



ATTICUS

Ambient-intelligent Tele-monitoring System

Codice progetto: ARS01_00860

Deliverable D4.3

Tecnologie di tracciamento della posizione



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DEL MOLISE**



Data: Agosto 2019

Leader OR	UNISANNIO
Obiettivo realizzativo (OR)	OR4 – Realizzazione del dispositivo S-WARE: acquisizione ed elaborazione segnali
Attività	4.3 – Studio delle tecnologie di tracciamento della posizione indoor e outdoor
Descrizione dell'attività (come da capitolato)	Saranno studiate le tecnologie per il tracciamento della posizione sia indoor che outdoor. Le tecnologie analizzate comprenderanno RSSI, UWB, Dead reckoning e GNSS.
Partner coinvolti nell'attività	<ul style="list-style-type: none">● CON-ITA
Stato del documento	Final draft
Confidenzialità	Ristretta

Indice del documento

1	Introduzione.....	7
2	Sistemi di navigazione basati su reti di ricevitori/trasmittitori	8
2.1	Approccio geometrico.....	11
2.1.1	Time of Arrival (ToA)	12
2.1.2	Time-Difference-of-Arrival (TDoA)	15
2.1.3	Angle of Arrival (AoA).....	18
2.2	Sistemi basati su misure di prossimità	20
2.3	Received Signal Strength Indication	22
2.4	Sorgenti di errore nei sistemi di localizzazione	24
2.5	Breve descrizione dei sistemi di localizzazione indoor presenti in letteratura	27
2.5.1	Sistemi time based	29
2.5.2	Sistemi RSSI	35
3	Sistemi basati su dead-reckoning.....	48
3.1	I sensori inerziali.....	51
3.1.1	Accelerometro.....	51
3.1.2	Giroscopio	53
3.1.3	Sensori di campo magnetico	54
3.1.4	Orientamento.....	55
3.1.5	Errori nelle misure inerziali	56
3.2	Calcolo della distanza da misure inerziali.....	59
3.3	Calcolo della direzione da misure inerziali.....	71
3.3.1	Gli angoli di Eulero.....	72
3.3.2	I quaternioni	73
3.3.3	Relazione tra quaternioni e angoli di Eulero	73
3.4	Algoritmi per la stima dell'orientamento.....	74
3.4.1	Filtro Madgwick.....	74
3.5	Esempio di stima della posizione mediante misure di distanza e di orientamento	76

Indice delle tabelle

Tabella 1: Specifiche tecniche del sensore Ubisense serie 7000.	32
Tabella 2: Specifiche tecniche del tag Ubisense slim.	32
Tabella 3: 25th, 50th (mediana) e 75th percentile dell'errore in distanza con i tre approcci considerati.	38



