tareas de recogida y envío de datos al servidor.

Se presentan dos casos diferenciados de funcionamiento:

Durante la fase en que el usuario se esté desplazando por el entorno, el nodo móvil tendrá que enviarle al servidor la media de las potencias de las señales recibidas por los puntos inalámbricos, y el servidor debe estimar la posición, enviando las coordenadas al cliente.

En el caso en que el usuario haya identificado un hito, la posición exacta del nodo móvil será obtenida del Módulo de Localización e Identificación de Productos, y se utilizará la información actual de la potencia recibida desde los nodos de referencia para calibrar el sistema, como se indica en el punto siguiente.

4.3.3. Interacción con el sistema global

La interacción a nivel de transmisión de datos de este módulo con el sistema global, en lo que en diseño se refiere, presenta pocos requisitos:

Con el Módulo de Localización e Identificación de Productos, la interacción consistirá en, al realizarse una identificación positiva, recibirá un aviso y las coordenadas exactas almacenadas en el mapa de productos, de manera que se podam realizar el calibrado del sistema como se ve en el punto 3.4, comparando las señales que se reciban en ese momento con las almacenadas en el mapa de potencias para esas coordenadas.

Con el Módulo de Enrutamiento y Guiado, se trata de enviar a este módulo la información, en formato de coordenadas, del movimiento del usuario, para que el módulo pueda establecer el camino que está siguiendo el nodo móvil.

4.4. Calibración y entrenamiento

El primer objetivo de la calibración es detectar el ruido del canal inalámbrico, afectado por el problema del camino múltiple y las pérdidas de señal. También es necesaria para evitar los problemas ocasionados por la reorganización del entorno (movimientos de estanterías, etc.), por interferencias ocasionales provocadas, por ejemplo, por grupos de personas, emisores distintos a los del sistema, etc.

La propuesta consiste en crear el mapa de potencias de manera que no tenga apenas coste en tiempo ni recursos para el sistema, y mantener la calibración de forma constante por los usuarios del sistema, y de forma transparente para ellos.

Una ventaja de las tecnologías y técnicas escogidas para el sistema de posicionamiento es que, una vez calibrado el sistema y generada la base de datos de potencias, puede ser usada por distintos tipos de nodos móviles sin necesidad de un recalibrado.

4.4.1. Calibración inicial

Este proyecto propone usar el montaje inicial del sistema para la calibración. Al colocar productos tras la instalación del sistema, se irá alimentando el mapa de potencias, escaneando los productos y enviando al servidor, que tendrá la posición real del producto, el mapa de señales, mediante la media de los últimos diez segundos (estimando un tiempo de colocación del producto).

Mediante esta operación inicial, se enviará al servidor el punto de medición real del mapa, junto con una media de las potencias en ese momento. La construcción del mapa inicial de potencias se completará en el proceso de reposición del material.

El único requisito para esto es que los agentes de reposición de material sean capaces de realizar las mediciones y enviarlas al servidor, lo que en el caso de agentes humanos podría realizarse con un Smartphone similar al usado por los clientes del sistema.

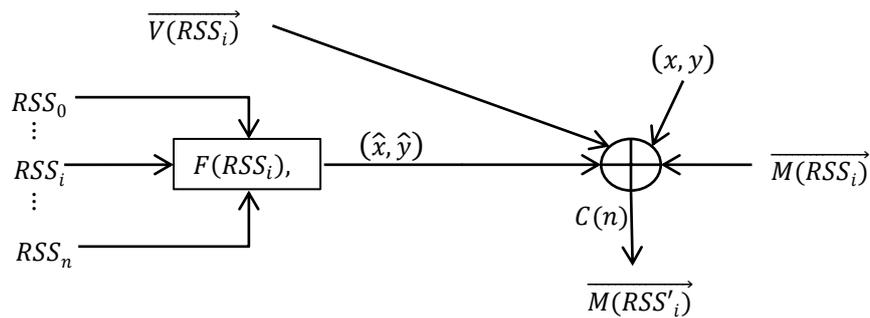
El envío de las mediciones se realizaría por un interfaz del sistema desarrollado a tal fin, y que funcionaría de forma similar al que usarían los clientes para la localización del producto en el Módulo de Localización e Identificación de Productos

4.4.2. Entrenamiento

Se ha diseñado de igual manera un sistema de calibrado que minimiza y casi hace desaparecer los costes de mantenimiento de esta parte del sistema.

La propuesta se basa en el envío de información de las medias de las medidas de las potencias al servidor cuando un cliente localiza un producto. Este feedback enviado por los nodos móviles de los usuarios de forma continuada durante su uso, para realizar la calibración en tiempo real del sistema, lo que mantendría el sistema constantemente calibrado, sin necesidad de incurrir en el consumo de recursos ni tiempo.

Para realizar esta tarea, se usará un filtro adaptativo para la calibración del mapa de huellas, basando en la variación de las potencias de las señales almacenadas en dicho mapa, y de la recibida en tiempo real del nodo móvil en el momento en el que localiza un hito, es decir, se encuentra en una localización exacta:



Donde la función de calibración recibe:

- El vector de potencias de señal recogidas en el nodo móvil: $\overrightarrow{V(RSS_i)}$
- La posición estimada del nodo móvil: (\hat{x}, \hat{y})
- La posición real del nodo móvil: (x, y)
- El vector de potencias almacenado en el mapa de huellas para esa localización: $\overrightarrow{M(RSS'_i)}$

5. Conclusión

En este proyecto se ha propuesto un sistema para el posicionamiento de dispositivos móviles en entorno interior, considerando criterios de bajo coste, fácilmente accesible a los usuarios, mínimamente intrusivo y que permite una precisión suficiente, con un consumo energético mínimo y robusto a las interferencias.

