

Influència del nombre d'usuaris en sistemes de localització en interiors basats en Wi-Fi

Sergio García Villalonga
(segarvi@uoc.edu)

Director: Antoni Pérez Navarro
(aperezn@uoc.edu)

16 de gener de 2015

Resum

Els sistemes de localització en exteriors com el *GPS*¹ es troben molt desenvolupats actualment, però resulten inviables en interiors. Les diverses aplicacions comercials dels sistemes de localització en interiors els fan altament atractius. Però localitzar en interiors comporta una sèrie de problemes físics addicionals, com poden ser la presència d'obstacles. Per aquest motiu, aquest camp ha estat extensament estudiat i han sorgit nombroses aproximacions que utilitzen diferents tècniques i tecnologies per minimitzar els problemes existents.

En el cas de sistemes de localització en interiors per *WiFi*, un factor que pot influir en la precisió de les estimacions és la quantitat de persones al voltant de l'usuari. Per estudiar-ne la influència, el present estudi descriu el procés de creació d'un sistema de localització en interiors que permet investigar les possibles diferències de la precisió de les localitzacions en entorns buits i amb presència d'altres persones. Posteriorment es presenten una sèrie de proves realitzades, s'exposen els seus resultats, així com les conclusions sobre com influència del nombre d'usuaris a la precisió del sistema.

Outdoor location systems like GPS are notably developed, but they become inviable within buildings. The potential applications of indoor location are very appealing, but it also involves additional physical problems, as the presence of obstacles. Due to these difficulties, this field has been extensively studied and several solutions have been published. They use different methodologies and technologies to try to minimize the existing physical problems.

In the concrete case of indoor localization by WiFi, one of the factors that can influence on the precision of estimations

¹*Global Positioning System*, sistema de posicionament global

is the amount of people in the environment. The present study describes the creation process of an indoor location system that allows the investigation of possible differences in accuracy between empty and crowded environments. It also presents the completed tests and obtained results, as well as the derived conclusions on how the amount of users affects the precision of the system.

Paraules clau: localització en interiors, *WiFi*, precisió, dispersió, usuaris, *KNN*, *WKNN*, *MAP*, *MMSE*.

1 Introducció

El *GPS* com a sistema de posicionament ha esdevingut molt precís en exteriors (entre 5 i 10 metres[30]), però el seu principal problema és que no és efectiu en interiors. Els darrers anys s'està aprofundint en la localització d'interiors basant-se en l'ús de, per exemple, càmeres, o diverses tecnologies sense fils. Malgrat que per motius diversos la localització en interiors no ha estat tan desenvolupada al mercat com la localització en exteriors, les seves potencials aplicacions són també altament atractives. Des la ubicació en entorns més estàtics, com embalums a magatzems o maletes a aeroports, fins a situació en entorns dinàmics, com a persones dins edificis, passant per sistemes d'eficiència energètica.

Molts dels darrers estudis es centren en l'aprofitament de sistemes de senyal sense cables com puguin ser el *Bluetooth*[17] i el *WiFi*[2][11][12]. De totes maneres, aquestes tecnologies no es varen dissenyar amb aquest propòsit, pel que la precisió en la localització mitjançant aquest tipus de dispositius es pot veure afectada per diversos factors. Alguns



dels més comuns són les interferències de diferent procedència, la reflexió del senyals als objectes que esdevenen obstacles, o la inestabilitat de la pròpia emissió dels punts d'accés. El present estudi es centra en un dels possibles obstacles a l'hora de tenir en compte les aplicacions de localització en interiors mitjançant *WiFi*: la quantitat d'usuaris influeix en l'error que proporciona el sistema de localització.

Depenent de l'entorn i la seva aplicació, la gestió dels errors de localització pot ser més o menys crítica. Per exemple, podem suposar un sistema de localització en interiors per *WiFi* de persones en un centre comercial amb la que es mostrés publicitat en tendes properes. En aquest cas, un error de posicionament pot implicar una opinió negativa del client i podria fer disminuir lleument les vendes. Un altre exemple seria l'ús del mateix sistema en una residència d'ancians, per tal de poder localitzar a cada un dels residents. En cas d'emergència, on s'hagi d'evacuar l'edifici de manera urgent, un alt marge d'error causat per la gran quantitat d'usuaris augmenta significativament la possibilitat de tragèdia, al perdre temps cercant persones en localitzacions allà on no es troben.

Per tant, el tema en el que es centra el present treball té un gran interès de cara a futurs desenvolupaments de localització en interiors en diverses situacions. A més, tota la investigació i el programari que es desenvolupi per realitzar l'estudi s'alliberaran amb llicències lliures, per tal de facilitar les investigacions futures en el mateix camp, col·laborant a un millor aprofundiment, ajudant al desenvolupament de sistemes més precisos i, a la llarga, un possible major impacte positiu en la societat.

El document s'estructura de la següent manera: la secció 2 comenta breument els objectius d'aquest estudi, en la secció 3 es presenta l'estat de l'art de les tècniques i tecnologies més utilitzades actualment en la localització en interiors, en la secció 4 s'explica com s'ha dut a terme el procés de creació del mapa de ràdio i s'exposen alguns dels problemes observats durant el desenvolupament de la tasca; la secció 5 descriu les proves realitzades per comprovar la influència de la presència d'altres usuaris a l'entorn i es comenten els resultats obtinguts; la secció 6 exposa les conclusions derivades dels resultats i, finalment, la secció 7 proposa una sèrie de possibles futurs treballs a realitzar per complementar les tesis aquí exposades.

2 Objectius

El principal objectiu d'aquest estudi és analitzar com afecta el nombre de persones present a l'entorn en la precisió d'un sistema de posicionament en interiors basat en tecnologia *WiFi*. Per la consecució d'aquesta fita, podem establir els següents objectius complementaris:

- Presentar un estudi de les diferents variables que poden afectar negativament a la precisió en la localització en interiors.
- Presentar un estudi de les diferents alternatives tecnològiques a l'hora d'implementar un sistema de localització en interiors.
- Investigar les possibles eines lliures que puguin donar suport a l'objectiu principal de la investigació.
- Implementar un sistema lliure de localització en interiors mitjançant *WiFi* en un entorn amb diferents nivell de presència humana intentant reutilitzar qualque eina lliure existent.
- Dissenyar un pla de proves que permeti comparar la precisió del sistema implementat en diferents contextos.
- Presentar un estudi sobre com l'augment de persones presents afecta a la precisió de la localització del sistema desenvolupat.
- Proposar una millora del sistema dissenyat, més tolerant a les aglomeracions.

3 Estat de l'art

L'estudi del posicionament ha estat llargament estudiat. Malgrat existeixen tecnologies que permeten dur a terme tasques de localització en exterior molt precises, com el *GPS*, aquestes són inviables dins edificis, ja que depenen d'una línia de visió directa amb els corresponents satèl·lits.

Les tècniques utilitzades per dur a terme sistemes de posicionament en interiors són molt variades, com els sistemes basats en anàlisi d'imatges de càmeres [22] [25], anàlisi del moviment de l'usuari o anàlisi de les propietats de les ones emeses per diversos dispositius. S'ha de tenir en compte,

però, que depenen de la tecnologia, com els sistemes de càmeres, els problemes de privacitat inherents a qualsevol sistema de localització es poden veure incrementats, pel que haurien d'evitar-se [12].

A continuació es presenten diferents tècniques i tecnologies per tal de dur a terme una aproximació a la situació actual de la localització en interiors. Es dona èmfasi a les característiques, tant positives com negatives, dels sistemes basats en ones de ràdio, dels sistemes inercials, quins problemes han d'afrontar i quin tipus d'algorismes fan servir per inferir una localització. Finalment es presenten alguns projectes de programari lliure utilitzats en la localització en interiors.

3.1 Sistemes basats en tecnologies sense fils

Els sistemes basats en tecnologies sense fils utilitzen dispositius emissors d'ones i, calculen o aproximen la localització a partir de l'anàlisi de diverses propietats físiques d'aquestes. L'elecció del mètode d'estimació de la localització com la tecnologia emissora no és trivial i influeixen en diferents aspectes com poden ser tant la precisió, com el cost del sistema.

En les següents seccions es comenten les tècniques, algorismes i problemes més comuns a l'hora de realitzar tasques de localització en interiors utilitzant tecnologies sense fils, així com una sèrie d'estudis i sistemes existents classificats per la tecnologia utilitzada.

3.1.1 Mètodes d'estimació de la localització

Modelar la propagació de les ones en interiors no és fàcil, ja que els sistemes basats en tecnologies sense fils pateixen una sèrie de problemes comuns relatius a la naturalesa mateixa de les ones. Fenòmens com la difracció, la reflexió, la incapacitat de penetració o la dispersió poden fer que els valors de mesura es vegin distorsionats, i afegeixen incertesa al sistema. Per solucionar aquests problemes, s'han d'assegurar un mínim d'estacions emissors d'ones (el nombre pot variar segons la tecnologia) [2].

Excepte en l'ús de la triangulació clàssica, els algorismes de posicionament utilitzen altres mesures per minimitzar l'error, com un anàlisi a priori de l'escenari, per exemple.

