

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ - DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA - SCUOLA DI SCIENZE

CORSO DI LAUREA IN
SCIENZE E TECNOLOGIE INFORMATICHE

METODI E STRUMENTI PER IL POSIZIONAMENTO INDOOR

Relazione finale in
Basi di Dati

Relatore:
Prof. Maio Dario

Presentata da:
Tinti Erica

2° Sessione
Anno Accademico 2013/2014

Indice

INTRODUZIONE	1
1 METODI E TECNICHE DI POSIZIONAMENTO	3
1.1 PANORAMICA	3
1.2 PROBLEMATICHE	4
1.3 LOCALIZZAZIONE OUTDOOR: IL GPS.....	5
1.3.1 LA STRUTTURA DEL SISTEMA GPS.....	6
1.3.2 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO.....	8
1.4 IPS.....	9
1.4.1 METODI DI RANGING	9
1.4.2 TECNICHE DI POSIZIONAMENTO	15
1.4.3 TECNICHE DI NAVIGAZIONE.....	20
2 TECNOLOGIE DI SENSING.....	23
2.1 RICHIAMI DI FISICA (TEORIA DEI SEGNALI).....	24
2.2 RADIO FREQUENZE.....	25
2.2.1 BLUETOOTH	26
2.2.2 RFID.....	28
2.2.3 RETI CELLULARI.....	30
2.2.4 ZIGBEE	31
2.2.5 WLAN/WI-FI	32
2.2.6 ULTRA WIDE BAND.....	34
2.3 SISTEMI DI NAVIGAZIONE INERZIALE.....	35

2.4 CAMERA.....	36
2.5 ULTRASUONI.....	39
2.6 INFRAROSSI.....	41
2.7 CAMPI MAGNETICI.....	42
2.8 COMPARAZIONE DEI VARI SISTEMI.....	43
3 SISTEMI IBRIDI DI POSIZIONAMENTO	45
3.1 RFID & Kinect.....	46
3.2 UnLoc	48
3.3 INSAR	50
3.4 RFID & WLAN, con rilevamento dello spostamento di un IP	50
3.5 Wi-Fi & Bluetooth.....	52
3.6 Wi-Fi & sensori inerziali	54
3.7 COMPARAZIONE DEI VARI SISTEMI IBRIDI.....	55
4 SISTEMI DI POSIZIONAMENTO UNIVERSALI	57
4.1 ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI POSIZIONAMENTO UNIVERSALE	58
4.2 Sistema di posizionamento ibrido indoor-outdoor per dispositivi mobili	60
4.3 TC-OFDM.....	62
4.4 LOCATA	64
CONCLUSIONI.....	67
Bibliografia	69

Indice delle Figure

1.1	Satelliti GPS.....	6
1.2	Componenti del sistema GPS	7
1.3	Costellazione di satelliti GPS.....	7
1.4	Time of Arrival. In rosso è indicato il nodo del quale si vogliono calcolare le coordinate. In giallo è indicato il margine di errore. Le frecce blu rappresentano la distanza di trasmissione del segnale recepita da ogni singolo nodo.....	11
1.5	Situazione ideale e reale per ToA. Area di incertezza dovuta ad errori...	12
1.6	Time Difference of Arrival. In rosso è indicato il punto del quale si vogliono trovare le coordinate.....	13
1.7	Angle of Arrival	14
1.8	Errori AoA. In rosso è indicato il punto di coordinate non note	14
1.9	Triangolazione.....	16
1.10	Determinazione di un unico punto.....	17
1.11	Multilaterazione.....	18
1.12	Intersezione di iperboli.....	19
1.13	Dead reckoning	21
2.1	Classificazione dei diversi sistemi di posizionamento.....	24
2.2	Raffigurazione di celle adiacenti e relative frequenze	30

2.3	Calcolo della distanza sulla base dell'elaborazione di immagini	38
3.1	Microsoft Kinect, dettaglio sui sensori.....	46
3.2	Architettura del sistema proposto da Wang, et al.	47
3.3	Segnale prodotto dall'accelerometro all'interno di un ascensore.....	48
3.4	Architettura di UnLoc	49
3.5	Meccanismo del sistema proposto.....	51
3.6	Componenti dell'architettura	53
3.7	Determinazione della posizione iniziale dell'utente.....	54
4.1	Possibile architettura di un futuro sistema di posizionamento indoor-outdoor	58
4.2	Esempio di aree e BorderZone.....	61
4.3	Decisional Region in uno spazio bidimensionale.....	62
4.4	Architettura del sistema TC-OFDM	63
4.5	Il sistema di posizionamento Locata.....	64

Indice delle Tabelle

2.1	Classi Bluetooth.....	26
2.2	Frequenze dello spettro elettromagnetico	29
2.3	Comparazione delle caratteristiche di ZigBee, Bluetooth e Wi-Fi.....	31
2.4	Tabella di comparazione di diversi sistemi di posizionamento indoor. In grassetto sono evidenziati i sistemi trattati in questo lavoro. Abbreviazioni: US ultrasuoni, USSP ultrasuoni smartphone, S suoni udibili, CAM camera, CM campi magnetici, BT Bluetooth, CAMSP camera smartphone, CAMM camera marker, IR infrarossi.	43
3.1	Comparazione sistemi ibridi	55

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, poter localizzare persone o oggetti è diventato sempre più di vitale importanza. Si pensi ad esempio alle numerose applicazioni che richiedono di accedere a informazioni relative alla posizione di un dispositivo mobile, al fine di fornire all'utente informazioni legate al contesto di utilizzo. Gli ambiti applicativi che richiedono l'accesso a questo tipo di informazioni sono innumerevoli e possono riguardare la normale vita quotidiana, il marketing, fino ad arrivare al supporto in situazioni di emergenza.

Oggi giorno, la maggior parte della popolazione trascorre buona parte della giornata all'interno di edifici, e sempre di più sono le applicazioni che, anche in ambiente indoor, necessitano di accedere ad informazioni relative alla posizione. Tuttavia, mentre per quanto riguarda il posizionamento in ambiente outdoor il GPS è ormai uno standard de facto, in ambiente indoor il segnale satellitare risulta scarso se non inesistente, e non riesce dunque ad incontrare le

INTRODUZIONE

necessità di grande precisione richieste. La ricerca di un efficiente sistema di posizionamento indoor è dunque un problema che richiede una rapida soluzione.

Per sopperire all'inefficacia del segnale GPS in ambiente indoor, sono stati progettati sistemi di posizionamento basati su diverse tecnologie di sensing quali radio frequenze (Wi-Fi, Bluetooth, ecc.), infrarossi, ultrasuoni, ecc. Spesso però i sistemi di posizionamento basati esclusivamente su una singola tecnologia soffrono di errori dovuti alle limitazioni della tecnologia stessa, che li portano spesso a una minore accuratezza del risultato o all'aumento dei costi dovuto al tentativo di correggere eventuali errori. Per questo motivo la tendenza attuale consiste nell'unire più tecnologie di sensing al fine di aumentarne la precisione e abbatterne i costi, sfruttando al meglio le caratteristiche di ciascuna tecnologia. La sfida per il futuro è costituita dalla ricerca di un unico sistema capace di fornire un servizio di posizionamento accurato sia in ambiente outdoor che indoor.

L'obiettivo di questa tesi è illustrare i principi alla base del posizionamento, e fornire alcune soluzioni al problema del posizionamento indoor.

Il primo capitolo si pone l'obiettivo di comunicare l'importanza del tema e fornire le nozioni di base necessarie per la comprensione degli argomenti trattati nei capitoli successivi. In particolare sono introdotti i principali metodi e tecniche di posizionamento e navigazione. Nel secondo capitolo sono illustrate nel dettaglio alcune tra le più diffuse tecnologie di sensing che rendono possibile, ciascuna con modalità diverse, il posizionamento indoor. Sono inoltre forniti esempi di sistemi di posizionamento, riportandone il livello di accuratezza. Nel terzo capitolo sono trattati i sistemi basati sulla fusione di due o più tecnologie di sensing. Nel quarto e ultimo capitolo sono illustrate le tendenze previste nel campo dei sistemi di posizionamento, e sono forniti esempi di sistemi validi sia in ambiente indoor che outdoor.

CAPITOLO 1

METODI E TECNICHE DI POSIZIONAMENTO

1.1 PANORAMICA

Negli ultimi anni, poter localizzare persone o oggetti è diventato sempre di più di vitale importanza. Si pensi ad esempio alle numerose applicazioni che richiedono di accedere a informazioni relative alla posizione di un dispositivo mobile. Questi servizi, conosciuti come LBS (Location Based Services), fanno uso della posizione geografica di un dispositivo per fornire informazioni relative o legate all'ambiente circostante. Gli ambiti di applicazione di questo genere di servizi sono innumerevoli e spaziano dalla navigazione, all'home automation, dall'ambito social alla realtà aumentata, fino ad arrivare alla sicurezza nazionale [1] [2]. In particolare, in ambiente indoor, conoscere la posizione di un device può risultare utile ad esempio per guidare persone alla ricerca di un determinato prodotto all'interno di un centro commerciale, condurle verso la giusta linea di metropolitana, localizzare persone intrappolate

in un edificio in fiamme, o ancora guidare un robot nell'esplorazione di ambienti sconosciuti o potenzialmente pericolosi per l'uomo, quali ad esempio edifici danneggiati da terremoti, grotte o anche centrali nucleari (nel 2011 fu utilizzato un robot per l'esplorazione della centrale di Fukushima) [1] [3]. Lo sviluppo di nuovi e migliori metodi per il posizionamento indoor potrebbe aprire la strada ad un nuovo mercato.

1.2 PROBLEMATICHE

Mentre in ambiente outdoor sono stati raggiunti buoni risultati per quanto riguarda la precisione della posizione ottenuta, con il posizionamento indoor sorgono numerose problematiche legate alla maggior complessità del contesto:

- La struttura ed i materiali da costruzione, riflettono e rifrangono i segnali, creando così il problema del multipathing¹ che rende complicato determinare la provenienza di un dato segnale
- L'alta densità di ostacoli indebolisce e disperde il segnale. Questo problema prende il nome di fastfading
- La presenza di persone e porte aperte rende l'aria, ovvero il mezzo di trasporto del segnale, soggetta a rapidi cambiamenti climatici che influiscono sulla velocità di propagazione del segnale
- La presenza di ostacoli costituisce anche il problema del NLoS (Non-Line-of-Sight), ovvero la presenza di segnale non in linea diretta
- Infine, in ambiente indoor è richiesta una maggiore precisione dovuta ai requisiti degli specifici ambiti applicativi.

¹ Per multipathing si intende la ricezione dello stesso segnale da direzioni diverse, ed è dovuto ai fenomeni di riflessione e rifrazione

Il posizionamento indoor risente dunque di numerosi errori che diminuiscono la precisione e lo rendono il collo di bottiglia nella ricerca di un unico sistema di posizionamento valido sia in ambiente outdoor che indoor. Infatti, diversi sistemi sono in grado di ottenere la posizione sia che ci si trovi in ambiente esterno che interno, ma le differenze di performance dello stesso sistema differiscono pesantemente, a discapito dell'ambiente indoor [1].

1.3 LOCALIZZAZIONE OUTDOOR: IL GPS

Un GNSS (Global Navigation Satellite System) è un sistema di geolocalizzazione a livello mondiale basato su satelliti. Il sistema più utilizzato e diffuso è GPS NAVSTAR (NAVigation Satellite with Timing and Ranging Global Positioning System), generalmente abbreviato con GPS, che si basa su una costellazione di satelliti artificiali gestita dal dipartimento della difesa degli stati uniti d'America. Come in molti altri casi, anche la navigazione satellitare è nata in campo militare, con lo scopo di tracciare convogli e navi al fine di poter prestare soccorso in caso di necessità, e si è poi estesa al mondo tecnico-civile [4]. Oltre al sistema GPS, esistono altri sistemi di navigazione satellitari appartenenti ad altri organi governativi quali GLONASS (Global Orbiting NAVigation Satellite System) realizzato dall'ex Unione Sovietica, IRNSS sviluppato dall'India, e GALILEO gestito dall'Unione Europea (ancora in fase iniziale) [5]. A differenza dei precedenti, quest'ultimo sistema è stato interamente concepito per scopi civili, e quindi non sarà soggetto a limitazioni, interruzioni e offuscamenti dovuti a strategie di tipo militare [6].

I satelliti GPS (figura 1.1), emettono segnali radio complessi in grado di inviare informazioni dalle quali è possibile ricavare indicazioni relative alla distanza tra il satellite ed un ricevitore sulla terra, e al tempo impiegato dal segnale per raggiungerlo. I livelli di precisione ottenibili variano in base al ricevitore utilizzato, alla modalità di misura, tempi di stazionamento (ovvero per quanto tempo il ricevitore resta nella stessa posizione), numero e disposizione dei satelliti

al momento della ricezione dei segnali (ne sono necessari almeno 4 e maggiore è la distanza tra loro e migliore sarà il risultato ottenuto) [7].



Figura 1.1 Satelliti GPS

1.3.1 LA STRUTTURA DEL SISTEMA GPS

Il sistema GPS è suddivisibile in tre componenti (figura 1.2):

- Il segmento spaziale (Space segment), costituito dai satelliti responsabili dell'invio di segnali radio a terra
- Il segmento di controllo (Control Segment), composto da 5 stazioni a terra, ovvero Colorado Springs (Master control station), Hawaii, Kwajalein, Ascension e Diego Garcia, tutte distribuite in prossimità dell'equatore, che hanno il compito di mantenere sincronizzati gli orologi di tutti i satelliti e conoscere la posizione esatta di questi ultimi in ogni momento ed eventualmente correggerla
- Il segmento utente (User Segment), costituito da un'antenna capace di agganciare i segnali, un ricevitore in grado di decodificarli ed elaborarli, ed un software per il trattamento dei dati ricevuti.

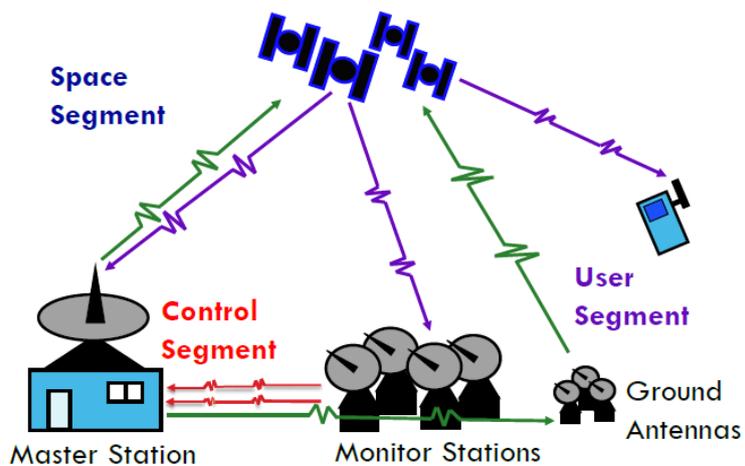


Figura 1.2 Componenti del sistema GPS

Attualmente il segmento spaziale consta di 31 satelliti (dei quali 24 sono garantiti attivi più 3 di scorta), disposti su 6 orbite inclinate di 55° rispetto all'equatore (figura 2.3). In questo modo, e grazie alla presenza di almeno 4 satelliti su ogni orbita, a terra, in situazioni di copertura standard, sarà possibile ricevere il segnale da almeno 5 satelliti [5].

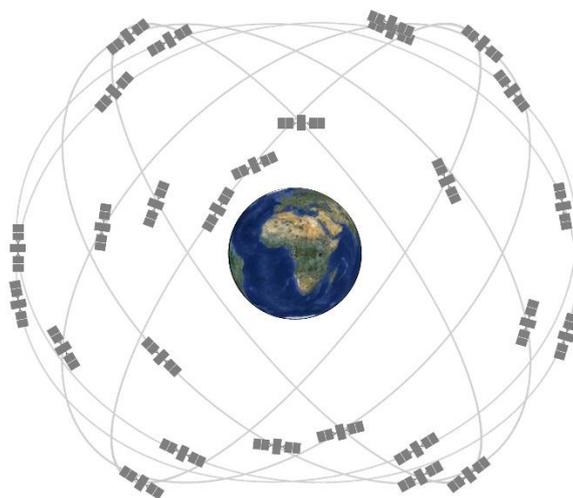


Figura 1.3 Costellazione di satelliti GPS

1.3.2 PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Il principio di funzionamento del GPS si basa sul presupposto che le coordinate dei satelliti, rispetto ad un sistema cartesiano geocentrico, sono note in ogni momento. Il calcolo della posizione del ricevitore si basa sul tempo trascorso tra l'emissione del segnale da parte del satellite e la ricezione dello stesso da parte del ricevitore. Sulla base di queste informazioni infatti è possibile calcolare la distanza tra satellite e ricevitore, e calcolare le coordinate di quest'ultimo per mezzo della tecnica di trilaterazione (paragrafo 1.4.2.2) [7].

Per poter conoscere il tempo impiegato dal segnale per raggiungere il ricevitore, è necessario che sia i satelliti che il ricevitore siano sincronizzati. I satelliti, equipaggiati con orologi atomici ad altissima precisione (al cesio o al rubidio), sono mantenuti sincronizzati dalle stazioni di controllo, mentre i ricevitori, che possiedono orologi molto meno precisi, si sincronizzano ad ogni nuova accensione, utilizzando l'informazione proveniente dal quarto satellite. Se satelliti e ricevitore fossero naturalmente sincronizzati, sarebbero sufficienti 3 satelliti per determinare univocamente latitudine, longitudine e altitudine [5].

Ogni satellite emette su due portanti denominate L1 ed L2, le quali è necessario che abbiano diversa frequenza al fine di valutare e correggere il ritardo causato dall'attraversamento della ionosfera. La portante L1 è l'unica disponibile per uso civile (SPS), mentre la L2 è ad uso esclusivamente militare (PPS), anche se negli ultimi anni alcuni ricevitori possono sfruttare anche questo secondo canale, raggiungendo così maggiori precisioni [5].

Ognuna delle due portanti viene modulata secondo tre codici binari (C/A, P, D) che si ripetono nel tempo e sono detti pseudo-casuali. I ricevitori non autorizzati alla lettura del segnale GPS percepiscono questo segnale come rumore di fondo [7].

