

Master en Ingeniería de Sistemas y Control

Sistema de control de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil

Alumno: Eduardo Mas Carrillo
Director: Sebastián Dormido Bencomo
Curso: 2012 - 2013

Master en Ingeniería de Sistemas y Control

Sistema de control de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil

Proyecto específico propuesto por un profesor.

Alumno: Eduardo Mas Carrillo
Director: Sebastián Dormido Bencomo

Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:

Firma del alumno

Resumen del proyecto.

El sistema descrito en este documento es parte de un proyecto para la asistencia de personas que sufren la enfermedad de Parkinson. Este sistema se engloba dentro de los denominados AAL, Ambient Assisted Living, o asistencia en la vida cotidiana dirigida por el entorno, que permiten mejorar la calidad de vida de personas mayores o pacientes que sufren ciertas enfermedades y/o discapacidades mediante la utilización de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC).

El servicio que ofrece el módulo que se presenta en este proyecto tiene como objetivo la localización del paciente en el interior de su domicilio, obteniendo una información precisa de su posicionamiento, permitiendo actuar al sistema global, una vez conocida su localización, para mejorar la calidad de vida de estos pacientes. Como una funcionalidad añadida a localización del sujeto, se encuentra la detección de episodios de acinesia, característicos de la enfermedad de Parkinson, donde el paciente entra en un estado de parálisis temporal que ejerce una dificultad en el sujeto para iniciar un movimiento, permitiendo actuar en consecuencia y ayudar al sujeto a continuar con su movimiento.

Esta aplicación para la localización en interiores se basa en el posicionamiento del usuario mediante un filtro bayesiano para la estimación de la localización, técnica que provee una herramienta estadística muy potente para ayudar a minimizar la incertidumbre en la mediciones de los sensores que recogen la información. En el caso que nos ocupa, la información de la posición del sujeto es recogida mediante una red wifi a través de un WPS, Wifi-Based Positioning System o posicionamiento por wifi. Estos métodos de detección de dispositivos móviles permiten el posicionamiento en interiores de forma precisa y a un coste reducido.

Palabras Clave.

AAL, localización en interiores, WPS, filtro bayesiano.

Contenido

Lista de figuras.....	8
1. Introducción.....	9
1.1. Enfermedad de Parkinson. Síntomas motores.....	9
1.2. Propósito.....	10
1.3. Posicionamiento y localización.....	10
2. Requisitos.....	12
2.1. Requisitos Funcionales.....	12
2.1.1. Localización en interiores.....	12
2.1.2. Detección de bloqueos.....	13
2.2. Requisitos no funcionales.....	15
2.3. Clases de usuario y características.....	16
2.4. Entorno operacional.....	16
2.5. Restricciones de implementación.....	17
3. Estado del arte.....	19
3.1. Técnicas de localización en interiores.....	19
3.1.1. Localización mediante etiquetas RFID.....	20
3.1.2. Localización mediante marcas visibles.....	21
3.1.3. Localización mediante el cálculo del punto central a partir de nodos predefinidos..	21
3.1.4. Localización mediante triangulación de la señal.....	22
3.1.5. Localización mediante sistemas inerciales.....	23
3.1.6. Localización mediante detección de movimiento.....	24
3.1.7. Localización mediante mapas de radio wifi.....	25
3.2. Algoritmos de inferencia de la localización usando mapas de radio.....	26
3.2.1. Vecino más cercano.....	26
3.2.2. Redes Neuronales.....	27
3.2.3. Filtro Bayesiano para estimación de la localización.....	28

3.3. Análisis de Proyectos de Localización.....	29
3.3.1. PlaceLab.....	30
3.3.2. Ekahau Real Time Location System (RTLS).....	32
3.3.3. Indoor Navigation System for Handheld Devices.....	33
3.3.4. Framework Look!.....	35
3.4. Sistemas operativos.....	37
3.4.1. Android.....	38
3.4.2. iOS.....	38
3.5. Conclusiones.....	39
4. Arquitectura.....	41
4.1. Arquitectura global.....	41
4.2. Arquitectura del sistema.....	42
4.2.1. Arquitectura física.....	42
4.2.2. Arquitectura de software.....	44
5. Módulos del Sistema.....	46
5.1. Módulo para la generación del mapa de radio.....	46
5.1.1. Configuración y funcionamiento.....	46
5.2. Módulo de localización.....	48
5.2.1. Localización por mapas de radio.....	48
5.2.2. Filtro de Bayes para la estimación de la localización.....	50
5.2.3. Configuración del módulo.....	57
5.2.4. Interfaz de usuario.....	57
5.3. Módulo de detección de bloqueos.....	58
6. Apuntes finales.....	60
6.1. Conclusiones.....	60
6.2. Trabajos futuros.....	62
7. Bibliografía.....	63

Apéndice 1. Ejemplo sencillo de funcionamiento del filtro bayesiano. 65

Lista de figuras

<i>Figura 1.- Caso de uso en la localización en interiores.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.- Diagrama de actividades de la localización en interiores.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.- Caso de uso en la detección de bloqueos.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4.- Diagrama de actividades en la detección de bloqueos.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 5.- Red neuronal.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 6.- Módulo Stumbler de PlaceLab.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7.- Módulo Tracker de PlaceLab.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8.- Interfaz Ekahau RTLS.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9.- Interfaz del Indoor Navigation System for Handheld Devices.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10.- Ejemplo de mapa de radio.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11.- Ejemplo en Look! de realidad aumentada.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12.- Distribución espacial en Look!.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13.- Tasa de aciertos en la localización con Look!.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14.- Expansión de android.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 15.- Arquitectura global del sistema AAL.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 16.- Diagrama de flujo de datos del sistema de localización.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 17.- Esquema de la arquitectura física.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18.- Arquitectura del sistema de localización.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19.- Modulo de generación del mapa de radio.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20.- Representación gráfica de un mapa de radio.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 21.- Representación de la aproximación normal de un conjunto de señales wifi.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 22.- Ejemplo de detección por filtro bayesiano.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 23.- Modulo de localización.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24.- Oscilación de la intensidad de las señales wifi.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25.- Distorsión de las muestras en torno a la media de una señal wifi.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 26.- Ejemplo de espacio con división de rejilla.....</i>	<i>65</i>

1. Introducción.

Los sistemas de Vida Cotidiana Asistida por el Entorno, Ambient Assisted Living (AAL), destacan por su dimensión social y avanzan al mismo tiempo en problemas aun abiertos en la ingeniería, como son el tratamiento unificado de tareas de la vida diaria y la validación de servicios y aplicaciones en el despliegue de estos sistemas.

Existe una inherente dimensión social en la concepción y desarrollo de sistemas AAL que debe ser destacada y estudiada. Esta dimensión se puede apreciar desde tres perspectivas. Primero existen interacciones cuando hay involucrados varios actores, como el equipo médico o los familiares, aparte del sujeto que recibe la asistencia. Segundo, los objetivos de los AAL son esencialmente fines sociales, como incrementar el tiempo y calidad en que las personas puedan vivir en su entorno tradicional, manteniendo unos de los niveles aceptables de autonomía confianza y movilidad. Y tercero, hay objetivos implícitos en los AAL, creados para afrontar el creciente envejecimiento de la población y, además, para la integración de grupos de usuarios que tienen problemas para incorporarse o mantenerse en el tejido social, bien sea por enfermedad o por tener necesidades especiales.

En cuanto a la ingeniería de sistemas AAL, hay que aclarar que fundamentalmente se afronta con medios y técnicas de desarrollo convencionales. El esfuerzo de desarrollo se centra en la creación de servicios o aplicaciones para dispositivos específicos y un problema concreto.

Una parte importante de los AAL se centra en la ubicación del sujeto en el entorno donde se encuentra el sistema de asistencia en el hogar. El proyecto que aquí se presenta es uno de los pilares para estos sistemas, un procedimiento de control de posicionamiento y movilidad en interiores.

La aplicación para el cual está diseñado este subsistema de localización es para personas que sufren la enfermedad de Parkinson cuyo uno de sus principales síntomas son los episodios de acinesia, en los cuales el enfermo sufre una severa dificultad para iniciar un movimiento y a partir del cual queda en un estado de bloqueo motriz.

1.1. Enfermedad de Parkinson. Síntomas motores.

James Parkinson en 1817 describe detalladamente la enfermedad que posteriormente llevaría su nombre, señala su carácter progresivo, refiere como síntomas característicos el temblor y la pérdida de fuerza y señala la existencia de trastornos de la marcha y de la postura.

La Enfermedad de Parkinson (EP) se enmarca dentro de los síndromes clínicos caracterizados por hipobradicinesia¹, rigidez, temblor e inestabilidad postural. Dentro de estos síntomas motores se encuentra la acinesia que se muestran en el paciente como la dificultad para realizar dos patrones de movimiento simultáneos, retraso y lentitud en el inicio y ejecución de los movimientos voluntarios o la pérdida de movimientos voluntarios y automatismos.

Se trata de una inmovilidad total, un bloqueo, cuando se inicia la marcha, que se presentan de un momento a otro y que puede durar varios minutos o más de una hora. Aparecen después de muchos años de enfermedad y que parece asociarse al deterioro de las neuronas residuales de la sustancia negra. Cuando esto sucede, los pacientes se sienten muy cansados y esperando que la movilidad se restablezca. Los bloqueos pueden tener lugar siempre a la misma hora, pero más usualmente se producen por cambios significativos en el entorno alrededor del movimiento, por ejemplo, cambios en los materiales del suelo por el que avanzan, traspasar de una estancia a otra a través de puertas, paso por lugares estrechos como entrar a un vestidor o ascensor, o cruzar por encima de una alfombra; en tales lugares el pie se queda "pegado" al suelo.

1.2. Propósito.

El sistema de control de posicionamiento y movilidad a través de dispositivo móvil tiene como función principal supervisar el movimiento de un paciente con la enfermedad de Parkinson en la vivienda en la que habita.

Como hemos indicado, esta utilidad se englobaría dentro de un sistema de asistencia en la vida cotidiana para pacientes con este trastorno permitiendo ganar en calidad de vida gracias a todas las funcionalidades que ofrece este asistente.

La aplicación de control de posicionamiento y movilidad tiene como principal funcionalidad la localización del paciente dentro de la vivienda y en segundo lugar la detección de episodios de acinesia.

El sistema de control de posicionamiento y movilidad se basa en la localización del usuario mediante wifi, o WPS, mientras el enfermo porta un dispositivo móvil. Este método de detección del usuario permite el posicionamiento en interiores de forma precisa y a un coste reducido.

1.3. Posicionamiento y localización.

Según las redes de teléfonos y otros dispositivos móviles van creciendo, el posicionamiento para estos terminales cobra una importancia cada vez mayor. De hecho, un porcentaje muy importante de las aplicaciones requieren una información

¹ lentitud y torpeza general en la realización de los movimientos voluntarios.

certera sobre la información de localización del terminal (computación ubicua, aplicaciones basadas en contexto, control de situaciones de emergencia, etc.). Mientras existen muchas soluciones para exteriores, basadas en GPS o A-GPS, estas mismas soluciones no son aplicables para lugares cubiertos e interiores de edificios.

La señal recibida es demasiado débil para poder obtener exactitud sobre la posición actual. No obstante, dado que cada vez hay más edificios equipados con puntos de acceso para proveer conexión a internet inalámbrica, se abre una nueva posibilidad al utilizar estos dispositivos para determinar la localización del usuario en entornos de interiores.

2. Requisitos

Para el desarrollo de un procedimiento para el posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil para un sistema AAL de atención a enfermos de Parkinson, es necesario especificar una serie de requisitos que sirvan de guía para las labores de diseño e implementación, debido a las necesidades inherentes que este sistema presenta. En el presente capítulo se define en primer lugar la funcionalidad básica a implementar, en forma de requisitos funcionales, y se explica en detalle cada uno de ellos. Seguidamente se definen una serie de requisitos no funcionales que aportan información extra a los requisitos funcionales. Finalmente se presenta una serie de restricciones adicionales que se deben cumplir.

2.1. Requisitos Funcionales

El desarrollo del sistema de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivos móviles requiere de las funcionalidades:

- Localización en interiores.
- Detección de bloqueos.

A continuación se describe en mayor detalle cada uno de los requisitos funcionales.

2.1.1. Localización en interiores.

2.1.1.1. Descripción.

La localización en interiores es la funcionalidad principal del sistema, que le permite inferir la situación del sujeto dentro de la vivienda.

El posicionamiento del paciente es esencial para un sistema de asistencia en la vida cotidiana y debe permitir conocer de forma precisa la situación de éste en el espacio.

2.1.1.2. Secuencia de estímulo/respuesta.

La localización se realiza mediante una de las técnicas de localización en interiores que se analizarán en apartados posteriores, y deberá utilizar equipamiento que permita a un dispositivo móvil conocer la ubicación del paciente. Una vez el terminal determina la situación del paciente mediante el uso de estas técnicas, el dispositivo informará de la posición determinada.

2.1.1.3. Caso de uso.

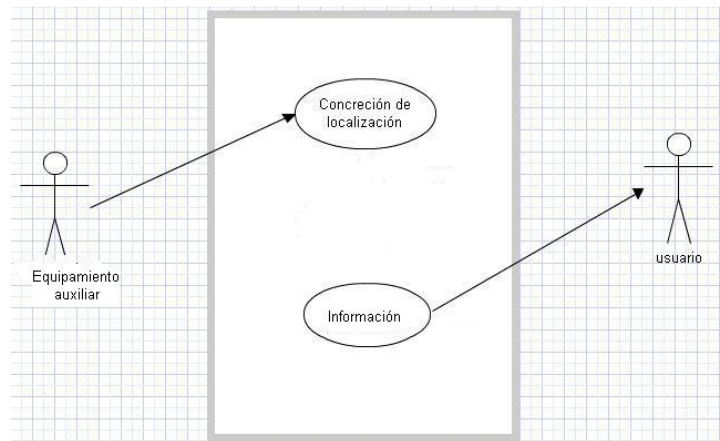


Figura 1.- Caso de uso en la localización en interiores.

2.1.1.4. Requerimientos funcionales.

Requerimientos 1: Definición de los puntos o nodos de detección del domicilio. Los nodos son las zonas de la casa que el sistema utiliza como punto de localización. Esto determina una localización discreta de la ubicación del paciente. La distribución de nodos será realizada por los especialistas.

Requerimientos 2: Distribución del equipamiento auxiliar. Las técnicas de localización en interiores necesitan de elementos que operen con la información del entorno para inferir la localización del paciente. Estos pueden ser puntos de acceso wifi, emisores de radiofrecuencia, cámaras, etc. La ubicación de este equipamiento debe ser de tal forma que no queden puntos ciegos en ningún punto de interés de la vivienda.

Requerimientos 3: Información al usuario. El sistema deberá mostrar mediante la interfaz la ubicación del paciente.

2.1.1.5. Diagrama de actividades.



Figura 2.- Diagrama de actividades de la localización en interiores.

2.1.2. Detección de bloqueos.

2.1.2.6. Descripción.

La detección de bloqueos es una característica que el sistema es capaz de controlar.

Los bloqueos son situaciones en las que el usuario permanece inmóvil en un punto específico. Estos puntos se definen en la configuración del sistema como sensible donde el sujeto puede sufrir un episodio de acinesia. A diferencia de estos puntos, están los que por diversas razones el usuario puede permanecer un tiempo indefinido sin que se active la detección, zonas donde el entorno no reúne las características precisas para que se produzcan bloqueos.

Este sistema de detección de bloqueos debe permanecer activado en todo momento, mientras el sistema está operativo.

2.1.2.7. Secuencia de estímulo/respuesta.

El sistema debe realizar un análisis entre el tiempo de inmovilidad del paciente y la ubicación actual de este, determinando en caso afirmativo que el paciente se encuentra en un estado de acinesia. Si la localización es en un punto sensible a bloqueos y el usuario permanece más de unos segundos en la misma zona, el software determina un estado de bloqueo.

Cuando uno de estos sucesos es detectado, el terminal emitirá avisos sonoros.

A partir de este tiempo después del suceso, el sistema generará un mensaje de texto para ser enviado a los teléfonos configurados dentro de la lista de contactos para emergencias.

2.1.2.8. Caso de uso.

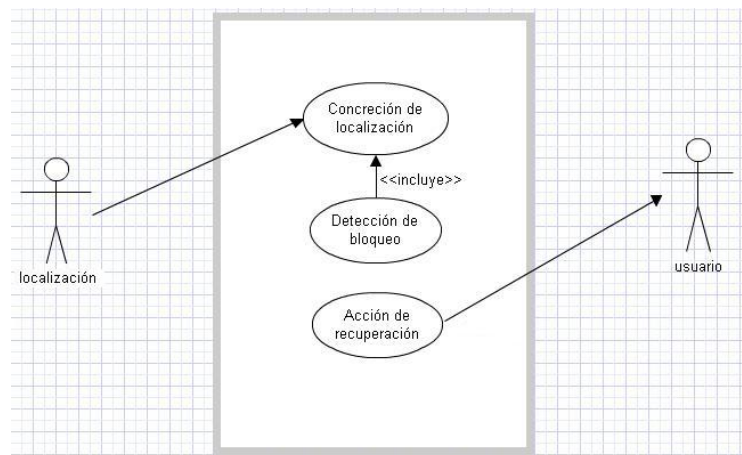


Figura 3.- Caso de uso en la detección de bloqueos.

2.1.2.9. Requerimientos funcionales.

Requerimiento 1: Configuración de los puntos. Una vez se ha distribuido la configuración espacial de los puntos, se debe definir el tipo de nodo para cada uno. Así, el especialista considerará los nodos como sensibles de bloqueo o no en función del análisis del entorno espacial donde se aplicará el sistema.

Será en estos puntos sensibles donde se efectuará la función de detección de bloqueo.

Requerimiento 2: Definición de los tiempos para bloqueo. Un bloqueo puede surgir en cualquier momento pero su duración es prolongada en el tiempo. Además, el paciente puede permanecer estático en una zona viable para bloqueo pero sin sufrir un episodio de inmovilidad (pararse a leer un escrito, uso del móvil, etc.). Para la detección de bloqueos se debe configurar un tiempo en el que la inmovilidad pase a ser considerada bloqueo.