Indice delle figure

Figura 1: classificazione delle tecniche di localizzazione indoor..	10
Figura 2: localizzazione del terminale utente mediante trilaterazione.	13
Figura 3: ambiguità presente nella localizzazione 2D con due misure a disposizione.	15
Figura 4:Stima della posizione del terminale utente mediante multilaterazione in un sistema TDoA.	17
Figura 5: Sistema di localizzazione basato su misure di AoA e triangolazione.	19
Figura 6: sistema di misura di posizione mediante misura di prossimità.	21
Figura 7: influenza degli errori di misura temporali sulla stima della posizione del terminale utente nel caso di sistema ToA.	25
Figura 8: calcolo della posizione dell'utente come intersezione fra rette costruite a partire dalle intersezioni tra le circonferenze nel caso di sistema ToA.	27
Figura 9: sensori e tag del sistema Ubisense [7].	31
Figura 10: Il Bat System.	34
Figura 11: Scenario di test del progetto RADAR.	35
Figura 12: Algoritmo NNSS-AVG.	37
Figura 13: CDF dell'errore sulla stima della posizione dei metodi NNSS-AVG, strongest BS e random	38
Figura 14:Prestazioni del sistema RADAR al variare del numero k di nearest neighbors.	39
Figura 15: RSS misurato su un access point Bluetooth e un access point Wi-Fi.	41
Figura 16: SSD misurato tra una coppia di access point Bluetooth e access point Wi-Fi.	42
Figura 17: Esempio di posizionamento di 9 readers che presentano due differenti regioni di copertura.	44
Figura 18: Sistema Landmarc: la mappa di riferimento con il posizionamento dei 4 readers, dei 16 reference tags e degli 8 tracking tags.	45
Figura 19: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento al variare delle k distanze euclidee scelte.	46
Figura 20: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento per $n = 3$ e $n = 4$ readers	46
Figura 21: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento, valutato durante le ore diurne e notturne	47
Figura 22: Rappresentazione geometrica del dead reckoning.	49
Figura 23: Ellisse di confidenza che contiene al 95% l'errore commesso.	49
Figura 24: assi di riferimento di un accelerometro integrato in uno smartphone.	52
Figura 25: Schema di principio di un giroscopio meccanico.	53
Figura 26: Orientamento basato sulla terna di angoli Roll, Pitch e Yaw).	54
Figura 27: errori legati al fattore di scala.	57
Figura 28: Errori legati alla non ortogonalità degli assi dei sensori.	58
Figura 29: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse x.	61
Figura 30: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse y.	61
Figura 31: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse z.	62
Figura 32: cammino rettilineo - modulo dell'accelerazione.	62
Figura 33: Cammino rettilineo: Doppia Soglia per valutare il numero di passi effettuati.	63
Figura 34: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano destra:valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi	64
Figura 35: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano destra: modulo dell'accelerazione.	65

Figura 36: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano sinistra: valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi.	66
Figura 37: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano sinistra: modulo dell'accelerazione.	67
Figura 38: Scala in salita: valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi	68
Figura 39: Scala in salita: modulo dell'accelerazione	69
Figura 40: Conteggio del numero dei passi con metodo Zero-Crossing [19].	69
Figura 41: Frequenza della camminata vs. lunghezza del passo. Varianza dell'accelerazione vs. lunghezza del passo	71
Figura 42: schema semplificato per la stima della posizione da misure di distanza e orientamento.	77
Figura 43: percorsi utilizzati per i test sperimentali.	78
Figura 44: risultati del test 1 (percorso rettilineo).	81
Figura 45: risultati del test 2 (percorso con curva a destra).	83
Figura 46: risultati del test 3 (percorso con doppia curva a sinistra).	85
Figura 47: risultati del test 4 (percorso misto con 4 curve).	87
Figura 48: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 1 - numero di passi contati.	87
Figura 49: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 2 - numero di passi contati.	88
Figura 50: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 3 - numero di passi contati.	88
Figura 51: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 4 - numero di passi contati.	89

1 Introduzione

Questo documento riporta lo stato dell'arte dei metodi per il tracciamento della posizione di nodi wireless. In particolare, vengono riportate diverse soluzioni presenti in letteratura per la navigazione in ambienti indoor.

I metodi sono suddivisi in due categorie. Alla prima categoria appartengono i metodi basati su una rete di ricevitori o trasmettitori posti nell'ambiente oggetto di navigazione, che ottengono la stima della posizione attraverso la misura della distanza del nodo di cui si vuole ottenere la posizione ed un certo numero di altri nodi fissi.

Alla seconda categoria, invece appartengono metodi che ottengono la stima della posizione stimando l'orientamento del nodo e integrando la velocità, anche attraverso il conteggio dei passi. In questo caso è il singolo terminale utente che fornisce una stima della posizione del terminale stesso.

Nei paragrafi seguenti saranno descritti i metodi appartenenti a ciascuna delle due categorie.

2 Sistemi di navigazione basati su reti di ricevitori/trasmittitori

Lo scenario che si considera è costituito da due elementi base: il terminale utente o apparato utente e gli apparati di rete che sono i nodi che costituiscono l'infrastruttura di rete.

In generale, il processo di localizzazione si divide in due fasi: (i) una prima fase che prevede la misurazione di grandezze fisiche (tempi, angoli o potenze) eseguite o dai nodi che costituiscono l'infrastruttura di rete o dal terminale utente, e (ii) una seconda fase dove mediante un algoritmo, che utilizza i parametri misurati, si determina la posizione del terminale utente.