1.4 IPS

Oggi giorno, più dell'80% della vita dell'uomo si svolge all'interno di edifici e, come già detto, sempre maggiori sono le applicazioni che necessitano di accedere alla posizione di un device mobile. Il GPS è un sistema con il quale, in ambiente esterno, è possibile ottenere la posizione di un ricevitore con una buona precisione. All'interno degli edifici però, a causa della mancanza di line-of-sight, non è possibile farvi affidamento sia per la copertura limitata, se non addirittura assente del segnale, sia per i molteplici errori dovuti al multipathing che si verrebbero a creare. Ne segue che trovare un efficace sistema di posizionamento indoor si sta rivelando una questione non trascurabile [8].

I sistemi di posizionamento indoor, conosciuti sotto l'acronimo di IPS (Indoor Positioning System), possono essere classificati in base a diversi fattori tra i quali principi di posizionamento (ID, fingerprint o geometrici), tipo di segnale [2], metodi di ranging tra i quali TOA (paragrafo 1.4.1.1), TDOA (1.4.1.2), AOA (1.4.1.3), RSSI (1.4.1.4) e cell-ID, e tecniche di posizionamento come triangolazione (1.4.2.1), trilaterazione (1.4.2.2), multilaterazione o massima verosimiglianza (1.4.2.3), fingerprinting (1.4.2.4), prossimità, trilaterazione iperbolica [4] [8].

1.4.1 METODI DI RANGING

I metodi di ranging servono per determinare la posizione di un emettitore, dati una serie di sensori (almeno 3) di coordinate note. I vari metodi differiscono per accuratezza, hardware e logica di funzionamento. Per ricavare le coordinate dell'emettitore, si possono sfruttare il tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione e la direzione da cui proviene il segnale. I principali metodi di ranging sono ToA (Time of Arrival), TDoA (Time Difference of Arrival), AoA (Angle of Arrival) e RSSI (Received Signal Strength Information).

1.4.1.1 TOA

Il metodo ToA (Time of Arrival) calcola la distanza tra l'emettitore e il nodo ricevente considerando il tempo trascorso tra l'emissione e la ricezione del segnale. Infatti conoscendo la velocità di propagazione del segnale nel mezzo e il tempo impiegato per arrivare da un punto all'altro (time-of-flight, o tempo di volo), lo spazio percorso è direttamente calcolabile nel seguente modo:

$$R_i = c \cdot t \cdot i$$

dove c è la velocità della luce, t è il tempo di trasmissione del segnale ricevuto dal nodo i , ed R_i è la distanza di trasmissione del segnale recepita dal nodo i [3].

Possiamo dunque disegnare un cerchio di raggio R_i e di centro l' i -esimo nodo ancora, in modo tale che il nodo sorgente si trovi teoricamente sulla circonferenza:

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$$

dove (x_i, y_i) è la posizione dell' i -esimo nodo ricevente e (x, y) è la posizione del nodo sorgente.

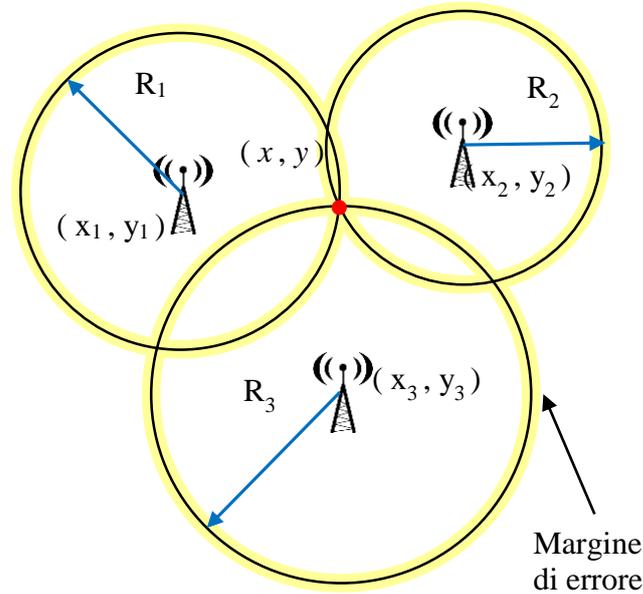


Figura 1.4 Time of Arrival. In rosso è indicato il nodo del quale si vogliono calcolare le coordinate. In giallo è indicato il margine di errore. Le frecce blu rappresentano la distanza di trasmissione del segnale recepita da ogni singolo nodo.

L'intersezione delle circonferenze di tutti i nodi (figura 1.4) indica la regione all'interno della quale si trova il nodo emettitore. Nel caso in cui avessimo 3 nodi riceventi avremmo il seguente sistema:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \\ \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} \end{cases}$$

Affinché questo metodo sia efficace, è necessario avere 3 punti di riferimento (dette anche ancore) e che sia i nodi riceventi che l'emettitore siano sincronizzati [4].

In una situazione ideale, le circonferenze relative ai vari nodi riceventi si intersecherebbero in un unico punto, determinando così la posizione del nodo sorgente, e le cui coordinate (x, y) verrebbero trovate applicando la trilaterazione (paragrafo 1.4.2.2). A causa di vari errori ed

approssimazioni però, non è possibile trovare un unico punto di intersezione (figura 1.5) ma è comunque possibile restringere l'area di ricerca ad una zona relativamente piccola [3].

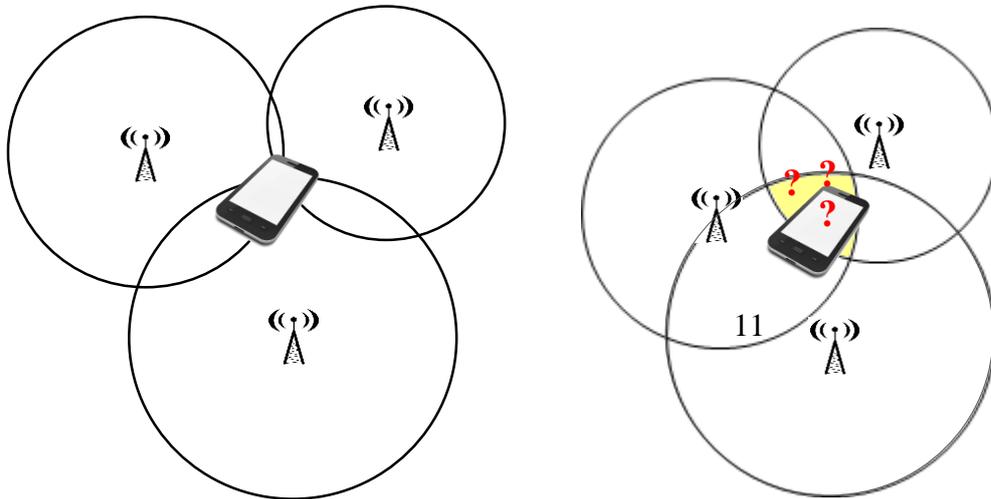


Figura 1.5 Situazione ideale e reale per ToA. Area di incertezza dovuta ad errori

1.4.1.2 TDOA

Il metodo TDoA (Time Difference of Arrival) sfrutta lo stesso principio di ToA, ovvero il tempo impiegato dal segnale per arrivare da un nodo sorgente al nodo ricevente, per poter calcolare la distanza tra i due nodi in questione. A differenza di ToA, che calcola il time-of-flight tra il trasmettitore ed ogni singolo sensore, TDoA sfrutta la differenza di tempo di volo tra gli stessi per calcolare la distanza tra i vari sensori (le cui coordinate sono già note) [3] [4].

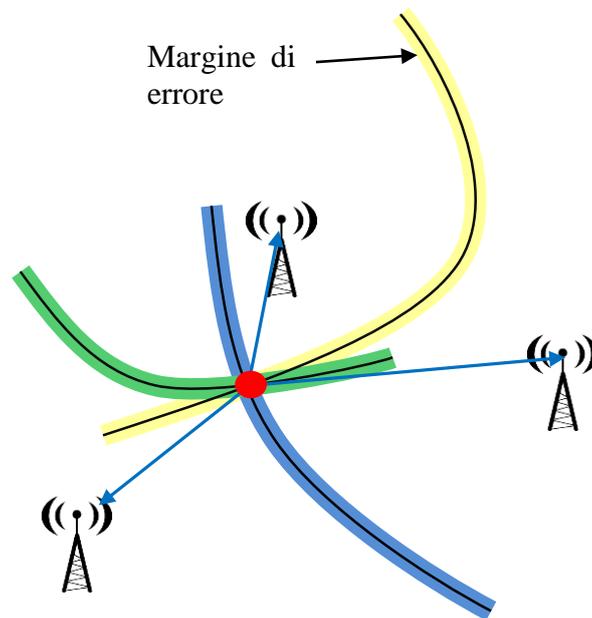


Figura 1.6 Time Difference of Arrival. In rosso è indicato il punto del quale si vogliono trovare le coordinate

Tramite la tecnica della multilaterazione (paragrafo 1.4.2.3), la posizione del trasmettitore sarà trovata in seguito all'intersezione di iperboli calcolate sulla base della distanza nota, e della distanza calcolata tramite time-of-flight (figura 1.6).

A differenza di TOA, nel metodo TDOA non è necessario che tutti i nodi siano sincronizzati, ma è sufficiente che lo siano i nodi ancora [1] [9].

1.4.1.3 AOA

Il metodo AoA (Angle of Arrival) determina la posizione di un device mobile attraverso l'angolo con cui il segnale arriva a due sensori di coordinate note. Applicando poi la tecnica della triangolazione (paragrafo 1.4.2.1), è possibile ricavare le coordinate del trasmettitore, che si troverà sull'intersezione delle due direzioni (figura 1.7) [3].

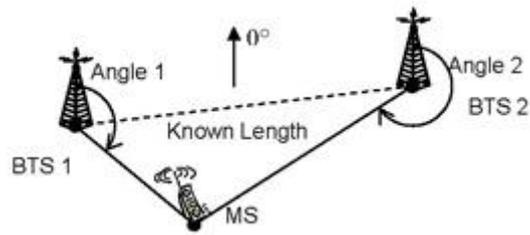


Figura 1.7 Angle of Arrival

È da notare che, all'aumentare della distanza tra emettitore e ricevitore aumenta anche l'errore (figura 1.8).

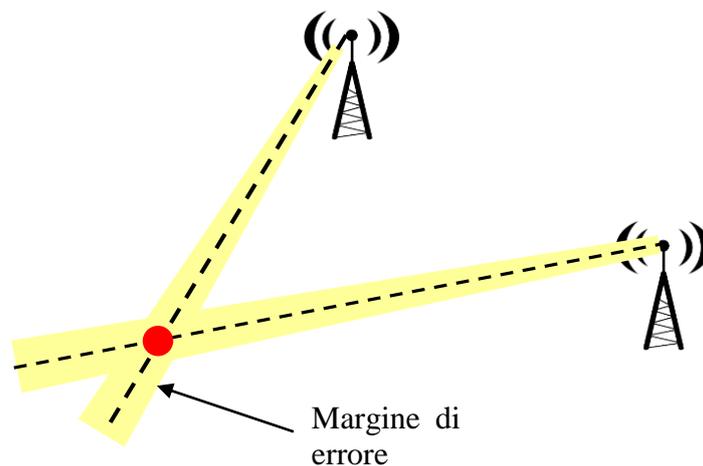


Figura 1.8 Errori AoA. In rosso è indicato il punto di coordinate non note.

Per poter applicare questo metodo sono necessarie antenne capaci di determinare la direzione di provenienza del segnale con una buona precisione. Il numero minimo necessario di antenne è 2 ma, per ottenere una maggiore precisione, è possibile utilizzare più antenne. La necessità di avere un array di antenne capaci di captare l'angolo di arrivo del segnale con una certa precisione, fa aumentare notevolmente i costi di applicazione di questo metodo [4].

1.4.1.4 RSSI

Il Metodo RSSI (Received Signal Strength Informations) si basa sulla potenza ricevuta di un segnale e sulla relazione che intercorre tra l'attenuazione del segnale e la distanza percorsa.

Per fare in modo che questo metodo sia applicabile, è necessario che la sorgente trasmetta il segnale con potenza costante nel tempo e che quest'ultima sia nota al ricevitore. Infatti, conoscendo la potenza con cui viene emesso il segnale e, ovviamente, la potenza con cui il segnale arriva al ricevitore, è possibile calcolarne l'attenuazione. L'attenuazione del segnale è un'importante caratteristica delle onde radio ed è direttamente proporzionale alla distanza e quindi, grazie all'applicazione di alcuni modelli teorici ed empirici basati sulla legge di propagazione del segnale, è possibile ricavare la distanza, nota l'attenuazione.

Per ottenere una buona localizzazione in ambiente indoor sfruttando questo metodo, è necessaria un'analisi preventiva dell'ambiente al fine di memorizzare alcune informazioni, con le quali verranno poi comparati i dati ottenuti durante il rilevamento della posizione, ovvero applicando la tecnica del fingerprinting [4] [8].

1.4.2 TECNICHE DI POSIZIONAMENTO

Una volta ottenute delle informazioni con i metodi di ranging, è necessario elaborare questi dati al fine di trasformare distanze, tempi e potenze di segnale in coordinate, e trovare così la posizione. A tale scopo, esistono diverse tecniche di posizionamento e tra le più importanti figurano la triangolazione, la trilaterazione, la multilaterazione e il fingerprinting.

1.4.2.1 TRIANGOLAZIONE

La triangolazione è una tecnica che permette di determinare la posizione di un punto misurando gli angoli alla base di un triangolo che ha come vertici alla base due punti di coordinate note e

un vertice di coordinate non note come vertice superiore. Per calcolare le coordinate a partire da misure di angoli, si utilizzano le formule della trigonometria [10].

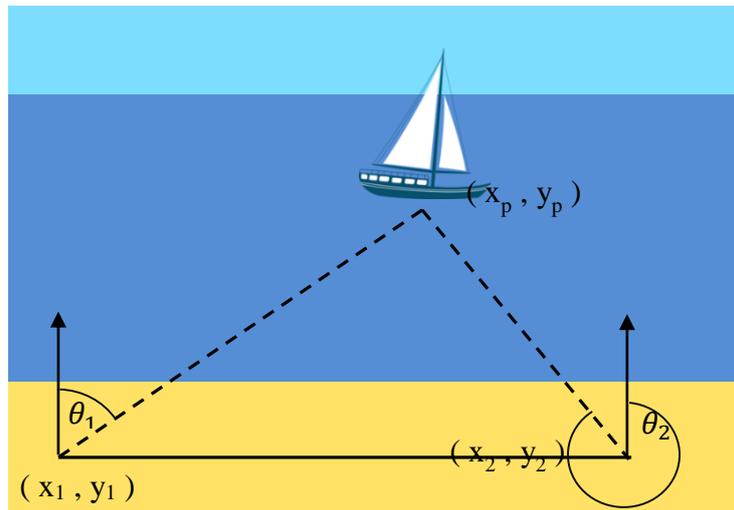


Figura 1.9 Triangolazione

Nel caso pratico dell'applicazione di questa tecnica per il metodo AOA, le coordinate del sensore sono calcolate nel seguente modo [8]:

$$\begin{cases} y_p = x_p \cdot \tan \theta_1 + (y_1 - x_1 \cdot \tan \theta_1) \\ y_p = x_p \cdot \tan \theta_2 + (y_2 - x_2 \cdot \tan \theta_2) \end{cases}$$

dove x_p e y_p sono le coordinate del punto del quale non si conosce la posizione; x_1 e y_1 sono le coordinate del primo punto; x_2 e y_2 sono le coordinate del secondo punto (figura); θ_1 e θ_2 sono rispettivamente l'azimut del primo punto verso p, e l'azimut del secondo punto verso il punto P (figura 1.9).

1.4.2.2 TRILATERAZIONE

La trilaterazione è una tecnica che permette di determinare la posizione assoluta o relativa di un punto misurando distanze, e sfruttando la geometria di cerchi, sfere e triangoli. Questa tecnica si basa sul fatto che, conoscendo la lunghezza dei tre lati di un triangolo, è possibile costruire un solo triangolo, in quanto figura rigida [11].

Sulla base di questi principi, per determinare univocamente le coordinate di un punto, è sufficiente conoscere le coordinate di due punti e le relative distanze dal punto ignoto. Nel caso di utilizzo di onde però, a meno che non si utilizzino antenne direzionali, è impossibile determinare la direzione di provenienza del segnale e, siccome due circonferenze si intersecano in due punti, è necessario avere un terzo punto di coordinate note, così da poter determinare “su quale intersezione” si trova il punto ignoto (figura 1.10).

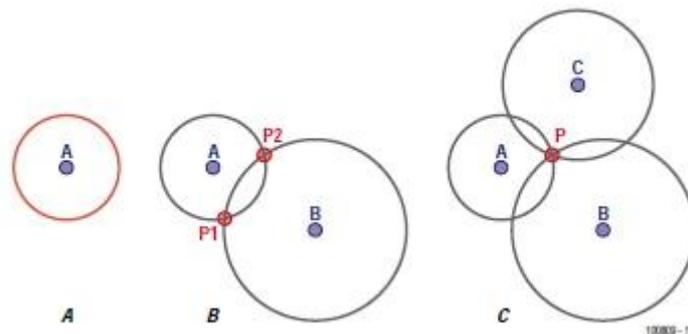


Figura 1.10 Determinazione di un unico punto

1.4.2.3 MULTILATERAZIONE

La tecnica della multilaterazione, anche detta tecnica di massima verosimiglianza, è solitamente applicata in seguito all'utilizzo del metodo TDOA, il quale, ricordiamo, calcola le distanze tra i vari nodi ancora, sulla base della differenza di time-of-flight. Questa tecnica basa la stima

della posizione di un nodo sulla minimizzazione della differenza tra la distanza stimata tramite TDoA, e la distanza effettiva ottenuta dalle coordinate (che sono note) [4] [12].