Este tiempo tiene que ser configurado y definido en función del usuario y de las características de la vivienda, y corresponde al técnico especialista realizar esta operación.

Requerimiento 3: Generación de la alerta sonora. Una vez se detecta el bloqueo, se debe emitir una señal sonora desde el terminal. Esta señal debe permitir ser cancelada de forma fácil por el usuario (caso de falsa detección o recuperación del paciente) o mediante la detección de movilidad (superación del bloqueo en el momento que se detecta movimiento).

2.1.2.10. Diagrama de actividades.

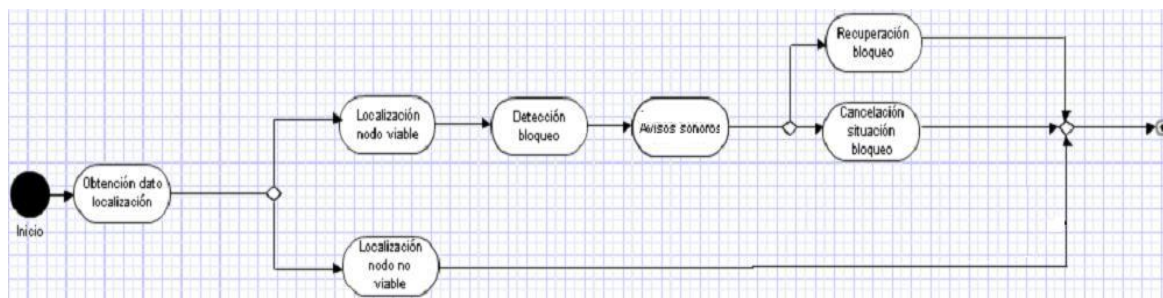


Figura 4.- Diagrama de actividades de la localización en interiores.

2.2. Requisitos no funcionales.

A continuación se definen los requisitos no funcionales del sistema de control de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil:

- Funcionamiento en dispositivos móviles.
- Interacción con el usuario mediante una interface simple.
- Interacción simple con equipamiento auxiliar para el intercambio de datos.

En capítulos posteriores describiremos estos requisitos no funcionales y su aplicación en el sistema de localización que aquí presentamos.

2.3. Clases de usuario y características.

Usuario.- El paciente debe conocer el manejo del dispositivo móvil y de la aplicación. Para que el proceso de asistencia en la movilidad del paciente tenga sentido es necesario que el paciente siempre porte el dispositivo móvil y esté encendido, con la aplicación activada. Debido a posibles problemas de aprendizaje de uso de dispositivos modernos para usuarios de las características de este tipo de pacientes, las interfaces hombre-máquina deben ser sencillas e intuitivas, como se describió en los apartados anteriores sobre los requisitos.

Técnico especialista.- Esta persona, o grupos de personas, se encargan de la configuración del software en función de la morfología de la vivienda, los puntos críticos donde se puede provocar los bloqueos, etc. En este sentido, se debe realizar un análisis previo del entorno para una correcta puesta en marcha del sistema. Debido a la pericia de estas personas no se requiere ningún requisito de sencillez de los procedimientos de configuración de los dispositivos y del software.

Dadas las cualidades de estos sistemas de asistencia a enfermos, estas personas deben tener conocimientos sobre las características de la enfermedad de Parkinson para una correcta configuración del sistema de detección de bloqueos.

2.4. Entorno operacional.

El sistema de control de posicionamiento y movilidad del paciente es un sistema de localización y seguimiento en interiores.

Está diseñado para ser utilizado en el domicilio de un paciente, utilizando un terminal móvil, smartphone, pda o similar, con capacidad wifi para comunicarse con los puntos de acceso, distribuidos por la casa, para determinar la posición del usuario.

Se requiere de un número suficiente de puntos de acceso, que depende de la extensión del domicilio donde reside el paciente, siendo recomendable como mínimo el uso de tres puntos de acceso, aunque a partir de un único punto de acceso el sistema debe poder operar. También puede ser determinante los materiales de construcción del piso y del número de señales wifi que se detectan en la casa con el fin de evitar las interferencias y las pérdidas de señal entre el terminal y los puntos de acceso. En esto sentido, supondremos que las comunicaciones wifi dentro de la vivienda son viables y dentro de los parámetros normales de esta tecnología, sin que tengamos previsto una alta tasa de interferencias para el tipo de señal inalámbrica ni de estructuras de construcción en el piso que influyan significativamente en el alcance normal de este formato de ondas. En caso de que estas alteraciones sean encontradas, se deberá aumentar el número de puntos de acceso a lo largo del domicilio con el fin de no encontrar puntos son cobertura wifi.

El domicilio se dividirá en un conjunto de puntos o nodos, siendo estos la unidad mínima de localización del usuario, no requiriéndose una localización continua en el espacio. La configuración de estos nodos (separación de las zonas del hogar) debe ser analizada en detalle ya que estos determinarán las posibles áreas donde es viable que se produzcan bloqueos (puertas, zonas de paso estrechas, cambios en el color/tipo del pavimento, etc.). Esta definición de nodos debe ser realizada por el equipo de desarrollo del producto y por los expertos en la enfermedad que supervisan el proyecto, los técnicos especialistas.

2.5. Restricciones de implementación.

Debido a los problemas que sufren estos pacientes, el uso de la aplicación debe ser muy sencillo y muy intuitivo. Las interfaces con éste deben tener pocos botones y menús, con tamaños de letra adecuados y con tonalidades de fondo de pantalla y letras fáciles de entender.

También, el sistema debe realizar todas las funciones sin depender del entorno físico donde viva el paciente (pisos de más de una altura, casas grandes, etc.).

Para ello, la definición del plano del domicilio no se realiza en base a un mapa gráfico, sino únicamente definiendo las zonas o nodos (habitaciones o parte de estas) que existen en la casa. Así, el sistema a través del terminal indicará el nodo donde se encuentra el paciente.

Este método permite de forma sencilla realizar una descripción de la vivienda del usuario mediante la definición de las zonas utilizando las coordenadas de su ubicación. Teniendo en cuenta esta forma de configuración del mapa del domicilio del paciente, el sistema debe ser capaz de localizar al usuario dando el nodo donde se encuentra.

El módulo de detección de bloqueos, tendrá prevista la recuperación del paciente ante los mismos, y deberá proveer los mecanismos necesarios para lograr este objetivo. Para ello tendrá que emitir avisos acústicos para indicar al usuario que se encuentra en estado de inmovilidad con la expectativa de que este continúe con el movimiento o que los acompañantes del paciente sepan que este se encuentra en un estado de incapacidad motriz para desplazarse.

Las principales restricciones del proyecto son:

- Precisión de la localización en interiores, alrededor de 4-5 metros, con un mínimo del 90% de aciertos.
- Tasa de refresco de datos de localización, en torno a los 3-5 segundos, garantizando el funcionamiento en tiempo real.

- Rendimiento fluido en dispositivos móviles con memoria igual o superior a 256 MB de RAM.

3. Estado del arte.

Antes de comenzar con el desarrollo del sistema de localización se ha realizado un análisis sobre el estado del arte relacionado con la localización en interiores, haciendo un primer estudio sobre las técnicas potencialmente más idóneas en esta área. En dicha exposición trataremos de contrastar las bondades de las mismas con los requerimientos y restricciones que se han definido para un sistema de estas características, además de verificar la adaptabilidad que ofrecen los métodos de localización en interiores a las aplicaciones relacionadas con un sistema AAL como el que forma parte nuestro subsistema.

Posteriormente estudiaremos diversos algoritmos de inferencia de la localización del dispositivo en el entorno a través de la información auxiliar que utilizan las diferentes técnicas de localización.

Por último analizaremos diversas aplicaciones que se han llevado a cabo por terceros para la gestión de la ubicación de individuos, estudiando sus características técnicas y funcionales.

3.1. Técnicas de localización en interiores.

Los requerimientos principales que debe tener un sistema de localización destinado a formar parte de un sistema AAL como el que integra nuestro subsistema son en primer lugar precisión y versatilidad, y en segundo lugar facilidad de implantación y aprovechamiento del hardware existente en dispositivos móviles actuales.

Uno de los problemas de la localización en interiores es el tipo de señal usado para la inferencia de la ubicación del terminal. Las señales usadas por las tecnologías de localización en el exterior son normalmente inadecuadas para interiores. Los sistemas que cuentan con el uso de señales de telecomunicaciones móviles carecen de una precisión necesaria para una adecuada situación del objeto dentro de edificios. Los denominados sistemas basados en GPS pueden lograr altas precisiones en exteriores, pero son ineficaces debido a que las señales que utiliza interfieren con los muros, suelos, mobiliario y otros objetos de interior.

Investigaciones sobre localización en interiores han identificado algunas posibles tecnologías. Una posible vía de actuación es instalar transmisores en los edificios para reproducir señales GPS. Desarrollos en esta área, de los denominados Pseudolite GPS², permiten alcanzar una elevada precisión pero requieren de un hardware adicional costoso. Una aproximación alternativa es la utilización de dispositivos de

² o “pseudo-satellite GPS”, son sistemas que simulan para entornos locales, mediante transmisores-receptores, un sistema basado en GPS.

radiofrecuencia, banda ultra ancha³ o bluetooth en el edificio, que permiten la localización mediante técnicas de triangulación. Una tercera aproximación es el uso de mapeo de señales wifi mediante el uso de puntos de acceso. Esta técnica es potencialmente interesante pues no necesita la instalación de transmisores adicionales ya que se pueden utilizar los puntos de acceso wifi cada vez más implantados en edificios e infraestructuras de interior. Aunque no requiere de grandes instalaciones de hardware, la construcción de un mapa de señales wifi a partir de la emisión de las transmisiones de los puntos de acceso puede requerir la descripción del entorno mediante la toma de un número elevado de mediciones que determinen dicho mapa.

Estas alternativas para la creación de sistemas de localización en interiores pueden ser viables, pero pueden presentar retos en la implementación y desarrollo que podrían hacerlos inapropiados para la aplicación sobre la ubicación de un paciente de Parkinson que tratamos de desarrollar.

En cuanto a las técnicas de localización a partir de la tipología de señales vistas en párrafos anteriores tenemos que distinguir dos métodos diferentes para implementar un sistema de posicionamiento: auto posicionamiento y posicionamiento remoto. Con un método de auto posicionamiento, la localización es determinada por el dispositivo del propio sujeto a posicionar a través de algunas de los tipos de señal vistos con anterioridad. La información de localización es conocida por el dispositivo móvil portado y puede ser usado para aplicaciones y/o servicios que pueden ser ejecutados dentro del mismo hardware. Con el método de posicionamiento remoto, la localización es determinada por un servidor externo mediante las señales que emite el dispositivo que porta el individuo. El posicionamiento puede ser usado para un sistema de seguimiento o transmitido de nuevo al dispositivo de usuario a través de un método de transferencia de información.

En los siguientes apartados se describen las diferentes técnicas de localización soportadas por la clasificación de señales analizadas y que se encuadran o pueden adaptarse a alguno de los dos métodos de control del posicionamiento. También se analizarán sus ventajas e inconvenientes y la idoneidad para el sistema de asistencia en la vida cotidiana que engloba nuestro control sobre el posicionamiento del paciente.

3.1.1. Localización mediante etiquetas RFID.

RFID, Radio Frequency IDentification, en español identificación por radiofrecuencia, consiste en la colocación a lo largo del entorno de etiquetas RFID. Cada una de las etiquetas posee un identificador único que puede ser leído por radiofrecuencia, de forma

³ Ultra Wide Band (UWB) en inglés, es un tecnología de radio que usa un ancho de banda mayor de 500 MHz o del 25% de la frecuencia central.

que al ser detectadas por un lector RFID puede inferirse la posición a partir de una base de datos de identificadores y posiciones.

Como se ha descrito este sistema tiene la necesidad de contar con un hardware específico, pudiendo necesitar un alto número de etiquetas en espacios grandes teniendo en cuenta además el corto alcance este tipo de señales, y un análisis pormenorizado de la implantación de las mismas. Además. La naturaleza de este método requiere de un sistema de procesamiento de datos al tratarse de un mecanismo de localización remota, por lo que es un sistema externo al dispositivo del paciente quien infiere la ubicación del mismo. A su vez, la mayoría de las etiquetas RFID carecen de interfaz de usuario por lo que no cumple con el requerimiento de información al usuario.

Como ventaja cuenta la sencillez del método y la baja intromisión del sistema en el usuario, quien únicamente debe portar una etiqueta, normalmente de pequeño tamaño y peso.

3.1.2. Localización mediante marcas visibles.

Este método no utiliza emisión de señales. Consiste en la utilización de marcas visibles en las paredes que puedan ser detectadas mediante una cámara y reconocidas por un sistema de visión artificial. Cada marca equivale a una posición específica almacenada en una base de datos.

Este método puede tener aplicaciones útiles, por ejemplo en sistemas robóticos, ya que cumple su objetivo con gran precisión al tratarse de marcas localizadas. Pero sin embargo cuenta con grandes inconvenientes teniendo en cuenta el propósito de un sistema de asistencia en el hogar como son la localización no pasiva, y añadiendo la complejidad del reconocimiento de marcas que no resulta trivial. Además existen problemas de funcionamiento si se intercalan objetos entre la cámara y las marcas.

Pero el mayor inconveniente encontrado es la intromisión del sistema en la actuación normal del paciente, ya que debería disponer de un dispositivo con cámara portado de manera que pudiera enfocar en todo momento las marcas visibles, algo que a priori es desaconsejable para el enfermo.

3.1.3. Localización mediante el cálculo del punto central a partir de nodos predefinidos.

Consiste en la creación de una base de datos de puntos predefinidos, que pueden ser antenas de telefonía, puntos de acceso wifi, dispositivos bluetooth, etc. Estos nodos tienen asociadas en la base de datos sus coordenadas reales.

De esta forma, el dispositivo móvil comprueba periódicamente cuántos de estos puntos es capaz de detectar, y a partir de los nodos detectados infiere su posición mediante el cálculo del punto central a todos ellos, también conocido como centroide o centro geométrico.

Este método no debe confundirse con el método de inferencia de la posición mediante la fuerza de la señal recibida para cada punto de acceso, que se comenta en los próximos apartados. La diferencia fundamental radica en que mediante este método no es necesaria la elaboración de mapas de radio, aunque la precisión disminuye de forma drástica.

Se pueden aplicar diversas mejoras sobre esta tecnología, tales como el uso de información estadística acerca del movimiento del dispositivo para calcular la posición en base a la probabilidad de que este se encuentre en un punto determinado.

Existen diversos proyectos que utilizan esta tecnología en conjunción con bases de datos de puntos de acceso obtenidos por war driving⁴ que permiten localizar un móvil con una precisión aceptable sin la necesidad de usar GPS, pero en este caso son aplicaciones para exteriores.

Esta tecnología no ofrece los resultados esperados en interiores de edificios por varios motivos. El principal es el hecho de que el mecanismo de inferencia se base solamente en la detección o no detección de un determinado punto de acceso limita en gran medida la precisión que es posible obtener. Esta puede ser suficiente para localizar un móvil en exteriores de manera aproximada, pero no para obtener una posición en el interior de un edificio.

Como ventajas de esta técnica se encuentran los requerimientos de hardware externo, ya que se trataría de puntos de acceso, ampliamente distribuidos, y de dispositivos móviles. Como inconvenientes a este método tenemos la precisión, que resulta insuficiente para interiores, su inestabilidad por los posibles cambios de configuración y la necesidad del reconocimiento previo de los nodos.

3.1.4. Localización mediante triangulación de la señal.

En este sentido, existen tres métodos de triangulación para sistemas basados en diferentes tipos de ondas de radio:

- Triangulación por tiempo de llegada (TOA, Time of Arrival): consiste en calcular el tiempo que tarda una onda desde que sale del dispositivo fuente hasta que llega al dispositivo destino. En base a dicha información, y utilizando al menos tres nodos fuente, se infiere la posición en que se encuentra el dispositivo móvil.
- Triangulación por diferencia de tiempos (TDOA, Time Difference of arrival): utiliza en este caso la diferencia entre los tiempos de llegada de una misma señal radioeléctrica a un conjunto de antenas receptoras. No es necesario en este caso

⁴ búsqueda de redes inalámbricas wifi desde un vehículo en movimiento.

conocer los tiempos de llegada; tan sólo basta con conocer la diferencia de dichos tiempos. Para ello partimos del principio que defiende que debido a la diferencia de distancias que existe entre las antenas respecto al punto de medición, los tiempos de retardo de las señales captadas por el terminal emisor son diversos. Para calcular dichas diferencias de tiempo, una de las técnicas aplicables consiste en medir las diferencias de fase de la señal en cada una de las antenas receptoras.

- Triangulación por intensidad de señal (RSS): consiste en calcular la fuerza de la señal que llega de al menos tres dispositivos fuente distintos. En base a dicha información, se infiere la posición del dispositivo.

Ninguno de estos métodos es aconsejable para uso con ondas wifi, ya que dichas ondas rebotan en el interior de un edificio, produciendo reflexiones y refracciones que alteran el tiempo de llegada y la intensidad de la señal. Además surge el problema de la propagación multitrayecto, ya que las ondas pueden llegar al dispositivo destino por múltiples caminos, produciendo tiempos de llegada y atenuaciones distintos.

Es posible aplicar estos métodos a las redes de telefonía, pero debido a la lejanía que hay entre las diferentes antenas de telefonía, la precisión que se conseguiría sería muy baja y en cualquier caso insuficiente para la localización en interiores.

Se han estudiado aplicaciones de estos métodos para ondas de baja frecuencia. Sin embargo, esto hace necesaria la disponibilidad de hardware externo específico, y resulta poco versátil e inadecuado para nuestra aplicación.

Por tanto este sistema puede conseguir buenas precisiones, pero con hardware especial no aplicable a nuestra utilidad, que lo haría altamente costoso.