Triangulació La triangulació basa els seus mètodes en el coneixement de la posició de les estacions emissors d'ones [2]. A partir d'aquest i del càlcul d'algunes de les propietats físiques de les ones, es pot estimar la localització d'un usuari. En quant a la triangulació, existeixen dues variants pel seu càlcul:

- **Lateració:** s'estima la posició calculant el punt d'intersecció dels senyals provinents de diferents fonts. Es fan servir diferents mètriques:

- **TOA** (*time of arrival*, temps d'arribada): calcula la distància tenint en compte el moment de partida del senyal i el moment d'arribada. Aquest mètode es veu afectat per dos problemes: tots els transmissors han d'estar fortament sincronitzats i s'ha d'afegir informació temporal (*timestamp*) al senyal.
- **TDOA** (*time difference of arrival*, diferència del temps d'arribada): la idea del **TDOA** és calcular la diferència temporal en què el senyal arriba des de diferents fonts d'emissió, en comptes del temps absolut d'arribada del **TOA**. La localització pot ser estimada amb la intersecció de dos o més mesures de **TDOA**.
- **RTOF** (*roundtrip time of flight*, temps d'anada i tornada): utilitza el temps de transmissió del senyal, encara que suma tant el temps d'anada com el de tornada, i elimina la necessitat de sincronització forta del **TOA**. Tot i així, el dispositiu a localitzar pot afegir un retard a la resposta, cosa que esdevé un problema al poder ser variable i dependre del dispositiu. En casos de mesura de distàncies curtes, l'error pot ser considerable.
- **CN** (*closest neighbour*, veí més proper): assumeix la localització de l'usuari com la del punt de referència més proper a aquest.
- **RSS** (*received signal strength*, intensitat del senyal rebut): els anteriors mètodes necessiten una línia de visibilitat directa entre els transmissors i l'usuari, i el senyal es pot veure afectat per fenòmens físics

com la reflexió. Aquest mètode tracta de calcular la pèrdua de força del senyal causada per la seva propagació. El principal inconvenient és l'atenuació del senyal degut a obstacles.

– **Received signal phase method**

(mètode de la fase de senyal rebut): aquest mètode també rep el nom de *POA* (*phase of arrival*, fase d'arribada). Utilitza la fase de l'ona portadora, i assumeix que les ones emeses són ones sinusoidals pures, de la mateixa freqüència i sense cap tipus de compensació (*offset*) inicial. La fase del senyal rebut des de diferents punts emissors permet estimar la posició. El principal problema d'aquest mètode són els obstacles i fenòmens com la reflexió. Necessita una línia de visió directa.

- **Angulació:** s'aplica la tècnica d'*AOA* (*angle of arrival*, angle d'arribada) amb la que localització es pot trobar mitjançant la intersecció de diverses línies de vectors angulars, cada un format pel radi circular des de l'estació base fins al dispositiu usuari. Aquesta tècnica té l'avantatge de necessitar només dues estacions base, com a mínim, per trobar un punt en una localització bidimensional (o tres per a una localització tridimensional) [21] i de que no es necessita cap tipus de sincronització temporal. Per contra, es necessiten o antenes direccionals, o una matriu d'antenes (pel que els requeriments de maquinari són més complexes) i que la precisió de la localització minva amb la distància.

Reconeixement de patrons Els algorismes de reconeixement de patrons es divideixen en dues fases. En la primera, la fase fora de línia (*offline*), es porta a terme un anàlisi de l'intensitat rebuda des de les fonts de senyals fins a certs punts. El resultat és l'anomenat mapa de ràdio, on es relacionen aquestes dades. Posteriorment, en la fase en línia (*online*), s'estima la localització de l'usuari cercant patrons entre les dades mesurades "en viu" i les empremtes enregistrades anteriorment.

El principal problema que afronten aquests algorismes és que, en un mateix punt, al llarg del

temps, pot fluctuar notablement, pel que la decisió del nombre de punts de referència i la quantitat d'enregistraments del senyal en cada un no és trivial [2] Podem diferenciar cinc tipus de mètodes d'aquest tipus:

- **Mètodes probabilístics:** la localització s'infereix segons la probabilitat de que el senyal rebut sigui a un punt en concret. S'utilitzen diversos mètodes probabilístics com la fórmula de Bayes, filtres de Kalman[13], filtres de partícules o el mètode del model de Markov ocult [11]. També s'utilitzen dades de desviació estàndard per dur a terme una aproximació més acurada.
- **kNN** (*k nearest neighbours*): les dades de posicionament en línia permeten trobar els k punts de referència més propers. La mitjana d'aquests permet dur a terme una estimació. Si la mitjana es pondera amb les dades d'intensitat del senyal rebut es pot obtenir una estimació més acurada.
- **Xarxes neuronals:** les mesures de la fase fora de línia serveixen com a dades d'entrenament dels pesos d'una xarxa neuronal artificial.
- **SVM** (*support vector machines*): es tracta d'una eina de classificació i regressió de dades, a partir de tècniques d'aprenentatge supervisat.
- **SMP** (*smallest M-vertex polygon*): s'utilitzen les dades en línia per cercar punts candidats, i es forma un polígon mínim, amb el qual es calcula una aproximació de la localització com a la mitjana de la posició dels vèrtex.

Proximitat Els algorismes de proximitat es solen utilitzar a entorns amb gran quantitat d'antenes que formen una xarxa o cel·les, com poden ser la tecnologia *GSM*. En aquests algorismes, quan una antena detecta un dispositiu a localitzar, es considera que esta col·locat en "ella" En el cas de que diverses antenes detectin el dispositiu, es considera que es troba col·locat en l'antena del qual rep una major intensitat de senyal.

3.1.2 Sistemes existents segons tecnologia sense fils

A l'hora de dissenyar un sistema de localització sense fils existeixen dues aproximacions: desenvolupar la infraestructura de senyalització o aprofitar les fonts existents. El primer cas presenta l'avantatge de tenir control sobre la localització de les fonts, pel que existeix la possibilitat d'obtenir resultats més precisos. En el segon cas, l'avantatge és l'estalvi en temps i cost de muntar una infraestructura pròpia, encara que es necessiten algorismes més complexos que compensin l'error que pot suposar no conèixer la localització de les fonts.

A continuació s'enumeren algunes de les tecnologies sense fils emprades en els sistemes de localització [21]:

GPS El *GPS* és un sistema de localització militar americà amb ús civil. El seu funcionament es basa en l'ús de satèl·lits geoestacionaris que contínuament emeten missatges amb informació espai-temporal amb els que els receptors triangulen la seva posició. Es tracta d'un sistema molt precís en exteriors, però on la poca capacitat de penetració del senyal del satèl·lit fa que perdi la seva eficiència en interiors.

Tot i així, s'han desenvolupat solucions per tal de localitzar en interiors utilitzant aquesta tecnologia. *SnapTrack*[24] fa servir una solució híbrida (*GPS* + *WiFi*), *Atmel*[21] i *U-Blox* [1] fan servir una tecnologia pròpia de detecció de senyals *GPS* de baixa intensitat, i *Locata* [4] fa servir un receptor propi, del qual s'instal·len una quantitat determinada formant una xarxa.

RFID Es tracta d'un sistema de transmissió de dades per radio freqüència que consta d'etiquetes (actives o passives), que emeten dades, i els receptors, que les llegeixen. Les etiquetes actives són capaces d'emetre informació per sí mateixes, encara que necessiten una font d'energia suplementària. Les etiquetes passives no emeten informació per si mateixes, sino que aprofiten l'energia del senyal emès per un receptor situat a prop seu.

Un dels avantatges és que operen a diferents rangs de freqüències pel que es poden veure menys afectades per interferències. El principal problema és que el seu radi d'acció és petit (uns 2 metres les passives i uns 100 metres les actives [9]) i es

necessita una infraestructura amb gran quantitat d'etiquetes.

Algunes tecnologies que utilitzen *RFID* són *SpotON* [14] i *LANDMARK* [27].

Xarxes cel·lulars Algunes tecnologies de posicionament fan servir les antenes de xarxes cel·lulars per telèfons mòbils aprofitant el seu gran rang de cobertura i la seva capacitat de penetració en edificis. Tot i així, la precisió amb aquests sistemes sol ser molt baixa, sobre 50 i 200 metres, sobretot a llocs on la densitat d'antenes és baixa [8].

Les propostes de localització en interiors mitjançant aquesta tecnologia solen ser experimentals, sense trobar cap aplicació comercial coneguda, com les proposades per Otsason et al. [28].

UWB *UWB* (*Ultra Wide Band*, banda ultra ampla), és una tecnologia similar al *RFID*, però basada en l'emissió de pulsacions ultracurtes. Els seus avantatges respecte al primer són la transmissió (a la vegada) sobre diverses bandes de freqüència, sobre una amplada de l'espectre de ràdio major, menor consum d'energia, tolerància a l'arribada d'ones per diferents camins i capacitat de penetració superior. La curtor de les pulsacions permet una determinació molt precisa del *TOA*.

Alguns sistemes de localització utilitzant *UWB* són *Ultrawideband Planet*², *UbiSense*³ i *Aether Wire & Location*⁴.

Bluetooth (IEEE 802.15) *Bluetooth* és una tecnologia estandarditzada de transmissió de dades que opera en la banda de freqüència dels 2,4 GHz. Antigament, el seu principal avantatge era que molts de dispositius mòbils estaven equipats amb *Bluetooth* com a tecnologia de transmissió de dades, encara que actualment els dispositius mòbils es solen equipar amb tecnologies que permeten una velocitat de transmissió molt major (sobretot *WLAN*). A més, el seu principal inconvenient és el seu curt rang d'acció (de 10 a 15 metres).

Com a sistemes de localització en interiors basats en *Bluetooth* podem destacar *Topaz*⁵ i el proposat a Kotanen et al. [17].

²<http://www.ultrawidebandplanet.com>

³<http://www.ubisense.net>

⁴<http://www.aetherwire.com>

⁵<http://www.tadlys.com>

UHF Els senyals *UHF* (*Ultra High Frequency*, freqüència ultra alta) operen a unes freqüències de 433 MHz i 868 MHz, que els ofereixen una capacitat de penetració apreciable. El principal problema és que es necessiten desenvolupar sistemes propietaris d'antenes que facin servir aquestes freqüències. Tot i així, el control que es té sobre el hardware, permet ajustar la precisió i el consum.