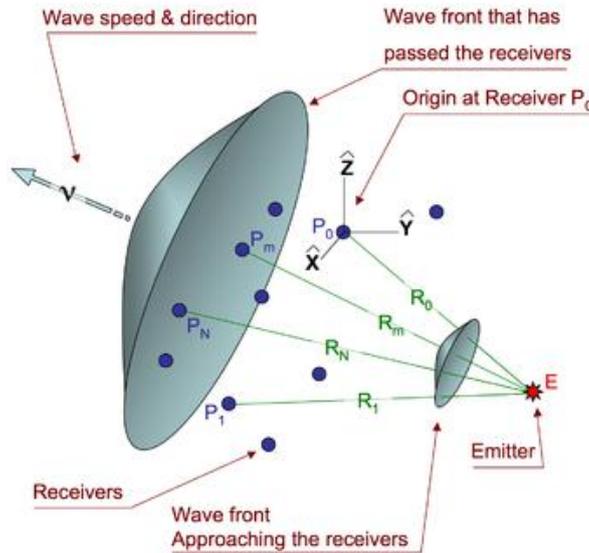


Figura 1.11 Multilaterazione [13]

Consideriamo un emettitore E del quale non sono note le coordinate (x, y, z) .

Siano $P_0, P_1, \dots, P_n, n+1$ punti di coordinate note, tali per cui P_0 sia il primo nodo a ricevere il segnale (figura 1.11).

Essendo l'iperbole il luogo geometrico dei punti del piano per cui è costante la differenza delle distanze da due punti fissi detti fuochi, per ogni nodo ancora i , possiamo costruire un'iperbole che abbia come fuochi il punto P_0 e il punto P_m .

$$R_m = |P_m - E| = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2}$$

Per semplificare i calcoli, facciamo coincidere l'origine del sistema con il punto P_0 :

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Ottenendo dunque:

$$R_m = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Il nodo E si troverà nell'intersezione di tutte le $n+1$ iperboli (figura 1.12).

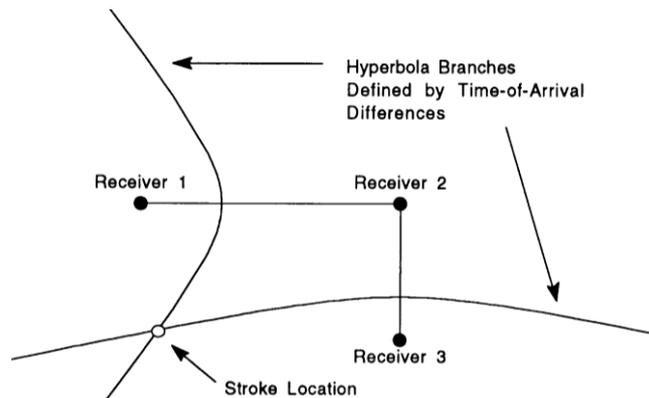


Figura 1.12 Intersezione di iperboli

Affinché sia possibile trovare la posizione di un target nello spazio, sono necessari almeno quattro nodi ricevitori [4] [12] [13].

1.4.2.4 FINGERPRINTING

La tecnica del fingerprinting è usata principalmente in abbinamento col metodo RSSI nel caso di localizzazione a radio frequenza, ma può essere usata anche con segnali audio o video. Questa tecnica consiste di due fasi: una prima fase off-line di analisi della scena e campionatura, e una seconda fase on-line di pattern matching. Durante la prima fase viene redatta una mappa radio, la quale può essere ottenuta o empiricamente eseguendo delle misure sul luogo, o analiticamente. Nel primo caso, viene misurata la potenza di segnale ricevuta in un certo numero di punti all'interno di un edificio, ed emessa da alcuni nodi fissi. Questi dati sono poi memorizzati all'interno di un database e recuperati durante la fase online, in modo tale da poterli comparare con quelli ottenuti in questa seconda fase, e stimare così la posizione del device. Nel secondo caso invece, la potenza del segnale ricevuto in ogni punto è ottenuta analiticamente. In

questo modo si evita la fase preventiva di campionamento, in quanto questi valori possono essere calcolati direttamente durante la fase online [8] [1].

1.4.2.5 SENSOR DATA FUSION

Sensor Data Fusion può essere considerato come un'evoluzione delle tecniche precedenti: si basa sull'elaborazione di dati provenienti dall'utilizzo di tecnologie differenti, come ad esempio Wi-Fi e GPS, al fine di ottenere risultati migliori [8]. La comparazione di dati provenienti da più sensori può apportare i vantaggi appresso elencati [14].

- **Robustezza ed affidabilità:** la ridondanza di sensori permette al sistema di procurare informazioni anche nel caso di parziali guasti.
- **Estensione della copertura spaziale e temporale:** più sensori disposti adeguatamente coprono aree diverse, aumentando così la disponibilità del servizio di posizionamento.
- **Aumento dell'affidabilità:** la misura di un singolo sensore è confermata dalle misure di altri sensori che coprono la stessa area.
- **Riduzione dell'ambiguità e dell'incertezza:** avere a disposizione più informazioni riduce una serie di ambiguità e interpretazioni del valore misurato.
- **Robustezza contro le interferenze:** l'utilizzo di sensori che sfruttano tecnologie differenti (ad esempio sensori ottici e ad ultrasuoni), rende il sistema meno vulnerabile alle interferenze.
- **Miglioramento della precisione:** combinare più misure indipendenti aumenta la precisione del risultato finale.

1.4.3 TECNICHE DI NAVIGAZIONE

Per navigazione s'intende un insieme di tecniche per mezzo delle quali è possibile determinare la posizione e la direzione di un oggetto in movimento, nei vari istanti di tempo [15]. Le principali tecniche sono due: il position fixing e il dead reckoning.

1.4.3.1 POSITION FIXING

Position Fixing è una tecnica di navigazione che si basa sulle misure effettuate su punti di coordinate note per determinare la posizione corrente del punto. Per trovare le coordinate dell'oggetto in movimento, possono essere usati angoli e distanze, applicando quindi le tecniche di posizionamento viste al paragrafo 1.4.2.

1.4.3.2 DEAD RECKONING

Dead Reckoning (dall'inglese deduced reckoning, ovvero "stima derivata", che in italiano viene tradotto con "navigazione stimata") è un processo di stima della posizione corrente di un oggetto, sulla base delle posizioni determinate (o stimate) precedentemente, tenendo conto della velocità e della direzione [1] [16]. Questa tecnica è soggetta ad errori cumulativi, e quindi la deviazione rispetto alla reale posizione cresce nel tempo (figura 1.13). Il motivo di questi errori è dovuto al fatto che la posizione di ogni nuovo punto è calcolata solo in base alla posizione del punto precedente [1].

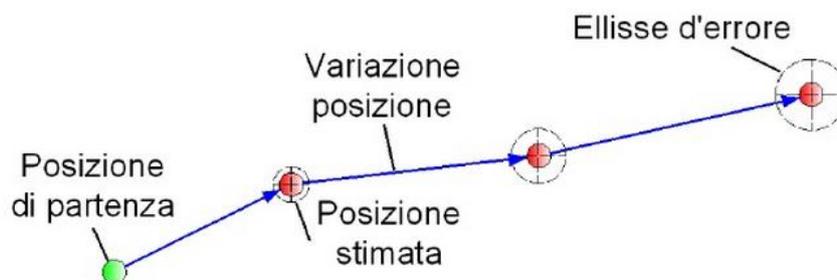


Figura 1.13 Dead reckoning [17]

Per migliorare i risultati ottenuti, questa tecnica è spesso utilizzata in abbinamento con una tecnica di position fixing, o con sensori inerziali.

CAPITOLO 2

TECNOLOGIE DI SENSING

Nel primo capitolo abbiamo introdotto il problema del posizionamento indoor ed illustrato i principali metodi e tecniche di posizionamento e di navigazione. In questo secondo capitolo approfondiremo le tecnologie di sensing, ovvero i vari fenomeni fisici attraverso i quali sono ottenute le informazioni relative ad esempio al time-of-flight di un segnale a ultrasuoni o alla prossimità di un device a un beacon. Il presente capitolo descrive dunque la fase di acquisizione dati, che poi devono essere trattati applicando i vari metodi e tecniche di posizionamento visti nel capitolo precedente, al fine di ottenere una specifica posizione [8].

Per ognuna di queste tecnologie di sensing saranno forniti alcuni esempi di implementazione di sistemi di posizionamento basati esclusivamente su una singola tecnologia, descrivendone il funzionamento ed i relativi livelli di precisione ottenibili.

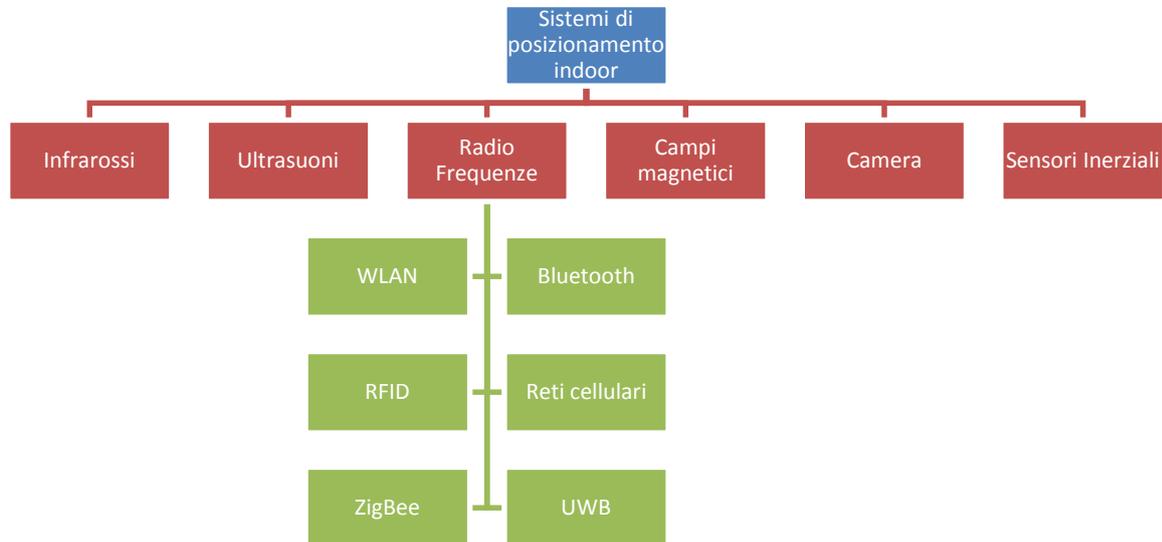


Figura 2.1 Classificazione dei diversi sistemi di posizionamento

Per chiarezza suddivideremo le varie tecnologie in base al tipo di fenomeno fisico sul quale si basano ovvero onde radio frequenze (Wi-fi, bluetooth, RFID, ZigBee, ecc.), ultrasuoni, infrarossi, sensori inerziali, immagini e campi magnetici (figura 2.1).

2.1 RICHIAMI DI FISICA (TEORIA DEI SEGNALI)

Wikipedia, alla voce “Segnale (fisica)” [18], definisce segnale come “una qualsiasi grandezza fisica che varia nel tempo in maniera deterministica o aleatoria (se trasporta informazione), descrivibile quindi in termini di funzione nota del tempo oppure di processo aleatorio”.

Possiamo distinguere 3 principali tipi di segnali:

- Segnali acustici
- Segnali elettrici
- Segnali elettromagnetici

I segnali acustici ed elettrici si propagano attraverso un mezzo solido o fluido (acqua o aria) [19]. In particolare, per i segnali elettrici, il mezzo trasmissivo è sempre un materiale conduttore. Per i segnali elettromagnetici invece il mezzo trasmissivo può essere sia un portante fisico come una guida metallica, una guida dielettrica o un cavo coassiale, sia un portante radio come l'etere o lo spazio libero. I segnali elettromagnetici nel vuoto viaggiano tutti alla velocità della luce ($c = 299\,792\,458$ m/s) [18].

Affinché un segnale trasporti una certa informazione, è necessario che un segnale fondamentale (detto segnale portante) venga modulato dal segnale contenente l'informazione [18].

Possono verificarsi alcuni aspetti indesiderati sulla propagazione e ricezione del segnale, quali [18]:

- Attenuazione: riduzione dell'ampiezza dell'onda in funzione della distanza percorsa, dovuta generalmente alla cessione di energia al mezzo di propagazione [20]
- Rumore: insieme di segnali indesiderati che si sovrappongono al segnale utile [21]
- Interferenza: sovrapposizione di segnali indesiderati al segnale utile, che crea disturbo e distorce il segnale [22]
- Dispersione: allungamento della forma d'onda del segnale trasmesso, dovuto alla dipendenza tra l'indice di rifrazione del mezzo e la frequenza [23]
- Distorsione: alterazione dell'informazione originariamente trasmessa [24]

2.2 RADIO FREQUENZE

Buona parte dei sistemi di posizionamento si basano su radio frequenze, le quali, essendo onde elettromagnetiche, hanno la capacità di propagarsi nel vuoto. In questo paragrafo sono illustrati i principali sistemi di posizionamento basati su radio frequenze quali Bluetooth, RFID, reti cellulari, ZigBee, WLAN ed UWB.

2.2.1 BLUETOOTH

Bluetooth è uno standard che permette la comunicazione senza fili tra dispositivi elettronici per la creazione di reti personali (WPAN: Wireless Personal Area Network) [25]. Le caratteristiche chiave di questa tecnologia sono il basso consumo, il basso costo e la possibilità di essere usata ovunque [26]. Bluetooth comunica usando onde radio con frequenze comprese tra 2.402 GHz e 2.480 GHz, che rientrano dunque all'interno della banda ISM (Industrial, Scientific, Medical) di 2.4 GHz. Questa banda di frequenze è stata riservata ad applicazioni di tipo industriale, scientifico e medico dall'Unione Internazionale delle Comunicazioni (ITU). La specifica Bluetooth è stata concepita da Ericsson nel 1994 e in seguito formalizzata e gestita da Bluetooth Specification Interest Group (SIG).

Bluetooth è diviso in tre classi, ognuna delle quali ha diversa potenza e portata, come mostrato nella tabella 2.1. La maggior parte dei device attualmente in circolazione appartiene alla seconda classe.

Classe	Potenza (mW)	Potenza (dBm)	Distanza (m)
1	100	20	100
2	2,5	4	10
3	1	0	1

Tabella 2.0.1: Classi Bluetooth [25]

Un dispositivo si può connettere al massimo con sette altri dispositivi contemporaneamente, formando così una rete ad-hoc chiamata piconet, all'interno della quale il dispositivo che inizia la comunicazione si comporta come master, mentre gli altri sono slave.

Al fine di ridurre le interferenze tra dispositivi, Bluetooth usa una tecnica nota come spread-spectrum frequency hopping, con la quale ogni device trasmette su una delle 79 frequenze scelta a caso, e cambiando frequenza 1600 volte al secondo. In questo modo si riducono di molto le probabilità che due dispositivi trasmettano alla stessa frequenza e quindi interferiscano tra loro [27].

Per ridurre le interferenze con altre tecnologie che condividono lo stesso spettro di frequenze, Bluetooth utilizza la tecnologia adaptive frequency hopping (AFH). Questa tecnologia si basa sul rilevare ed evitare le frequenze già in utilizzo “saltando” tra le 79 frequenze a intervalli di 1MHz [26].

Prima di installare una rete, un device deve effettuare una richiesta al fine di “scoprire” gli altri dispositivi che si trovano all’interno del range d’azione del segnale bluetooth, e che sono in modalità “rilevabile”, e questi risponderanno inviando informazioni quali nome e indirizzo. Questo processo può durare fino a 10,24 secondi [27].

ZONITH

ZONITH Indoor Positioning Module è un sistema di localizzazione basato su Bluetooth, per il monitoraggio dei dipendenti che lavorano in ambienti pericolosi. Il sistema consiste in alcuni ZONITH Bluetooth Position Beacon che sono distribuiti in una certa area, e sono capaci di tracciare ogni device mobile avente il Bluetooth attivato. I beacon sono connessi via Ethernet e permettono all’utente di aggiornare la potenza del segnale al fine di migliorare la precisione del sistema. Questo sistema di posizionamento è integrato con ZONITH Alarm Control System di Teldio, il quale è in grado di lanciare l’allarme in caso di emergenza [27].

iBEACON

iBeacon è un marchio registrato da Apple (ma può essere sfruttato anche da altri dispositivi) per un sistema di posizionamento basato sulla prossimità. Questa tecnologia si basa sul protocollo Bluetooth LE (Bluetooth Low Energy) ed è costituita da una serie di beacon Bluetooth che inviano segnali che possono essere rilevati da smartphone o altri dispositivi compatibili, abilitandoli ad eseguire determinate azioni. Può essere utilizzata ad esempio, oltre che per il posizionamento in ambiente indoor, per inviare notifiche al passaggio in prossimità di merce in sconto, o per abilitare pagamenti POS [28] [29].

2.2.2 RFID

RFID (Radio Frequency IDentification, ovvero identificazione a radio frequenza) è una tecnologia che permette l'identificazione e/o la memorizzazione automatica di dati. L'identificazione di un oggetto, una persona o un animale avviene mediante radiofrequenza ed è resa possibile dall'utilizzo di particolari etichette elettroniche, capaci di rispondere all'interrogazione a distanza di determinati apparati. Queste etichette, che vengono attaccate o inserite all'interno del soggetto da identificare, prendono il nome di tag (o transponder), mentre gli apparati che inviano l'interrogazione sono detti reader (o interrogator). Questi ultimi sono in grado sia di comunicare con un tag, sia di modificarne le informazioni [30]. Normalmente, i dati inviati da un tag consistono di un id univoco, come ad esempio il numero seriale, e possono essere collegati a informazioni sulla posizione relative al tag stesso [1]. Alcuni tag possono anche essere alimentati tramite induzione elettromagnetica dai campi magnetici prodotti attorno al reader [31]. In base a quest'ultima possibilità, possiamo distinguere i tag come appresso descritto.

- Attivi: alimentati da batterie interne. Sono più pesanti e costosi ma hanno un raggio d'azione molto maggiore (30 metri o più) rispetto a quelli passivi [1]
- Semiattivi: per l'invio di dati usano in parte l'energia ricevuta dall'onda radio del reader, mentre la batteria di cui sono muniti serve principalmente per mantenere attiva la parte circuitale interna [32]
- Passivi: sono completamente privi di batteria e sfruttano l'energia dell'onda ricevuta per trasmettere informazioni

Un sistema RFID è costituito, oltre che da tag e reader, da uno o più server, che hanno il compito di raccogliere gli id dei vari tag inviatigli dai reader, ed effettuare calcoli applicando, ad esempio, un metodo di posizionamento [32].