3.1.5. Localización mediante sistemas inerciales.

Este método consiste en la utilización de sistemas inerciales tales como acelerómetros y giroscopios para el cálculo del movimiento relativo de un dispositivo móvil en el espacio. No necesitan de señales que permitan la inferencia de la localización, pero se debe aportar la localización inicial en el momento de comenzar el posicionamiento.

Para ello, se procesan todos los eventos de aceleración detectados por el sensor en cada uno de los ejes cartesianos (X, Y, Z). Es necesario eliminar el efecto de la gravedad en cada uno de los ejes para obtener las aceleraciones absolutas en cada instante. Para ello, se utiliza un filtro que se encarga de calcular la fuerza de la gravedad en cada eje y restarla a la aceleración detectada.

Una vez hecho esto, se integra la aceleración respecto al tiempo para obtener la velocidad, y se vuelve a integrar la velocidad con respecto al tiempo para obtener el desplazamiento. Este desplazamiento resultante es el desplazamiento relativo en ese

instante en cada uno de los ejes, que se añade a la información de posicionamiento inicial aportada al sistema.

Mediante el cálculo de los desplazamientos relativos, teóricamente, es posible obtener la posición de un móvil en cada instante. Sin embargo, en función de la precisión del acelerómetro se producirían mayores o menores errores entre cómputo y cómputo que determinarían el tiempo durante el cual el cálculo es fiable. A partir de cierto tiempo es necesario volver a aportar la posición para evitar grandes desfases.

Dependiendo de la calidad del hardware utilizado integrado en un dispositivo móvil, se pueden encontrar errores acumulados inasumibles, volviendo el sistema rápidamente inestable. Sin embargo, con acelerómetros de mayor precisión es posible obtener resultados aceptables mediante esta técnica, siempre y cuando sea combinada con otras técnicas de localización para poder corregir los errores acumulados.

3.1.6. Localización mediante detección de movimiento.

De nuevo este método no necesita de señales auxiliares para la determinación de la ubicación. Esta técnica consiste en detectar, mediante el uso de un acelerómetro, cuando la persona que porta el dispositivo está caminando, para posteriormente aplicar una velocidad de paso estándar en la dirección correcta.

Para ello, se mantiene una lista con las últimas N mediciones del acelerómetro, y se calcula su desviación estándar. Se trata de buscar una desviación estándar por encima de cierto umbral para detectar movimiento continuado.

Si la persona está en movimiento se producirán variaciones continuas en la aceleración que aumentarán la desviación estándar.

Una vez se ha detectado si la persona está o no caminando, se utiliza la brújula del dispositivo para calcular la dirección de la persona con respecto al norte magnético de la Tierra, y se aplica una velocidad de paso estándar en dicha dirección.

Esta técnica no debe confundirse con los sistemas inerciales descritos en la sección anterior. La diferencia radica en que la primera técnica trata de obtener los valores exactos de desplazamiento relativo por medio de la aceleración, mientras que esta técnica trata de aproximar el desplazamiento por medio de una velocidad estándar cuando se detecta que la persona está en movimiento.

De nuevo pueden seguir apareciendo errores acumulados tanto por la velocidad de paso aplicada, que no deja de ser una aproximación, como por los falsos positivos que pudieran darse al detectar el movimiento de la persona, por lo que sigue siendo necesario un método de localización auxiliar que permita resetear la posición cada cierto tiempo.

Además, dada la naturaleza de la aplicación que describimos, los pacientes con Parkinson sufren alteraciones motoras que impiden estimar la posición utilizando la velocidad estándar del paso, por lo que lo hace una técnica inviable para nuestro sistema.

3.1.7. Localización mediante mapas de radio wifi.

Este método consiste en la obtención, a partir de un proceso de captura de datos, de un mapa de radio (radiomap) de las ondas wifi de diferentes puntos de acceso en diferentes nodos previamente definidos. Este mapa de radio es utilizado posteriormente para inferir la posición del dispositivo mediante distintos tipos de algoritmos.

El primer paso consiste en obtener una lista de los puntos wifi que se utilizarán en la creación del mapa de radio. Estos pueden ser definidos por el SSID o por la dirección MAC de los mismos.

Una vez obtenida la lista de puntos wifi, se define una serie de nodos y se llevan a cabo capturas de datos en cada nodo. En estas capturas se guarda información de los niveles de señal (RSSI) de cada uno de los puntos de acceso en ese punto, obteniendo para cada punto de localización una huella o fingerprint con la que comparar las capturas en la localización posterior. La información obtenida en las capturas, es decir, todas las huellas del conjunto de puntos, conforma el mapa de radio.

Obtenido el mapa de radio, la posición del dispositivo se infiere mediante la captura de datos y búsqueda del nodo con mayor similitud. Esto puede hacerse con distintos tipos de algoritmos.

El mecanismo de entrenamiento asegura una buena precisión, y el hardware necesario (conexión wifi) está disponible en teléfonos móviles actuales. Sin embargo el método requiere de una captura previa de datos para la obtención de las huellas, que además pueden ser no aptas para cambios en los dispositivos o en la organización del entorno (transformaciones en el mobiliario, obras menores de la vivienda, etc.).

Para el desarrollo de nuestro sistema se ha utilizado una técnica basada en un mapa de radio mediante señales wifi, utilizando un esquema de auto posicionamiento, donde el dispositivo móvil obtendrá la información de los puntos de acceso e inferirá la posición del sujeto.

A continuación, se van a describir diversos sistemas de inferencia para la técnica de mapas de radio wifi.

3.2. Algoritmos de inferencia de la localización usando mapas de radio.

Un algoritmo de inferencia de la localización es un método que permite determinar la localización de un objeto mediante la información que tenemos sobre los elementos que intervienen en el entorno de la localización.

Los algoritmos de inferencia que se van a describir parten de la técnica de localización mediante mapas de radio wifi. Como se describió en el apartado anterior, esta técnica requiere de la descripción del entorno mediante la toma de muestras en los puntos de localización configurados para la detección del usuario, necesario para la creación de un mapa. Una vez el mapa está elaborado, el sistema utiliza esta información y la de la medición actual para determinar la ubicación del terminal mediante estrategias de comparación entre ambos datos.

3.2.1. Vecino más cercano.

Consiste en la búsqueda del nodo con máxima similitud a los datos del mapa en cada medición. Para ello se calcula la distancia euclídea de cada nodo con respecto a los datos obtenidos, y se devuelve el nodo cuya distancia es menor.

Distancia euclídea en un espacio bidimensional:

$$d_E(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.1)$$

Para un mapa diseñado a partir de M puntos de acceso obtenemos la distancia de un punto n cualquiera del mapa definido por las medidas de intensidad de la señal wifi (RSSI) en ese punto, y con la medición actual, definido por las intensidades de los puntos de acceso en ese momento:

$$d_E(P_n, P_a) = \sqrt{(RSSI_{ap_{1a}} - RSSI_{ap_{1n}})^2 + \dots + (RSSI_{ap_{Ma}} - RSSI_{ap_{Mn}})^2} \quad (3.2)$$

Donde P_n es el punto n-ésimo del mapa, P_a el punto actual de ubicación del terminal, $RSSI_{ap_{1n}} \dots RSSI_{ap_{Mn}}$ son las medidas de intensidad de los puntos de acceso 1 a M en el punto n-ésimo del mapa y $RSSI_{ap_{1a}} \dots RSSI_{ap_{Ma}}$ son las medidas de intensidad de los puntos de acceso 1 a M en el punto actual de localización.

Este algoritmo tiene la ventaja de ser muy simple y los resultados en diferentes trabajos previos han demostrado que se comporta realmente bien en el procesado de la inferencia de la posición. Sin embargo la precisión en la localización no supera el punto por habitación del domicilio por lo que no lo hace adecuado para la un sistema con el que presentamos.

3.2.2. Redes Neuronales.

Otro método empleado para la inferencia de la posición con respecto a los datos obtenidos son las redes neuronales. Se trata de utilizar la red para un problema de reconocimiento de patrones, que trasladado a nuestra aplicación se trataría de obtener el grado de similitud del conjunto de datos detectado con cada uno de los nodos del conjunto de entrenamiento. En este caso el primer paso necesario es definir el tipo y la arquitectura de la red. Un tipo de red válida para llevar a cabo el reconocimiento de patrones es la denominada red neuronal Perceptrón Multicapa, con propagación hacia atrás.

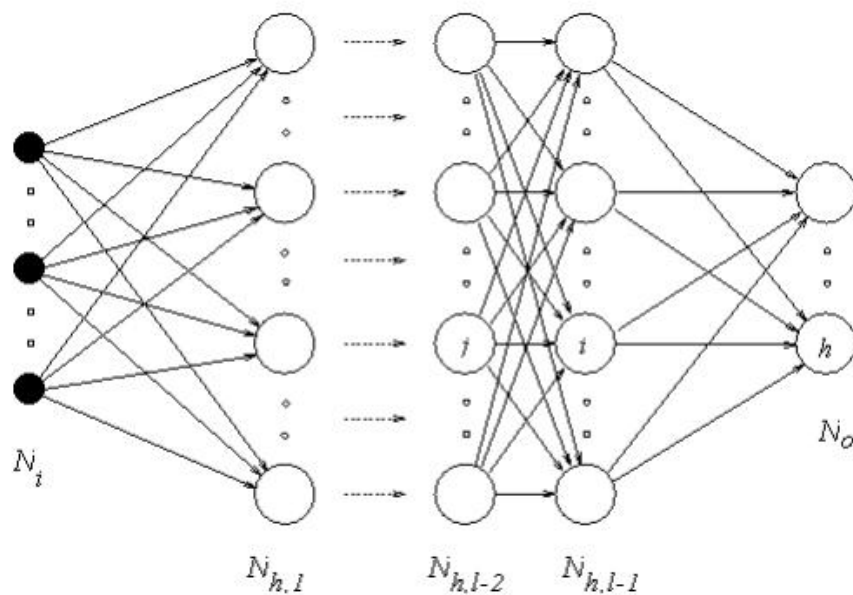


Figura 5.- Red neuronal

En estudios realizados con este tipo de redes y para un problema de localización en interiores se utilizó una codificación en código Gray para las entradas de la red y una salida para cada uno de los puntos de acceso empleados en la captura de datos, de forma que la salida para cada nodo se encontrará entre 0 y 1 en función de su similitud a los datos de entrada. La red analizada tiene las siguientes características:

- Capa de entrada: codificación de la información de la señal de cada punto de acceso en números binarios de 7 bits con posterior codificación de la información binaria en código Gray de 7 bits para evitar que pequeñas variaciones en la señal produzcan variaciones grandes en la codificación de la información. De aquí se obtienen las $N * 7$ neuronas de entrada en la red neuronal, donde N es el número de puntos de acceso fijados.
- Capa Oculta: Se ha utilizado una única capa oculta con un número de neuronas igual a 50.

- Capa de Salida: Hay una neurona de salida por cada uno de los nodos. El valor de salida se encuentra en el intervalo $[0,1]$ y corresponde al nivel de similitud entre los datos de entrada y los datos entrenados. Un valor de 0 equivale a ninguna similitud, y un valor de 1 similitud total.
- Entrenamiento mediante algoritmo de propagación hacia atrás.
- Función de transferencia: Sigmoid.
- Tasa de aprendizaje: fijado en 0.5.
- Condición de parada: Error en entrenamiento inferior a 0.01.

Antes de proceder al reconocimiento de patrones, para el caso que nos ocupa la localización del dispositivo, se necesita entrenar la red neuronal con los datos obtenidos para cada nodo o punto de localización. Una vez se alcanza un error en el entrenamiento por debajo de cierto umbral, condición de parada, la red queda entrenada y lista para recibir nuevos datos de entrada.

Una vez entrenada la red, esta puede utilizarse para la localización. Para ello, se crea un conjunto de entrada a partir de la información detectada y se introduce en la red. Para cada neurona de salida, se obtiene un valor en el intervalo $[0,1]$ correspondiente al nivel de similitud de la información con dicho punto en el mapa. Finalmente, se selecciona el nodo cuya similitud es mayor y se comprueba si está por encima de un umbral definido. En caso afirmativo, se devuelven las coordenadas de dicho nodo como localización actual del dispositivo.

Los resultados con este método dependen en gran medida de los parámetros de la red tales como la arquitectura y el número de neuronas utilizadas, aunque los resultados analizados en varios estudios revela que no se alcanzaron precisiones aceptables, aunque existen vías de mejora en cuanto a al uso de distintos tipos de configuración y tipos en las redes a utilizar.

3.2.3. Filtro Bayesiano para estimación de la localización.

Esta técnica para la estimación de la localización viene sustentada en el hecho de la incertidumbre que presentan los datos procedentes de sensores usados en la localización. Un filtro bayesiano representa una técnica estadística que pretende limar las imperfecciones que muestran los sistemas basados únicamente en los datos sensoriales de los dispositivos usados para un sistema de localización. El filtrado bayesiano se basa en el principio de que la mayoría de los eventos son dependientes y la probabilidad de que un evento ocurra en el futuro se puede deducir de las instancias anteriores de ese evento.

Los filtros bayesianos estiman probabilísticamente el estado de un sistema dinámico a partir de una secuencia de muestras con ruido recibidas a través de los sensores.

Aplicado a la estimación de la localización, el estado es la posición de una persona u objeto y los sensores proveen al sistema información sobre dicho estado. Este algoritmo representa el estado en un momento dado por variables aleatorias, al que les aplica una distribución aleatoria denominada *creencia*, que representa la incertidumbre sobre la localización estimada. El filtro de Bayes intenta estimar secuencialmente las *creencias* de cada estado condicionados por toda la información suministrada por los sensores. En términos generales, la *creencia* responde a la pregunta “¿Cuál es la probabilidad de que una persona u objeto estén en una localización *determinada* si contamos con todo el historial de mediciones realizadas por los sensores?”. En realidad, el cálculo de la denominada *creencia* crece exponencialmente a medida que transcurre el tiempo debido a que el historial de mediciones crece también en el tiempo. Por ello, los filtros bayesianos aplicados a localización asumen que el sistema dinámico es del tipo Markov, es decir, el estado en un momento dado contiene toda la información relevante, o dicho de otra manera, las mediciones de los sensores solo dependen de la posición actual del sujeto y el estado en un instante en el tiempo depende solo del estado anterior.

En diversos estudios se analizan diferentes representaciones de los filtros bayesianos en la localización en interiores, como los filtros de Kalman, Multihypothesis Tracking (MHT), aproximación basado en rejilla, aproximación topológica y el filtro de partículas.

En capítulos posteriores analizaremos la técnica de la estimación de la localización mediante los filtros de Bayes como método usado por nuestro sistema de control de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil.

3.3. Análisis de Proyectos de Localización.

La localización de un dispositivo móvil dentro de un edificio sirve como base o complemento para multitud de aplicaciones. Sin embargo, encontrar la solución a este problema no es en absoluto trivial, ya que en la localización en interiores no es posible utilizar sistemas GPS, de gran exactitud y al alcance de todos, y los requerimientos en cuanto a precisión son importantes, debido a las reducidas dimensiones que pueden tener los entornos de uso.

Antes de desarrollar un sistema de localización en interiores de edificios hemos decidido contrastar los proyectos o sistemas existentes de localización desarrollados por diversas empresas y universidades con el fin de analizar su adecuación a nuestro proyecto, y las características principales que los harían competidores de nuestro desarrollo.

En las siguientes secciones se describen los diferentes proyectos que se han analizado: PlaceLab, Ekahau RTLS, Indoor Navigation System for Handheld Devices y Look!, enumerando finalmente las conclusiones del estudio.

3.3.1. PlaceLab.

PlaceLab es un proyecto Open Source desarrollado por Intel Research con el objetivo de crear un sistema de geolocalización basado en la técnica conocida como “cálculo del punto central a partir de nodos predefinidos” descrita con anterioridad. La documentación del proyecto reza que dicha técnica es válida tanto para exteriores como para interiores de edificios. Para ello se vale de fuentes de ondas de radiofrecuencia que pueden ser de tres tipos distintos:

- Puntos de acceso wifi.
- Dispositivos Bluetooth.
- Antenas de radio GSM.

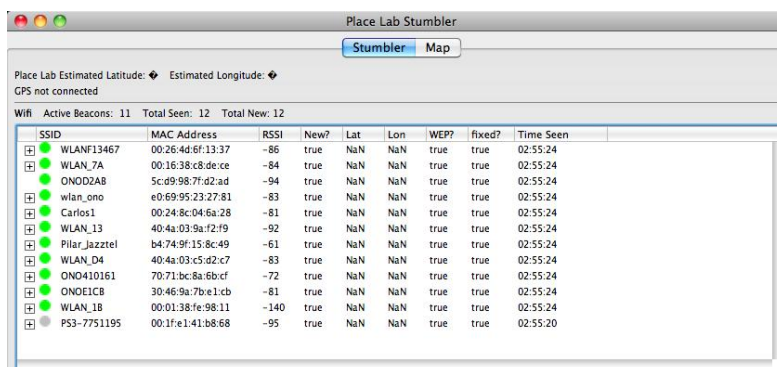
De esta forma, la información recibida en un momento dado se contrasta con bases de nodos fuente de ondas, conocidos como balizas, y sus coordenadas. Se trata de buscar qué ondas se reciben en cada momento, dónde se encuentran sus fuentes y a partir de esta información calcular el punto central de todas ellas.

En los siguientes apartados se describen las principales características que conforman la aplicación.

3.3.1.1. División del sistema en módulos.

La localización mediante esta técnica se basa en contrastar las ondas detectadas en un momento dado con bases de datos previamente elaboradas de nodos fuente y coordenadas asociadas. Es necesario elaborar en primer lugar dichas bases de datos.

En el caso de PlaceLab, se utilizan bases de datos ya existentes y de acceso público provenientes de páginas de war driving, y también utilizan su propia base de datos. Para ello, se utiliza una base de datos local como caché que se sincroniza con dichas bases de datos de forma periódica. Además, el software provee un módulo conocido como Stumbler que, conectada a un GPS, es capaz de capturar nuevos nodos y añadirlos a la base de datos caché para su posterior sincronización.