Exemples de sistemes *UHF* són *3-D-ID* de *Pin-Point* [36] i o el sistema *TDOA* de *WhereNet*⁶ i *MeshNetworks*⁷.

Rajos infrarojos Els sistemes basats en rajos infrarojos utilitzen tres mètodes [9]: balises actives, anàlisi d'imatges infraroges de radiació natural i anàlisi d'imatges amb fonts de llum artificial [23]. El principal inconvenient és la seva nul·la capacitat de penetració, necessiten una línia de visió directa.

Un exemple de sistema de localització comercial basat en infrarojos és el *Microsoft Kinect*, amb precisió de localització de 2,5 cm a 3 m de distància [15].

Sistemes basats en sensors Els darrers anys, l'abaratiment i popularització de diversos tipus de sensors, ha portat el desenvolupat estàndards de comunicació per aquests dispositius. Podríem destacar el *ZigBee*⁸ i l'estàndard 802.15.4 (base de *Zig-Bee* i altres protocols). Els avantatges d'aquests sensors, es centren sobretot en la capacitat de saber la seva posició, a més de la seva disponibilitat, cada cop major.

Com a estudi es pot destacar el realitzat per Álvarez et al. [38]. on tracten la implementació d'un sistema de localització basat en *ZigBee*, utilitzant trilateració basant-se en la intensitat de senyal rebut. Obtenen mesures acurades a menys de 3 metres, però amb el nombre adequat d'emissors aconseguen un error de menys d'1 metre el 50% del temps i un error de menys de 1,75 metres el 75% del temps.

Sistemes híbrids Altres sistemes combinen diverses tecnologies per tal d'aprofitar-se dels seus avantatges i mitigar els seus inconvenients. Destaquen el sistema *HP Labs Smart-LOCUS* [29], que

utilitza una combinació de radio freqüència i ultrasons; *Radianse*⁹ i *Versus*¹⁰ que utilitzen una combinació de radio freqüència i rajos infrarojos; i el sistema *EIRIS*¹¹, que fa servir una barreja de rajos infrarojos, *UHF* i sistemes de radio de baixa freqüència.

WiFi Es tracta d'una tecnologia de transmissió de dades que opera en la banda dels 2,4 GHz i els 5 GHz. Actualment l'estàndard més estès és el IEEE 802.11, amb les variacions 802.11a, 802.11b, 802.11g, i 802.11n. Les diferències entre elles són la velocitat de transmissió de dades, la freqüència utilitzada, l'ample de banda i les tècniques de modulació [9]. Els punts d'accés *WiFi* transmeten balises per tal de que altres dispositius les puguin descobrir. Aquests senyals es poden captar tant si la xarxa està protegida com si és oberta i malgrat no s'estigui connectat a ella [35].

El seu principal avantatge és que la seva expansió és molt notable, tant a edificis privats com públics. Aquesta disponibilitat els fa ideals per tal d'implementar sistemes de localització en interiors des del punt de vista dels costos. Per contra, *WiFi* presenta una sèrie de problemes addicionals:

- La intensitat dels senyals de *WiFi* és molt poc estable i pot fluctuar durant el temps en una mateixa posició.
- La intensitat del senyal es pot veure afectada per variacions en la meteorologia, a més de fer-ho de manera no uniforme als diferents punts d'accés [10].
- L'espectre de ràdio de 2,4 GHz és compartit per diferents tecnologies pel que causen interferències o renou.
- Els punts d'accés operen sobre diferents canals. Una tarja *WiFi* no pot captar tots els canals a la vegada, pel que per captar senyals de tots els punts d'accés ha d'anar canviant de canal i de freqüència.
- La mesura del *RSS* és, en realitat, molt poc precisa.

⁶<http://www.wherenet.com>

⁷<http://mesh.nowireless.com/index.htm>

⁸<https://www.zigbee.org/>

⁹<http://www.radianse.com>

¹⁰<http://www.versustech.com>

¹¹<http://www.elcomel.com.ar/english/eiris.htm>

- En casos en què no s'utilitzi infraestructura pròpia es pot presentar el problema de que el nombre de punts d'accés disponibles pot variar notablement.

En quant als sistemes existents, la precisió en *RSS* es troba entre, aproximadament, els 3 i els 30 metres.

La tecnologia *WiFi* com a suport per la construcció de sistemes de localització en interiors ha estat llargament estudiada pels beneficis comentats anteriorment, i s'han aportat maneres de mitigar els problemes anteriors.

El sistema pioner en fer servir la intensitat del senyal rebut va ser *RADAR* [3]. Aquest sistema fa servir l'algoritme dels *k* veïns més propers. Segons aquest estudi s'arriba a la conclusió de que factors de disseny i presa de dades com l'orientació de l'usuari, el nombre de veïns propers, el nombre de punts de dades i el nombre de mostres afecten a l'exactitud de les localitzacions.

El sistema *Horus* [37] va ser desenvolupat per proveir informació de posicionament molt precisa sense requerir una gran potència de computació. Fa servir mètodes probabilístics amb els que assigna una categoria a cada coordenada de localització candidada. Augmentant el nombre de localitzacions de mostra es pot millorar l'exactitud, ja que es pot millorar l'estimació utilitzant les mitjanes i les desviacions estàndard de la distribució gaussiana.

El sistema *COMPASS* [16] va ser desenvolupat a partir de la feina prèvia de *Horus*, amb l'afegit de que utilitza l'orientació de l'usuari per seleccionar un subconjunt de les dades per dur a terme l'anàlisi probabilístic de la posició. També estudia l'efecte de la presència de gent a l'entorn, sobretot al que es refereix a l'absorció del senyal.

Els estudis duts a terme per Rogoleva [31] i Bolliger [7] són interessants per l'aproximació que duen a terme per construir el mapa de ràdio de manera col·laborativa. En ells, es proposa l'ajustament continuu del mapa de ràdio amb els valors mesurats pels diversos usuaris del sistema. Aquest mapa és considerat com un dels més massius i acurats.

L'estudi exposat per García-Valverde et al. [12] proposa un sistema d'aprenentatge que permeti minimitzar l'error i localitzar amb precisió sense necessitat d'una infraestructura pròpia. Alguns d'aquests errors poden ser minimitzats utilitzant algunes tècniques de preprocessament. Per tractar

amb informació inexacta o amb la incertesa, proposen l'ús addicional d'algorismes de lògica difusa. El mètode utilitza la informació de punts emissors existents, no propis, sobre els que es duu a terme un entrenament de l'ordre de dies. A més, el sistema aprèn incrementalment durant tot el seu cicle de vida, pel que és adaptable al llarg del temps en quant a variacions en l'entorn.

Battiti et al. [5] proposen un sistema de localització per *WiFi* que utilitza un classificador basat en xarxes neuronals. Amb aquest sistema s'aconsegueix una precisió d'1 metre amb una probabilitat del 72%.

Ekahau¹² és un sistema de posicionament comercial que combina xarxes baiesianes, complexitat estocàstica i aprenentatge competitiu en temps real. La localització es calcula en un servidor central.

AeroScout¹³ és un exemple de sistema de localització en interiors basat en *TDOA*. Requereix que el senyal de radio es rebí en tres o més punts separats, sincronitzats de manera molt acurada (al nivell de nanosegons).

Els estudis de Tsuda et al. [34] utilitzen aprenentatge automàtic per calcular una possible posició futura basant-se en la ruta que formen les posicions anteriors. Per aquesta tasca fan servir predictors basats en filtres de Kalman, filtres de Kalman millorats, filtres de partícules, mètodes de segona opinió i mètodes de modificació de consulta.

3.2 Sistemes inercials

Molts dels sistemes actuals de localització en interiors, que es basen en tecnologies sense fils com *UWB* i *WLAN*, afegeixen correccions mitjançant unitats de mesura inercial.

Els sistemes inercials generalment consisteixen en un acceleròmetre, un giroscopi, un magnetòmetre, un convertidor analògic/digital i un microcontrolador o un processador digital de senyal. Amb aquestes eines es pot obtenir l'orientació de l'usuari i la seva acceleració que, juntament amb una posició inicial i el temps transcorregut, permet obtenir la nova posició d'aquest. Aquest tipus de sistema genera dades de posició relativa o absoluta, que es combinen amb filtres de partícules o de Kalman [35]. Algunes solucions integren integració

¹²<http://www.ekahau.com>

¹³<http://www.aeroscout.com/>

amb altres tècniques com la doble integració [26], xarxes neuronals [6] o lògica difusa [33] [12].

El principal problema és que els sensors es poden veure afectats per problemes de precisió, provocats, per exemple, per soroll blanc [35]. Com que els sistemes inercials calculen la posició actual basant-se en l'anterior, l'error és acumulatiu. Per tant, les imprecisions de mesura poden augmentar amb la distància. Inicialment, els dispositius són calibrats pels fabricants, però amb el pas del temps són necessaris nous calibratges o sistemes de localització que implementin mètodes de reposicionament que equilibrin l'error cada cert temps [13].

A més, cal tenir en compte que els valors de densitat de flux magnètic que calculen l'orientació es poden veure afectats per interferències d'altres fonts d'electromagnetisme, com instal·lacions elèctriques o altres dispositius electrònics.

En [13] es presenta un sistema de posicionament en interiors basat en *IMU*¹⁴, on es fa servir un coneixement previ sobre l'edifici. S'utilitza la doble integració sobre el valor d'acceleració sobre el temps per calcular la posició. Per estabilitzar l'error que s'afegeix amb el temps, s'utilitza la informació d'orientació amb un filtre de Kalman estès a part d'altres compensacions.

El sistema *Bodyguard* [19] és un sistema inercial amb maquinari propi. El sistema detecta moviments amb 6 graus de llibertat i està especialitzat en la localització de persones en moviment. Com que una de les seves aplicacions són les emergències, el dispositiu suporta temperatures entre -25°C i 70°C.