Il metodo di posizionamento più usato nel caso di utilizzo di tecnologia basata su RFID è il principio di prossimità, conosciuto anche come CoO (Cell of Origin), con il quale ad esempio il sistema indica la presenza di una persona che indossa un tag RFID. In questo modo però, la

precisione di un sistema RFID dipende fortemente dalla densità dei tag impiegati e dal loro maximal-reading-range, ovvero il massimo raggio di copertura. [1]. In alternativa, può essere usato il metodo RSSI per una stima grossolana, in abbinamento con le tecniche di multilaterazione, mentre il metodo ToA è stato provato essere difficilmente applicabile. Al fine di ottenere una precisione migliore di un metro nella distanza tra reader e tag, è necessario effettuare più misurazioni con un'ampiezza di banda di almeno 10kHz.

Generalmente i sistemi RFID possono essere non-intrusivi per l'utente, ad esempio integrandoli nel pavimento, sotto i tappeti o nei muri. Più è alta la frequenza, e più il segnale è soggetto ad attenuazione. Le bande di frequenza tipiche sono classificate come mostrato in tabella.

Low Frequencies (LF)	125/134 kHz
Hight Frequencies (HF)	13.56 MHz
Ultra Hight Frequencies bassa (UHF)	433 MHz
Ultra Hight Frequencies media (UHF)	860/960 MHz
Ultra Hight Frequencies alta (UHF)	2.4 GHz
Super Hight Frequencies (SHF)	5.8 GHz
Ultra Wide Band (UWB)	>5.8 GHz

Tabella 2.2 Frequenze dello spettro elettromagnetico [33]

2.2.2.1 LANDMARC

LANDMARC si basa su tag attivi preprogrammati con un ID affinché siano identificati dal reader. I reader RFID hanno 8 livelli di potenza, dove il livello 1 copre il range più piccolo e il livello 8 il più grande. Ogni reader ha un livello di potenza predeterminato che corrisponde ad un certo range all'interno del quale può essere rilevato il tag. I readers sono posizionati in punti di coordinate note e suddividono l'area in sotto-regioni. I tag che attraversano queste sotto-regioni sono associati alla sotto-regione. L'accuratezza di questo metodo dipende dal numero di reader e dalla loro disposizione [34].

2.2.3 RETI CELLULARI

Le Reti cellulari, grazie allo loro grande copertura e diffusione, possono essere utilizzate per ottenere una posizione anche in ambiente indoor [2]. Proprio per queste caratteristiche, le reti GSM (Global System for Mobile communication) e UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) sono alla base delle moderne infrastrutture di comunicazione senza fili su larga scala [1].

Il funzionamento delle reti mobili si basa sulla suddivisione di una certa area in celle, ognuna delle quali è di competenza di una o più antenne di posizione nota. Ognuna di queste antenne trasmette a una frequenza diversa da quella delle celle adiacenti, al fine di evitare interferenze (figura 2.2) [35].

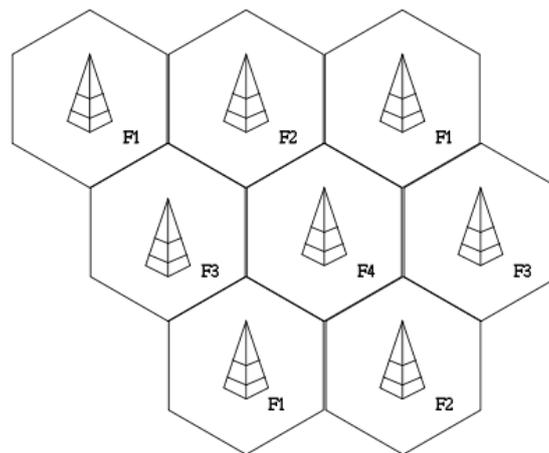


Figura 2.2 Rappresentazione di celle adiacenti e relative frequenze [35]

In Europa, la maggior parte delle reti GSM (2G) opera a frequenze di 900MHz o 1800MHz, e le reti UMTS (3G) a 2100MHz [35]. Anche la tecnologia LTE (Long Term Evolution), considerata di quarta generazione (4G) [36], è capace di offrire un servizio di posizionamento [2]. In Europa, per questa tecnologia, verranno utilizzate le bande di frequenza di 800MHz, 900MHz, 1800MHz e 2600MHz, una volta rese libere [36].

Attualmente, il posizionamento tramite reti mobili si basa sull'applicazione dei metodi Cell-ID, TOA, TDOA, AOA, Fingerprinting su RSSI, Round Trip Delay (RTD), Advanced Forward

Link Trilateration (AFLT), Enhanced-Observed Time Difference (E-OTD) e Observed Time Difference Of Arrival-Idle period downlink (OTDOA-IPDL) [2].

La precisione dei sistemi di posizionamento basati esclusivamente su reti cellulari però è dell'ordine delle centinaia di metri (tra 50 e 300 metri), a causa dell'effetto del NLOS (no line-of-sight), multipathing, asincronia degli orologi nella rete, e così via. Di conseguenza, nonostante l'ampia copertura del segnale cellulare, questo metodo non può essere utilizzato nel posizionamento indoor, il quale richiede precisioni dell'ordine del metro [2].

2.2.4 ZIGBEE

ZigBee è una specifica per una serie di protocolli di comunicazione ad alto livello usati per creare una WPAN (Wireless Personal Area Network) a partire da piccole antenne a bassa potenza [37]. Questa tecnologia si basa sullo standard IEEE 802.15.4, che è stato progettato congiuntamente da ZigBee Alliance e IEEE, ed è caratterizzato da basso consumo di energia, ridotto trasferimento di dati e bassi costi [38]. ZigBee si propone come una tecnologia più semplice e meno costosa delle altre WPAN, come ad esempio il Bluetooth o il Wi-Fi (tabella 2.3) [37].

Caratteristiche	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g/n/n-draft
Bisogno di memoria	4-32 Kb	250 Kb +	1 Mb +
Autonomia con batteria	Anni	Mesi	Ore
Numero di nodi	65 000+	7	32
Velocità di trasferimento	250 kb/s	1 Mb/s	11-54-108-320-1000 Mb/s
Portata (approssimativa)	100 m	10 m	300 m

Tabella 2.3 Comparazione delle caratteristiche di ZigBee, Bluetooth e Wi-Fi [39]

La portata del segnale di un singolo nodo è di circa 100 metri, che scendono a 20/30 metri in ambiente indoor. Anche ZigBee, come molti altri tipi di segnale, opera nella frequenza di banda

ISM, ed è dunque soggetto a interferenza, con conseguenti possibili interruzioni di comunicazione [1].

Una componente fondamentale di ZigBee, è il supporto alle reti mesh, oltre alle reti a stella e ad albero. In una rete mesh, i nodi sono interconnessi con altri nodi in modo tale che ognuno di essi possa essere raggiungibile attraverso più cammini. In questo modo la rete è capace di autoricostruire i cammini nel caso in cui un nodo lasci la rete (fault-tolerant), ed ogni nodo è capace di autoesplorare l'intera rete [40].

2.2.4.1 Sistema di tracciamento di persone con ZigBee

Per tentare di rimediare al problema delle forti interferenze di cui soffre ZigBee, C.H. Chu, et al. [41] propongono due metodi con l'obiettivo di migliorare l'accuratezza del sistema di tracciamento di persone da loro implementato. I due metodi proposti sono NAMVPC (Neighbor Area Majority Vote Priority Correction) e EPC (Environment Parameters Correction). NAMVPC considera i casi in cui i sensori sono distribuiti su più stanze. Quando un sensore associato a una certa persona entra all'interno di una stanza, è usato un sistema di maggioranza per considerare le informazioni provenienti esclusivamente dalla stessa stanza, e ignorare le informazioni relative alle stanze limitrofe. EPC usa lo storico delle informazioni per correggere le coordinate stimate della posizione corrente. Gli esperimenti effettuati da C.H. Chu, et al. mostrano che NAMVPC riesce a ridurre significativamente il discostamento (drifting effect) dalla posizione esatta, ed EPC riesce a migliorare la precisione del posizionamento del 60% circa. L'errore medio di posizionamento è inferiore ai 40 cm.

2.2.5 WLAN/WI-FI

WLAN IEEE 802.11b/g (Wireless Local Area Networks), altrimenti noto come Wi-Fi dal nome del marchio registrato di Wi-Fi Alliance, è uno standard usato per permettere l'accesso ad Internet senza fili all'interno di edifici [2]. Opera a 2.4GHz all'interno della banda ISM, ed ha un raggio d'azione di circa 50-100 metri [42]. Grazie alla loro grande diffusione, le reti wireless

sono una valida soluzione per il posizionamento indoor, ma non lo sono in ambiente outdoor a causa della loro portata limitata [2].

Ottenere il valore di RSS del segnale Wi-Fi non è particolarmente difficile in quanto ogni dispositivo capace di connettersi ad una rete WLAN può accedere all'informazione sulla potenza del segnale, e per questo motivo la maggior parte dei sistemi di posizionamento con WLAN si basano su RSS, in abbinamento con la tecnica del fingerprinting [42].

Un altro metodo, utilizzato ad esempio in Google Maps, è quello del cell-ID, secondo cui è considerato il MAC address dell'Access Point (AP) da cui proviene il segnale, e la posizione dell'utente viene fatta coincidere con quella dell'AP. A causa dell'imprevedibilità dell'ambiente, è difficile determinare la distanza tra device e AP. Di conseguenza l'errore con questo metodo si aggira intorno ai 10/20 metri.

I metodi ToA, TDoA e AoA sono meno comuni nelle reti WLAN a causa della complessità del calcolo del time-of-flight e della misura degli angoli [1].

Il posizionamento basato su fingerprinting e RSS è il metodo più preciso ma prevede la costruzione di un database, con conseguente maggior carico di lavoro, e richiede circa 3 o 4 AP ogni 100 metri quadrati, e ciò lo rende più dispendioso [2].

2.2.5.1 RADAR

Il sistema RADAR fu proposto dal gruppo di ricerca della Microsoft, come un sistema di tracciamento indoor, facente uso delle WLAN esistenti. Questo sistema sfrutta il RSS e il signal-to-noise ratio (SNR) congiuntamente alle tecniche di triangolazione. Il sistema RADAR è in grado di fornire una posizione assoluta in 2D, rendendo così possibile l'utilizzo di applicazioni location-base per l'utente. I principali vantaggi dell'utilizzo del sistema RADAR sono lo sfruttamento di una struttura già presente come la WLAN, e il ridotto numero di base station necessarie per rendere possibile il posizionamento [43].

2.2.5.2 3D-ODIL

In [44] è presentato il sistema 3D-ODIL (3-Dimensional On-Demand Indoor Localization system), il quale non necessita della tecnica del fingerprinting e può essere rapidamente reso operativo all'interno di un edificio a più piani. 3D-ODIL è composto da due fasi: la localizzazione verticale e la localizzazione orizzontale. Nella prima fase è proposto un algoritmo MSD (MultiStorey Differential), che permette di completare la localizzazione verticale, con conseguente grande riduzione del numero di nodi ancora impiegati. Nella seconda fase è utilizzato l'algoritmo EFD (Enhanced Field Division) per realizzare la localizzazione orizzontale, la cui idea principale è quella di dividere dinamicamente i campi all'interno delle diverse aree e posizionare il target.

2.2.6 ULTRA WIDE BAND

Ultra-Wideband (UWB) è una tecnologia a radiofrequenze che può essere utilizzata con basso dispendio di energia, per comunicazioni a corto raggio ed alta velocità, usando un'ampia porzione dello spettro elettromagnetico (>500MHz) [45]. Più precisamente, un'onda radio rientra nelle UWB se la sua larghezza di banda eccede i 500MHz o il 20% del carrier frequency [1]. UWB invia impulsi di breve durata (meno di 1 ns) che rendono possibile filtrare i segnali riflessi dal segnale originale, offrendo una maggiore precisione [43], che si aggira nell'ordine del centimetro [46]. Per questo motivo, l'utilizzo della tecnologia UWB all'interno dei sistemi di posizionamento è stata largamente utilizzata come modo per migliorare la precisione della posizione [43].

2.2.6.1 UBISENSE

Il sistema Ubisense è costituito da tre parti: i sensori, il tag da tracciare e la piattaforma software Ubisense. I tag attivi trasmettono impulsi UWB. I sensori, che sono fissi e dei quali è nota la posizione, ricevono il segnale UWB dal tag. In seguito i dati relativi alla posizione del tag sono inviati, via Ethernet, dai sensori al software che li analizza e mostra la posizione del tag. La

piattaforma software è formata da due parti: Local Engine e Local Platform. La prima è una componente run-time e permette l'inizializzazione dei sensori e del tag, la seconda raccoglie i dati e li elabora [43].

2.3 SISTEMI DI NAVIGAZIONE INERZIALE

Un sistema di navigazione inerziale (INS - Inertial Navigation System) è un sistema di navigazione che si basa sulla raccolta e l'elaborazione di dati provenienti dall'utilizzo di uno o più sensori inerziali, i quali monitorano i vari stati della navigazione di un oggetto sul quale sono montati [47]. Un INS è in grado di calcolare in continuazione, attraverso dead reckoning, la posizione, la velocità e l'orientamento di un oggetto in movimento, senza il bisogno di riferimenti esterni. Un sistema del genere normalmente è quindi costituito da un computer, un giroscopio, in grado di fornire la velocità angolare, ed un accelerometro, in grado di misurare l'accelerazione lineare, e quindi di fornire la velocità rispetto ad un sistema di riferimento [48].

Un sistema di navigazione inerziale deve essere inizializzato con una posizione di partenza (tramite un ricevitore GPS, l'interazione dell'utente, la visualizzazione di un marker, ecc.), e in seguito calcola l'aggiornamento della sua posizione in base alle informazioni ottenute dai sensori inerziali [48]. I pregi dell'utilizzo di questo sistema sono l'alta precisione nella misurazione degli spostamenti (dell'ordine dei decimetri), e l'indipendenza da sistemi esterni (ad eccezione dell'inizializzazione); queste caratteristiche lo rendono applicabile su larga scala, in ambienti sia indoor sia outdoor. L'aspetto negativo è però dovuto al fatto che gli errori si accumulano con il movimento, e per questo motivo questo sistema è raramente utilizzato singolarmente, ed è piuttosto sfruttato come metodo ausiliario per il miglioramento di altri sistemi di posizionamento [2].

Con il termine IMU (Inertial Measurement Unit) si indica un insieme di sensori inerziali racchiusi all'interno di una stessa piattaforma [47]. Grazie alla recente diffusione dei MEMS (MicroElectroMechanical System), è stata possibile la realizzazione di INS leggeri e dalle piccole dimensioni [48], che possono essere integrati all'interno di uno smartphone. Compassi

elettronici e accelerometri sono ampiamente presenti negli smartphone in circolazione, e diversi device di ultima generazione sono equipaggiati anche di un giroscopio. Con il continuo abbassamento dei costi dei MEMS, i dispositivi IMU saranno composti da un numero crescente di sensori e diventeranno una configurazione di base dei futuri smartphone [2].

A causa della limitata accuratezza dei sensori MEMS presenti negli smartphone, è difficile rimuovere completamente gli effetti dell'accelerazione gravitazionale e ciò rende complicato ottenere informazioni precise sul movimento dell'utente. Il più comune metodo che prevede la navigazione assistita da IMU è la navigazione pedestre, conosciuta sotto l'acronimo di PDR (Pedestrian Dead Reckoning). L'idea principale sulla quale si basa questa tecnica è di usare l'accelerazione prodotta dalla camminata per rilevare i passi, stimarne la lunghezza ed aggiornare la posizione sulla base della direzione, generalmente ottenuta attraverso magnetometri o giroscopi.

Se il dispositivo IMU si trova in una posizione fissa, come ad esempio sotto la suola di una scarpa o legato alla cintura [49], l'azimut del movimento è ottenuto tramite il compasso elettronico [2]. Nel caso in cui sia quello di uno smartphone, invece, difficilmente quest'ultimo si trova in una posizione fissa, e diventa quindi difficile determinare la direzione secondo la quale si sta muovendo l'utente, in quanto la direzione del segnale potrebbe cambiare in base ai diversi orientamenti del device [49].

2.4 CAMERA

Il posizionamento tramite sensori ottici sta diventando una delle tecniche dominanti, capace di coprire un largo numero di campi di applicazione a tutti i livelli di precisione, e che trova principale applicazione nel dominio dei millimetri. Il successo di queste tecniche è dovuto ai miglioramenti e alle miniaturizzazioni degli attuatori (ad esempio laser) e in particolare all'avanzamento della tecnologia dei detector (ad esempio sensori CDD o CMOS). In contemporanea, si è avuto l'incremento della velocità di trasferimento dati e delle capacità di

calcolo, così come un notevole sviluppo nel campo dell'immagine processing. Inoltre, un sistema di posizionamento basato su immagini catturate da telecamere, permette di ottenere informazioni aggiuntive quali ad esempio l'identità delle persone inquadrare.

I sistemi di posizionamento indoor basati su sensori ottici possono essere categorizzati come sistemi egomotion in cui un sensore (ad esempio la camera) non fisso deve essere localizzato, e un altro sensore statico si muove all'interno dell'immagine della camera. La posizione del primo sensore è ottenuta analizzando gli spostamenti del secondo sensore durante l'acquisizione dell'immagine. Tutti i sistemi basati sull'utilizzo di camere misurano le coordinate sull'immagine solo in termini di angoli, utilizzando il metodo AoA (Angle of Arrival). Le informazioni sulla profondità possono essere ottenute sfruttando il movimento della camera. In questo approccio, conosciuto come synthetic stereo vision, la scena è osservata sequenzialmente dalla stessa camera posta in punti diversi, e la profondità può essere stimata in maniera simile all'approccio utilizzato nella stereo vision. La baseline tra le varie immagini in sequenza deve però essere determinata attraverso altre tecniche e la scala non può essere determinata solo attraverso le immagini, ed è quindi necessaria un'altra soluzione.

La trasformazione in coordinate reali a partire dalle distanze nell'immagine richiede informazioni aggiuntive. Nel caso sia utilizzata una camera stereoscopica, la scala può essere dedotta dall'immagine ottenuta. L'inconveniente dell'utilizzo di questo tipo di camere è che le performance ottenibili sono direttamente legate alla lunghezza della stereo-baseline, e dunque non è possibile miniaturizzare il dispositivo.

In alternativa, le distanze possono essere direttamente misurate attraverso l'utilizzo di sensori addizionali, quali laser-scanner o range imaging camera. Quest'ultima restituisce un valore distanziometrico per ogni pixel di un'immagine, ad un determinato frame rate. Per determinare una scala in modo grossolano può essere sfruttata anche la posizione dell'autofocus [50].