The screenshot shows the 'Place Lab Stumbler' application window. At the top, there are 'Stumbler' and 'Map' buttons. Below them, it displays 'Place Lab Estimated Latitude: ♦ Estimated Longitude: ♦' and 'GPS not connected'. A summary bar indicates 'WiFi Active Beacons: 11 Total Seen: 12 Total New: 12'. The main part of the window is a table with the following columns: SSID, MAC Address, RSSI, New?, Lat, Lon, WEP?, fixed?, and Time Seen. The table contains 11 rows of data for various Wi-Fi networks.

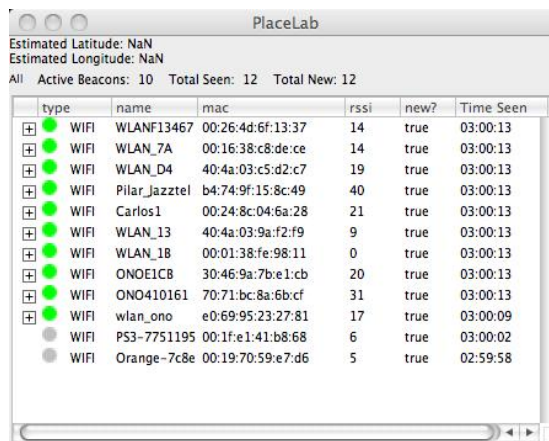
SSID	MAC Address	RSSI	New?	Lat	Lon	WEP?	fixed?	Time Seen
WLAN13467	00:26:4d:6f:13:37	-86	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
WLAN_7A	00:16:38:c8:de:ce	-84	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
ONOD2AB	5c:d9:98:7f:d2:ad	-94	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
wlan_ono	e0:69:95:23:27:81	-83	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
Carlos1	00:24:8c:04:6a:28	-81	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
WLAN_13	40:4a:03:9a:f2:f9	-92	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
Pilar_Jazztel	b4:74:9f:15:8c:49	-61	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
WLAN_D4	40:4a:03:c5:d2:c7	-83	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
ON0410161	70:71:bc:8a:6b:cf	-72	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
ON0E1CB	30:46:9a:7b:e1:cb	-81	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
WLAN_1B	00:01:38:fe:98:11	-140	true	NaN	NaN	true	true	02:55:24
P53-7751195	00:1fe:141:b8:68	-95	true	NaN	NaN	true	true	02:55:20

Figura 6.- Módulo Stumbler de PlaceLab.

El módulo Tracker es la parte encargada de estimar una localización del dispositivo en base a las balizas detectadas en un momento dado. Existen distintos métodos para hacerlo y además dicha funcionalidad es extensible, permitiendo añadir métodos propios a los ya existentes. Por defecto, Placelab incluye los siguientes métodos:

- Centroid: Consiste en la búsqueda del punto central de las balizas detectadas.
- Filtro de partículas: Se utiliza un filtro de partículas para modelar el movimiento del dispositivo y aplicar modelos estadísticos para predecir la posición en base a dicha información.

La herramienta Tracker utiliza alguno de estos métodos para la estimación de la posición en cada instante. Para ello en primer lugar captura la información de las ondas de radio en cada instante y procesa la posición en base al algoritmo seleccionado.



The screenshot shows the Placelab Tracker application window. At the top, it displays 'Estimated Latitude: NaN' and 'Estimated Longitude: NaN'. Below that, it shows 'All Active Beacons: 10 Total Seen: 12 Total New: 12'. The main part of the window is a table with the following columns: type, name, mac, rssi, new?, and Time Seen. The table contains 10 rows of data, each representing a detected WiFi beacon.

type	name	mac	rssi	new?	Time Seen
WIFI	WLANF13467	00:26:4d:6f:13:37	14	true	03:00:13
WIFI	WLAN_7A	00:16:38:c8:de:ce	14	true	03:00:13
WIFI	WLAN_D4	40:4a:03:c5:d2:c7	19	true	03:00:13
WIFI	Pilar_jazztel	b4:74:9f:15:8c:49	40	true	03:00:13
WIFI	Carlos1	00:24:8c:04:6a:28	21	true	03:00:13
WIFI	WLAN_13	40:4a:03:9a:f2:f9	9	true	03:00:13
WIFI	WLAN_18	00:01:38:fe:98:11	0	true	03:00:13
WIFI	ONOEICB	30:46:9a:7b:e1:cb	20	true	03:00:13
WIFI	ONO410161	70:71:bc:8a:6b:cf	31	true	03:00:13
WIFI	wlan_ono	e0:69:95:23:27:81	17	true	03:00:09
WIFI	PS3-7751195	00:1f:e1:41:b8:68	6	true	03:00:02
WIFI	Orange-7c8e	00:19:70:59:e7:d6	5	true	02:59:58

Figura 7.- Módulo Tracker de Placelab.

3.3.1.2. Análisis.

Esta herramienta de localización por wifi no ha tenido continuidad por parte de los responsables del grupo de investigación que la desarrollaba. Existen dificultades que se describen en relación con el estancamiento del proyecto y que repercuten en la funcionalidad de este sistema, como el de la base de datos, actualmente desfasada sobre los puntos de acceso para la detección en exteriores, necesitando la introducción manual de los datos de los puntos wifi y las coordenadas correspondientes para el uso que necesitamos. Además requiere hardware adicional, en concreto GPS, no siempre disponible en los móviles o tabletas disponibles, para la función de captura de nodos.

Se han realizado diversas pruebas por diferentes grupos de investigación con hasta cuatro routers wifi colocados a lo largo de un edificio para comprobar la precisión que es capaz de obtener. Cabe destacar que mediante este software de localización la posición de los puntos de acceso es relevante, ya que la localización resultante del terminal se determina a través de las posiciones de cada uno de los routers definidos. Para la prueba del sistema, utilizando el algoritmo de *cálculo de la posición central a*

los nodos, no consiguió resultados satisfactorios, ya que la precisión obtenida fue muy baja.

En cuanto a los algoritmos definidos en la aplicación PlaceLab, el utilizado para la prueba no tiene en cuenta la intensidad de señal recibida por cada red, por lo que es un procedimiento que no tiene en cuenta las características físicas de las señales y por tanto no se explotan las particularidades de las emisiones wifi. Por otra parte, sistemas como el filtro de partículas, que a priori prometen resultados óptimos en la localización en interiores, puede presentar problemas de rendimiento si no se controla la cantidad de datos necesarios para determinar la posición actual.

En las conclusiones obtenidas sobre este sistema destaca la dificultad de uso debido a su discontinuidad. Se presenta como un sistema que puede resultar útil para obtener una localización aproximada en exteriores en situaciones en las que se carece de un sistema de posicionamiento GPS, pero el punto de vista desde el que aborda el problema lo hace inadecuado para interiores. Aún con todo, el análisis de este proyecto nos proporciona un primer acercamiento a los filtros bayesianos para la estimación en la localización y alberga unas expectativas óptimas en cuanto al desarrollo de un sistema que utilice dichas técnicas estadísticas.

3.3.2. Ekahau Real Time Location System (RTLS).

Ekahau es de una empresa que ofrece soluciones avanzadas de localización en interiores mediante sistemas wifi. RTLS es una aplicación comercial que usa cualquier red wifi para localización además de otras utilidades, de ahí que no necesite infraestructura extra para ser instalado, por lo que el coste se reduce a la aplicación y a los etiquetas con servicios wifi que sirven como terminal para la persona u objeto a localizar.

Al ser un sistema comercial no tenemos acceso al mismo, pero el fabricante garantiza una alta precisión en la localización, permitiendo determinar el emplazamiento de sus sistemas a nivel de cama en aplicaciones específicas de interiores para hospitales.

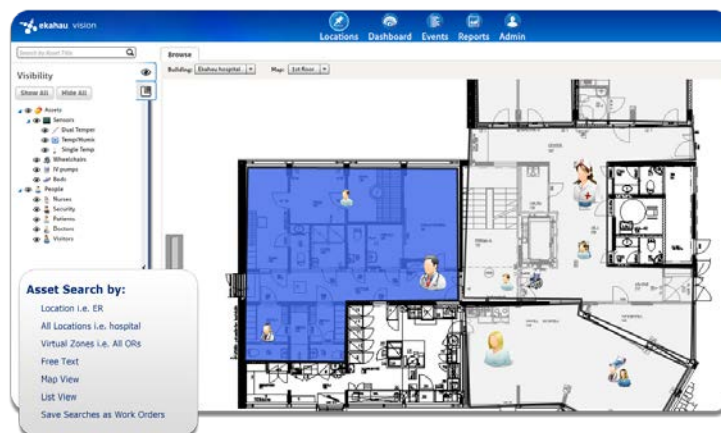


Figura 8.- Interfaz Ekahau RTLS.

Entre las características expuestas en las especificaciones aparecen:

- Plataforma de localización abierta para redes estándar, no dependiente del fabricante de los puntos de acceso wifi.
- Facilidad de implantación y facilidad de uso, por la instalación con redes preexistentes y sin necesidad de cableado extra, además de uso de terminales de fácil utilización.
- Gran precisión de localización, imbatible según el propietario, gracias al uso de algoritmos matemáticos probabilísticos de seguimiento de la localización de alta eficacia. Consigue entre uno y tres metros y cien por cien de aciertos en la planta y habitación donde se sitúa el sujeto.

Atendiendo a esta información, un sistema como el que se pretende presentar en este proyecto debe tener en cuenta estas especificaciones para ser asumidas como objetivo. En cuanto a la plataforma abierta para la utilización de cualquier red, el hecho de usar un dispositivo móvil con conexión wifi estándar asegura que se podrá usar en conjunción con cualquier punto de acceso del mercado, y de la misma forma, la implantación y facilidad de uso son requisitos inherentes a nuestro sistema, ya que se pretende un sistema de bajo coste, con la posibilidad de uso de las redes wifi preinstaladas en el entorno de uso, y con una interfaz de fácil uso por las características de los pacientes que portarán los dispositivos. En cuanto a la precisión, se desprende que este sistema puede utilizar métodos estadísticos como lo que ya hemos comentado, por lo que se tendrá en cuenta esta precisión para corroborar la bondad de nuestro sistema.

3.3.3. Indoor Navigation System for Handheld Devices.

Este proyecto, perteneciente al Worcester Polytechnic Institute de Massachusetts, tiene como principal objetivo facilitar la navegación en interiores para personas con discapacidad psíquica, permitiendo a la persona que porta un dispositivo ser guiado a través de diferentes rutas para llegar a un destino definido.

Como parte del sistema de navegación, el aplicativo necesita de un sub proceso de localización basado en mapas de radio, que fue explicado en secciones anteriores. Además, se conjuga esta técnica con un sistema inercial de navegación. Un sistema de navegación inercial es un sistema de ayuda a la navegación que usa sensores de movimiento (acelerómetros) y sensores de rotación (giroscopios) para calcular continuamente mediante estimación la posición, orientación, y velocidad de un objeto en movimiento.

El posicionamiento mediante wifi con la técnica vista de mapas de radio y el sistema de navegación inercial utilizan diferentes tipos de información para determinar la localización del usuario. El sistema de localización wifi aporta la probabilidad de estar

presente en cada una de las localizaciones del edificio, mientras que el sistema inercial ofrece una estimación de la distancia hacia la que se desplaza el sujeto entre cada muestra wifi tomada por el dispositivo. Una vez se conocen estos dos datos, se combinan para determinar la localización final del usuario.

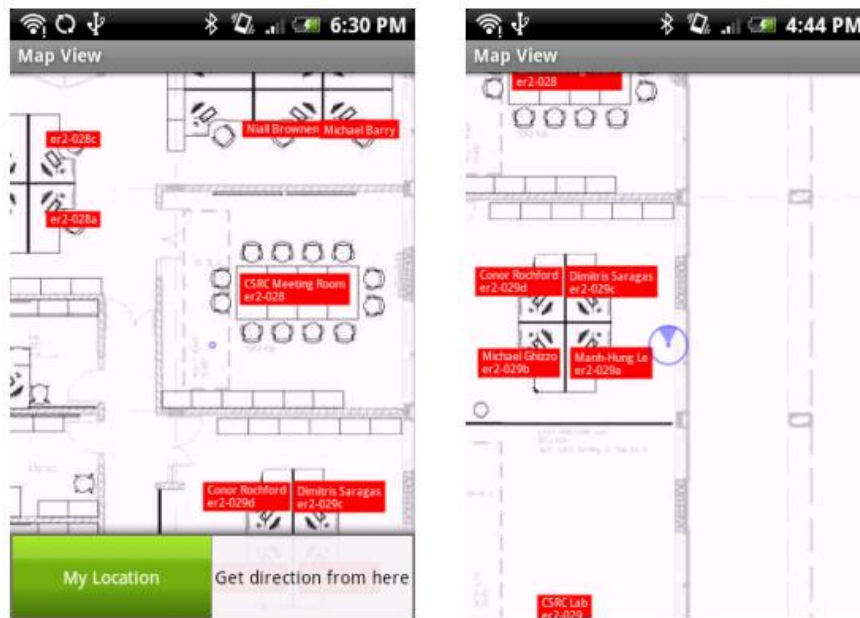


Figura 9.- Interfaz del Indoor Navigation System for Handheld Devices.

Como novedad en el diseño aparece la creación automática de un mapa de radio mediante procesado de mapas por ray tracing. El denominado modelo de propagación por ray tracing permite la generación de un mapa de intensidades de la señal sin necesidad de un estudio de los RSSI de cada punto de acceso mediante técnicas de entrenamiento. Así, este modelado utiliza un sistema de estimación de la propagación de la señal wifi de diferentes puntos de acceso dentro de un edificio.

Mediante la introducción de las características físicas del edificio (muros, tabiques, paredes, etc.) expresado por sus coordenadas $((X1, Y1), (X2, Y2), \text{etc.})$ y el nivel de atenuación que producen en la señal, y la localización de los puntos de acceso (coordenadas (X, Y)), potencia medida a un metro de distancia y direcciones MAC de estos, se genera un mapa con las intensidades calculadas en cada punto, que sirve de referencia para el uso de la técnica mediante mapas de radio.

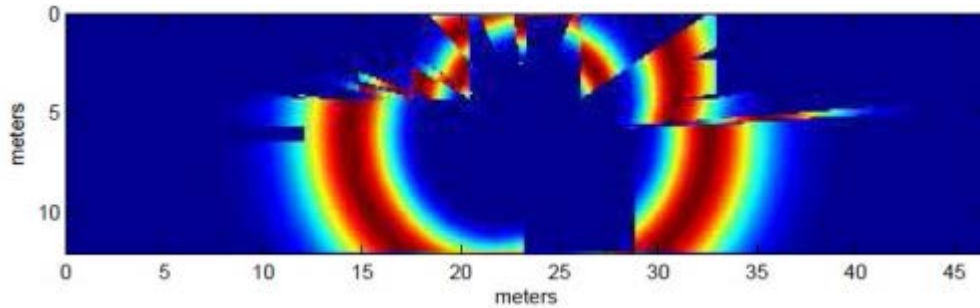


Figura 10.- Ejemplo de mapa de radio.

El proyecto está formado por tanto por dos componentes principales:

- Una serie de librerías para el procesado y obtención de los mapas de radio.
- Una aplicación para Android que implementa la localización en función de los mapas de radio, mediante los métodos wifi, y el sistema de navegación inercial que complementa la localización.

3.3.4. Framework Look!

El objetivo del proyecto Look!, de la Universidad Complutense de Madrid, es crear un framework de realidad aumentada. Este proyecto, además de los problemas relacionados con la realidad aumentada, como la representación gráfica o la interacción con objetos virtuales, aborda como principales el problema de la localización en interiores. La localización en interiores resulta imprescindible para el tipo de aplicaciones de realidad aumentada que presenta este proyecto, ya que debe proporcionar información adicional dentro de edificios para la finalidad deseada.

El sistema desarrollado por Look! para la localización, se basa en la combinación de una técnica primaria de localización mediante wifi y una técnica secundaria de localización mediante un sistema de navegación inercial, similar al proyecto *Indoor Navigation System for Handheld Devices*.

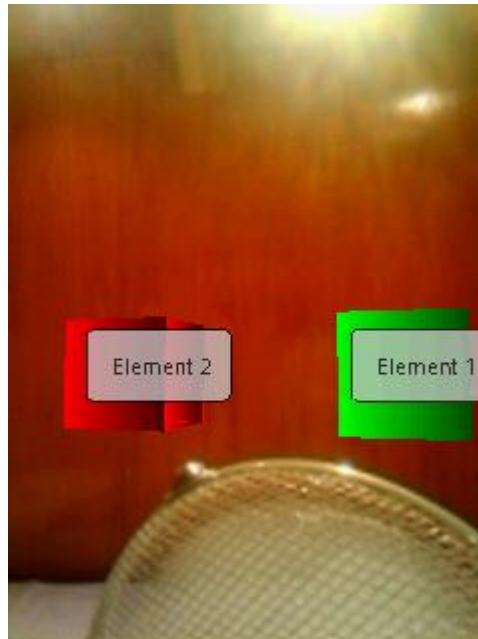


Figura 11.- Ejemplo en Look! de realidad aumentada.

El módulo de localización por wifi utiliza un sistema de mapas de radio que se utiliza para la comparación de las intensidades de la red wifi para la ubicación del dispositivo de realidad aumentada. Funciona mediante dos tipos de algoritmos de inferencia. El primero es el algoritmo de vecino más cercano, y el segundo mediante una red neuronal. Ambos mecanismos fueron analizados en capítulos anteriores. Ambas técnicas son suplementarias, y se debe optar por una de ellas en el momento de la configuración del sistema.

El mapa de radio es determinado manualmente en una fase previa al modo operacional, proporcionando las huellas para la utilización con los algoritmos.

El subsistema de navegación inercial que se utiliza en el módulo de localización se sustenta en la utilización de acelerómetros para el desarrollo de un sistema de posicionamiento en interiores. Su objetivo es estimar el movimiento relativo del dispositivo en base a una posición de partida, que es determinada por el subsistema de localización por wifi.

Los resultados obtenidos en la localización de interiores para la siguiente configuración espacial se registran en la siguiente tabla, que muestra el porcentaje de aciertos en la localización del dispositivo de realidad virtual con la precisión a nivel de habitación.