Altres exemples són *NavShoe* [18] o *InertiaCube3D*

3.3 Grups d'eines de localització en interiors existents

Com a part o objectiu de les investigacions en el camp de la localització en interiors es poden trobar en ocasions peces de programari de suport a la investigació que han esdevingut productes comercials o que han estat alliberats com a programari lliure. Es tracta tant de programes de localització complets, com de biblioteques que suporten la creació d'aquest tipus de programari.

En aquest sentit, s'han identificat algunes eines lliures que poden ser estudiades i reutilitzades per a la realització de l'estudi.

3.3.1 *PlaceLab*

Es tracta d'un grup d'eines per dur a terme la construcció del programari necessari en sistemes de localització en interiors [32]. Els seus objectius són: facilitar la implementació de sistemes de localització per part dels investigadors, proveir modularitat en quant als components de programari encarregats de les diferents tasques del procés de localització i proveir suport per diverses plataformes, tant en el procés de sensorització (*GPS*, *WiFi*, *Bluetooth* i *GSM*), com als sistemes operatius on executar-lo (*Windows*, *Mac OS X*, *GNU/Linux* i *FreeBSD*). El sistema es troba implementat amb les biblioteques *Java 2 Micro Edition (J2ME)*, pel que és compatible tant amb telèfons mòbils antics com amb ordinadors estàndard.

Es tracta d'un grup d'eines lliure, alliberat amb la llicència *GPL v2*. El codi es troba disponible a *Sourceforge*¹⁵, encara que es troba en un estat d'abandonament, ja que els darrers canvis dels que hi ha constància daten de 2010, pel que segurament s'haurien de realitzar molts ajustaments.

Arquitectura L'arquitectura proveeix un sistema multicapa en el que en la més inferior es troben els *Spotters*, els elements que detecten la informació dels sensors. A una capa superior, els *Trackers* reben la informació de sensorització dels *Spotters* i la comparen amb les dades dels possibles entrenaments fora de línia, emmagatzemats a elements anomenats *Mappers*, i infereixen una localització basant-se en diferents tipus d'algorismes. Aquesta es passa a un nivell superior en forma d'un element anomenat *Estimate*, on es troben els adaptadors necessaris perquè hi interactuin les aplicacions. La comunicació entre capes es porta a terme amb interfícies comunes, independents de dels algorismes implementats.

3.3.2 *AirPlace*

AirPlace [20] és un programari per dur a terme localització en interiors utilitzant la potència del senyal rebut dels punts d'accés *WiFi* existents a l'en-

¹⁴*Inertial Measurement Unit*, unitat de mesura inercial

¹⁵<http://sourceforge.net/projects/placelab/>



torn. *AirPlace* gestiona el cicle de vida sencer d'una aplicació de localització, des de la creació del mapa de ràdio, fins la localització de l'usuari final. Per això es divideix en tres aplicacions diferents: *AirPlace Logger*, *Radiomap Server* i *AirPlace Tracker*.

L'*AirPlace Logger* du a terme la tasca d'enregistrament de dades *WiFi* per la creació del mapa de ràdio del sistema de localització. Es tracta d'una aplicació per *Android* que, utilitzant un plànol de la zona a escanejar i les distàncies reals que representen l'ample i alt d'aquest, permet indicar una situació i realitzar mesures de les intensitats de les xarxes *WiFi* detectades en aquest. El nombre de mostres a prendre a cada punt pot ser configurada (de 5 fins a 30), així com l'interval entre mostres (0,5, 1 i 2 segons).

El *Radiomap Server* consisteix en una aplicació Java que exposa un petit servidor web per tal de rebre la informació de l'*AirPlace Logger*, generar el mapa de ràdio i distribuir-lo als usuaris que executin *AirPlace Tracker* per tal de dur a terme el procés de localització. Al generar el mapa de ràdio, una vegada que l'*AirPlace Logger* ha enviat les dades enregistrades al servidor, es genera un fitxer on, per cada punt del plànol, es calcula la mitjana de les potències enregistrades. Aquest fitxer resultant és, pròpiament, el mapa de ràdio.

L'*AirPlace Tracker* és una aplicació d'*Android* que, basant-se en el mapa de ràdio generat amb l'*AirPlace Logger* i el *Radiomap Server*, permet localitzar a l'usuari en l'interior de l'edifici analitzat. Aquesta divisió de tasques permet a l'*AirPlace Tracker* dur a terme el procés de localització independentment, sense la necessitat de contactar cap servidor extern, excepte per obtenir inicialment una còpia del fitxer que representa el mapa de ràdio. Això permet evitar el sobreprocessament degut al requeriment constant d'informació, manté una baixa congestió de la xarxa, un estalvi considerable de bateria, així com salvaguarda la privacitat de l'usuari, ja que a partir de les peticions, el servidor podria inferir dades sobre la posició.

Per tal de fer funcionar l'*AirPlace Tracker*, s'han de proveir el plànol de l'edifici i el mapa de ràdio. Es troben disponibles quatre algorismes per estimar la posició: el *K nearest neighbors*, el *weighted k nearest neighbors*, el *probabilistic maximum a posteriori* i el *probabilistic minimum mean square error*, i es pot alternar entre ells fent servir el menú de l'aplicació.

El programa disposa de dos modes de funcionament: el mode en línia i el mode fora de línia. El primer situa en el mapa, en temps real, a l'usuari. Al segon se li proveeix un nou mapa de ràdio, creat amb la combinació dels dos programes anteriors, estima les posicions del nou mapa basant-se en les dades de potència de senyal i calcula l'error mitjà. Aquest darrer mètode permet l'anàlisi a posteriori de les dades recollides pels experiments de localització.

Es tracta d'un programari desenvolupat a la Universitat de Xipre i redistribuït de manera lliure, sota la llicència *GPL* versió 2. Això ha suposat un avantatge destacable a l'estudi, ja que per realitzar les proves s'ha hagut de modificar el codi font d'*AirPlace Tracker*.

Un cop analitzats algunes de les diferents tècniques i tecnologies utilitzades en la localització en interiors, així com alguns sistemes lliures disponibles per suportar l'estudi, es passa a descriure el procés de creació del sistema de localització que permetrà investigar la influència de la presència d'altres persones en la precisió.

4 Presa de dades

L'objectiu principal de l'estudi és investigar com influeix la presència de persones a l'entorn a la hora d'estimar posicions amb un sistema de localització en interiors per *WiFi*. Avaluades les diferents alternatives, s'ha decidit utilitzar *AirPlace*, al ser una opció que implementa totes les funcionalitats requerides: creació d'un mapa de ràdio i estimació de les posicions a partir d'aquest.

A més, Per tal de poder dur a terme una avaluació de la influència de la presència d'usuaris en la precisió del sistema de localització en interiors es necessita un lloc que presentàs fortes diferències en el nombre de persones presents a l'entorn. A més, tenint en compte que el sistema *AirPlace* es basa en la localització mitjançant una infraestructura *WiFi* existent, l'entorn ha de proveir una quantitat suficient de punts d'accés per dur a terme les operacions.

Aquestes necessitats es veuen cobertes en edificis com els centres comercials. Les proves realitzades per aquest estudi es varen dur a terme en una secció del centre comercial Glòries, a Barcelona. La diferència horària entre l'obertura del centre

als treballadors i l'obertura als clients proporciona un context idoni per realitzar proves en un entorn pràcticament buit als matins, i la proximitat de les festes de Nadal a l'hora de realitzar les proves han ofert un entorn molt concorregut durant l'horari comercial.

A més, l'elecció d'un centre comercial, proporciona dos tipus d'espais -passadissos i botigues- sobre els que resulta interessant classificar els resultats, ja que presenten característiques que afecten a la precisió.

En el cas dels passadissos, l'entorn es caracteritza per:

- Majors espais.
- Voltes més amples.
- Menys presència d'obstacles entre diferents punts.

Per contra, les botigues proporcionen un context en el que, a priori, la precisió es pot veure minvada, tant en el cas d'absència com en el de presència d'usuaris en l'entorn degut, entre d'altres a:

- Presència de prestatges.
- Parets més properes.
- Sostres més baixos.

La realització de les proves dins un centre comercial i l'estudi els resultats dels dos tipus de localitzacions pot permetre, a més d'afrontar possibles millores de la manera més adequada en cada situació, donar un enfocament a una situació més realista que no al realitzar proves planificades dins un entorn controlat com pot ser un laboratori.

El primer pas és la creació del mapa de ràdio, que consisteix en recaptar, en diferents localitzacions, informació sobre quins punts d'accés *WiFi* es localitzen i amb quina intensitat es capta el senyal. Amb aquesta informació, a l'hora d'estimar una posició a posteriori, s'apliquen diferents algorismes que contrasten la informació del mapa de ràdio amb la informació sobre punts d'accés i intensitats que detecta l'usuari del sistema.

4.1 Creació del mapa de ràdio

A l'hora de crear el mapa de ràdio s'han tingut en compte una sèrie de consideracions. La primera és on prendre les mesures per realitzar les mesures. En l'estudi, s'ha realitzat una presa de dades amb punts distribuïts més o menys uniformement per tot l'edifici. La impossibilitat d'obtenir plànols detallats de l'interior de les botigues i el fet de que alguns locals es troben tancats, ha afectat a la uniformitat d'aquesta distribució, situació que no es dona en les mostres preses als passadissos.

En la figura 1 es poden veure els punts que representen la presa de dades del mapa de ràdio sobre el plànol. En total s'han pres mostres a 83 localitzacions, amb una distància mínima mitjana entre punts de 8,23 m.