2.4.1 M. Werner, et al. 2011

M. Werner, et al. [51], propongono un sistema di posizionamento economico e che non ha bisogno di infrastrutture specifiche in quanto si basa sull'utilizzo della camera di uno

smartphone. Il sistema è in grado di raggiungere una precisione dell'ordine dei metri, rileva la direzione di osservazione dell'utente con grande accuratezza, è facile da installare e ottimizzare, ed è molto sensibile alle differenze semantiche dello spazio di navigazione. Nonostante un'imprecisione di un metro potrebbe portare ad un errore sull'identificazione della corretta stanza, i due ambienti sono visualmente diversi e questo sistema ha un rischio minore di attribuire una stanza sbagliata rispetto ad un sistema basato esclusivamente su principi geometrici. Questo sistema sfrutta un database di immagini, a ognuna delle quali corrispondono informazioni aggiuntive quali posizione, direzione, scala, rotazione e descrizione dell'immagine, che sono generate usando l'algoritmo SURF [52].

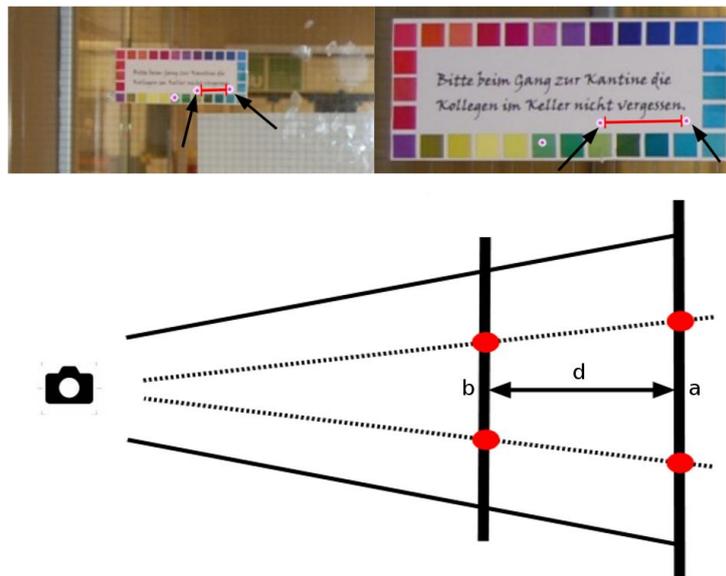


Figura 2.3 Calcolo della distanza sulla base dell'elaborazione di immagini

Il sistema fornisce supporto per tre modalità di stima della posizione. La prima si basa su di un'immagine scattata dall'utente e che è analizzata dal sistema (photo mode). In seguito si ricerca l'immagine corrispondente nel database ed è calcolata la posizione attuale comparando le scale degli oggetti nelle due immagini (figura 2.3). La seconda e la terza modalità si basano su uno stream video ottenuto dal device. Lo stream consiste in immagini di bassa qualità che sono usate per una stima continua della posizione, ma richiedono un'elaborazione più sofisticata a causa della bassa risoluzione e della sfocatura dovuta al movimento. Mentre la

seconda metodologia (averaging) utilizza una media delle posizioni derivata dal match con tutti i frame all'interno di una sliding window dello stream video, la terza modalità (voting) utilizza un algoritmo di voting per il recupero della posizione.

2.5 ULTRASUONI

A differenza delle onde elettromagnetiche, il suono è un'onda meccanica e quindi ha bisogno di un mezzo per propagarsi, come aria e materiali da costruzione ad esempio. Gli ultrasuoni sono caratterizzati da una frequenza superiore ai 20kHz, e non rientrano quindi nel range dei suoni udibili dall'orecchio umano (tra i 20Hz e i 20kHz) [53]. Nei sistemi di posizionamento basati su onde sonore sono maggiormente impiegati gli ultrasuoni, ma esistono anche sistemi di posizionamento basati su suoni udibili [1]. I segnali ad ultrasuoni sono usati in natura dai pipistrelli per muoversi di notte, e questo principio ha ispirato l'essere umano a progettare sistemi di navigazione simili negli ultimi 100 anni [43].

La distanza tra due device può essere stimata a partire dalla misura del Time of Arrival di un impulso che viaggia tra un emettitore e un ricevitore ad ultrasuoni. Per evitare la sincronizzazione degli orologi però, spesso viene utilizzato il metodo di Time Difference of Arrival anziché TOA. A differenza delle onde radio, con gli ultrasuoni il raggio di operatività è limitato a 10 metri o meno, a causa dello specifico decadimento dell'onda acustica attraverso il canale aereo.

Al fine di ottenere le coordinate di un device è possibile utilizzare la tecnica della multilaterazione. Esistono due principali tipi di architetture: una prevede di localizzare un emettitore conoscendo le coordinate di tre o più ricevitori di posizione fissa, l'altra richiede invece di localizzare un ricevitore in base alla posizione di 3 o più emettitori di posizione fissa. I device delle architetture del primo tipo sono detti attivi, mentre quelli del secondo tipo sono detti passivi. Inoltre in letteratura i ricevitori sono noti come listener, ed i nodi emettitori come beacon [1].

2.5.1 Posizionamento tramite segnali audio prodotti da uno smartphone

Lopes, Vieira, Reis, Albuquerque, Carvalho [54] propongono un sistema di posizionamento indoor basato su segnali acustici e compatibili con un comune smartphone. Questo sistema sfrutta le capacità di uno smartphone di processare segnali audio I/O, utilizzando segnali acustici non invasivi come tecnologia di sensing, ed è stato progettato con un'architettura distribuita, permettendo così, ad esempio, che ogni smartphone sia in grado di ottenere la propria posizione sfruttando solo segnali acustici. L'architettura è composta da una serie di beacon acustici (almeno 3 per stanza), i quali emettono suoni con frequenze comprese tra i 18 e i 22 kHz (normalmente non udibili dall'orecchio umano). Il sistema utilizza un metodo di Time Difference of Arrival (TDOA) migliorato che sfrutta la periodicità dei segnali emessi dai beacon, in questo modo non è necessario sincronizzare lo smartphone con i beacon. Per mantenere i beacon sincronizzati gli autori hanno realizzato il protocollo ATSS (Automatic Time Synchronization and Syntonization) che assicura una differenza di sincronizzazione minore di 5 μ s. Grazie all'approccio sopra descritto, ed applicando inoltre un algoritmo per mitigare gli effetti del NLOS, questo sistema riesce a garantire una precisione stabile e accurata, con un errore assoluto di meno di 10 cm nel 95% dei casi, e con una deviazione standard media di 2.2 cm, per un periodo di aggiornamento della posizione di 350ms.

2.5.2 Guoguo

Guoguo [55] è un altro sistema basato su segnali acustici prodotti da beacon, che fungono da nodi ancora, ed elaborati da un comune smartphone. Affinché quest'ultimo possa localizzarsi, è necessario che riceva segnali da almeno 3 nodi. I beacon trasmettono periodicamente un segnale acustico modulato sui token del controller. Rilevando e estraendo le informazioni contenute all'interno dei segnali inviati dai beacon, lo smartphone demodula il codice e calcola il relativo TOA. Un algoritmo in esecuzione sullo smartphone elimina le misure errate con un metodo basato su dati statistici ed accede alla posizione del nodo ancora eseguendo un confronto con gli pseudocodici. Un server fornisce servizi come localizzazione e navigazione al fine di rendere efficiente il posizionamento real-time e minimizzare i costi di esecuzione e

memorizzazione su uno smartphone. L'accuratezza del sistema Guoguo è compresa tra i 6 e i 25 cm.

2.6 INFRAROSSI

La radiazione infrarossa (IR) è una radiazione elettromagnetica, la cui lunghezza d'onda, compresa tra 700nm e 1mm, è maggiore di quella dello spettro del visibile, ma minore rispetto a quella delle onde radio [56].

Un sistema di posizionamento basato su infrarossi necessita di una comunicazione line-of-sight tra il trasmettitore e il ricevitore, nonché dell'assenza di interferenze con intense fonti luminose. A causa di queste limitazioni, l'utilizzo di un sistema ad infrarossi si limita ad una stanza [43], con conseguente aumento del costo per l'installazione dei sensori e loro manutenzione [46]. I tre metodi principali per lo sfruttamento dei segnali infrarossi sono: l'uso di beacon attivi, la cattura di immagini infrarosse utilizzando radiazioni prodotte in natura, o fonti di luce artificiali [1].

2.6.1 Active Badge

Active Badge è uno dei primi sistemi di posizionamento indoor basati su badge progettati da AT&T Cambridge negli anni '90, che fornisce una posizione simbolica di ogni badge attivo, come ad esempio la stanza in cui si trova. Stimando la posizione del badge attivo tenuto al fianco della persona, il sistema Active Badge può determinare la posizione della stessa all'interno della sua area di copertura.

Un badge attivo trasmette un segnale IR univoco ogni 15 secondi. In ogni singolo ambiente equipaggiato con questo sistema come ad esempio una stanza, sono fissati uno o più sensori, i quali rilevano il segnale inviato da un badge attivo. La posizione del badge è determinata dai sensori, che sono collegati via cavo, e che inoltrano queste informazioni al server centrale [43].

2.7 CAMPI MAGNETICI

L'utilizzo dei campi magnetici è certamente uno dei metodi più antichi che l'uomo ha impiegato per definire o tracciare la propria posizione. I sistemi di posizionamento basati sui campi magnetici offrono un'alta precisione e non soffrono del problema del LOS [43].

I campi magnetici possono essere generati a partire da una bobina usando la corrente alternata (AC, Alternating Current), o impulsi di corrente continua (DC, Direct Current). I campi elettromagnetici possono anche essere usati per ottenere una posizione combinando l'uso dei campi elettrici e dei campi magnetici. Le due fonti di campi elettromagnetici sono le cariche statiche che producono campi elettrici, e la corrente che produce campi magnetici. Le cariche oscillanti producono sia campi magnetici che elettrici.

A differenza dei sistemi basati su bobine alimentate con impulsi di corrente continua, i sistemi basati su corrente alternata sono meno influenzati dal campo magnetico terrestre e dai campi magnetici prodotti dai device elettronici [1].

2.7.1 *IndoorAtlas*

Il sistema di posizionamento IndoorAtlas [57] è stato sviluppato da una startup finlandese e s'ispira al fatto che alcuni animali sono in grado di dedurre la propria posizione rispetto alla loro destinazione sfruttando segnali relativi alle varie locali anomalie del campo magnetico terrestre. I moderni edifici, grazie alla loro struttura in acciaio o cemento armato, possiedono un proprio unico campo magnetico, che varia spostandosi all'interno dell'edificio, e che può essere sfruttato per il posizionamento nello stesso modo in cui gli animali sfruttano le variazioni del campo magnetico terrestre. L'accuratezza della tecnologia IndoorAtlas all'interno dei moderni edifici è compresa tra 0.1 e 2 metri, anche se varia in base alla tipologia costruttiva dell'edificio.

Il punto di forza di questa tecnologia sta nel fatto che non sono necessarie infrastrutture hardware particolari in quanto attualmente tutti gli smartphone sono muniti di un compasso elettronico, capace di catturare le fluttuazioni del campo magnetico, ed è implementato

completamente via software. Queste caratteristiche lo rendono un sistema utilizzabile ovunque (ubiquitous system).

2.8 COMPARAZIONE DEI VARI SISTEMI

Per completezza mostriamo una tabella riassuntiva di alcuni sistemi di posizionamento basati esclusivamente su una singola tecnologia di sensing. Nella tabella 2.4 sono elencati oltre ai sistemi descritti in questo capitolo, anche altri sistemi che si è ritenuto importante citare. Per ogni sistema sono indicati nome, anno di pubblicazione, tecnica di sensing, metodologia di ranging, accuratezza, banda di frequenza (dove presente), costi (se noti).

Nome	Anno	Tecnica di sensing	Metodologia di ranging	Accuratezza	Costi
OPTOTRAK	2008	IR	-	0.1 – 0.5 mm	alti
Firefly	2008	IR	-	3.0 mm	alti
Beep	2005	S	TOA	0.4 cm	bassi
MotionStar	2007	CM	-	1 cm	alti
Schweitzer et al	2010	US/S	TDOA	1 cm	medi
Active Bat	2008	US	TOA	3.0 cm	alti
Lopes et al	2012	US	TOA	9.6 cm	medi
Mulloni	2009	CAMSP	-	cm – dm	bassi
Lopes et al	2014	USSP/S	TDOA	< 10 cm	bassi
Cricket	2005	US	TOA	10 cm	medi
Ubisense	2008	US	TDOA, AOA	15 cm	alti
Guoguo	2013	USSP/S	TOA	6 – 25 cm	bassi
Chu et al	2011	ZIGBEE	RSSI	< 40 cm	medi
Smartmuseum	2009	RFID	-	0.50 m	-
Wifarer	2012	WLAN	RSSI fingerprint	1.3. m	-
COMPASS	2006	CAM	RSSI fingerprint	1.65 m	medi
IndoorAtlas	2012	CM	RSSI	10 cm – 2 m	bassi
Sky-Trax	2010	CAMM	-	2 – 30 cm	-
StarGazer	2008	CAMM	-	cm – dm	medi
3D-ODIL	2014	WLAN	-	-	bassi

Nome	Anno	Tecnica di sensing	Metodologia di ranging	Accuratezza	Costi
Ekahau	2008	WLAN	RSSI	1 m	medi
Werner et al	2011	CAMSP	-	m	bassi
RADAR	2000	WLAN	fingerprint	2 – 3 m	bassi
WhereNet	2008	RFID	-	2 – 3 m	medi
LANDMARC	2004	RFID	-	Num sensori	-
Sonitor	2008	US	-	stanza	bassi
Active Badge	2008	IR	-	stanza	-

Tabella 2.4 Tabella di comparazione di diversi sistemi di posizionamento indoor. In grassetto sono evidenziati i sistemi trattati in questo lavoro. Abbreviazioni: US ultrasuoni, USSP ultrasuoni smartphone, S suoni udibili, CAM camera, CM campi magnetici, BT Bluetooth, CAMSP camera smartphone, CAMM camera marker, IR infrarossi. [58] [54] [43] [55] [50] [41]

CAPITOLO 3

SISTEMI IBRIDI DI POSIZIONAMENTO

Nel secondo capitolo abbiamo descritto le principali tecnologie di sensing, fornendo esempi per ognuna di esse. Spesso però i sistemi di posizionamento basati esclusivamente su una singola tecnologia soffrono di errori dovuti alle limitazioni della tecnologia stessa, come ad esempio la scarsa copertura per i sistemi basati su ultrasuoni o infrarossi, le interferenze per tecnologie a radio frequenze e gli accumuli di errori nei sistemi basati su sensori inerziali. Queste limitazioni portano spesso a una minore accuratezza del risultato o all'aumento dei costi dovuto al tentativo di mitigare gli eventuali errori. Per questo motivo spesso più tecnologie sono usate all'interno di un singolo sistema di posizionamento al fine di aumentarne la precisione e abbatterne i costi, sfruttando le potenzialità di ciascuna tecnologia.

In questo terzo capitolo illustreremo alcuni recenti sistemi di posizionamento che fanno uso di più tecnologie di sensing.

3.1 RFID & Kinect

C.S. Wang, et al. [59], propongono un sistema di posizionamento indoor basato su tag RFID attivi e il noto controller Kinect della Microsoft. Kinect è un dispositivo originariamente pensato per Xbox 360 che è sensibile al movimento del corpo umano [60]. Questo dispositivo è composto da una camera RGB e due sensori infrarossi (un emettitore e un ricevitore) che insieme costituiscono il sensore di profondità (figura 3.1). Combinando le funzioni di identificazione e posizionamento di RFID, e l'abilità di Kinect estrarre e distinguere i diversi oggetti, è stato realizzato un sistema capace di analizzare le identità e la posizione delle persone in modo accurato ed efficiente.

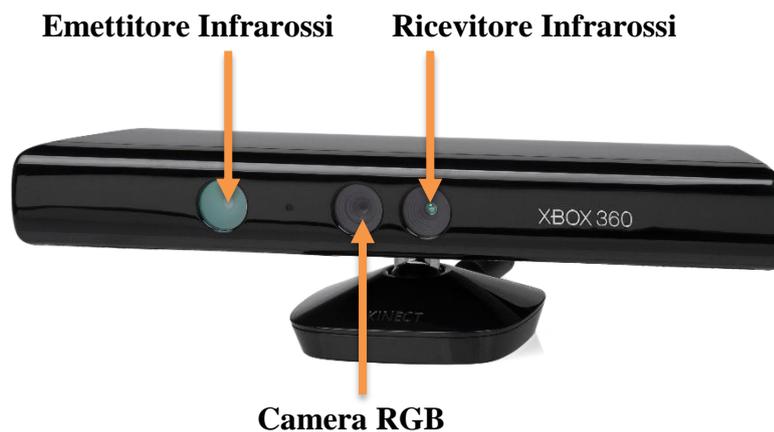


Figura 3.1 Microsoft Kinect, dettaglio sui sensori [60]

Questo sistema è costituito da due parti, ovvero un meccanismo di posizionamento RFID con tag attivi, e un meccanismo basato su Kinect. L'architettura del sistema è mostrata nella figura 3.2.

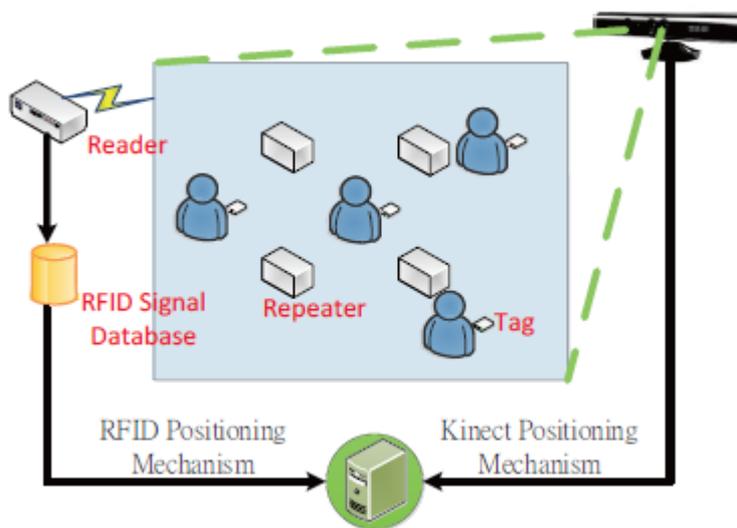


Figura 3.2 Architettura del sistema proposto da Wang, et al.