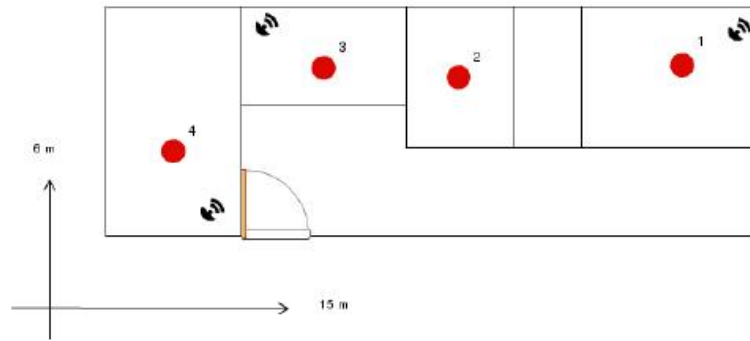


Figura 12.- Distribución espacial en Look!

Algoritmo	% Habitación	% Baño	% Cocina	% Salón
Closest Neighbor	100 %	0 %	100 %	100 %
Red Neuronal	90 %	30 %	30 %	30 %

Figura 13.- Tasa de aciertos en la localización con Look!

Donde ● es el nodo o punto de detección para una habitación dada, y 📶 determina la ubicación de los puntos wifi utilizados.

3.4. Sistemas operativos.

Para el desarrollo de software de localización en interiores y su operatividad, se ha propuesto el uso de dispositivos móviles. El usuario de nuestro sistema debe utilizar un terminal de reducidas dimensiones, con capacidad de usar tecnologías de localización (wifi, bluetooth, IF, RFID, etc.) y facilidad para mostrar una interfaz sencilla, permitiendo el uso elementos comunes y conocidos (como ventanas, botones, cajas de texto, etc.).

Como se comentó anteriormente, se utilizará un sistema de localización por wifi, por lo que se puede reducir la catalogación de dispositivos a smartphones o teléfonos inteligentes y pequeñas tabletas, o tabletas. Por su comercialización, se pueden clasificar en función del sistema operativo que usan. Los smartphones y tabletas de altas prestaciones se encuentran dominados actualmente por dos sistemas operativos mayoritarios:

- iOS: Se encuentra en los smartphones y tabletas fabricados por Apple (iPhone, iPad, iPad mini). De naturaleza cerrada, sus aplicaciones deben de ser aprobadas por Apple y están sometidas a un conjunto de normas más o menos estricto.

- Android: De naturaleza más abierta, basado en software libre y desarrollado por Google pero disponible en smartphones de diversos fabricantes (HTC, Motorola, Samsung, etc.)

En las siguientes secciones se explican los principales sistemas operativos considerados para la implementación del sistema, sus características, ventajas y desventajas.

3.4.1. Android.

Android es un sistema operativo de código abierto basado en Linux diseñado para dispositivos móviles, como smartphones o tablets, desarrollado por Google.

Como muestra la figura, el crecimiento de Android ha sido exponencial en los últimos años. Esto es relevante, debido a que desarrollar para dicho sistema supone hoy en día llegar a millones de usuarios de dispositivos móviles de diferentes fabricantes en todo el mundo, y da una muestra de que esta tendencia se encuentra lejos de revertirse en un futuro cercano. Esto lo convierte en una plataforma muy atractiva para el desarrollo de nuevas aplicaciones móviles.

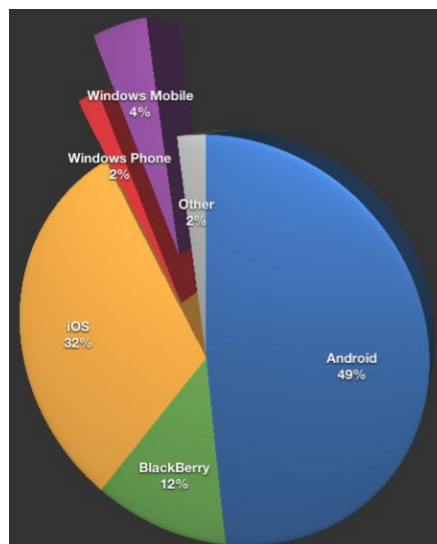


Figura 14.- Expansión de android.

3.4.2. iOS.

iOS es un sistema operativo móvil, cerrado, de Apple utilizado por sus productos, como el iPhone, el iPod Touch y el iPad.

Es un sistema maduro que permite la programación de aplicaciones en Objective-C, un lenguaje de programación orientado a objetos creado como super conjunto de C, pero que implementa un modelo de objetos parecido al de Smalltalk.

Para el desarrollo, se utiliza el iOS SDK, que puede ser obtenido de manera gratuita tras registrarse como desarrollador de la plataforma. El desarrollo para iOS debe realizarse desde el sistema operativo Mac.

3.5. Conclusiones.

Una vez hemos realizado un análisis de las diferentes técnicas de localización en interiores, algoritmos de inferencia y los proyectos/herramientas desarrolladas para tal fin, vamos a describir nuestro sistema en base a las características escogidas para llevar a cabo nuestro proyecto.

Debido a la sencillez de implementación de la técnica de mapas de radio y vistas las ventajas en cuanto a precisión, fiabilidad y potencial que se han descrito a lo largo del capítulo, es la opción elegida para sustentar nuestro sistema de posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil. Este método requiere de dos fases:

- Generación del mapa de radio del entorno operacional.
- Estimación de la localización del sujeto u objeto.

Para el desarrollo de la primera fase nos hemos decantado por un mapeo manual, realizando las mediciones necesarias para la determinación de las intensidades de señal wifi de cada uno de los puntos de acceso que conformarán nuestra red inalámbrica. Aunque hemos analizado la posibilidad de realizar un modelado del mapa mediante una técnica de ray tracing, nos vamos a centrar en la definición manual del mapa ya que consideramos que reflejará más fielmente el entorno. También, porque la aplicación está pensada para el seguimiento de pacientes en un domicilio, por tanto de dimensiones reducidas en comparación con las aplicaciones estudiadas que pueden llegar a alcanzar el nivel de edificio.

Para la implementación de la segunda fase, de estimación, y analizados los tres algoritmos de inferencia para el mapa de radio descrito en esta memoria, hemos seleccionado el filtro bayesiano, primero, por su teórico potencial en cuanto a la precisión alcanzable en un sistema con este método y segundo, por su innovador planteamiento, que pone de manifiesto el auge de los desarrollos estadísticos para la resolución de una amplia gama de problemas.

En cuanto al sistema operativo para el desarrollo y operación de nuestra aplicación, y una vez analizadas las dos plataformas de mayor difusión en el mercado, la tecnología escogida para llevar a cabo el proyecto es android, por las siguientes razones:

- Java: El desarrollo de aplicaciones es basado en el lenguaje Java, que permite un entorno de desarrollo libre sobre un sistema operativo cualquiera. Además se trata de un lenguaje muy popular y muy difundido entre los programadores, con amplia documentación y con gran soporte.

- Sistema abierto: Android es un framework de código abierto, lo que permitiría todo tipo de experimentación necesaria con elementos no ofrecidos a priori por el SDK.
- Plataforma en expansión: Aunque iOS lleva más tiempo en el mercado, android está sufriendo un crecimiento exponencial en la actualidad, lo que amplía enormemente las expectativas de desarrollo de nuevas funcionalidades.
- Acceso a dispositivos de prueba y de funcionamiento: Tanto los desarrolladores como los usuarios finales tienen a su disposición una gran variedad de dispositivos que utilizan android, de diferentes marcas y gamas, y con una variedad de precios que permite una mayor accesibilidad a los productos con este sistema operativo, a diferencia de los terminales con iOS, exclusivo de la marca Apple, de gama alta y a precios elevados.

4. Arquitectura

Este sistema se englobará dentro de un sistema para la Asistencia en la Vida Cotidiana dirigida por el Entorno, Ambient Assisted Living (AAL), que entre los requisitos globales contempla la localización del paciente en el entorno y la supervisión y guía de este cuando se mueve por el domicilio.

El sistema de asistencia tiene como objetivo monitorizar, supervisar y controlar las acciones de un paciente con la enfermedad de Parkinson para mejorar la calidad de vida el usuario en el domicilio donde reside, y se divide en una serie de módulos que ofrecen funcionalidad diversa al sistema. Este sistema cumple además con los requisitos de un sistema de computación ubicua, *pervasive computing*, entendida como la integración de los sistemas informáticos en el entorno de la persona, de forma que los ordenadores no se perciban como objetos diferenciados y ayuden en las acciones que se llevan a cabo cotidianamente.

Como parte de este sistema de asistencia en el hogar, el software de control de posicionamiento y movilidad del paciente es una pieza importante para el beneficio de los usuarios que sufren la enfermedad de Parkinson.

Se ha partido del código del framework Look!, con licencia GPLv3, desarrollado para android y que tiene un módulo de localización para wifi. Aunque el framework Look! ha sido desarrollado para generar una librería útil en la implementación de sistemas de realidad aumentada, la modularidad del diseño ha permitido partir del código del módulo de localización por wifi.

4.1. Arquitectura global.

El sistema de control de posicionamiento y movilidad queda por tanto englobado dentro de un sistema de mayor nivel que requiere de los resultados del mismo para dar información a otros sub sistemas que necesiten la localización del paciente como punto de partida o como información auxiliar para su funcionamiento.

De esta manera, el sistema global en relación al módulo de localización presentado puede describirse sencillamente como se muestra en la figura siguiente.

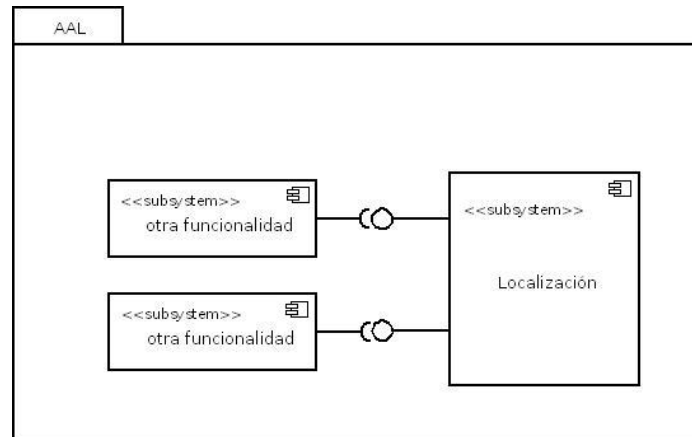


Figura 15.- Arquitectura global del sistema AAL.

La salida que ofrece el módulo de localización es la situación del paciente mediante sus coordenadas bidimensionales (X, Y).

En cuanto a las entradas del sistema de localización, se tratan de señales wifi para la medición de las intensidades de alcance al dispositivo a través de un entramado de red wifi. Los puntos de acceso necesarios para esta condición pueden proveer al sistema global de otro tipo de funcionalidad, como comunicaciones interiores con otros dispositivos o comunicaciones externas con otros sistemas (sistemas de monitorización médica, conexiones a internet, etc.).

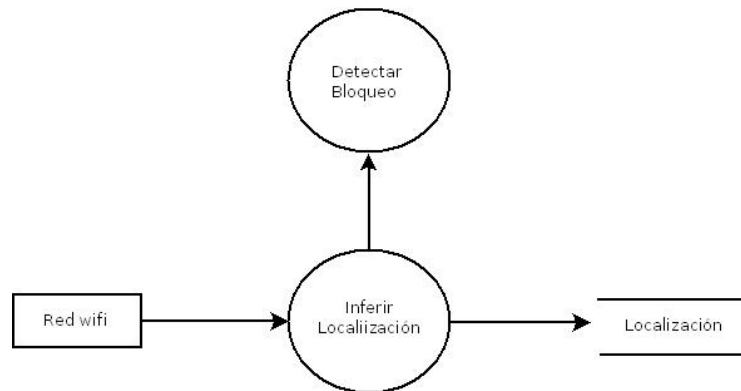


Figura 16.- Diagrama de flujo de datos del sistema de localización.

4.2. Arquitectura del sistema.

4.2.1. Arquitectura física.

El sub sistema de localización final estará compuesto por un dispositivo móvil con sistema operativo android y conectividad wifi, que albergará la aplicación de control de posicionamiento y movilidad, y un conjunto de puntos de acceso wifi que dotarán al sub sistema de la información sensorial necesaria para la determinación de la localización del usuario dentro del entorno operacional.

Este dispositivo electrónico puede ser genérico, sin dependencia de marca o modelo, y preferiblemente de formato compacto, tamaño smartphone, debido a la necesidad de ser transportado en todo momento por el paciente. Este hardware debe contemplar las siguientes características:

- Conectividad wifi.- para la comunicación con los puntos de acceso para la fase de localización.
- Sistema operativo.- el sistema operativo del dispositivo es android.
- Táctil.- por sencillez en su uso y para facilitar las interfaces, el dispositivo debe tener una pantalla táctil, preferiblemente de tamaño considerable para una mejor usabilidad. En la gama actual de móviles en el mercado, los smartphones con android cuentan en su totalidad de pantallas táctiles.
- Memoria.- con un mínimo de 256 Mb.
- Tamaño.- preferiblemente tamaño de teléfono móvil o smartphone, aunque puede ser tamaño tableta.

La localización del dispositivo se realiza mediante la comunicación del smartphone y los puntos de acceso utilizados. Los requisitos de posicionamiento por wifi necesitan de un número de puntos de acceso que determinarán el mapa de radio que se utilizará para la determinación del posicionamiento. El sistema puede contar desde uno hasta un número indefinido de puntos de acceso, pero para que el sistema produzca unos mapas completos e inequívocos se deberá usar una configuración que permita contrastar diferentes mediciones de diferentes puntos de acceso para eliminar las ambigüedades dadas en los puntos de localización. A priori, cuantos más puntos de acceso mayor exactitud de los mapas pero mayor coste computacional por el desarrollo de los algoritmos de inferencia. Las características básicas de estos puntos de acceso son:

- Tipo de normativa.- La señal wifi debe ser compatible con la señal del dispositivo. Por convenio usaremos la norma 802.11g, específica de la zona geográfica europea y casi compatible con la gran mayoría de los dispositivos telefónicos y puntos de acceso del mercado.
- Características comunes.- el resto de características de los puntos de acceso son comunes a la práctica totalidad de los dispositivos del mercado.



Figura 17.- Esquema de la arquitectura física.

4.2.2. Arquitectura de software.

Como se ha mencionado, el módulo de localización provee dos funciones principales:

La primera de ellas es la localización del paciente en el entorno. Mediante el uso de redes inalámbricas y mecanismos de cálculo estadístico, el paciente es localizado en alguno de los puntos del domicilio. Esta función es la base de nuestro sistema y es una parte importante del sistema global de asistencia al paciente, ya que con la información sobre la posición del sujeto otras funcionalidades del sistema podrán actuar conforme a este dato.

La segunda es la detección de bloqueos del paciente causadas por los síntomas que presenta la enfermedad. Es habitual en los pacientes de Parkinson sufrir episodios de acinesia, ocasionando una falta, pérdida o cesación en el movimiento. Normalmente estos sucesos ocurren cuando los pacientes atraviesan lugares estrechos, atraviesan puertas o tienen que cruzar a través de una línea marcada en el suelo o un cambio en los acabados de este. El sistema es capaz de detectar estos bloqueos, evitando las falsas detecciones como permanecer en una silla o en una zona donde es posible que el individuo se mantenga estático por un tiempo determinado.

Junto con la detección se habilitan estrategias de recuperación en el movimiento del paciente, como son la emisión de sonidos a través del dispositivo que puede conseguir la reanudación de la marcha de la persona.

Para ver la arquitectura del sub sistema que nos ocupa, vamos a dividir el software en dos módulos que representan las dos funcionalidades expuestas.

4.2.2.1. Módulo de localización.

El módulo de localización calcula la posición mediante el uso de la técnica de mapas de radio utilizando un mecanismo de inferencia basado en un filtro bayesiano. Para ello, escucha los puntos de acceso definidos de donde obtiene una huella de las intensidades de señal que le servirán al método estadístico para la determinación de la posición del dispositivo.

El resultado del proceso es una coordenada (X,Y) que establece un punto en el mapa del entorno.

4.2.2.2. Módulo de detección de bloqueos.

Este módulo es el encargado de la detección de un estado sin movimiento en un punto del mapa donde no es lógico permanecer estático. Una vez el sistema localiza al paciente en un punto sensible de ser la ubicación para un bloqueo inicializa un contador para observar cuanto tiempo el usuario permanece detenido en el mismo punto. Si el usuario continúa el movimiento y el módulo de localización confirma el avance hacia otro punto del mapa el subsistema de detección de bloqueos paraliza el contador y continúa en modo de observación. Si por el contrario el movimiento se detiene en el punto original y el contador de tiempo aumenta, una vez supere cierto umbral, el sistema confirma el estado de bloqueo e inicia una señal sonora para intentar hacer ver al usuario del estado bloqueante e incentivarle para la recuperación del mismo.

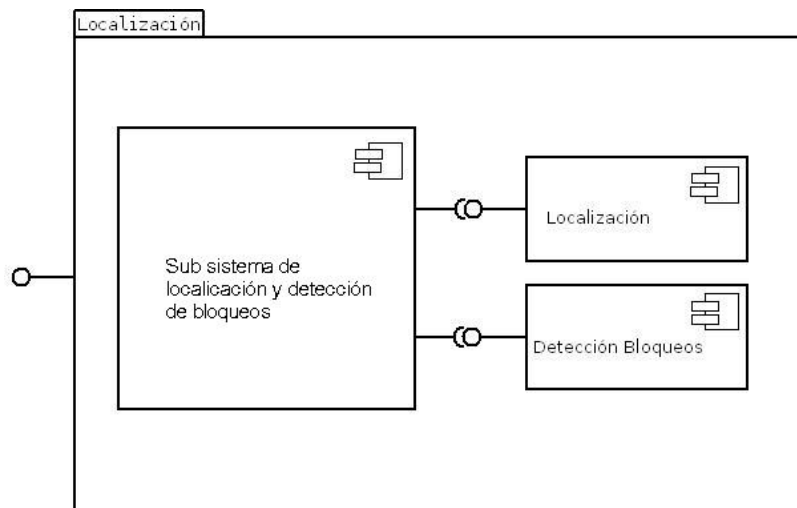


Figura 18.- Arquitectura del sistema de localización

5. Módulos del Sistema.

En este apartado vamos a describir los tres módulos que componen nuestro sistema.