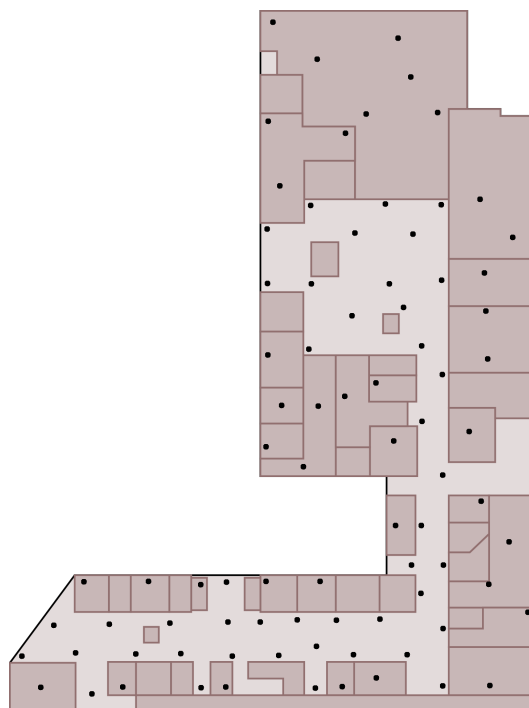


Figura 1: Punts on s'ha dut a terme la presa de dades per construir el mapa de ràdio.

Tenint en compte que el mapa de ràdio ha d'enregistrar els valors de les intensitats del senyal amb la màxima precisió possible, i que la presència d'usuaris pot influir en la mesura de la potència de senyal rebut, es va considerar que la presa de dades per construir el mapa de ràdio s'havia de dur

a terme en els moments de menys presència en el centre.

Com que a l'*AirPlace Logger* es poden definir la quantitat de mostres a prendre en cada punt a localitzar i l'interval de temps entre mostres, també s'ha de tenir en compte quins valors fixar. Com que el senyal rebut des d'un punt d'accés *WiFi* fluctua notablement i la potència rebuda mesurada varia al llarg del temps que dur la presa de les mostres, s'ha cregut convenient enregistrar el màxim nombre de mostres possibles, en aquest cas 30. D'aquesta manera s'assegura una millor mostra estadística a l'hora de calcular la potència mitjana. L'interval entre cada mostra s'ha fixat en 1 segon, ja que mig segon entre mostres podria resultar en una mostra poc fluctuant, i dos segons hauria allargat massa el temps de presa de dades.

A la figura 2 es mostra la variació de la potència del senyal rebut en un punt al llarg de les 30 mostres. Com s'observa, en un punt la intensitat rebuda pot variar fins a 15 dbm, el que influeix en la poca precisió dels sistemes de localització per *WiFi*.

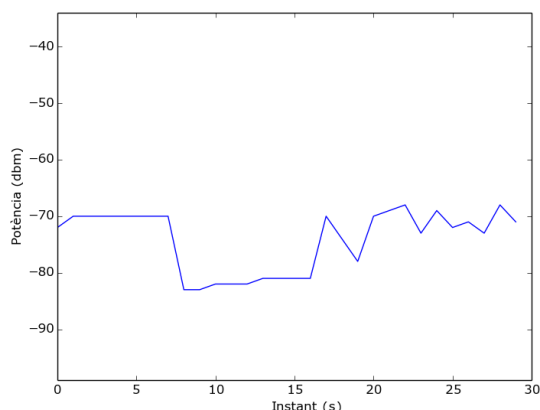


Figura 2: Variació de la potència del senyal rebut per la MAC f8:63:94:9c:2e:db al punt P74.

5 Proves i resultats

A l'hora de realitzar les proves de localització, l'*AirPlace Tracker* proporciona dos modes: l'*on-line* i l'*off-line*. El primer mostra la posició estimada de l'usuari en cada moment. Es tracta d'un sistema molt visual però que no aporta cap tipus de dada que pugui ser analitzada posteriorment.

El mode *off-line*, per contra, pren un fitxer amb informació sobre diferents localitzacions i la potència del senyal rebut en cada una d'elles. Tècnicament, aquest fitxer es genera de la mateixa manera que el mapa de ràdio inicial, encara que, per evitar confusió, se l'anomenarà mapa de proves.

A partir del mapa de ràdio i de la informació sobre la intensitat del senyal a cada punt del mapa de proves, l'*AirPlace Tracker* estima la posició de les localitzacions del darrer. L'*AirPlace Tracker* permet dur a terme aquest procés d'estimació amb diferents algorismes.

Aquest procés sí genera una sèrie de dades que poden ser analitzades estadísticament a posteriori. Per tal d'estudiar la influència del nombre d'usuaris en la precisió de la localització s'han generat dos mapes de proves, amb idèntiques localitzacions però preses en dos moments on la diferència d'usuaris fos significativa.

A continuació s'exposen els detalls de la presa de dades i els resultats obtinguts del seu anàlisi.

5.1 Presa de dades de prova

La presa de dades per realitzar un anàlisi *off-line* de localitzacions en interior amb l'*AirPlace Tracker* comença amb la creació d'un mapa de prova utilitzant l'*AirPlace Logger*. Per aquest estudi en concret, se n'han creat dos, a les mateixes localitzacions però en diferents contextos, un en absència d'altres usuaris i un altre en la situació contrària. Per assegurar que per ambdós mapes s'enregistressin dades a les mateixes localitzacions es varen triar posicions amb alguna particularitat, com localitzacions just a les portes dels negocis, o amb certs patrons de les rajoles.

La recollida de dades amb una presència mínima a l'entorn (figura 3) es va dur a terme en un context similar a la de la creació del mapa de ràdio: a partir de les 8 del matí pels passadissos i a partir de les 10 dins les botigues. Pel segon mapa de proves, les dades es varen recollir els dies 20 i 21 de desembre de 2014 a la tarda. Com s'aprecia a la figura 4, en el segon l'ocupació del centre és major.

En ambdós contextos, s'han pres mostres a 115 diferents posicions, (figura 5), de les quals 42 es troben dins botigues i 73 a passadissos. A l'igual que en la creació del mapa de ràdio, per cada posició s'han pres 30 mostres. La distància mínima mitjana entre localitzacions és de 5,56 m.



Figura 3: Centre comercial en les proves sense usuaris.



Figura 4: Centre comercial en les proves en horari comercial.

5.2 Estimació de les localitzacions de prova

Per tal de realitzar un anàlisi detallat de les dades generades amb el mode *off-line* es proporcionen a l'*AirPlace Tracker* els mapes de prova generats anteriorment. Utilitzant el mapa de ràdio generat inicialment realitza les estimacions de cada una de les posicions de prova, tenint en compte la intensitat del senyal a cada una. Aquesta operació es pot realitzar repetidament i amb diferents algorismes, pel que permet estudiar de manera més detallada la influència d'usuaris a l'entorn.

Tanmateix, el funcionament del mode *off-line* només proporciona, al final de l'execució de les estimacions, l'error mitjà de les posicions calculades respecte a les posicions reals del mapa de prova. Aquesta informació és mostrada en forma de fines-

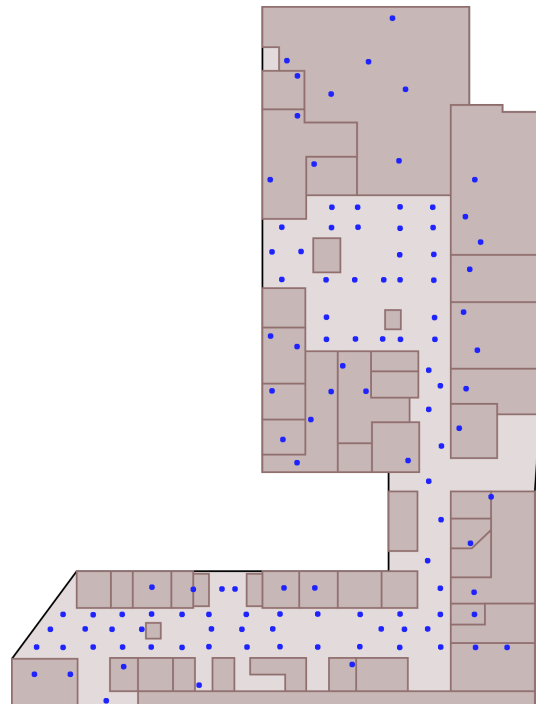


Figura 5: Punts on s'ha dut a terme la presa de dades en les proves.

tra de diàleg en la mateixa aplicació (figura 6).

Un altre problema és el temps d'execució de les proves. Depenent de l'algorisme triat i dels paràmetres corresponents, l'anàlisi de l'error mitjà de les estimacions per una quantitat de localitzacions relativament gran porta, aproximadament, una mitjana de 80 minuts. Aquest factor dificulta la realització d'anàlisis per diferents algorismes i paràmetres si es disposa d'un temps limitat.

Per tal de generar resultats més detallats i poder dur a terme un anàlisi estadístic més ric, així com per agilitzar l'execució de les proves, es va decidir realitzar una sèrie de modificacions al codi de l'*AirPlace Tracker*¹⁶, aprofitant la seva llicència lliure. Amb aquestes modificacions, l'*AirPlace Tracker* executa en paral·lel els anàlisis amb diferents algorismes i persisteix els resultats dels anàlisis en forma de fitxers.

D'aquesta manera, els fitxers resultants de l'execució de l'anàlisi contenen informació sobre la posició real de cada localització de prova, la posició

¹⁶El codi modificat es pot trobar a <https://github.com/SeGarVi/TFM>

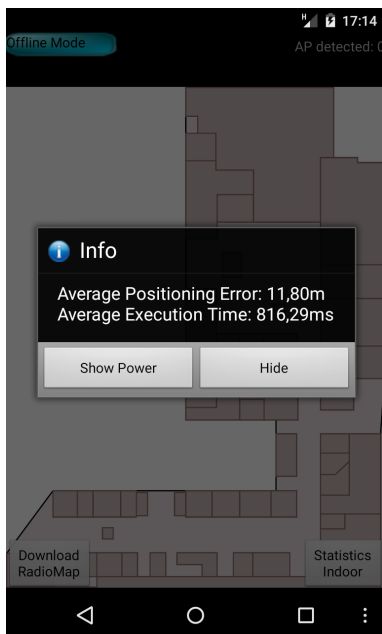


Figura 6: Final de l'execució d'un anàlisi *off-line* d'*AirPlace Tracker*.