Per la parte relativa al posizionamento RFID, durante i test, sono stati precedentemente sistemati sulla scena alcuni Repeaters RFID attivi, e successivamente il tester, che trasporta il tag RFID attivo, inizia a muoversi tra i vari blocchi. Contemporaneamente, il Reader acquisisce i segnali inoltrati dai vari tag, e analizza una scala di potenza del segnale (RSS) relativa ai tag. In seguito il sistema determina i valori di RSS dei vari blocchi in base alle informazioni di RSS raccolte, e memorizza i relativi dati all'interno di un database al fine di completare l'analisi e l'inizializzazione dell'ambiente.

Per quanto riguarda la parte del sistema relativa al posizionamento tramite Kinect, quest'ultima è montata in alto e punta sull'area oggetto di studio. Le informazioni relative alle persone in movimento all'interno dell'area possono essere ottenute immediatamente grazie all'accurata funzionalità di Kinect di individuazione delle persone, e la posizione corrente delle persone sulla scena è determinata attraverso un'equazione di trasformazione delle coordinate. Infine, il risultato ottenuto dal posizionamento tramite RFID è comparato con i risultati ottenuti per mezzo di Kinect. L'unione dei dati provenienti da entrambi i sistemi è effettuato in base al principio di distanza minima, e ciò significa che le informazioni di RFID sono perfettamente integrate con il preciso risultato del posizionamento con Kinect.

3.2 UnLoc

UnLoc [61] è uno schema di localizzazione indoor “unsupervised” che “bypassa” il bisogno di wardriving¹. È implementato sotto forma di applicazione Android. Questo sistema si basa sull’osservazione che certe zone di un edificio presentano dei segni distintivi (sensor signature) rilevabili da uno o più tipi di sensori.

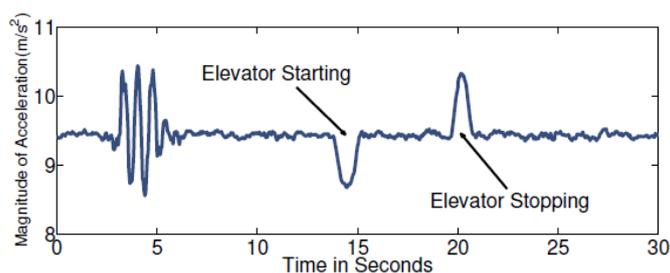


Figura 3.3 Segnale prodotto dall'accelerometro all'interno di un ascensore [61]

Ascensori, scale, ingressi, scale mobili ad esempio, forzano l’utente a muoversi in un certo modo, che implica un certo pattern caratteristico dell’accelerometro di uno smartphone (figura 3.3). Questo comportamento prevedibile può essere trasformato in un punto di riferimento (SLM, Seed LandMark). Oltre a questo tipo di sensor signature, UnLoc ipotizza che all’interno di ogni edificio siano presenti altri tipi di signature, che possono rientrare nel dominio magnetico, o in quello dei segnali di reti wireless. Per quanto riguarda il dominio magnetico, all’interno di un edificio in certi punti possono verificarsi fluttuazioni del campo magnetico, rilevabili dal magnetometro (bussola elettronica) di uno smartphone, dovuti alla presenza di masse metalliche (si è già parlato di questo fenomeno nel paragrafo 2.7.1 relativo al sistema “IndoorAtlas”). Anche la ricezione di segnali WiFi provenienti da un determinato insieme di access point (o anche la completa assenza di segnali) può essere caratteristica di una specifica area dell’edificio, e in particolare dell’angolo dei corridoi, in cui si incontrano i segnali

¹ Il wardriving è un’attività che consiste nell’intercettare reti Wi-Fi durante lo spostamento in automobile, in bicicletta o a piedi, usando un laptop o uno smartphone [65].

provenienti dai diversi passaggi. Inoltre, anche certe abitudini degli utenti potrebbero essere considerate come signature, come nel caso di una fontanella d’acqua in corrispondenza della quale diversi utenti si soffermano. Questo secondo tipo di sensor signature è detto OLM (Organic LandMarker).

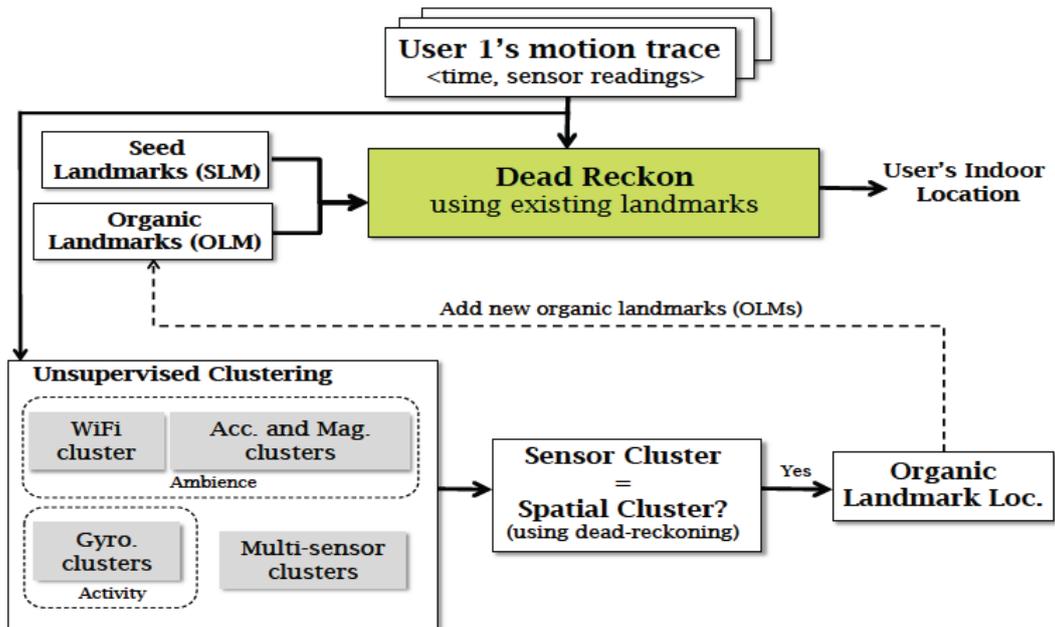


Figura 3.4 Architettura di UnLoc [61]

L’idea principale del sistema è ricorsiva ed è mostrata in figura 3.4. I diversi utenti si muovono normalmente all’interno dell’edificio, permettendo ai vari sensori montati sullo smartphone di collezionare dati, e quindi determinare una posizione approssimativa dei diversi landmark. La navigazione tra i vari landmark è effettuata tramite la tecnica del dead reckoning (paragrafo 1.4.3.2). Al passaggio in prossimità di uno di questi landmark lo smartphone è in grado di percepirne la presenza e quindi di ricalibrare la propria posizione sulla base di quella del landmark. Da questa affermazione si deduce che la diffusione dei landmark all’interno dell’edificio influisce direttamente sull’accuratezza del sistema in quanto è in grado di mitigare l’accumulo di errori proprio del dead-reckoning. La posizione dei marker, a sua volta, si affina con i dati collezionati dai vari utenti. Questo processo ricorsivo fa in modo che l’accuratezza della posizione migliori nel tempo.

Dai test effettuati risulta che UnLoc è in grado di fornire un'accuratezza media di 1.69 metri in modalità online e 0.89 metri in modalità offline. Il sistema riesce a raggiungere la convergenza in meno di due ore di utilizzo, e risulta robusto ai cambiamenti dell'ambiente.

3.3 INSAR

INSAR (Indoor Navigation System Using Augmented Reality) [62] è un sistema di navigazione indoor, implementato sotto forma di applicazione Android, che sfrutta le reti WLAN ed i sensori inerziali al fine di guidare l'utente verso una destinazione, e mostrando i relativi dati di navigazione attraverso la realtà aumentata, senza dunque visualizzare alcuna mappa. Il posizionamento è ottenuto tramite fingerprinting dell'RSS del segnale Wi-Fi determinato precedentemente in specifici punti fissi (RP - Reference Point) e memorizzato all'interno di un database. Mentre la maggior parte dei sistemi calcola l'intero percorso tra il punto di inizio e la destinazione, INSTAR memorizza la direzione verso la destinazione da ogni singolo reference point, considerando il cammino più breve. Il cammino minimo è determinato calcolando il numero di RP sul percorso tra il RP corrente e quello di destinazione, in entrambi i versi. Il cammino più corto sarà quello con minor numero di RP poiché questi sono disposti in modo tale da essere tutti equidistanti fra loro. Effettuare questi calcoli e memorizzarne la direzione nel database permette un minor costo computazionale per il calcolo della posizione e, nel caso di instabilità del segnale Wi-Fi, il sistema è comunque in grado di indicare la direzione da seguire. Il giroscopio è utilizzato per determinare la direzione e mostrarla nello schermo sotto forma di freccia in realtà aumentata. I pregi di questo sistema sono quindi l'assenza di infrastrutture aggiuntive e l'autonomia di ogni singolo smartphone nell'effettuare i calcoli necessari, non essendo così strettamente legato alla stabilità della rete.

3.4 RFID & WLAN, con rilevamento dello spostamento di un IP

Qi e Xu [63] hanno realizzato un sistema di posizionamento che combina i benefici delle reti WLAN e dei tag RFID. Inoltre propongono un sistema per il rilevamento dello spostamento di

un determinato IP all'interno di una rete. Infatti l'implementazione originaria di IP/TCP non era stata progettata pensando a dispositivi in movimento. Oggi però il successo delle reti Wi-Fi è in parte dovuto proprio alla possibilità offerta agli utenti di poter accedere ad internet non solo da una postazione fissa ma anche in movimento. Siccome l'instradamento dei pacchetti a livello di rete si basa sul prefisso dell'IP di un nodo che identifica, oltre al nodo stesso, anche la sottorete a cui il nodo appartiene, succede che quando un device si sposta e accede alla rete attraverso un altro access point, cambia l'indirizzo di sottorete del device e la consegna del traffico IP fallisce. I risultati ottenuti per entrambi i problemi forniscono soluzioni con un'ottima risposta in termini di tempo e accuratezza.

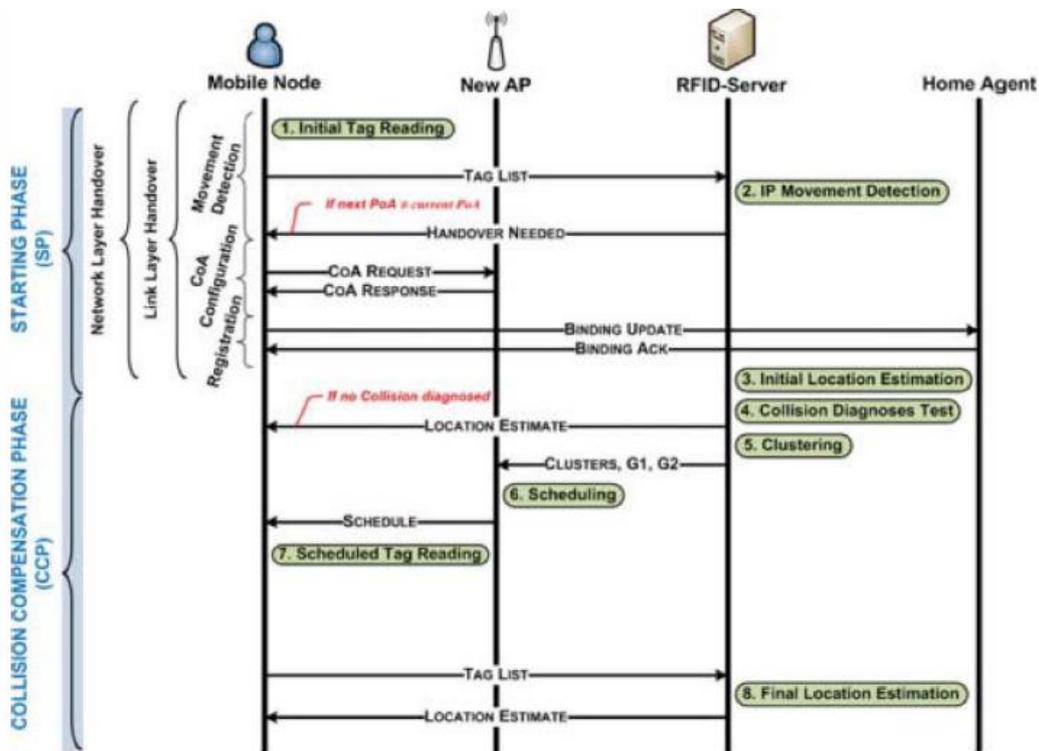


Figura 3.5 Meccanismo del sistema proposto [63]

Il sistema considera una rete wireless divisa in un insieme di sottoreti più piccole, ognuna servita da un singolo AP (Access Point), che agisce da Access Router. All'interno dell'intera rete, un insieme di device si spostano tra queste sottoreti. Un device, quando si trova all'interno di una sottorete servita da un AP, questo AP è il suo Point of Attachment (PoA) per accedere a

Internet. Ogni terminale è anche equipaggiato con un Reader RFID che recupera informazioni da un insieme di tag RFID passivi disposti in griglia nel pavimento sotto l'area. Ogni tag ha una posizione nota e pertanto rappresenta un punto di riferimento (reference tag). Infine, un server dedicato all'interno del dominio della rete, chiamato RFID-Server, mantiene un database che è utilizzato sia per la localizzazione sia per il rilevamento dello spostamento di device tra le sottoreti. Questo database raccoglie informazioni legate sia alla posizione sia alla topologia o connettività dei reference tag, e per questo motivo è detto Location and Connectivity Database (LCD). Il sistema proposto è schematizzato in figura 3.5.

3.5 Wi-Fi & Bluetooth

Baniukevic, Jesen e Lu [64] propongono un sistema di posizionamento basato sull'integrazione di Wi-Fi e reti di sensori Bluetooth. Come già illustrato nel paragrafo 2.2.5, la tecnologia Wi-Fi gode di grande diffusione ed è in grado di offrire un'ampia copertura in ambiente indoor, ma è difficile ottenere grandi precisioni se non con elevati costi architetture e computazionali. Il Bluetooth (paragrafo 2.2.1) al contrario è una tecnologia a basso costo, ma che offre una scarsa copertura. Baniukevic et al. hanno sfruttato le caratteristiche complementari di queste due tecnologie di sensing per realizzare un sistema che permettesse di ottenere una maggiore precisione rispetto all'utilizzo di una sola delle due tecnologie, senza però impattare pesantemente sul costo.

Per combinare la tecnologia Wi-Fi con quella Bluetooth in un unico sistema di posizionamento sono stati proposti due approcci: il primo basato solo sul fingerprinting, mentre il secondo utilizza anche il principio di prossimità. Il primo approccio prevede l'analisi della scena per entrambe le infrastrutture, seguito dalla creazione di un'unica mappa radio contenente le informazioni di entrambe. Successivamente, nella fase online, questa mappa è utilizzata per stimare la posizione degli utenti. La realizzazione di questa mappa però richiede un lavoro di fingerprinting extra per il Bluetooth nella fase offline. Inoltre le interferenze tra Wi-Fi e

Bluetooth potrebbero incidere sulla stima della posizione, la quale viene fatta basandosi sulla mappa radio che combina i dati delle due tecnologie.

In alternativa, il secondo approccio propone di applicare il fingerprinting per il Wi-Fi ed il principio di prossimità per il Bluetooth, combinandoli al fine di creare un unico sistema di posizionamento. Dato un ambiente indoor la cui principale infrastruttura wireless sia una rete Wi-Fi, sono aggiunti un numero limitato di hotspot Bluetooth, distribuendoli in modo tale da suddividere l'area in partizioni disgiunte. Di conseguenza, l'intera mappa radio è suddivisa in piccole sottoparti, ognuna delle quali corrisponde ad una partizione, indotta dalla presenza di un hotspot Bluetooth. Questo approccio riduce il costo computazionale della fase di stima online della posizione.

In particolare, quando un utente entra all'interno dell'area di competenza di un hotspot Bluetooth, la posizione dell'utente è semplicemente stimata facendola coincidere con quella dell'hotspot, ovvero applicando il principio di prossimità, e senza quindi considerare la potenza del segnale. Quando l'utente lascia un determinato hotspot, un processo chiamato partition switching si occupa di determinare la partizione (o le partizioni) corrente in cui si trova l'utente. In seguito, nella fase online riferita al Wi-Fi, la ricerca della posizione dell'utente coinvolge solo la corrispondente parte della mappa radio. La ricerca sull'intera mappa radio dunque si verifica solo fino a che il device dell'utente non incontra un hotspot Bluetooth. I componenti dell'architettura di questo sistema sono riassunti in figura 3.6.

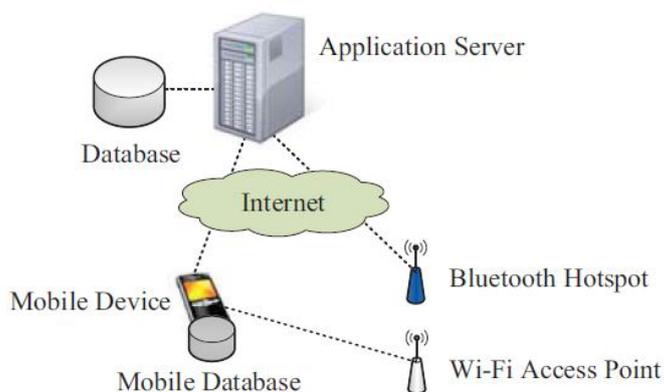


Figura 3.6 Componenti dell'architettura [64]

3.6 Wi-Fi & sensori inerziali

Il sistema proposto da L.H. Chen [65], et al. consiste nella fusione tra Wi-Fi e sensori inerziali al fine di realizzare un sistema di navigazione indoor basato sul PDR (Pedestrian Dead Reckoning), senza però la necessità di conoscere in anticipo la posizione e la direzione iniziali dell'utente. Queste ultime infatti sono dedotte automaticamente dai metodi proposti senza il bisogno di un intervento dell'utente.