5.1. Módulo para la generación del mapa de radio.

Este módulo prepara al sistema para ser usado en un entorno real. Puesto que se va a utilizar un sistema de localización mediante un mapa wifi, la primera función del sistema debe ser generar el citado mapa. El formato de especificación del mapa de radio debe ser analizado para poder cumplir con la función encomendada. El formato que adopte el mapa de radio viene definido por el modelo de percepción que usaremos en el filtro bayesiano encargado de la estimación de la localización del paciente, modelo que veremos analizado con gran detalle en la sección destinada al módulo de localización. También en la citada sección veremos el formato y características que adopta el mapa, por lo que aquí nos centraremos en el configuración y funcionamiento del módulo para la generación del mapa de radio.

5.1.1. Configuración y funcionamiento.

El módulo, para ser utilizado, necesita:

- Descripción de los puntos de la rejilla.
- Puntos de acceso utilizados.

La descripción de los puntos de la rejilla es parte de la planificación que se debe realizar del entorno donde monitorizar al paciente. Para esta descripción se debe tener en cuenta la precisión de las celdas (espacio mínimo entre dos puntos vecinos), un sistema de coordenadas que determine la ubicación en el entorno y una etiqueta que determina cuando una celda es tratada como un punto sensible a la aparición de los bloqueos que puede sufrir el paciente.

La precisión del sistema ha sido analizada desde el diseño de la aplicación y se ha ajustado a medida que se han realizado las pruebas de software. Los sistemas analizados en las secciones aparecidas en el capítulo sobre el estado del arte definen precisiones entre uno y tres metros del sistema con el 100% del sistema comercial RTLS de la empresa Ekahau, y la precisión de habitación del sistema Look!, sin tener el 100% de aciertos en todas las habitaciones definidas en el mapa. Por tanto, una precisión aceptable, teniendo en cuenta la finalidad del sistema y del estudio sobre otros sistemas de características similares por wifi, hacen que usemos entre cuatro y cinco metros como valor óptimo de precisión. En cuanto al sistema de coordenadas, el mecanismo de configuración y uso de la aplicación permite el uso de coordenadas matriciales y de coordenadas cartesianas en metros, por lo que resulta irrelevante a nivel de funcionamiento el uso de uno u otro tipo. Por conveniencia, es decisión del sujeto la

elección de este factor, ya que únicamente sirve de información para la interfaz de usuario. El último valor de configuración es la etiqueta de “posible bloqueo”. Un uno en este campo informa al sistema de que debe tener en cuenta el punto para realizar un seguimiento de posible bloqueo en función del tiempo de permanencia en la celda. Un cero indica al sistema que el usuario puede permanecer por tiempo indefinido en el lugar sin que el sistema alerte por un problema de movilidad.

El fichero que recoge la información de control se denomina *lugares.txt* y tiene el formato siguiente:

Id, Planta/coordenada Z, coordenada X, coordenada Y, posible bloqueo.

```
1 1 7 5 0
2 1 11 4 1
```

En este ejemplo se describen dos puntos/nodos. El nodo 1, situado en la planta 1, coordenadas (7, 5), y no se considera de posible bloqueo. El nodo 2, planta 1, (11, 4) y etiquetado como sensible de cara a bloqueos.

La comunicación wifi es solo con los puntos de acceso configurados en el fichero *APs.txt*. Este fichero tiene una lista de direcciones MAC, con un mínimo de una, para las comunicaciones con estos dispositivos. El sistema no requiere conexión ni autenticación, por lo que con tan solo las direcciones físicas de los puntos inalámbricos se puede utilizar el sistema. Esta característica permite la utilización de las redes wifi preinstaladas y aprovechar la cobertura existente.

Un ejemplo de fichero es:

```
e8:40:f2:99:84:d9
68:7f:74:11:24:ee
e0:91:53:18:07:3a
```

En este caso usaríamos tres puntos de acceso para el sistema de localización.

Una vez configurada la rejilla y los puntos de acceso estamos en disposición de generar el mapa de radio. El mapa de radio, estará formado por pares (id de celda, punto de acceso) y los valores correspondientes a la media y desviación típica calculada para cada una de las combinaciones entre celdas y puntos de acceso. El fichero *entrenamiento.txt* contiene la información final sobre el mapa.



Figura 19.- Modulo de generación del mapa de radio.

Este software de generación posee una interfaz sencilla, donde únicamente se debe seleccionar el identificador del nodo a comprobar y tomar las mediciones necesarias. El resultado del operar con el módulo de generación del mapa de radio es el fichero *entrenamiento.txt* que contendrá la información completa del mapa elaborado. La información del mapa y el fichero se verán explicados en el apartado siguiente.

5.2. Módulo de localización.

En esta sección vamos a describir el módulo de localización integrado en el sistema de control del posicionamiento y movilidad en interiores a través de dispositivo móvil. Como se ha descrito en anteriores capítulos, este módulo realiza la detección de la ubicación del usuario mediante una técnica de mapas de radio con el uso del filtro de Bayes como motor de inferencia de la localización en interiores.

Dentro de los apartados de este capítulo describiremos el funcionamiento del software, su configuración y preparación, la arquitectura elaborada para su desarrollo y terminaremos con la exposición de las pruebas realizadas analizando los resultados obtenidos.

5.2.1. Localización por mapas de radio.

Como se describió en el capítulo sobre el estado del arte, el uso de redes wifi es una técnica potencialmente interesante en la localización en interiores, ya que no necesita la instalación de transmisores adicionales, pudiéndose utilizar los puntos de acceso inalámbricos cada vez más implantados en edificios y viviendas. La intensidad de la señal wifi que emiten los dispositivos inalámbricos permite generar huellas en el espacio, ya que dicha intensidad se va atenuando a medida que el receptor se va alejando del emisor de la señal.

Aunque no requiere de grandes instalaciones de hardware por los motivos mencionados, la construcción de un mapa de señales wifi a partir de la emisión de las transmisiones de los puntos de acceso requiere un esfuerzo extra ya que se debe realizar la descripción del entorno mediante la toma de un número elevado de mediciones que determinen dicho mapa. Por tanto, este método consiste en la obtención, a partir de un proceso de captura de datos, de un mapa de radio (radiomap) de las ondas wifi de diferentes puntos de acceso en diferentes puntos previamente definidos. Este mapa de radio es utilizado posteriormente para determinar la posición del dispositivo en uno de los puntos definido para el entorno. Como es lógico, el número y localización de los puntos de acceso debe permitir una cobertura total de la zona donde se necesita realizar el posicionamiento del sujeto.

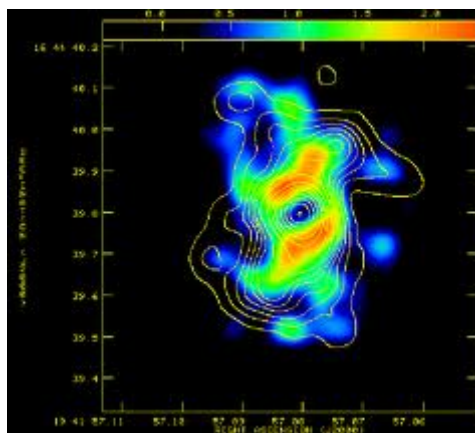


Figura 20.- Representación gráfica de un mapa de radio.

Se trata por tanto de un sistema discreto, donde la ubicación viene determinada por uno de los puntos caracterizados del espacio definido para su uso. El subsistema de localización permite la detección en un espacio tridimensional, definido por sus coordenadas (X, Y, Z) , donde X e Y representan un punto, en metros o en un coordenadas matriciales (formato de fila y columna, si la rejilla tiene un aspecto simétrico), y Z es la planta dentro del entorno. Si la vivienda del paciente tiene una única planta, la coordenada Z , contendrá el único valor posible.

La descripción del entorno operacional se realiza en la fase de configuración, donde se elabora un listado de los puntos o nodos de localización definidos por sus tres coordenadas.

La fase de creación del mapa en nuestro sistema de localización es realizada manualmente, mediante una técnica de entrenamiento que permite la toma de un número no determinado inicialmente de muestras para la definición de cada punto del mapa. De esta manera, el software presenta un programa destinado a generar el mapa wifi. Esta aplicación necesita las direcciones MAC de los puntos de acceso inalámbricos y a partir de la especificación punto por punto, nodo por nodo, se va definiendo las huellas que determinan el mapeo final.

En cada captura en esta fase de generación del mapa, el sistema recoge la intensidad o RSSI, Receive Signal Strength Indication, de cada router wifi configurado para un punto del entorno. Al finalizar el ciclo completo de toma de muestras, el software de generación calcula una aproximación a una función normal mediante la media de todas las muestras de cada punto y la desviación típica que sufren todas las mediciones. De esta manera se obtiene una aproximación por cada celda o punto de análisis y cada punto de acceso wifi.

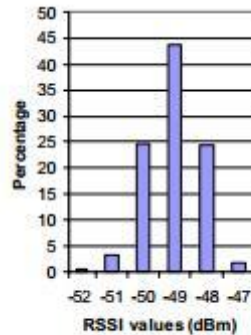


Figura 21.- Representación de la aproximación normal de un conjunto de señales wifi.

Una vez estamos en disposición del mapa wifi descrito por todas las aproximaciones de funciones normales de cada nodo y por cada punto de acceso utilizado en el sistema, la aplicación esta lista para operar con el paciente.

En esta fase de localización, el sistema utiliza los datos del mapa generado para realizar, a través de filtros bayesianos, una estimación de la localización. En el siguiente apartado explicamos el funcionamiento de esta técnica estadística.

5.2.2. Filtro de Bayes para la estimación de la localización.

Antes de ver su adaptación al sistema de localización, vamos a analizar su descripción formal.

5.2.2.1. Descripción.

La técnica de estimación de la localización usando filtros bayesianos viene sustentada en el hecho de la incertidumbre que presentan los datos procedentes de sensores usados en la localización. Un filtro bayesiano representa una técnica estadística que pretende limar las imperfecciones que muestran los sistemas basados únicamente en los datos sensoriales de los dispositivos usados para un sistema de localización. El filtrado bayesiano se basa en el principio de que la mayoría de los eventos son dependientes y la probabilidad de que un evento ocurra en el futuro se puede deducir de las instancias anteriores de ese evento.

Los filtros bayesianos estiman probabilísticamente el estado de un sistema dinámico a partir de una secuencia de muestras con ruido recibidas a través de los sensores. Aplicado a la estimación de la localización, el estado es la posición de una persona u objeto y los sensores proveen al sistema información sobre dicho estado. Este algoritmo representa el estado en un momento dado por variables aleatorias, x_t , al que les aplica una distribución aleatoria denominada *creencia*, que representa la incertidumbre sobre la localización estimada. El filtro de Bayes intenta estimar secuencialmente las *creencias* de cada estado condicionados por toda la información suministrada por los sensores.

Asumiendo que los datos sensoriales consisten en una secuencia temporal de observaciones sobre el entorno representado por z_1, z_2, \dots, z_t , la *creencia* para un estado x_t , $Bel(x_t)$, es representada por la función de probabilidad de la variable x_t condicionada por todos los datos sensoriales hasta el momento t :

$$Bel(x_t) = p(x_t | z_1, z_2, \dots, z_t) \quad (5.1)$$

En términos generales, la *creencia* responde a la pregunta “¿Cuál es la probabilidad de que una persona u objeto estén en una localización *determinada* si contamos con todo el historial de mediciones realizadas por los sensores?”. El problema de esta aproximación es que el cálculo de la denominada *creencia* crece exponencialmente a medida que transcurre el tiempo debido a que el historial de mediciones crece también en el tiempo. Por ello, los filtros bayesianos aplicados a localización asumen que el sistema dinámico es del tipo Markov, es decir, el estado en un momento dado, x_t , contiene toda la información relevante, o dicho de otra manera, las mediciones de los sensores solo dependen de la posición actual del sujeto y que el estado en un instante en el tiempo t depende solo del estado anterior x_{t-1} . Estado anteriores a x_{t-1} no proveen información adicional. Bajo esta presunción en el comportamiento del sistema, el sistema puede realizar los cálculos de la *creencia* eficientemente sin perder información.

Vamos a examinar el funcionamiento recursivo del filtro bayesiano mediante un hipotético escenario unidimensional, donde una persona camina a lo largo de un pasillo llevando consigo un sensor, por ejemplo una cámara, que determina si la persona pasa en frente a una puerta. El sensor es incapaz de distinguir entre diferentes puertas.

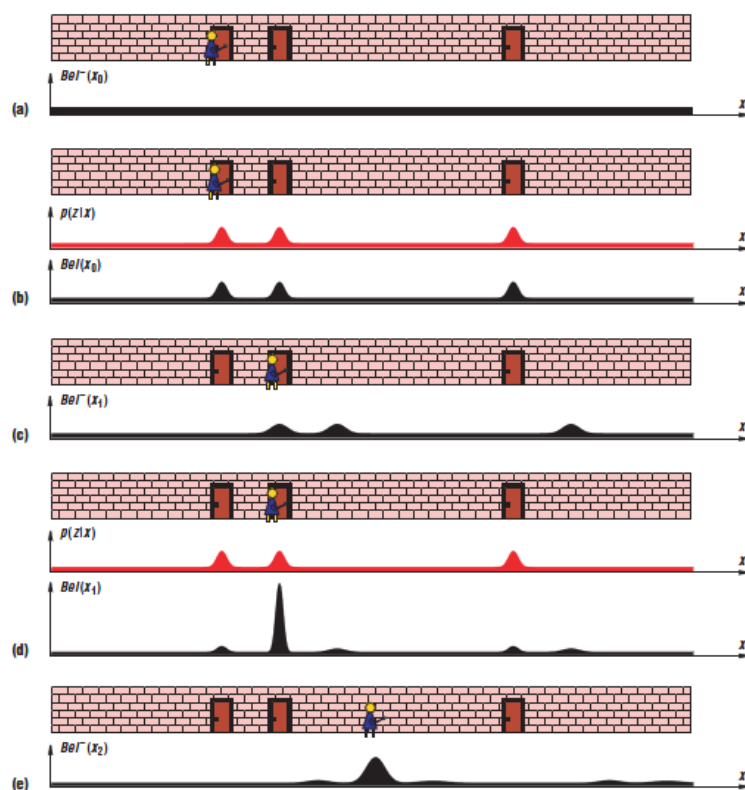


Figura 22.- Ejemplo de detección por filtro bayesiano.

En la fila a de la figura, momento inicial, se muestra una distribución uniforme sobre las posibles localizaciones, que determina que la posición actual de la persona es desconocida. El sensor envía en el siguiente instante un acierto en el posicionamiento sobre una de las puertas, con lo que la *creencia* de los estados asociados a la localización sobre las puertas crece y la probabilidad en el resto de estados disminuye, fila b. La distribución generada tiene tres picos, correspondientes a las tres puertas, que produce un estado ambiguo debido a que hasta el momento el sistema es incapaz de discernir entre las tres posible ubicaciones. A su vez, los estados no asociados a puertas no tienen una probabilidad de cero debido a la incertidumbre inherente a los sensores; una probabilidad pequeña pero distinta de cero, indica que el sensor puede estar equivocado y el sujeto no estar en la posición cercana a la puerta.

En c, se muestra como la persona se desplaza y su efecto en la *creencia*. El filtro bayesiano desplaza la *creencia* en la dirección del movimiento y suaviza su dimensión por la inherente incertidumbre en la estimación del movimiento. Finalmente, en las filas c y d, se refleja la *creencia* después de la detección de otra puerta y el siguiente movimiento respectivamente. Gran parte de la densidad de la probabilidad se localiza en la ubicación cercana a la segunda puerta, representando este resultado gran similitud con la localización real del individuo.

En este momento vamos a analizar cómo se actualiza el filtro de Bayes. Cuando quiera un sensor dar una nueva observación z_t , el filtro predice el estado de acuerdo a la siguiente ecuación,

$$Bel^-(x_t) \leftarrow \int p(x_t|x_{t-1})Bel(x_{t-1})dx_{t-1} \quad (5.2)$$

El filtro entonces corrige la estimación predicha usando la medición del sensor,

$$Bel(x_t) \leftarrow \alpha_t p(z_t|x_t)Bel^-(x_t) \quad (5.3)$$

La probabilidad $p(x_t|x_{t-1})$ describe el *sistema dinámico*, el sistema que regula cómo cambian los estado a lo largo del tiempo.

En estimación sobre la localización, esta probabilidad condicional es el modelo del movimiento, que determina dónde está el objeto en el momento t , cuando previamente estaba en x_{t-1} . Este modelo depende fuertemente de la información disponible en el proceso de estimación.

En el ejemplo del individuo caminando a lo largo del pasillo, el modelo de movimiento corresponde con los cambios en la *creencia* vistos en la fila c y e. La *creencia* inmediatamente después de la predicción y justo antes de la observación del sensor es la denominada *creencia predictiva*, $Bel^-(x_t)$. El modelo de percepción, $p(z_t|x_t)$, describe la probabilidad de que el sensor registre la observación z_t cuando la persona se encuentra en el estado x_t . Como muestran las filas b y d del escenario, la observación del sensor actualiza la creencia incrementando la probabilidad de la localización en aquellos estados donde el modelo de percepción da valores elevados. Para el estudio de la estimación de la localización, el modelo de percepción es derivado de las características tecnológicas de los sensores.

α_t es un valor de normalización para asegurar que la suma de las probabilidades de los estados en el espacio es uno. $Bel(x_0)$ es inicializado con valores apropiados si tenemos conocimiento previo de la localización inicial del objeto, pero normalmente es uniformemente distribuido entre todos los estado por la falta de información.