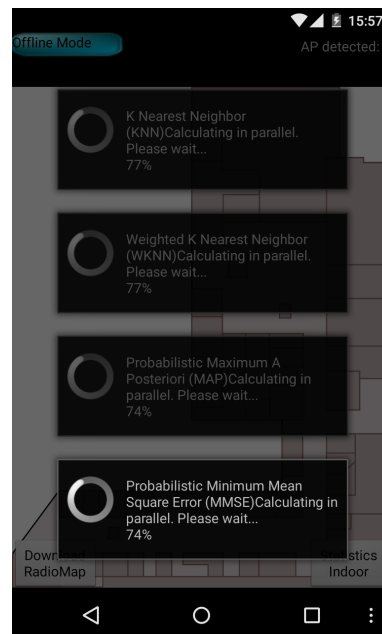


Figura 7: Execució d'un anàlisi en paral·lel amb *AirPlace Tracker*.

estimada, i l'error. Pel que fa a la paral·lelització, al tractar-se d'un telèfon amb un processador multinucli, permet l'execució de l'anàlisi de totes les mostres d'un mapa de proves, amb els quatre algorismes disponibles (figura 7) simultàniament, en uns 110 minuts de mitjana.

5.3 Anàlisi dels resultats

El resultat obtingut en el processament dels mapes de proves permet obtenir l'error en el càlcul de la posició de cada localització. Aquestes dades, extretes dels mapes de prova realitzats tant amb altres usuaris al voltant com sense, són la base per l'estudi de la influència d'aquests en la precisió del sistema.

De les 30 mostres enregistrades per cada localització als mapes de prova, s'ha decidit calcular l'error mitjà respecte a la posició real i la desviació mitjana de cada mostra. D'aquesta manera podem estudiar com afecta la presència d'usuaris tant a la precisió mitjana com a la dispersió de les estimacions. Els resultats de la comparativa s'han classificat per algorismes utilitzats, per situació de les localitzacions (passadís o botiga) i per context (amb presència i sense presència d'altres usuaris).

A continuació es comenten els resultats obtinguts classificats per algorisme.

5.4 *K Nearest Neighbours*

L'algorisme de *K Nearest Neighbours* estima la posició en dues fases:

1. Calcula la distància de la localització a estimar amb cada una de les localitzacions del mapa de ràdio basant-se en les dades d'intensitat del senyal de ràdio.
2. Estima la posició calculant la mitjana de les *K* localitzacions del mapa de ràdio més properes.

Com es pot observar al gràfic (figura 8), en el cas de les localitzacions dins botigues, la precisió mitjana en l'entorn sense usuaris és major que en el cas d'un entorn amb clients al voltant. En el cas dels passadissos observem un resultat particular. La mesura sense usuaris és més precisa fins $K=8$. Per valors majors, la l'error mitjà passa a ser menor en un entorn amb usuaris al voltant.

Segurament aquest efecte sigui degut a que els usuaris esdevenen obstacles per senyals de fonts

més llunyanes, més visibles als passadissos, pel que els senyals propers guanyen pes a l'hora de calcular la mitjana.

Les mesures més precises donen un error mitjà de 8,68 m., en l'entorn sense usuaris, i 9,82 m. en l'entorn contrari.

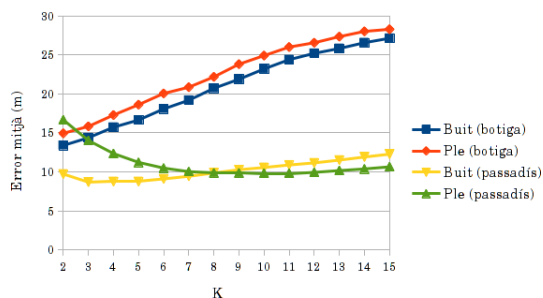


Figura 8: Comparació gràfica de l'error mitjà per l'algorisme K Nearest Neighbours funció de K .

Pel que fa a la desviació mitjana (figura 9) podem observar que tant dins botigues com en passadissos, la presència d'usuaris afecta negativament a la dispersió de les estimacions.

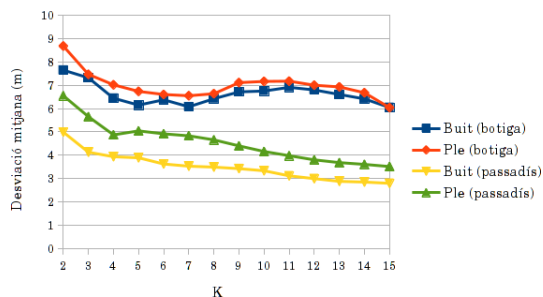


Figura 9: Comparació gràfica de la desviació mitjana per l'algorisme K Nearest Neighbours funció de K .

5.5 Weighted K Nearest Neighbours

L'algorisme *Weighted K Nearest Neighbours* segueix el mateix funcionament que l'anterior, amb la diferència de que a l'hora de calcular el punt mitjà de les K localitzacions més properes. La variable utilitzada per ponderar la mitjana és la inversa de la distància. Per tant, a l'hora de realitzar la mitjana els punts de referència més propers tenen més

pes que els llunyans, al suposar-se que les mesures de potència del senyal dels primers seran més precises.

En el cas de les proves amb l'algorisme *Weighted K Nearest Neighbours*, la tendència és molt similar. Els gràfics (figura 10) mostren clarament com es segueix el mateix patró que amb l'anterior algorisme (figura 8), encara que amb un error mitjà lleugerament menor.

Les mesures més exactes donen un error de 8,61 m. en un entorn sense altres usuaris i un error de 9,68 m. en l'entorn amb molta presència de clients.

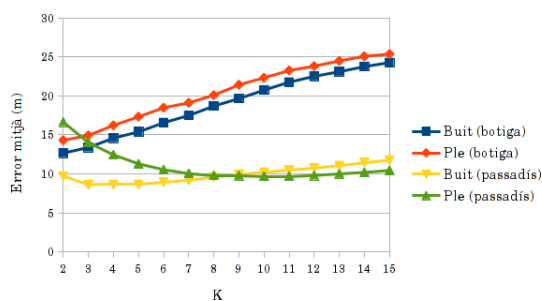


Figura 10: Comparació gràfica de l'error mitjà per l'algorisme *Weighted K Nearest Neighbours* funció de K .

En el cas de la dispersió de les estimacions (figura 11), amb aquest algorisme observam el mateix comportament. En tots els casos, tant a passadissos com dins botigues, la dispersió en l'entorn amb altres usuaris present és major.

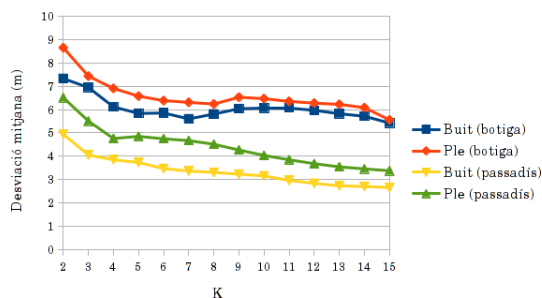


Figura 11: Comparació gràfica de la desviació mitjana per l'algorisme *Weighted K Nearest Neighbours* funció de K .

5.6 Probabilistic Maximum A Posteriori

L'algorisme *Probabilistic Maximum A Posteriori* estima la posició actual de l'usuari com el punt del mapa de ràdio que maximitza la probabilitat a partir de les dades d'intensitat del senyal. Per l'estimació de la probabilitat es fa servir la tècnica del mínim error quadràtic mitjà i el valor és ponderat amb una variable K , que penalitza inversament la probabilitat. D'aquesta manera, un valor baix de K dona com a resultat probabilitats molt similars entre la localització de l'usuari i els punts del mapa de ràdio, fet que pot derivar en que no es pugui estimar la localització.

Realitzant el càlcul amb l'algorisme *Probabilistic Maximum A Posteriori* s'obté un patró diferent als anteriors. Com es pot observar, els valors de l'error mitjà minven conforme augmenta K en tots els casos (figura 12). Tot i així, la precisió no millora constantment, sinó que a partir de certs valors de K ($K=8$ a passadissos i $K=7$ en botigues) el valor d'error esdevé constant. Tanmateix, l'error mitjà de localització es veu afectat per la presència de clients tant dins botigues com en passadissos.

Pel que fa als millors registres de precisió, es troben en 11,35 m. en un entorn sense usuaris i 12,77 m. en el cas contrari.

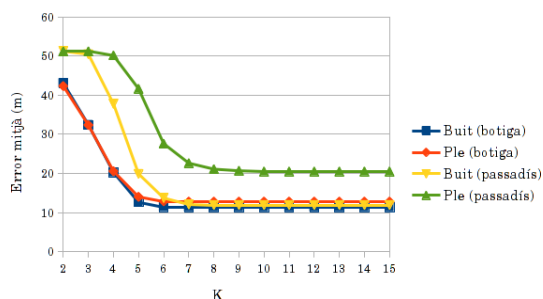


Figura 12: Comparació gràfica de l'error mitjà per l'algorisme *Probabilistic Maximum A Posteriori* funció de K .