L'algoritmo è costituito da due fasi. Nella prima fase, la posizione e la direzione di spostamento iniziali sono determinate in modo sequenziale. La prima è ottenuta considerando gli spostamenti relativi dell'utente nei diversi istanti di tempo, ottenibili dal sistema PDR, e dalla posizione stimata dal sistema di posizionamento Wi-Fi tramite analisi dell'RSSI (figura 3.7). La seconda invece è determinata con l'aiuto dell'analisi della regressione (regression analysis), che può essere usata per modellare la distribuzione delle posizioni stimate dal sistema di posizionamento Wi-Fi.

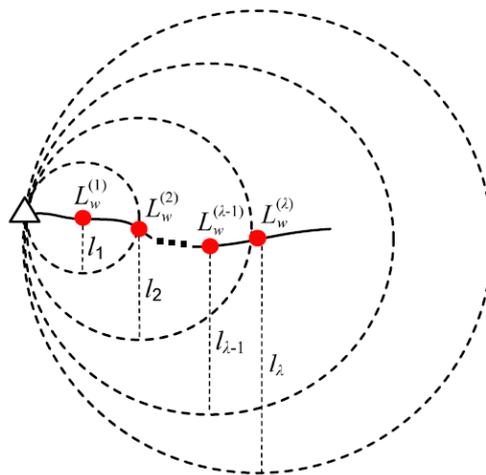


Figura 3.7 Determinazione della posizione iniziale dell'utente [65]

Nella seconda fase è proposto un algoritmo di fusione che si basa sul principio di massima verosimiglianza (paragrafo 1.4.2.3). In questo algoritmo di fusione, al fine di restituire una posizione stabile, sono considerate le informazioni relative alle posizioni stimate separatamente dai sistemi Wi-Fi e PDR. Nello specifico, l'obiettivo di questo algoritmo è di correggere gli

errori accumulati con l'utilizzo della tecnica del dead-reckoning, attraverso le informazioni relative alla potenza del segnale provenienti dal posizionamento Wi-Fi.

3.7 COMPARAZIONE DEI VARI SISTEMI IBRIDI

Nome	Anno	Tecnologie di sensing usate	Tecniche di posizionamento e navigazione	Infrastrutture
Wang et al.	2014	RFID, Kinect		Tag RFID attivi, Microsoft Kinect
UnLoc	2012	WLAN, sensori inerziali, campi magnetici	Dead-reckoning, urban sensing, WiFi-based partitioning	Smartphone
INSAR	2014	WLAN, sensori inerziali	RSSI fingerprinting	Rete WLAN
Qi et Xu	2013	WLAN, RFID	-	Rete WLAN, Reader RFID attivi, griglia di tag RFID passivi nel pavimento
Baniukevic et al.	2013	WLAN, Bluetooth	RSSI fingerprinting, principio di prossimità	Rete Wi-Fi, hotspot Bluetooth
Chen et al.	2014	WLAN, sensori inerziali	RSSI, pedestrian dead-reckoning	Rete Wi-Fi, IMU

Tabella 3.1 Comparazione sistemi ibridi

CAPITOLO 4

SISTEMI DI POSIZIONAMENTO UNIVERSALI

Nel primo capitolo abbiamo evidenziato la necessità di disporre di un sistema di posizionamento efficiente in ambiente indoor, al fine rendere possibile l'utilizzo di servizi LBS, ovvero basati sulla posizione. Abbiamo anche detto che il sistema GPS è largamente usato in ambiente outdoor, ma che in ambiente indoor non riesce a fornire livelli di accuratezza accettabili. Nei capitoli successivi abbiamo quindi illustrato le tecnologie di sensing che rendono possibile il posizionamento in ambiente indoor, fornendo esempi che si basano su una (capitolo 2) o più (capitolo 3) tecnologie. Con lo sviluppo di sistemi di posizionamento indoor sempre più precisi e con costi di realizzazione minori, dovuti spesso all'utilizzo di infrastrutture esistenti, la realizzazione di un unico sistema di posizionamento sta diventando un traguardo realizzabile. Si pensi ad esempio a un sistema di navigazione che sia in grado di guidare un'autovettura, oltre che sulla normale rete stradale, anche all'interno di un parcheggio sotterraneo, fino ad un determinato posto auto. In questo quarto e ultimo capitolo spiegheremo

nel dettaglio quali sono le tendenze previste per il futuro nel campo del posizionamento svincolato dall'ambiente, fornendo esempi di possibili soluzioni.

4.1 ARCHITETTURA DI UN SISTEMA DI POSIZIONAMENTO UNIVERSALE

Secondo quanto riportato da Deng, et al. [2], considerando i costi di costruzione di una rete, è inevitabile che la tendenza futura sia quella di combinare reti cellulari (che offrono grande copertura) con tecnologie wireless a più corto raggio quali Wi-Fi, Bluetooth, RFID, Infrarossi, ecc., e assistito da GNSS (Global Navigation Satellite System), al fine di fornire un unico servizio di posizionamento valido sia in ambiente indoor sia outdoor.

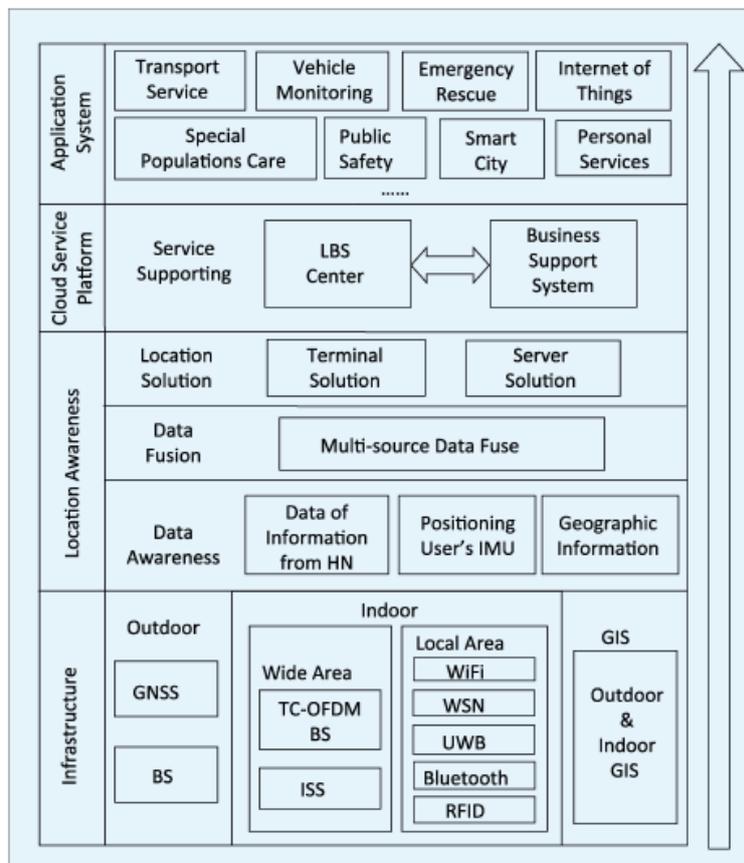


Figura 4.1 Possibile architettura di un futuro sistema di posizionamento indoor-outdoor

Una possibile futura architettura di sistema di posizionamento universale è mostrata in figura 4.1. Questa architettura è costituita da quattro livelli: infrastruttura, informazioni sulla posizione, piattaforme di servizi cloud e sistema applicativo.

L'infrastruttura è composta da tre parti, ovvero una rete di posizionamento indoor, una rete di posizionamento outdoor e sistemi GIS

¹ (Geographical Information Science o in italiano SIT, Sistema Informativo Territoriale). La rete di posizionamento outdoor è costituita da Base Station² (BS) della rete cellulare, mentre la rete indoor è composta da sistemi a più corto raggio come Wi-Fi, Bluetooth, RFID, Infrarossi, ecc., ed è utilizzata per supplire ai limitati livelli di accuratezza ottenibili dalla rete cellulare in ambiente indoor. In ambiente outdoor il posizionamento è basato su GNSS e assistito dai diversi BS della rete cellulare. Per quanto riguarda GIS, si prevede lo sviluppo un unico sistema valido sia in ambiente indoor che outdoor.

Il livello relativo alle informazioni sulla posizione è suddiviso in tre parti, quali informazioni sui dati, data fusion (1.4.2.5) e soluzioni per il posizionamento. I dati comprendono le informazioni sulla posizione ottenute tramite i diversi metodi di ranging (ToA, TDoA, AoA, ecc.) (paragrafo 1.4.1), i dati provenienti da sensori inerziali (accelerometro, giroscopio, magnetometro, ecc), informazioni su punti geografici di interesse (POI, Point of Interest). I dati provengono da diverse fonti e la soluzione della posizione può essere elaborata da un terminale come da un server.

La piattaforma di servizi cloud include il centro dei servizi di localizzazione (LBS) e il sistema di supporto alle vendite. Il centro di LBS può essere costruito su diversi livelli dalle industrie,

¹ Le antenne che emettono i segnali della rete cellulare

² “Un sistema informativo territoriale (in acronimo SIT) indica il complesso di uomini, strumenti e procedure (spesso informali) che permettono l'acquisizione e la distribuzione dei dati nell'ambito dell'organizzazione e che li rendono disponibili, validandoli, nel momento in cui sono richiesti a chi ne ha la necessità per svolgere una qualsivoglia attività” [66]

dalle imprese o dal governo. Il sistema di supporto alle vendite sarà costruito dagli operatori per supportare le operazioni legate ai servizi di localizzazione.

La piattaforma di servizi cloud concentra e gestisce la massa di informazioni, e fornisce le informazioni relative alla posizione a diverse applicazioni.

Il livello di applicazione fornisce servizi basati sulle informazioni sulla posizione ottenute tramite la piattaforma di servizi cloud.

4.2 Sistema di posizionamento ibrido indoor-outdoor per dispositivi mobili

Ficco, Palmieri e Castiglione [8] propongono un sistema capace di scegliere, in modo dinamico e trasparente durante lo spostamento dell'utente, tra le varie tecnologie di posizionamento supportate dal device mobile ed offerte dall'ambiente circostante. Questo sistema combina la tecnica del fingerprinting basata su RSS per quanto riguarda l'ambiente indoor, e il tradizionale sistema GPS per scenari outdoor, applicando criteri di scelta opportunistici sulla base di un meccanismo count-and-threshold. La soluzione ottenuta è capace di sfruttare le diverse caratteristiche delle reti wireless e delle tecnologie satellitari, al fine di fornire servizi di localizzazione indipendenti dallo scenario indoor o outdoor, minimizzando il consumo di energia del dispositivo mobile.

Per rendere possibile ciò, è necessario che siano rese disponibili a runtime le informazioni relative al contesto. Per esempio, al fine di minimizzare il consumo di energia, il terminale ha bisogno di conoscere quali tecniche sono disponibili in una data zona (in un determinato periodo di tempo), e quando dovrebbe passare all'utilizzo di un'altra tecnologia al fine di consumare sempre il meno possibile.

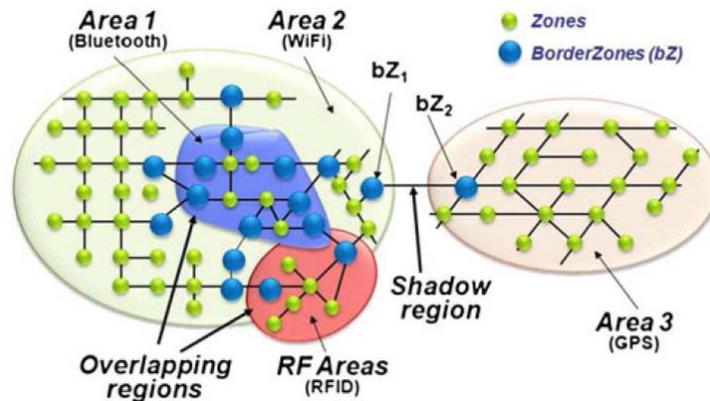


Figura 4.2 Esempio di aree e BorderZone [8]

Affinché sia possibile per le applicazioni scegliere trasparentemente tra i vari metodi di posizionamento e cambiarli dinamicamente, è necessario che il sistema sia a conoscenza di quali tecnologie sono disponibili nei diversi ambienti. Ficco, et al., propongono un modello ibrido di localizzazione che esprime la posizione di un device mobile in termini sia di coordinate simboliche sia geometriche, rappresentanti una specifica posizione o un'area limitata dello spazio d'interesse dell'utente. In ambiente indoor una zona può essere rappresentata da una specifica area di interesse, come per esempio una stanza o un corridoio, o da un punto specifico, mentre in ambiente outdoor può essere una zona più o meno grande, identificata da un insieme di coordinate geografiche. Un insieme di più zone adiacenti coperte dalla stessa tecnologia è detta area (figura 4.2). È inoltre introdotto il concetto di BorderZone per definire il passaggio tra un'area e l'altra.

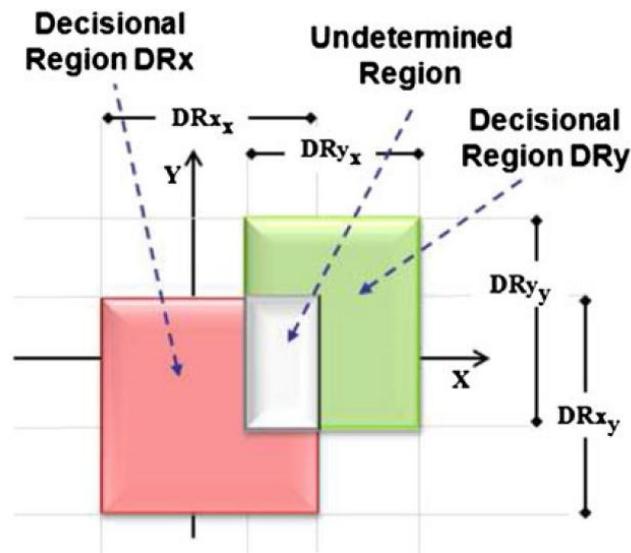


Figura 4.3 Decisional Region in uno spazio bidimensionale [8]

Secondo l'approccio proposto, un insieme di BorderZone in prossimità della zona di transizione tra diverse aree, possono essere rappresentate come uno spazio geometrico bidimensionale (figura 4.3). Nello specifico queste BorderZone partizionano questo spazio in un insieme di Decisional Region (DR), ognuna delle quali è rappresentata da un vettore di valori RSS, dove ognuno degli elementi è riferito ad uno specifico sensore o Access Point. In una BorderZone servita da GPS queste informazioni sono l'insieme dei "messaggi" GPS.

4.3 TC-OFDM

TC-OFDM (Time & Code Division-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [2] è un sistema in grado di fornire sia un sistema di navigazione, sia di comunicazione per le reti cellulari. Il segnale TC-OFDM trasporta alla stessa banda di frequenza le informazioni utili alla navigazione e alla comunicazione. Questo sistema è in grado di fornire un servizio di posizionamento valido in ambiente indoor e outdoor, con livelli di accuratezza dell'ordine dei metri. Le informazioni relative alla posizione possono essere inviate a un sistema di server, per gestire il sistema di posizionamento e fornire informazioni relative alla posizione ad

applicazioni LBS. All'interno di edifici di grandi dimensioni il segnale proveniente da BS potrebbe non essere sufficiente, e TC-OFDM può essere un supporto alla copertura. L'architettura del sistema è mostrata in figura 4.4.

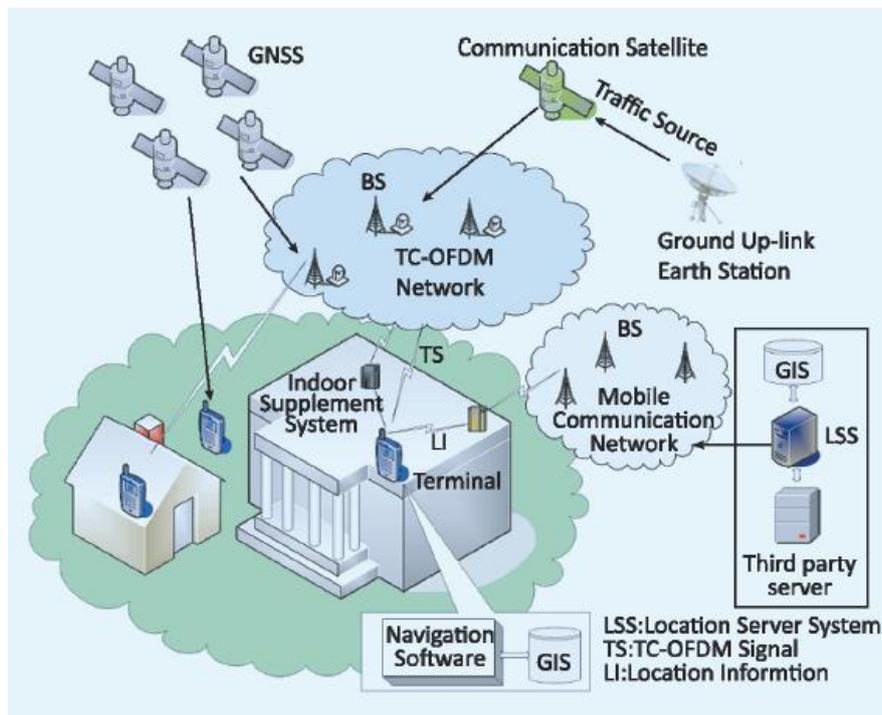


Figura 4.4 Architettura del sistema TC-OFDM [2]

Comparato con i segnali della rete di comunicazione mobile esistente, il segnale TC-OFDM trasporta informazioni di navigazione di grande accuratezza, e vanta alte precisioni di sincronizzazione e copertura di vaste aree.

Al fine di mitigare l'errore dovuto a NLOS (Non-Line-Of-Sight), i ricercatori hanno realizzato un modello di correzione. La distribuzione degli errori NLOS all'interno di edifici è stimata in base alla posizione fornita da BS, GIS, e punti di riferimento.

4.4 LOCATA

La tecnologia di posizionamento Locata [66], sviluppata da Australian GPS manufacturer Locata Company, è una possibile soluzione sia per assistere i sistemi GNSS con segnali terrestri extra (come nel caso in cui ci sia scarsa copertura di segnale in linea diretta, dovuto ad esempio alla presenza di alberi), sia per rimpiazzare il GNSS (ad esempio in ambiente indoor).