Para aplicar este tipo de filtros bayesianos a nuestra aplicación de localización por wifi debemos especificar el modelo de percepción, el modelo dinámico y la representación de las creencias de los estados. Las propiedades de los diferentes desarrollos de filtros bayesianos difieren fundamentalmente en cómo representan la densidad de probabilidad sobre el estado x_t .

Debido a la restricción sobre nuestro modelo en cuanto se determina un mapa discreto con localizaciones puntuales sobre el mismo, hemos basado nuestro sistema de inferencia mediante filtro bayesiano en la estimación de la localización de aproximación basada en rejilla, grid-based approach.

Este tipo de filtro de Bayes, a diferencia de otros como el filtro de Kalman, funciona para aplicaciones discretas como la que nos ocupa. La diferencia con las ecuaciones vistas para el cómputo de las creencias radica en la utilización de un sumatorio en lugar de una integración,

$$Bel^-(x_{n,t}) = \sum_{i=1}^N p(x_{n,t}|x_{i,t-1})Bel(x_{i,t-1}) \quad (5.4)$$

Donde N representa el número de estados o localizaciones posibles y $x_{n,t}$ el estado n-ésimo en el momento t .

En localización de interiores esta aproximación exige que el espacio sea dividido en celdas, a modo de rejilla, donde cada estado corresponde con una de estas divisiones, donde la mayor creencia calculada determina la posición del objeto. Una ventaja es que este tipo de filtro puede representar una distribución de probabilidades arbitraria sobre el espacio de estados, ya que no corresponde con una función de densidad continua.

En este momento, y para precisar el comportamiento del sistema de localización que vamos a llevar a cabo, debemos centrarnos en los aspectos relativos a los modelos explicados en el desarrollo del patrón bayesiano. Describiremos inicialmente el modelo dinámico y posteriormente nos centraremos en el modelo de percepción

5.2.2.2. Modelo dinámico.

El modelo dinámico viene definido por:

$$p(x_t|x_{t-1}) \quad (5.5)$$

Como vimos, es el sistema que regula cómo cambian los estados a lo largo del tiempo. Pos las restricciones al sistema, sabemos que el modelo se comporta como una cadena de Markov, en la cual la probabilidad de que ocurra un evento, ubicación en el estado x , depende del evento inmediato anterior, ubicación en el estado anterior.

Como la *creencia predictiva* de cada estado viene sujeta al sumatorio de la *creencia* obtenida para cada estado en el momento anterior, $Bel^-(x_{i,t-1})$, por el modelo dinámico que influye en la transición al estado que estamos evaluando teniendo en cuenta la probabilidad de provenir del estado i -ésimo, necesitamos un mecanismo para determinar la función de probabilidad de cada salto entre cada dos estados.

Para describir un modelo dinámico es necesario tratar de introducir una función que determine la posibilidad de salto entre cada dos celdas. La primera opción para obtener el modelo dinámico puede ser equilibrar las probabilidades de transición por igual entre todos los vecinos al punto donde se encentra el objeto, pero es un modelo poco refinado y no aplica un razonamiento lógico al movimiento del paciente, en nuestro caso. Otra opción que puede servir es usar una fórmula, ponderada entre 0 y 1, a través de la cual

determinar la probabilidad de salto entre dos celdas (o de permanencia en un mismo punto). Puede usarse la distancia euclídea. De esta forma, cuanto más cerca estén los puntos en el mapa más valor tendrá esta función y por tanto pesará más la transición entre estas dos celdas que con otras más alejadas. Esto presenta, a priori, dos inconvenientes. El primero es que para la distancia entre dos puntos de la rejilla se tienen en cuenta sus coordenadas cartesianas o matriciales, pero puede darse el caso de que la rejilla tenga transiciones imposibles, como puede ser dos celdas con una pared de por medio o cualquier obstáculo que impida dicha transición. Este problema puede ser solventado utilizando valores nulos en casos como el descrito.

El segundo problema es que para el cálculo de la distancia euclídea hay que determinar exactamente qué tipo de coordenadas se van a utilizar. Si se usan coordenadas matriciales (fila, columna), el tamaño de las divisiones de la rejilla puede alterar la función de probabilidad, ya que la distancia real recorrida entre dos de los puntos sería la misma en ambos mapas pero con un tamaño menor de rejilla se podrían traspasar más celdas en la transición que para una rejilla con una subdivisión mayor y por tanto distorsionar la función. Para el caso de coordenadas cartesianas, en metros, este hecho no ocurre. Sin embargo, el uso de la distancia euclídea no tiene un componente empírico en la determinación de un modelado dinámico fidedigno, ya que no se tiene en cuenta características físicas del paciente, como su velocidad estándar, su esquema de comportamiento en cuanto a las rutas más habituales, tendencias en el comportamiento, etc., ni del entorno, mobiliario, espacios, zonas no transitables, etc. Otro factor desfavorable para la utilización de la distancia entre dos puntos es que el paciente puede permanecer inmóvil, por voluntad propia o no, en un punto; la distancia entonces sería cero, por lo que el sistema solo funcionaría con un movimiento continuo del paciente, suposición que a todos los efectos se considera errónea.

Una distribución de probabilidades más real, y como tercera opción, es la definición empírica de una tabla de transiciones que dependen de las características físicas del paciente y del entorno. Como desventaja principal es el hecho de que representar el modelo dinámico es una ardua tarea, ya que necesita del estudio del entorno, del paciente, y del modelado un vez conocidos estos factores. Pero sin embargo, la principal ventaja que aparece en el método es que el sistema, siempre y cuando el análisis sea preciso, recoge una matiz de transiciones con unos valores de probabilidad muy exactos en función del estudio realizado, además que permite una flexibilidad en cuanto al modelo ya que puede ser refinado a medida que se va obteniendo más información, incluso desde la misma aplicación.

Para el desarrollo del modelo dinámico de nuestro sistema por wifi, tras analizar los resultados usando las dos últimas técnicas, se ha utilizado este tercer método de generación, ya que lo consideramos el más apropiado, teniendo en cuenta la posibilidad de la reutilización entre pacientes, flexibilidad, y la aproximación al comportamiento real del usuario final. En las pruebas del sistema se utilizaron factores en la definición

del modelo como el tiempo entre información de la localización, la velocidad estándar de una persona, la tendencia en rutas prediseñadas y tiempos medios en celdas de inmovilidad (sillones, camas, etc.).

5.2.2.3. Modelo de percepción.

El modelo perceptual del filtro bayesiano está relacionado directamente con los sensores usados. Como mencionamos anteriormente, describe la probabilidad de que el sensor registre la observación z_t cuando la persona se encuentra en el estado x_t . Esta observación del sensor debe servir para actualizar la *creencia* del estado en el que me encuentro, permitiendo el incremento de la probabilidad de localización en dicho estado.

Por tanto, el modelo de percepción es derivado de las características tecnológicas de los sensores, cuya fidelidad será vital para una localización precisa. Nuestro sistema de localización utiliza la intensidad de las señales wifi para la detección del paciente, y como técnica usamos el mapa de radio. Este mapa se realiza por la toma reiterada de medidas en cada celda de la rejilla y a partir de los datos obtenidos se genera una aproximación normal de la que surgen la media y la desviación típica.

Estos dos datos son los que se usan para medir la verosimilitud de una medición en relación con la aproximación normal obtenida en la fase de generación del mapa de radio. La verosimilitud es una función que determina el grado, entre cero y uno, de similitud de un valor para una normal dada. Esta función se denomina *normdist* en la mayoría de las librerías matemáticas consultadas.

Como podemos utilizar más de un punto de acceso, las verosimilitudes de las mediciones de cada punto de acceso en un momento dado se deben conjugar para obtener un único valor que determine la probabilidad de estar en un nodo cuando se han recogido las mediciones usadas por el modelo.

En las pruebas realizadas del sistema se optó por una mejora en el cálculo de las verosimilitudes a las normales definidas en el mapa. Esta mejora del modelo consiste en obtener tres valores de verosimilitud consecutivos, valores del sistema de percepción, y combinarlos entre sí, previa conjunción de los datos de los diferentes enrutadores inalámbricos usados. El valor final determina el modelo de percepción para cada celda del cuadrante y es el que se usa para la generación de las *creencias* en un instante del tiempo, $Bel(x_t)$.

En el apéndice 1 tenemos un ejemplo sencillo del funcionamiento del filtro bayesiano basado en rejilla con una descripción práctica de los dos modelos, dinámico y de percepción.

5.2.3. Configuración del módulo.

Como se ha descrito, para poner en uso el sistema de localización, es preciso realizar el mapa wifi del espacio de operación. Este mapa es creado por el módulo de generación del mapa de radio, que utilizaba la información de las ubicaciones de la rejilla y la configuración de los puntos de acceso. El módulo de localización necesita igualmente esta información, cuya representación se encuentra descrita en el apartado correspondiente al módulo de creación del mapa.

A su vez, y antes de comenzar con el módulo de localización, es preciso diseñar el modelo dinámico. Como se ha presentado en el apartado correspondiente a este modelo, el diseño depende del estudio de ciertas características del sujeto y del entorno, pero puede resumirse en un fichero, *dinamica.txt*, con una fila por cada celda donde aparece en orden la probabilidad de salto, o permanencia, a esa u otra celda. Así, el orden de aparición de los valores de probabilidad, entre cero y uno, corresponde con el orden de los identificadores de cada nodo. Un ejemplo es como sigue:

```
1 0.5 0.5 0
2 0.5 0.333 0.167
3 0 0.75 0.25
```

En este ejemplo, la probabilidad de estando en 1 permanecer en 1 es de 0.5, de pasar a 2 es 0.5 y de pasar a 3 es nula (pared, elevada distancia, etc.). Estando en 2, pasar a uno tiene una probabilidad de 0.5, a 3 de 0.167 y de permanecer en 2 de 0.333. Para 3, la lectura es similar. La condición de cada fila es que la suma de todas las transiciones sume 1, el total de probabilidad.

5.2.4. Interfaz de usuario.

Una vez el sistema ha sido configurado y se ha generado el mapa wifi, el sistema está preparado para funcionar. El interfaz de usuario es muy simple, atendiendo a los requisitos formulados al respecto, y únicamente muestra la lectura de la localización, así como de un botón de parada.



Figura 23.- Módulo de localización.

A medida que el sistema continúa en operación, se va generando un fichero de log, *log.txt*, que recoge la información relevante del programa. Aunque este fichero tiene una especial relevancia en la fase de desarrollo y posterior prueba de software, es una herramienta especialmente interesante en la adaptación del sistema a mejoras en cuanto al modelo de percepción. En una fase de ajuste y afinamiento del sistema, una vez haya sido utilizado en un caso real, es posible analizar este fichero y obtener conclusiones más profundas sobre los modelos del filtro bayesiano y sobre cómo adaptarlo a nuevas o desconocidas situaciones.

5.3. Módulo de detección de bloqueos.

El módulo de detección de bloqueos del paciente es el que permite al sistema revelar una situación de parálisis motriz en el paciente y de intentar utilizar estrategias de recuperación mediante avisos sonoros. Arquitectónicamente, este módulo está integrado dentro del módulo de localización, pero dada su funcionalidad específica es interesante describirlo en un apartado propio.

Dentro de estos síntomas motores de la enfermedad de Parkinson se encuentra la acinesia, caracterizada como la dificultad para el inicio y ejecución de los movimientos voluntarios o la pérdida de movimientos voluntarios y automatismos. Se trata de una inmovilidad total, un bloqueo, cuando se inicia la marcha, que se presentan de un momento a otro y que puede durar varios minutos o más de una hora. Estos bloqueos pueden tener un origen sensorial, cuando el paciente pasa por un sitio estrecho, atraviesa una puerta o traspasa una zona donde hay un cambio significativo en el suelo (alfombras, cambio de materiales de construcción, etc.).

El funcionamiento del módulo es simple, una vez definidos, por parte de un especialista, los lugares donde se pueden dar estos sucesos dentro de la vivienda del paciente, el

El sistema permite controlar, a través de la localización conocida, el tiempo que éste permanece inmóvil en una de estas zonas. Si el tiempo de localización es mayor a un umbral definido, el módulo detecta un bloqueo y dispara una alerta sonora. Debido a que el origen es sensorial y el paciente permanece en un estado de consciencia, diversas técnicas propuestas por profesionales, incluidos los avisos sonoros, permiten al paciente recuperar el movimiento. En este sentido, el módulo aplica una de estas técnicas, alertas sonoras, para tratar de conseguir esta finalidad.

6. Apuntes finales.

Dentro de este capítulo expondremos las conclusiones finales sobre el proyecto y las líneas de trabajo futuro.

6.1. Conclusiones.

El desarrollo de este trabajo de fin de master tiene una connotación especial en cuanto a la utilidad final que tendrá nuestro sistema de control de posicionamiento y movilidad en interiores para ayudar a un colectivo tan delicado como son los enfermos de Parkinson. Este sistema de localización es la base de los descritos sistemas de asistencias en el hogar y pretende ser un escalón más en la evolución de este tipo de sistemas, integrados en los denominados sistemas ubicuos, que servirán en un futuro a mejorar la calidad de vida de las personas.

La principal motivación, aparte de la indicada, es la inmersión en un campo tan innovador como los son los sistemas de localización en interiores, que presentan una serie de retos que permiten investigar a través de un gran abanico de tecnologías y métodos de estimación que generan un alto conjunto de vías de experimentación.

Esta motivación ha generado que en los momentos iniciales del proyecto se analizarán diversas técnicas, y supuso un dilema en cuanto a la elección de un sistema fiable y novedoso en el área de la detección del posicionamiento de un sujeto. Finalmente, se optó por el modelo que tiene visos de ser la principal tecnología de localización en interiores. Explosión de las redes wifi, mecanismos de inferencias, proyectos de investigación en esta línea son algunos de los motivos para argumentar la selección de la localización por wifi para el desarrollo del trabajo.

A pesar de estas cualidades, el avance del proyecto no ha sido una tarea fácil, sobre todo por las necesidades asociadas a la precisión de la detección. La determinación e implementación del filtro de Bayes, la definición de sus dos modelos, dinámico y de percepción, en particular, son una muestra de la dificultad del trabajo. En este sentido, los resultados han demostrado que el esfuerzo ha merecido la pena, ya que la precisión obtenida alcanza los objetivos marcados.

Otro caballo de batalla es la fluctuación de la intensidad de las señales wifi. Esta característica produce un efecto de dispersión en el conjunto de muestras que se pueden recibir en un punto dado y por tanto alterar los resultados, tanto en la generación de los mapas como en el proceso de localización.

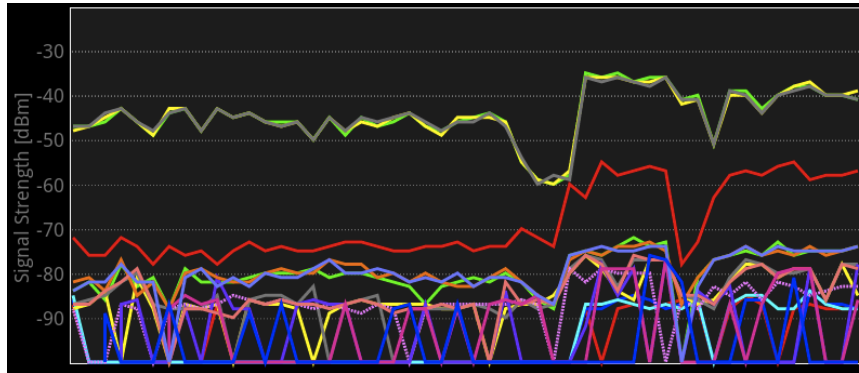


Figura 24.- Oscilación de la intensidad de las señales wifi.

Como se observa en este gráfico, la intensidad de las ondas wifi tiene un efecto oscilatorio en función del tiempo, de forma que puede alterar la localización cuando las medidas tomadas difieren ampliamente de la media de la señal. Esto repercute significativamente en la generación del mapa, puesto que si no tomamos un número importante de muestras para caracterizar la señal mediante su aproximación normal, se puede distorsionar el mapa generado. Además, la sensibilidad que muestran las ondas wifi en cuanto a las estructuras y los objetos interpuestos entre el emisor y receptor hacen que puedan sufrir alteraciones en la intensidad ante los cambios en el entorno.

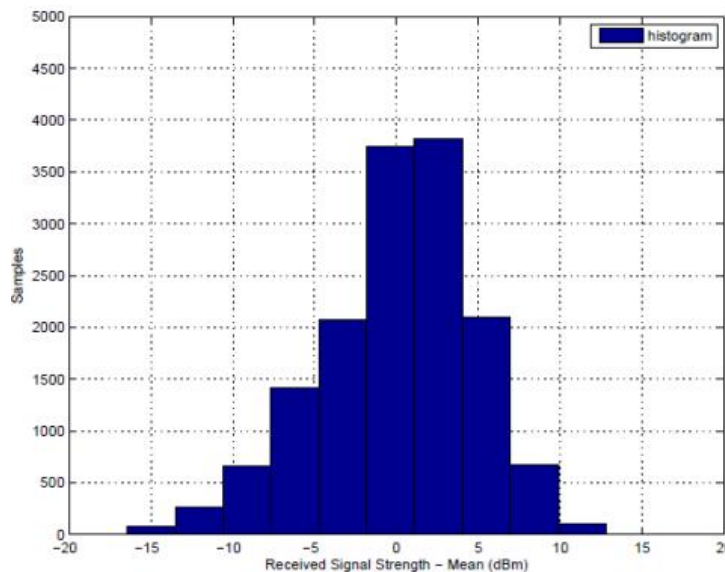


Figura 25.- Distorsión de las muestras en torno a la media de una señal wifi.

En la figura se observa el modelado del muestreo de una señal wifi, con su variación en torno a la media del conjunto. Como se puede ver, para un tamaño muestral considerable, las diferencias entre la mayor y la menor de las muestras difieren en más de 25 decibelios.