Pel que fa a la desviació mitjana de les estimacions (13), a partir de valors de K majors que 4, també es veu perjudicada per la presència d'altres usuaris, tant en botigues com en passadissos. A més, a l'igual que la mitjana, el seu valor s'estabilitza a partir de $K=10$.

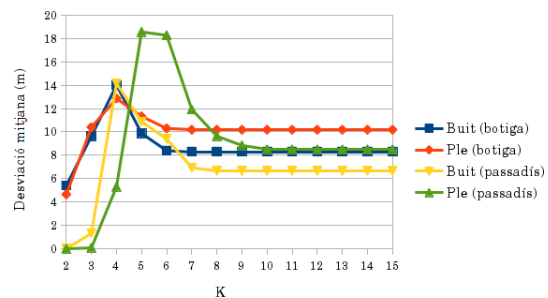


Figura 13: Comparació gràfica de la desviació mitjana per l'algorisme *Probabilistic Maximum A Posteriori* funció de K .

5.7 Probabilistic Minimum Mean Square Error

En l'algorisme *Probabilistic Minimum Mean Square Error* es duu a terme una estimació en dos passos:

1. Calcula la probabilitat de que l'usuari es trobi en cada un dels punts del mapa de ràdio de la mateixa manera que en l'algorisme anterior.
2. Es calcula la posició de l'usuari com la mitjana ponderada dels punts del mapa de ràdio, utilitzant la probabilitat de que l'usuari es trobi a un punt com a variable de ponderació.

Aquest algorisme, per tant, també es veu afectat per la variable K , de manera que a l'hora de calcular la mitjana ponderada, els punts amb més probabilitat tenen més pes.

En aquest darrer cas, l'anàlisi mostra un comportament similar a l'anterior però amb particularitats. A l'igual que amb l'algorisme *Probabilistic Maximum A Posteriori*, a partir de cert valor de K ($K=6$ en passadissos i $K=5$ dins botigues), l'error mitjà s'estabilitza. Aquesta estabilització es deu a que els valors alts de K afavoreixen les estimacions amb més probabilitat.

La principal diferència s'observa en el comportament amb valors petits de K . A priori, podria semblar que valors petits de K milloren el posicionament respecte a l'algorisme anterior. Però en realitat es deu a que l'algorisme ha estat incapaç de localitzar la gran majoria de punts. De fet, en el cas d'estimacions en passadissos, l'algorisme no arriba a estimar cap localització si $K=2$. En aquest cas, només a partir de $K=6$ es poden estimar totes les localitzacions.

Pel que fa com afecta la presència d'altres usuaris a la precisió de les mesures la figura 14, mostra que en tant en passadissos com en botigues, els resultats empitjoren amb usuaris al voltant. Els millors registres en termes de precisió es troben en 11,12 m. en un entorn sense usuaris i 12,32 m. en un entorn amb usuaris.

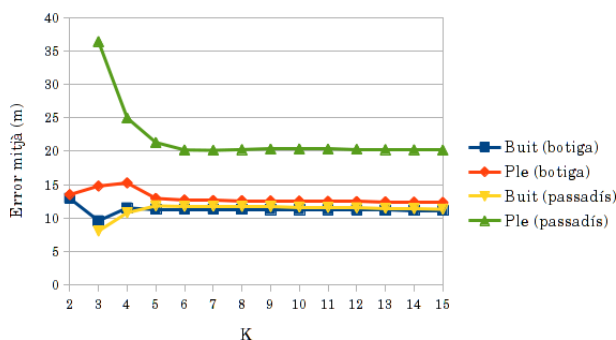


Figura 14: Comparació gràfica de l'error mitjà per l'algorisme *Probabilistic Minimum Mean Square Error* funció de K.

Pel que fa a la dispersió de les estimacions (figura 15), la presència de persones augmenta la desviació mitjana en la gran majoria de casos. Només per valors de K petits els entorns sense usuaris mostren una dispersió menor, però cal tenir en compte les irregularitats abans mencionades en aquests casos.

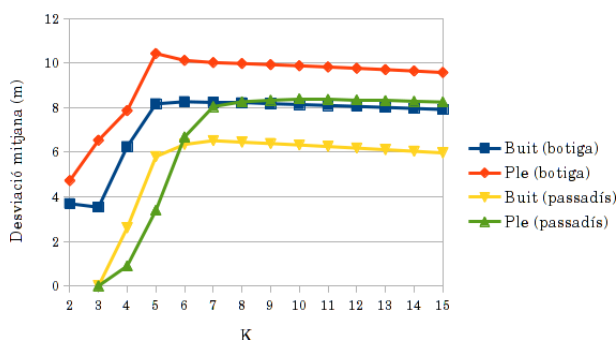


Figura 15: Comparació gràfica de la desviació mitjana per l'algorisme *Probabilistic Minimum Mean Square Error* funció de K.

6 Conclusió

En l'estudi desenvolupat s'ha creat un sistema de localització en interiors aprofitant aplicacions lliures existents. A partir de la creació d'un mapa de ràdio i de dos mapes de proves s'ha estudiat la influència de la presència d'altres usuaris en la precisió del sistema utilitzant quatre algorismes diferents.

El primer a destacar es que les xarxes *WiFi* permeten crear sistemes de localització en interiors d'una manera senzilla i barata. De fet, ha permès crear una en un entorn aliè a la nostra propietat en un entorn no controlat. De totes maneres, malgrat aquest avantatge, el fet de que la tecnologia *WiFi* no estigui dissenyada amb l'objectiu de localitzar en interiors, fa que efectes com la fluctuació del senyal, la reflexió o altres, afegixin una gran imprecisió en les estimacions.

En el nostre cas, amb imprecisions al voltant dels 10 metres, el sistema resultant pot no ser suficient depenent de l'aplicació a la qual es vulgui orientar. Per exemple, amb aquesta imprecisió seria gairebé inútil fer-lo servir a una aplicació destinada a oferir publicitat de la tenda davant la qual es troba l'usuari. En canvi, si els comerços es trobassin agrupats per tipus d'activitat comercial (per exemple, si tots els restaurants es situassin en la mateixa zona), una aplicació podria integrar el sistema de localització aquí presentat i oferir promocions diverses.

Depenent del tipus d'algorisme s'observen comportaments diferents en la localització dins botigues i passadissos. En el cas de *KNN* i *WKNN*, la localització és més precisa en passadissos que dins botigues. En el cas de *MAP* i *MMSE* la precisió és major en tendes, encara que les diferències de mesures botiga-passadissos són menys acusades que en el cas de *KNN* i *WKNN*. Malgrat que els valors d'error mitjà en *MAP* i *MMSE* arriben a ser molt similars en tots els casos, l'error mitjà en passadissos plens és especialment dolenta. En general, els millors resultats en quant a la precisió en passadissos s'obtenen amb l'algorisme *WKNN* amb valors de K entre 6 i 8. El millors resultats dins botigues, amb *MMSE* i valors alts de K.

Per altra banda, amb les dades resultants podem concloure que, sense cap dubte, la presència de clients en el centre comercial, tant en passadissos com en tendes, ha augmentat no només l'error mitjà de les estimacions de posició, sinó també la dispersió

d'aquestes. Només el cas de *KNN* i *WKNN* per valors alts de *K* mostra un error mitjà major en entorns sense usuaris al voltant, i només en passadissos. En general, la major precisió en entorns amb pocs usuaris al voltant, s'aconsegueix amb l'algorisme *MMSE* amb valors de *K* alts; en canvi, en entorns amb molts usuaris l'algorisme *WKNN* amb *K* entre 5 i 7 proporciona el menor error mitjà.

7 Treball futur

Aquest estudi proposa una avaluació detallada de com afecta la presència de persones a la localització en interiors. Partint dels resultats obtinguts es proposa estendre el treball realitzat per millorar la precisió del sistema de diferents maneres:

- Realitzant un estudi sobre com afecta a l'error de precisió el nombre de mostres, tant a l'hora de realitzar el mapa de ràdio, com a l'hora de realitzar el mapa de proves amb l'*AirPlace Logger*. Seria útil trobar un bon ajustament de l'aplicació per millorar la precisió i comprovar que aquesta millora és aplicable a diferents contextos.
- Orientar un estudi similar a l'anterior però centrant-se en estudiar com hi afecta l'interval entre mostres.
- En el mateix sentit que la proposta anterior, també seria necessari estudiar com afecta la distància entre mostres. Una gran quantitat de mostres pot millorar la precisió del sistema final, encara que una distància massa petita entre aquestes pot obtenir valors de senyal que portin a confusió entre dos localitzacions. En aquest sentit, segurament diverses variable entren en joc, com la distància als punts d'accés, així que potser té més sentit per infraestructures i entorns controlats.
- Addicionalment, també seria interessant estudiar com afecta a la precisió de la localització no només la quantitat de persones al voltant de l'usuari, sinó també la quantitat de persones connectades a les xarxes *WiFi* amb les que s'infereix.
- L'addició d'altre tipus de sistemes de mesura (no d'estimació) disponibles avui dia per millorar la precisió del sistema actual, i que no

depenguessin de la presència d'altres usuaris seria una gran millora a l'estat actual. La millora d'*AirPlace* amb, per exemple, dades provinents dels sistemes inercials disponibles a la majoria de telèfons intel·ligents suposaria un aprofitament de recursos amb resultats potencialment significatius.

- En un altre context, l'aplicació del sistema en un context comercial també seria desitjable. Un programa per a telèfons intel·ligents que executés certes accions (com mostrar publicitat) suposaria una aproximació a una utilitat en la vida diària de molts clients. Estudiar quins requeriments seria capaç de suportar amb la precisió aquí mostrada seria una interessant proposta per un futur projecte.