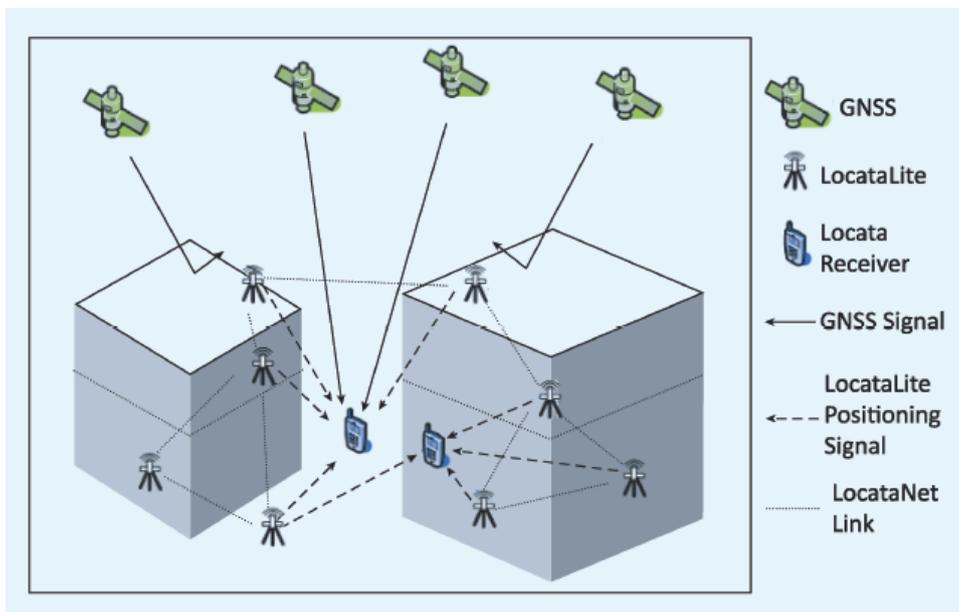


Figura 4.5 Il sistema di posizionamento Locata [2]

Locata si basa su di una costellazione di trasmettitori terrestri (LocataLite) sincronizzati, che trasmettono segnali di posizionamento analoghi a quelli emessi dai sistemi GNSS, e che possono essere letti dagli utenti tramite l'utilizzo di adeguati ricevitori (figura 4.5). Questi trasmettitori compongono una rete (LocataNet) che è in grado lavorare sia in combinazione con i sistemi GNSS, sia in modo interamente indipendente, al fine di supportare posizionamento, navigazione e sincronizzazione (PNT, Positioning, Navigation and Timing). Tutto ciò permette una considerevole flessibilità nel progetto del sistema grazie alla possibilità di avere completo controllo sui trasmettitori e sui ricevitori (contrariamente a quanto accade con il sistema satellitare GPS, gestito da organi militari). Una particolare proprietà di LocataNet che dovrebbe

essere enfatizzata è la sincronizzazione di tutti i trasmettitori, che permette un posizionamento con livelli di precisione dell'ordine del centimetro.

Esperimenti hanno dimostrato che Locata è in grado di fornire un servizio di posizionamento anche in ambiente indoor, con errori talvolta inferiori ai 3 centimetri. Per questo motivo Locata potrebbe diventare in futuro un sistema capace effettivamente di fornire un servizio di localizzazione sia in ambiente indoor che outdoor.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato inizialmente messo in evidenza il problema del posizionamento indoor, sottolineando la necessità di disporre di un sistema efficiente di posizionamento. Inoltre sono stati introdotti e illustrati i principali metodi e tecniche di posizionamento e navigazione (capitolo 1). Successivamente l'attenzione è stata focalizzata su alcune tra le principali tecnologie di sensing capaci di fornire una misura da cui partire per il calcolo della posizione. Per ognuna di queste tecnologie sono stati forniti esempi (capitolo 2). A causa delle limitazioni caratteristiche di ogni tecnologia di sensing, spesso i sistemi di posizionamento basati su un'unica tecnologia non sono sufficientemente accurati o, se lo sono, hanno costi di realizzazione molto elevati. Il capitolo 3 ha esposto nel dettaglio il funzionamento di alcuni sistemi di posizionamento basati sulla fusione di due o più tecnologie di sensing. Considerando gli ottimi risultati ottenuti dal sistema GPS per il posizionamento outdoor, e i risultati sempre migliori per quanto riguarda l'ambiente indoor con altre tecnologie, la nuova ambizione dei ricercatori è ora realizzare un unico sistema di posizionamento capace di fornire livelli di

CONCLUSIONI

accuratezza accettabili per entrambi i suddetti ambienti. Nel quarto e ultimo capitolo è stato descritto nel dettaglio il funzionamento di alcuni sistemi di posizionamento indipendenti dall'ambiente indoor o outdoor.

In conclusione, si può affermare che negli ultimi anni sono stati compiuti notevoli progressi nell'ambito del posizionamento indoor, soprattutto per quanto riguarda l'aumento della precisione. Molti sistemi riescono infatti a garantire precisioni anche superiori al decimetro, che possono risultare un requisito sufficiente per numerose applicazioni. In particolare l'utilizzo di smartphone per il posizionamento indoor, reso possibile dalla crescente precisione dei sensori IMU integrati all'interno di essi, ha in molti casi permesso un notevole abbattimento dei costi. Per quanto riguarda la realizzazione di un sistema di posizionamento universale che non sia costruito "semplicemente" combinando insieme tecnologie outdoor con altre indoor (dunque senza che una tecnologia copra entrambi gli ambienti), la strada è ancora lunga e molto probabilmente su questo tema si concentreranno le ricerche nei prossimi anni.

Bibliografia

- [1] R. Mautz, "Indoor Positioning Technologies (thesis)," *ETH Zurich*, p. 128, 2012.
- [2] Z. Deng, Y. Yu, X. Yuan, N. Wan e L. Yang, «Situation and Development Tendency of Indoor Positioning,» *China Communications*, p. 14, 2013.
- [3] L. Leh, «ZigBee-based intelligent indoor positioning system soft computing,» *Springer*, vol. 18, pp. 443 - 456, 2014.
- [4] A. Franceschetti, «Localizzazione di risorse mobili in ambiente indoor (Thesis),» *Università degli studi di Ferrara*, p. 99, 2008/2009.
- [5] C. d. Wikipedia, «Sistema di Posizionamento Globale,» *Wikipedia, L'enciclopedia libera*, 21 set 2014. [Online]. Available: http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Sistema_di_Posizionamento_Globale&oldid=68262202. [Consultato il giorno 3 11 2014].
- [6] Agenzia Spaziale Italiana, «Galileo,» 2014. [Online]. Available: http://www.asi.it/it/attivita/navigazione/galileo_test_range. [Consultato il giorno 4 10 2014].
- [7] Cannarozzo, Cucchiarini e Meschieri, *MISURE, RILIEVO E PROGETTO* terza edizione - vol 2, Bologna: Zanichelli, 2009.
-

- [8] M. Ficco, F. Palmieri and A. Castiglione, "Hybrid indoor and outdoor location services for new generation mobile terminals," *Springer*, p. 285, 2013.
- [9] R. Dobbins, S. Garcia e B. Shaw, «Software Defined Radio Localization Using 802.11-style Communications (Thesis),» *Worcester Polytechnic Institute*, p. 145.
- [10] C. d. Wikipedia, «Triangulation,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 27 ott 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Triangulation&oldid=631303569>. [Consultato il giorno 29 ott 2014].
- [11] C. d. Wikipedia, "Trilateration," Wikipedia, L'enciclopedia libera, 25 ago 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Trilateration&oldid=622732474>. [Accessed 30 ott 2014].
- [12] C. d. Wikipedia, «Multilaterazione,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 5 APR 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Multilaterazione&oldid=65179303](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Multilaterazione&oldid=65179303). [Consultato il giorno 30 ott 2014].
- [13] C. d. Wikipedia, "Multilateration," Wikipedia, L'enciclopedia libera, 2 nov 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Multilateration&oldid=631534197>. [Accessed 7 nov 2014].
- [14] W. Elmenreich, "Sensor Fusion in Time-Triggered System," *Vienna University of Technology*, p. 173, 2002.

- [15] C. d. Wikipedia, «Navigazione,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 11 mag 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Navigazione&oldid=65898696](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Navigazione&oldid=65898696). [Consultato il giorno 4 nov 2014].
- [16] C. d. Wikipedia, "Dead reckoning," Wikipedia, L'enciclopedia libera, 5 nov 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dead_reckoning&oldid=632586252. [Accessed 7 nov 2014].
- [17] M. De Agostino, «I SENSORI INERZIALI DI BASSO COSTO PER LA NAVIGAZIONE GEODETICA (thesis),» *Politecnico di Torino*, p. 322, 2009.
- [18] C. d. Wikipedia, «Segnale (fisica),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 17 mar 2013. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Segnale_\(fisica\)&oldid=57641570](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Segnale_(fisica)&oldid=57641570). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [19] C. d. Wikipedia, «Onda meccanica,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 15 lug 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Onda_meccanica&oldid=67051021](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Onda_meccanica&oldid=67051021). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [20] C. d. Wikipedia, «Attenuazione,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 14 gen 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Attenuazione&oldid=63550166](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Attenuazione&oldid=63550166). [Consultato il giorno 9 nov 2014].

BIBLIOGRAFIA

- [21] C. d. Wikipedia, «Rumore (elettronica),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 19 dic 2013. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Rumore_\(elettronica\)&oldid=63120489](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Rumore_(elettronica)&oldid=63120489). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [22] C. d. Wikipedia, «Interferenza (telecomunicazioni),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 13 set 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Interferenza_\(telecomunicazioni\)&oldid=68119480](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Interferenza_(telecomunicazioni)&oldid=68119480). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [23] C. d. Wikipedia, «Dispersione (fisica),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 30 dic 2012. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Dispersione_\(fisica\)&oldid=55015186](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Dispersione_(fisica)&oldid=55015186). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [24] C. d. Wikipedia, «Distorsione (fisica),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 26 lug 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Distorsione_\(fisica\)&oldid=67232576](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Distorsione_(fisica)&oldid=67232576). [Consultato il giorno 9 nov 2014].
- [25] C. d. Wikipedia, «Bluetooth,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 10 nov 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Bluetooth&oldid=68452243](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Bluetooth&oldid=68452243). [Consultato il giorno 10 nov 2014].
- [26] B. SIG, «Bluetooth Basics,» Bluetooth SIG, 2014. [Online]. Available: <http://www.bluetooth.com/Pages/Basics.aspx>. [Consultato il giorno 9 nov 2014].

- [27] A. Bekkelien, «Bluetooth Indoor Positioning,» *University of Geneva*, p. 56, 2012.
- [28] C. d. Wikipedia, «iBeacon,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 12 nov 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=iBeacon&oldid=633470376>. [Consultato il giorno 13 nov 2014].
- [29] B. Beacons, «Bluetooth Beacons,» 2014. [Online]. Available: <http://bluetoothbeacons.com/>. [Consultato il giorno 13 nov 2014].
- [30] C. d. Wikipedia, «Radio-frequency identification,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 3 ott 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio-frequency_identification&oldid=68460866](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio-frequency_identification&oldid=68460866). [Consultato il giorno 10 nov 2014].
- [31] C. d. Wikipedia, «Radio-frequency identification,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 5 nov 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Radio-frequency_identification&oldid=632541964. [Consultato il giorno 10 nov 2014].
- [32] M. Bouet e A. L. dos Santos, «RFID tags: Positioning Principles and Localization Techniques,» in *Wireless Days*, Dubai, 2008.
- [33] C. d. Wikipedia, «Spettro elettromagnetico,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 27 ott 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Spettro_elettromagnetico&oldid=68866558](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Spettro_elettromagnetico&oldid=68866558). [Consultato il giorno 8 nov 2014].

- [34] H. Koyuncu e S. Yang Hua, «A Survey of Indoor Positioning and Object Locating Systems,» *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, n. 5, p. 8, 2010.
- [35] C. d. Wikipedia, «Cellular network,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 18 ott 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Cellular_network&oldid=630056016. [Consultato il giorno 11 nov 2014].
- [36] C. d. Wikipedia, «LTE (telefonia),» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 13 nov 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=LTE_\(telefonia\)&oldid=69140312](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=LTE_(telefonia)&oldid=69140312). [Consultato il giorno 13 nov 2014].
- [37] C. d. Wikipedia, «ZigBee,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 7 nov 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=ZigBee&oldid=632845358>. [Consultato il giorno 11 nov 2014].
- [38] L. Luoh, «ZigBee-based intelligent indoor positioning system soft computing,» *Springer*, vol. 18, n. 3, pp. 443-456, 2014.
- [39] C. d. Wikipedia, «ZigBee,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 16 ott 2014. [Online]. Available: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=ZigBee&oldid=108266086>. [Consultato il giorno 10 nov 2014].

- [40] D. International, «ZigBee® Wireless Standard,» Digi International, [Online]. Available: <http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>. [Consultato il giorno 11 nov 2014].
- [41] C.-H. Chu, C.-H. Wang, C.-K. Liang, W. Ouyang, J.-H. Cai e Y.-H. Chen, «High-Accuracy Indoor Personnel Tracking System with a ZigBee Wireless Sensor Network,» in *Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks*, Pechino (Cina), 2011.
- [42] A. Wain Sy Au, «RSS-based WLAN Indoor Positioning and Tracking System Using Compressive Sensing and Its Implementation on Mobile Devices (thesis),» *University of Toronto*, p. 136, 2010.
- [43] Y. Gu, A. Lo e I. Niemegeers, «A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks,» *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, vol. 11, n. 1, p. 20, 2009.
- [44] P. Yi, M. Yu, Z. Zhou, W. Xu, Q. Zhang e T. Zhu, «A Three-Dimensional Wireless Indoor Localization System,» *Hindawi Publishing Corporation*, p. 13, 2014.
- [45] C. d. Wikipedia, «Ultra-wideband,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 30 mag 2014. [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultra-wideband&oldid=610733755>. [Consultato il giorno 13 nov 2014].
- [46] M. Hung V. Le, D. Saragas e N. Webb, «Indoor Navigation System for Handheld Devices (thesis),» *Worcester Polytechnic Institute*, 2009.

- [47] M. De Agostini, «I sensori inerziali di basso costo per la navigazione geodetica (PhD thesis),» *Politecnico di Torino*, 2009.
- [48] C. d. Wikipedia, "Inertial navigation system," Wikipedia, L'enciclopedia libera, 22 ott 2014. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inertial_navigation_system&oldid=63070810 1. [Accessed 12 nov 2014].
- [49] S. Kumar Gupta, S. Box e R. Wilson, «Low cost infrastructure free form of indoor positioning,» in *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Busan (Korea), 2014.
- [50] R. Mautz e S. Tilch, «Optical Indoor Positioning Systems,» in *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Guimarães (Portogallo), 2011.
- [51] M. Werner, M. Kessel e C. Marouane, «Indoor positioning using smartphone camera,» in *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Guimaraes (Portogallo), 2011.
- [52] H. Bay, T. Tuytelaars e L. Van Gool, «SURF: Speeded Up Robust Features,» *Computer Vision–ECCV*, pp. 404-417, 2006.
- [53] C. d. Wikipedia, «Ultrasuoni,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 27 ott 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrasuoni&oldid=68873804](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrasuoni&oldid=68873804). [Consultato il giorno 13 nov 2014].

- [54] S. I. Lopes, J. M. Vieira, D. Albuquerque e N. B. Carvalho, «Accurate smartphone indoor positioning using a WSN infrastructure and non-invasive audio for TDoA estimation,» *Pervasive and Mobile Computing*, p. 18, 2014.
- [55] K. Liu, X. Liu e X. Li, «Guoguo: Enabling Fine-grained Indoor Localization via Smartphone,» in *MobiSys '13, 11th annual international conference on Mobile systems*, Taipei, Taiwan, 2013.
- [56] C. d. Wikipedia, «Radiazione infrarossa,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 12 nov 2014. [Online]. Available: [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiazione_infrarossa&oldid=69125017](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiazione_infrarossa&oldid=69125017). [Consultato il giorno 13 nov 2014].
- [57] IndoorAtlas Ltd., «Ambient magnetic field-based indoor location technology (White paper),» *IndoorAtlas*, p. 5, 2012.
- [58] A. Kashevnik e M. Shchekotov, «Comparative Analysis of Indoor Positioning Systems Based on Communications Supported by Smartphones,» in *12TH CONFERENCE OF FRUCT ASSOCIATION*, Saint-Petersburg (Russia), 2012.
- [59] C.-S. Wang e C.-L. Chen, «RFID-based and Kinect-based indoor positioning system,» in *2014 4th International Conference on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems (VITAE)*, Aalborg (Denmark), 2014.
- [60] C. d. Wikipedia, «Microsoft Kinect,» Wikipedia, L'enciclopedia libera, 19 lug 2014. [Online]. Available:
-

- [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Microsoft_Kinect&oldid=67107535](http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Microsoft_Kinect&oldid=67107535). [Consultato il giorno 20 nov 2014].
- [61] H. Wang, S. Sen, A. Elgohary, M. Farid, M. Youssef e R. R. Choudhury, «No need to war-drive: Unsupervised Indoor Localization,» in *MobiSys '12 Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*, New York (USA), 2012.
- [62] A. Alnabhan e B. Tomaszewski, «INSAR: Indoor Navigation System Using Augmented Reality,» in *ISA '14 Proceedings of the Sixth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness*, New York (USA), 2014.
- [63] W.-m. Qi e T. Xu, «IP movement detection and indoor positioning based on Integrating RFID and WLAN,» in *The 8th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2013)*, Colombo (Sri Lanka), 2013.
- [64] A. Baniukevi, C. S. Jense e H. Lu, «Hybrid Indoor Positioning With Wi-Fi and Bluetooth: Architecture and Performance,» in *2013 IEEE 14th International Conference on Mobile Data Management (MDM)*, Milano (Italia), 2013.
- [65] L.-H. Chen, E. H.-K. Wu, M.-H. Jin e G.-H. Chen, «Intelligent Fusion of Wi-Fi and Inertial Sensor-Based Positioning Systems for Indoor Pedestrian Navigation,» *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 14, n. 11, p. 9, 2014.
- [66] C. Rizos, «Locata: A Positioning System for Indoor and Outdoor Applications Where GNSS Does Not Work,» in *Proceedings of the 18th Association of Public Authority Surveyors Conference (APAS2013)*, Canberra (Australia), 2013.