Aún con todo, el resultado del proyecto es un sistema altamente flexible en cuanto a configuración del sistema y fácilmente reutilizable debido a las fáciles interfaces

asociadas al sistema, ya que proporciona la localización en un formato de coordenadas. La reutilización lo hace apto para ser integrado en cualquier tipo de sistema, que permite una conexión con un dispositivo móvil, sirviendo para la localización de personas y objetos en interiores. Y flexible, puesto que tanto el mapa de radio y el número de nodos asociados, como el número de puntos de acceso y las características específicas del modelado de percepción hacen que pueda ser implantado en cualquier ubicación y para cualquier paciente, en definitiva cualquier objeto móvil con diferentes particulares.

6.2. Trabajos futuros.

Todas las características descritas sobre localización de interiores abren vías de investigación sobre mejoras al desarrollo de estos sistemas. Nuestro sistema de localización, de igual manera, permite adoptar otros mecanismos de avance en la precisión. La técnica de inferencia usada, filtro bayesiano con aproximación basada en rejilla, puede ser sustituida por otros tipos de filtro como son los filtros de partículas, que pueden llegar a ofrecer una mayor solidez y precisión en el posicionamiento. También la combinación de estas técnicas con mecanismos de navegación inercial pueden suponer un avance significativo en la resolución de la ubicación.

En otro sentido, las técnicas automáticas de generación de los mapas de radio brindan una rápida modelización de los entornos operacionales. Dichas técnicas, como ray tracing, fundamentan sus avances en las propiedades físicas de las ondas wifi y de los modelos en la atenuación de dichas señales con respecto a los objetos que atraviesan, pero ofrecen una alternativa sólida a la construcción manual.

Además de los posibles cambios en el sistema sobre los métodos desarrollados, la aplicación puede avanzar ostensiblemente con la adición de nuevas funcionalidades complementarias. Detección de caídas en los pacientes, con el uso de los acelerómetros y giroscopios de los dispositivos móviles, la generación de rutas en interiores, mediante la introducción de un punto inicial y otro final, la realidad aumentada, para ofrecer servicios como recordatorios o especificaciones en la medicación a tomar son algunas de las funciones que puede llevar a cabo el sistema en conjunción con la localización.

Por último, cabe destacar el uso de interfaces más completas para la información expuesta al usuario. El uso de mapas bidimensionales del entorno para conocer la situación del paciente o para el seguimiento de una ruta permiten al portador del dispositivo conocer con mayor nivel de detalle la información sobre el espacio que le rodea y sobre la localización de otros objetos o personas dentro de su área de movimiento.

7. Bibliografía

- Indoor Navigation System for Handheld Devices. Mahn Hung V. Le, Dimitris Saragas, Nathan Webb. Worcester Polytechnic Institute. Massachusetts, 2009.
- Bayesian filtering for location estimation. Dieter Fox, Jeffrey Hightower, Lin Liao, Dirk Schulz and Gaetano Borriello. IEEE Pervasive computer, 2003.
- Artificial Intelligence. A Modern Approach. Stuart J. Russell and Peter Norvig. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- Look!: Framework para Aplicaciones de Realidad Aumentada en Android. Sergio Bellón, Jorge Creixell y Ángel Serrano. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2010.
- Bayesian techniques for location estimation. Dieter Fox, Jeffrey Hightower, Henry Kautz, Lin Liao and Donald J. Patterson. Department of Computer Science & Engineering, University of Washington. Seattle.
- Sistemas de Localización y Posicionamiento: Sistemas de localización en interiores basados en radiofrecuencia. Fernando Seco Granja. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. <http://www.car.upm-csic.es/lopsi/static/publicaciones/docencia/Apuntes%20RF-LPS.pdf>
- Localización de dispositivos móviles en interiores usando redes Wireless. Adolfo González, Pablo Pedro Mulas y Rafael Rivera. Universidad Complutense de Madrid. Madrid, 2007
- Estudio de la escalabilidad de técnicas de localización basadas en tiempos de ida y vuelta en redes IEEE 802.11. Angela Lonigro. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2011.
- Indoor location tracking using RSSI readings from a single Wi-Fi access point. G. V. Zaruba, M. Huber, F. A. Kamangar and I. Chlamtac. Springer Science + Business Media, 2006. <http://crystal.uta.edu/~zaruba/Publications/J6.pdf>
- Métodos probabilísticos aplicados a los sistemas robóticos. Localización multirrobot basada en filtro de partículas. Ramón Rodríguez Luque. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, 2006.
- Building a Location Sensing and Positioning Service to Enable Indoor Location Based Services Sebastian Jürg Göndör "Computer-Supported Learning" Research Group, RWTH Aachen University. Aachen, 2010.

- Wi-Fi Localization Using RSSI Fingerprinting. Eduardo Navarro, Benjamin Peuker and Michael Quan. California Polytechnic State University. San Luis Obispo.
- Pedestrian Localisation for Indoor Environments. Oliver Woodman and Robert Harle. Computer Laboratory, University of Cambridge. <http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/www/publications/public/ojw28/Main-PersonalRedist.pdf>
- Particle filters for mobile robot localization. Dieter Fox, Sebastian Thrun, Wolfram Burgard and Frank Dellaert. 2001.
- Wireless Sensor Network Localization Techniques. Guoqiang Mao, Baris Fidan and Brian D.O. Anderson. The University of Sydney. Sydney, 2006.
- Large-Scale Localization from Wireless Signal Strength. Julia Letchner, Dieter Fox and Anthony LaMarca. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2005.
- PlaceLab Geopositioning system. <http://ntrg.cs.tcd.ie/undergrad/4ba2.05/group1/index.html>
- Ekahau Real Time Location System (RTLS). <http://www.ekahau.com/products/real-time-location-system/overview.html>
- Geoposicionamiento GSM independiente de la red móvil: Geoposicionamiento vía radio. <http://www.kriptopolis.org/geoposicionamiento-gsm-2>
- A Practical Path Loss Model For Indoor WiFi Positioning Enhancement. Atreyi Bose and Chuan Heng Foh. School of Computer Engineering, Nanyang Technological University. Singapore. <http://web.mysites.ntu.edu.sg/aschfoh/public/Shared%20Documents/pub/04449717-icics07.pdf>

Apéndice 1. Ejemplo sencillo de funcionamiento del filtro bayesiano.

Este apartado se expone un ejemplo sencillo para un mejor entendimiento del funcionamiento de un filtro bayesiano basado en rejilla. A continuación pasamos a describir el problema.

Tenemos una cuadrícula de 2x3 celdas que simulan un entorno. Las líneas gruesas corresponden a muros por los que no se puede pasar, es decir, transiciones imposibles en el movimiento de la persona.

El modelo dinámico se define de forma que se reparte por igual la probabilidad total de transición a los posibles estados vecinos y a la permanencia en una celda, únicamente pudiendo trasladarse en dirección N-S-E-O, sin movimientos diagonales.

Los datos de posición que nos dan los sensores son valores entre 1 y 6 de forma que si estamos en un nodo X nos dan valores cercanos a X.

La creencia predictiva (Bel) inicial para cada celda es 0.1666 (1/6, número de celdas).

1	2	3
4	5	6

Figura 26.- Ejemplo de espacio con división de rejilla.

Comienza el algoritmo:

- En $t = 0$ suponemos que estamos en 4:

●		

Los valores de tres sensores son 3.86, 4.12, 4.42. Obteniendo la media tenemos 4.13

Como hemos mencionado, para $t = 0$:

$$Bel(1_0) = Bel(2_0) = Bel(3_0) = Bel(4_0) = Bel(5_0) = Bel(6_0) = 0.1666$$

El modelo perceptual lo obtengo calculando la diferencia entre el valor obtenido por los sensores (S) y el valor ideal para la celda (X) (1 para la celda 1, 2 para la celda 2,...), ponderado entre 0 y 1 para obtener un valor de probabilidad:

$$P(z_t / x_t) = 1 - \left[\frac{\text{abs}(S-X)}{6/100} * 1/100 \right]$$

Esta función nos da un valor cercano a 1 (ó 1) cuando más próximo estemos al valor ideal en cada celda y cercano a 0 cuanto más alejados estemos a ese valor para cada celda.

En el cálculo de la creencia, α_t lo expresamos como 1. Entonces,

$$Bel(1_0) = \alpha_t * 1 - \left[\frac{\text{abs}(S-X)}{6/100} * 1/100 \right] * Bel(1_0) = 1 * 1 - \left[\frac{\text{abs}(4.13 - 1)}{0.06} * 0.01 \right] *$$

$$* 0.1666 = 0.913 \alpha_0 = Bel(1_0)$$

$$Bel(2_0) = 0.94 \alpha_0$$

$$Bel(3_0) = 0.968 \alpha_0$$

$$Bel(4_0) = 0.996 \alpha_0$$

$$Bel(5_0) = 0.975 \alpha_0$$

$$Bel(6_0) = 0.948 \alpha_0$$

Como $SUM (Bel(x_t)) = 1$, entonces despejando tenemos que:

$$\alpha_0 = 1/(0.913+0.94+0.968+0.996+0.975+0.948) = 0.1742$$

Por lo que:

$$Bel(1_0) = 0.159$$

$$Bel(2_0) = 0.1637$$

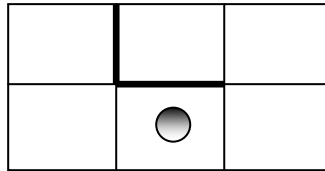
$$Bel(3_0) = 0.1686$$

$$**Bel(4_0) = 0.1735 \rightarrow \text{posicionamiento en celda 4 (mayor valor)}**$$

$$Bel(5_0) = 0.1698$$

$$Bel(6_0) = 0.1651$$

- t=1. Ahora suponemos que avanzamos a 5:



Los valores sensoriales son 4.45, 4.99 y 5.13. De media 4.86.

Calculamos la predicción de creencia:

$$Bel(1_1) = p(x_1/x_1)*Bel(x_1) + p(x_1/x_2)*Bel(x_2) + p(x_1/x_3)*Bel(x_3) + p(x_1/x_4)*Bel(x_4) + p(x_1/x_5)*Bel(x_5) + p(x_1/x_6)*Bel(x_6) = 0.5 * 0.159 + 0 * 0.1637 + 0 * 0.1686 + 0.5 * 0.1735 + 0 * 0.1698 + 0 * 0.1651 = 0.16625$$

$$Bel(2_1) = p(x_2/x_1)*Bel(x_1) + p(x_2/x_2)*Bel(x_2) + p(x_2/x_3)*Bel(x_3) + p(x_2/x_4)*Bel(x_4) + p(x_2/x_5)*Bel(x_5) + p(x_2/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.159 + 0.5 * 0.1637 + 0.5 * 0.1686 + 0 * 0.1735 + 0 * 0.1698 + 0 * 0.1651 = 0.16615$$

$$Bel(3_1) = p(x_3/x_1)*Bel(x_1) + p(x_3/x_2)*Bel(x_2) + p(x_3/x_3)*Bel(x_3) + p(x_3/x_4)*Bel(x_4) + p(x_3/x_5)*Bel(x_5) + p(x_3/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.159 + 0.333 * 0.1637 + 0.333 * 0.1686 + 0 * 0.1735 + 0 * 0.1698 + 0.333 * 0.1651 = 0.1656$$

$$Bel(4_1) = p(x_4/x_1)*Bel(x_1) + p(x_4/x_2)*Bel(x_2) + p(x_4/x_3)*Bel(x_3) + p(x_4/x_4)*Bel(x_4) + p(x_4/x_5)*Bel(x_5) + p(x_4/x_6)*Bel(x_6) = 0.333 * 0.159 + 0 * 0.1637 + 0 * 0.1686 + 0.333 * 0.1735 + 0.333 * 0.1698 + 0 * 0.1651 = 0.1672$$

$$Bel(5_1) = p(x_5/x_1)*Bel(x_1) + p(x_5/x_2)*Bel(x_2) + p(x_5/x_3)*Bel(x_3) + p(x_5/x_4)*Bel(x_4) + p(x_5/x_5)*Bel(x_5) + p(x_5/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.159 + 0 * 0.1637 + 0 * 0.1686 + 0.333 * 0.1735 + 0.333 * 0.1698 + 0.333 * 0.1651 = 0.1692$$

$$Bel(6_1) = p(x_6/x_1)*Bel(x_1) + p(x_6/x_2)*Bel(x_2) + p(x_6/x_3)*Bel(x_3) + p(x_6/x_4)*Bel(x_4) + p(x_6/x_5)*Bel(x_5) + p(x_6/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.159 + 0 * 0.1637 + 0.333 * 0.1686 + 0 * 0.1735 + 0.333 * 0.1698 + 0.333 * 0.1651 = 0.1676$$

Y ahora la creencia de cada celda:

$$Bel(1_1) = \alpha_1 * 1 - \left[\frac{abs(S-X)}{6/100} * 1/100 \right] * Bel(1_1) = 1 * 1 - \left[\frac{abs(4.86 - 1)}{0.06} * 0.01 \right]$$

$$*0.16625 = 0.8931 \alpha_1 = Bel(1_1)$$

$$Bel(2_1) = 0.9208 \alpha_1$$

$$Bel(3_1) = 0.9487 \alpha_1$$

$$Bel(4_1) = 0.9761 \alpha_1$$

$$Bel(5_1) = 0.996 \alpha_1$$

$$Bel(6_1) = 0.9681 \alpha_1$$

Como $SUM(Bel(x_i)) = 1$, entonces despejando tenemos que:

$$\alpha_1 = 1/(0.8931+0.8208+0.9487+0.9761+0.996+0.9681) = 0.1753$$

Por lo que:

$$Bel(1_1) = 0.1565$$

$$Bel(2_1) = 0.1614$$

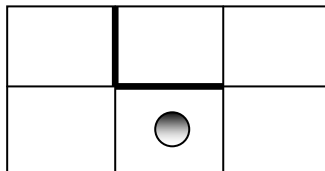
$$Bel(3_1) = 0.1663$$

$$Bel(4_1) = 0.1711$$

$$**Bel(5_1) = 0.1746 \rightarrow \text{posicionamiento en celda 5 (mayor valor)}**$$

$$Bel(6_1) = 0.1697$$

- t=2. Suponemos que nos quedamos en la celda 5 y que los valores de los sensores por tanto se asientan alrededor de ese valor: 4.79, 5.12 y 5.06 \rightarrow 4.99



De nuevo:

$$Bel(I_2) = p(x_1/x_1)*Bel(x_1) + p(x_1/x_2)*Bel(x_2) + p(x_1/x_3)*Bel(x_3) + p(x_1/x_4)*Bel(x_4) + p(x_1/x_5)*Bel(x_5) + p(x_1/x_6)*Bel(x_6) = 0.5 * 0.1565 + 0 * 0.1614 + 0 * 0.1663 + 0.5 * 0.1711 + 0 * 0.1746 + 0 * 0.1697 = 0.1638$$

$$Bel(2_2) = p(x_2/x_1)*Bel(x_1) + p(x_2/x_2)*Bel(x_2) + p(x_2/x_3)*Bel(x_3) + p(x_2/x_4)*Bel(x_4) + p(x_2/x_5)*Bel(x_5) + p(x_2/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.1565 + 0.5 * 0.1614 + 0.5 * 0.1663 + 0 * 0.1711 + 0 * 0.1746 + 0 * 0.1697 = 0.16385$$

$$Bel(3_2) = p(x_3/x_1)*Bel(x_1) + p(x_3/x_2)*Bel(x_2) + p(x_3/x_3)*Bel(x_3) + p(x_3/x_4)*Bel(x_4) + p(x_3/x_5)*Bel(x_5) + p(x_3/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.1565 + 0.333 * 0.1614 + 0.333 * 0.1663 + 0 * 0.1711 + 0 * 0.1746 + 0.333 * 0.1697 = 0.16563$$

$$Bel(4_2) = p(x_4/x_1)*Bel(x_1) + p(x_4/x_2)*Bel(x_2) + p(x_4/x_3)*Bel(x_3) + p(x_4/x_4)*Bel(x_4) + p(x_4/x_5)*Bel(x_5) + p(x_4/x_6)*Bel(x_6) = 0.333 * 0.1565 + 0 * 0.1614 + 0 * 0.1663 + 0.333 * 0.1711 + 0.333 * 0.1746 + 0 * 0.1697 = 0.16723$$

$$Bel(5_2) = p(x_5/x_1)*Bel(x_1) + p(x_5/x_2)*Bel(x_2) + p(x_5/x_3)*Bel(x_3) + p(x_5/x_4)*Bel(x_4) + p(x_5/x_5)*Bel(x_5) + p(x_5/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.1565 + 0 * 0.1614 + 0 * 0.1663 + 0.333 * 0.1711 + 0.333 * 0.1746 + 0.333 * 0.1697 = 0.17162$$

$$Bel(6_2) = p(x_6/x_1)*Bel(x_1) + p(x_6/x_2)*Bel(x_2) + p(x_6/x_3)*Bel(x_3) + p(x_6/x_4)*Bel(x_4) + p(x_6/x_5)*Bel(x_5) + p(x_6/x_6)*Bel(x_6) = 0 * 0.1565 + 0 * 0.1614 + 0.333 * 0.1663 + 0 * 0.1711 + 0.333 * 0.1746 + 0.333 * 0.1697 = 0.17002$$

La creencia:

$$Bel(1_2) = \alpha_2 * 1 - \left[\frac{abs(S-X)}{0.100} * 1/100 \right] * Bel(1_2) = 1 * 1 - \left[\frac{abs(4.99 - 1)}{0.06} * 0.01 \right] *$$

$$*0.1638 = 0.891 \alpha_2 = Bel(1_2)$$

$$Bel(2_2) = 0.9183 \alpha_2$$

$$Bel(3_2) = 0.945 \alpha_2$$

$$Bel(4_2) = 0.9724 \alpha_2$$

$$Bel(5_2) = 0.9997 \alpha_2$$

$$Bel(6_2) = 0.9713 \alpha_2$$

Como $SUM(Bel(x_t)) = 1$, entonces despejando tenemos que $\alpha_2 = 0.175$, por tanto:

$$Bel(1_1) = 0.15637$$

$$Bel(2_1) = 0.16116$$

$$Bel(3_1) = 0.16584$$

$$Bel(4_1) = 0.17065$$

$Bel(5_i) = 0.17544 \rightarrow$ posicionamiento en celda 5 (mayor valor)

$Bel(6_i) = 0.17046$