Referències

- [1] A. Wieser.: *High-Sensitivity GNSS: The Trade-Off between Availability and Accuracy*. Dins H., Kahmen i Chrzanowski A. (editors): *Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG Symposium*, 2006. Disponible a <http://www.u-blox.com>.
- [2] BAGOSI, Timea i Zoltan BARUCH: *RIndoor Localization by WiFi*. Dins *Proceedings 2011 IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pàgines 449–452., agost 2011, ISBN 9781457714795.
- [3] BAHL, Paramvir i Venkata N. PADMANABHAN: *RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system*. Dins *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, volum 2, pàgines 775–784., 2000, ISBN 9780780358805.
- [4] BARNES, J., C. RIZOS, J. WANG, D. SMALL, G. VOIGT i N. GAMBALE: *Locata: The positioning technology of the future?* Dins *Proceedings of the 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services*, pàgines 49–62., juliol 2003. Disponible

- en línia a: <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/snap.htm>.
- [5] BATTITI, Roberto, Thang Le NHAT i Alessandro VILLANI: *Location-aware computing: A neural network model for determining location in wireless LANs*. Report tècnic, 2002. DIT-02-0083.
- [6] BEAUREGARD, Stéphane i Harald HAAS: *Pedestrian dead reckoning: a basis for personal positioning*. Dins *Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06)*, pàgines 27–35., març 2006.
- [7] BOLLIGER, Philipp Lukas: *Robust Indoor Positioning through Adaptive Collaborative Labeling of Location Fingerprints*. Tesi de Doctorat, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2011. Director: Dr. Friedemann Mattern.
- [8] CAFFERY, James. J. i Gordon. L. STUBER: *Overview of radiolocation in CDMA cellular system*. IEEE Communications Magazine, 36(4):38–45, abril 1998, ISSN 0163-6804.
- [9] CHAN, Solomon: *A Hybrid Probabilistic Approach for Wifi Based Indoor Location Estimation*. Tesi de Doctorat, York University de Toronto, Facultat d'Estudis Graduats, març 2013. Director: Dr. G. Sohn.
- [10] CRANE, Robert K.: *Prediction of attenuation by rain*. IEEE Transactions on Communications., 28(9):1717–1733, setembre 1980.
- [11] EVENNOU, Frédéric i François MARX: *Advanced integration of wifi and inertial navigation systems for indoor mobile positioning*. EURASIP journal on applied signal processing, 2006:1–12, 2006, ISSN 1110-8657.
- [12] GARCIA-VALVERDE, Teresa, Alberto GARCIA-SOLA, Hani HAGRAS, James A. DOOLEY, Victor CALLAGHAN i Juan A. BOTIA: *A Fuzzy Logic-Based System for Indoor Localization Using WiFi in Ambient Intelligent Environments*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 21(4):702–718, agost 2013.
- [13] GLANZER, Gerald, Thomas BERNOULLI, Thomas WIESSFLECKER i Ulrich WALTER: *Semi-autonomous Indoor Positioning Using MEMS-based Inertial Measurement Units and Building Information*. Dins *Proceedings of the 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communications 2009*, pàgines 135–139., 2009, ISBN 1424432928.
- [14] HIGHTOWER, Jeffrey, Roy WANT i Gaetano BORRIELLO: *SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength*. Report tècnic, Universitat de Washington, Seattle, febrer 2000.
- [15] KHOSHELHAM, Kourosh i Sander Oude ELBERINK: *Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications*. Sensors, 12(2):1437–1454, 2012, ISSN 0924-4247.
- [16] KING, Thomas, Stephan KOPF, Thomas HAENSELMANN, Christian LUBBERGER i Wolfgang EFFELSBURG: *COMPASS: A Probabilistic Indoor Positioning System Based on 802.11 and Digital Compasses*. Dins *Proceedings of the first ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTECH '06)*, pàgines 34–40., setembre 2006, ISBN 9781595935397.
- [17] KOTANEN, Antti, Marko HÄNNIKÄINEN, Helena LEPPÄKOSKI i Timo D. HÄMÄLÄINEN: *Experiments on local positioning with Bluetooth*. Dins *Proceedings of the International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC 2003)*, pàgines 297–303., abril 2003, ISBN 9780769519166.
- [18] KRACH, B. i P. ROBERTSON: *Cascaded Estimation Architecture for Integration of Foot-Mounted Inertial Sensors*. Dins *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, pàgines 112–119., maig 2008.
- [19] KÖPPE, Enrico, Matthias BARTHOLMAI, Liers ACHIM i Jochen SCHILLER: *Radio-Based Multi-Sensor System for Person Tracking and Indoor Positioning*. Dins IEEE (editor): *Proceedings of the 9th Workshop*

- on Positioning, Navigation and Communications 2012, pàgines 180–186., 2012, ISBN 9781467314374.
- [20] Laoudias, C., G. Constantinou, M. Constantinides, S. Nicolaou, D. Zeinalipour-Yazti i C. G. Panayiotou: *The Airplace Indoor Positioning Platform for Android Smartphones*. Dins *13th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, pàgines 312–315., 2012.
- [21] LIU, Hui, Darabi HOUSHANG, Pat BANERJEE i Jing LIU: *Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 37(6):1067–1080, novembre 2007, ISSN 0924-4247.
- [22] MARTÍNEZ OSPINA, Anaolena: *Realidad Aumentada en Interiores: posicionamiento del usuario en dispositivos móviles y aplicaciones en rehabilitación y guiado (GuIAR)*. Tesina de Llicenciatura, Universidad Politécnica de Madrid, Facultat d'Informàtica, setembre 2013. Director: Dra. Angélica de Antonio Jiménez.
- [23] MAUTZ, Rainer: *Indoor Positioning Technologies, Habilitation Thesis*. Tesi de Doctorat, Technische Hochschule Zürich, febrer 2012. Director: Dr. Friedemann Mattern.
- [24] Moeglein, M. i N. Krasner: *An introduction to SnapTrack server-aided GPS technology*. Dins *11th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1998)*, pàgines 333–342., 1998.
- [25] MULLONI, Alessandro, Daniel WAGNER, Istvan BARAKONYI i Dieter SCHMALSTIEG: *Indoor Positioning and Navigation with Camera Phones*. IEEE Pervasive Computing, 8(2):22–31, 2009, ISSN 0924-4247.
- [26] NEGARD, N. O., R. KAUERT, S. ANDRES, T. SCHAUER i J. RAISCH: *Gait phases detection and step length estimation of gait by means of inertial sensors*. Dins Medical, International Federation for Biological Engineering (editors): *Proceedings of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC 2005)*, volum 11, novembre 2005.
- [27] NI, Lionel M., Yunhao LIU, Yiu Cho LAU i Abhishek P. PATIL: *LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID*. Wireless Networks, 10(6):701–710, novembre 2004.
- [28] OTSASON, Veljo, Alex VARSHAVSKY, Anthony LAMARCA i Eyal DE LARA: *Accurate GSM indoor localization*. Dins Springer-Verlag (editor): *Ubiquitous Computing 2005 (UbiComp 2005), Lecture Notes Computer Science*, volum 3660, pàgines 141–158., 2005, ISBN 9783540287605.
- [29] O'CONNOR, Mary Catherine: *HP SmartLOCUS*. RFID Journal, octubre 2004. Disponible en línia a: <http://www.rfidjournal.com/article/articleview/1211/1/50/>.
- [30] POGGE, Richard W.: *Real-World Relativity: The GPS Navigation System*, 2014. Curs en línia <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit5/gps.html>.
- [31] ROGOLEVA, Luba: *Crowdsourcing Location Information to Improve Indoor Localization*. Tesi de Doctorat, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2010. Director: Dr. Friedemann Mattern.
- [32] SOHN, Timothy, William G. GRISWOLD, James SCOTT, Anthony LAMARCA, Yatin CHAWATHE, Ian SMITH i Michael Y. CHEN: *Experiences with Place Lab: an Open Source Toolkit for Location-Aware Computing*. Dins ACM (editor): *Proceedings of the 28th international conference on Software engineering (ICSE'06)*, pàgines 462–470., 2006, ISBN 1-59593-375-1.
- [33] TOMÉ, Phillip, François BONZON, Bertrand MERMINOD i Kamiar AMINIAN: *Improving pedestrian dynamics modelling using fuzzy logic*. Dins Springer-Verlag (editor): *4th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (Wuppertal, Alemanya, 27-29 de febrer de 2008). Pedestrian And Evacuation Dynamics*, pàgines 503–508., 2008, ISBN 978-3-642-04503-5.
- [34] TSUDA, Yuki, Quan KONG i Takuya MAEKAWA: *Detecting and Correcting WiFi Positioning Errors*. Dins ACM (editor): *Proceedings of the 2013 ACM international joint*

- conference on Pervasive and ubiquitous computing (UbiComp'13)*, pàgines 777–786., 2013, ISBN 978-1-4503-1770-2.
- [35] VILASECA, David Iván i Juan Ignacio GIRIBET: *Indoor Navigation using WiFi signals*. Dins *Proceedings of the Fourth Argentine Symposium and Conference on Embedded Systems (SASE/CASE)*, volum 1, pàgines 14–16., 2013.
- [36] WERB, Jay i Colin LANZL: *Designing a positioning system finding things and people indoors*. *IEEE Spectrum*, 35(9):71–78, setembre 1998, ISSN 0018-9235.
- [37] YOUSSEF, Moustafa i Ashok AGRAWALA: *The Horus WLAN Location Determination System*. Dins ACM (editor): *Proceedings of the 3rd international conference on Mobile systems (MobSys '05)*, pàgines 205–218., 2005, ISBN 1-931971-31-5.
- [38] ÁLVAREZ LÓPEZ, Yuri, María Elena COS GÓMEZ, José Lorenzo ÁLVAREZ i Fernando LAS-HERAS ANDRÉS: *Evaluation of an RSS-based indoor location system*. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167(1):110–116, maig 2011, ISSN 0924-4247.