El sistema esta basado en una malla de nodos inalámbricos en una red 802.11, aprovechando la red de datos previsiblemente instalada en el recinto. El sistema permite al usuario recorrer el recinto cerrado utilizando un Smartphone como nodo móvil. De esta manera el sistema posicionará el dispositivo móvil mediante el proceso de las señales emitidas desde los puntos de acceso, en base a la potencia con que se reciba. El sistema realizará el cálculo de las coordenadas seleccionando los nodos más significativos mediante una función difusa que evalúa la influencia de la señal de cada nodo.

Además se ha diseñado un mapa de potencias que almacena las señales recibidas por los nodos de referencia en cada par de coordenadas. El sistema usa este mapa de potencias para calcular las coordenadas del nodo móvil, y se mantendrá calibrado en tiempo real con el uso que los usuarios hagan del sistema.

6. Trabajos futuros

La aplicación final se desarrollará en principio para el sistema operativo Android como software libre, lo que facilitará el acceso a los usuarios en mayor número, y además las librerías necesarias para el desarrollo de los módulos del proyecto son software libre, con lo que se podrán emplear o modificar según los requerimientos del sistema.

La distribución a los usuarios será simple, ya que el programa podría ser descargado gratuitamente como una aplicación desde el Android Market.

7. Bibliografía

- [1] *Comparison of Wireless Indoor Positioning Technologies*. Ekahau Whitepaper. Downloaded 08/2011 from ekahau.com
- [2] Mahmoud Al-Qutayri, Jeedella Jeedella and Majid Al-Shamsi. *An Integrated Wireless Indoor Navigation System for Visually Impaired*. Systems Conference (SysCon), 2011 IEEE International. 4-7 04/11
- [3] Mikkel Baun Kjærgaard, Henrik Blunck, Torben Godsk, Thomas Toftkjær, Dan Lund Christensen, and Kaj Grønbaek. *Indoor Positioning Using GPS Revisited*. Lecture Notes in Computer Science, Volume 6030/2010, 38-56. 2010
- [4] Ana M. Bernardos, José R. Casar, Paula Tarrío. *Real time calibration for RSS indoor positioning systems*. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010. 15-17/09/2010
- [5] Deng Chen, Fang YiYuan. *Improved RSSI Indoor Location System Based on Fuzzy Algorithm*. Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2011 IEEE International Conference. 06/2011
- [6] Lyu-Han Chen, Gen-Huey Chen, Ming-Hui Jin, Wu, E.H. *A Novel RSS-Based Indoor Positioning Algorithm Using Mobility Prediction*. ICPPW '10 Proceedings of the 2010 39th International Conference on Parallel Processing Workshops, pp 549-553. 10/2010
- [7] Rosen Ivanov. *Indoor Navigation System for Visually Impaired*. International Conference on Computer Systems and Technologies - CompSysTech'10
- [8] H. Liu, H. Darabi, P. Ganeljee, and J. Liu. *Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems*. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, pp. 1067-1080, Vol. 37, No. 6. 11/07
- [9] Priwgharm, R., Chemtanomwong, P. *A Comparative Study on Indoor Localization based on RSSI Measurement in Wireless Sensor Network*. 2011 Eighth International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE) 11-13/05/2011
- [10] Carlos Serodio, Lu'is Coutinho, Hugo Pinto, Pedro Mestre. *A Comparison of Multiple Algorithms for Fingerprinting using IEEE802.11*. 6-8/06/2011
- [11] Hamza Soganci and Sinan Gezici, Bilkent University, H. Vincent Poor, Princeton University. *Accurate positioning in ultra-wideband systems*. *IEEE Wireless Communications*. April 2011
- [12] J. Xu M. Ma C.L. Law, School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore. *Performance of time-difference-of-arrival ultra wideband indoor localization*. Published in IET Science, Measurement and Technology. Revised on 12th August 2010.
- [13] Davide Dardari, Senior Member IEEE, Raffaele D'Errico, Member IEEE, Christophe Roblin, Member IEEE, Alain Sibille, Senior Member IEEE, and Moe Z. Win, Fellow IEEE. *Ultrawide Bandwidth RFID: The Next Generation?* Proceedings of the IEEE | Vol. 98, No. 9, September 2010

- [14] Hyuntae Cho, Hyunsung Jang, and Yunju Baek. *Practical Localization System for Consumer Devices using Zigbee Networks*. IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 56, No. 3, August 2010
- [15] Hing Kai Chan, Senior Member, IEEE. *Agent-Based Factory Level Wireless Local Positioning System With ZigBee Technology*. IEEE SYSTEMS JOURNAL, VOL. 4, NO. 2, JUNE 2010
- [16] J.-S. Lee, Y.-W. Su, and C.-C. Shen. *A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*. 33rd Annu. Conf. IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taiwan, R.O.C.,
- [17] B. Sidhu, H. Singh, and A. Chhabra. *Emerging wireless standards – WiFi, ZigBee and WiMAX*. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 25, pp. 308–313.
- [18] Nisarg Kothari, Balajee Kannan, M. Bernardine Dias. *Robust Indoor Localization on a Commercial Smart-Phone*. The Robotics Institute, Carnegie-Mellon University. http://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=6902. August 2011
- [19] Andrew Howard, Sajid Siddiqi, Gaurav S. Sukhatme. *An Experimental Study of Localization Using Wireless Ethernet*. Descargado de <http://www.springerlink.com/content/mu1333820763207h/> en diciembre de 2011.
- [20] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. *RADAR: An inbuilding RF-based user location and tracking system*. INFOCOM 2000, pp. 775-784., 2000.