In particolare, è possibile suddividere tali sistemi in:

- Sistemi dove il terminale utente riceve il segnale irradiato dai nodi di rete, effettua le misurazioni di uno o più parametri e stima la propria posizione; in tal caso si parla di localizzazione interna o localizzazione terminal based;
- Sistemi dove gli apparati di rete (due o più) ricevono il segnale irradiato dal terminale utente, stimano uno o più parametri mediante opportune misurazioni e determinano la posizione dell'utente. Questa situazione è indicata con il termine di localizzazione esterna o localizzazione network based;
- Sistemi basati su approcci ibridi:
 - terminal-based, network-assisted: gli apparati di rete inviano dei segnali ausiliari, quali coordinate di riferimento, informazioni temporali per aiutare il terminale utente nel processo di localizzazione;
 - network-based, terminal-assisted: il terminale utente effettua le misurazioni e le comunica alla rete che provvede al calcolo della posizione dell'apparato.

È importante aggiungere, che un ruolo fondamentale, in un sistema di localizzazione è svolto dal protocollo di rete, essenziale per la comunicazione tra gli apparati coinvolti nel processo di localizzazione. Un altro elemento di primaria importanza di qualsiasi sistema di localizzazione è il sistema di riferimento, proprio perché il "risultato" della localizzazione deve essere espresso su un determinato riferimento; in particolare, si parla di coordinate geografiche e coordinate locali [1].

Le coordinate geografiche sono utilizzate per identificare univocamente la posizione di un punto sulla superficie terrestre mediante l'utilizzo di una terna di valori (esempio classico sono le coordinate fornite dal Global Positioning System GPS). Le coordinate locali invece si basano su un sistema cartesiano, la cui origine degli assi è fissata in maniera locale ed arbitraria.

In definitiva, è possibile riassumere gli elementi essenziali di un sistema di localizzazione in:

- terminale utente;
- infrastruttura di rete costituita da un insieme di apparati di rete ed eventualmente da un'unità centrale di gestione ed elaborazione;
- uno o più sistemi di misura di caratteristiche dei segnali trasmessi dagli apparati di rete o dal terminale utente;
- un algoritmo di localizzazione che sfrutta le misure fornite dai singoli apparati e fornisce la posizione del terminale utente in un opportuno sistema di riferimento;
- un protocollo di rete che permette lo scambio di informazioni tra i nodi della rete e con il terminale utente.

I sistemi di localizzazione possono essere classificati, in base al tipo di infrastruttura di rete utilizzata, in: sistemi con infrastruttura dedicata o sistemi con infrastruttura indipendente.

Un'infrastruttura dedicata, anche chiamata infrastruttura stand-alone, è costituita da un insieme di apparati di rete che sono utilizzati per la sola finalità di localizzare un terminale. In sistemi di questo tipo, spesso sono richiesti terminali utente specifici; l'esempio classico è quello del GPS, progettato e ottimizzato per consentire la localizzazione in ambienti outdoor che richiede l'utilizzo di un ricevitore GPS a bordo del terminale utente.

Un'infrastruttura indipendente è invece un'infrastruttura che "nasce" inizialmente per finalità di comunicazione, e successivamente viene integrata così da poter essere adoperata anche per finalità di localizzazione. Per cui, il grosso vantaggio di un sistema che usa un'infrastruttura indipendente è che la maggior parte degli apparati di rete di cui è costituita, così come i protocolli, possono essere riutilizzati per il positioning, inoltre non sono necessari terminali utente specifici; bisogna però

considerare che il progetto iniziale dell'infrastruttura di rete non è ottimizzato per la localizzazione e dunque l'integrazione finalizzata al positioning, risulta in alcuni casi complessa.

Le tecniche di localizzazione possono essere classificate in (Figura 1):

- tecniche basate su approccio geometrico;
- tecniche basate sul Received Signal Strength Indication (RSSI);
- tecniche basate su misure di prossimità.

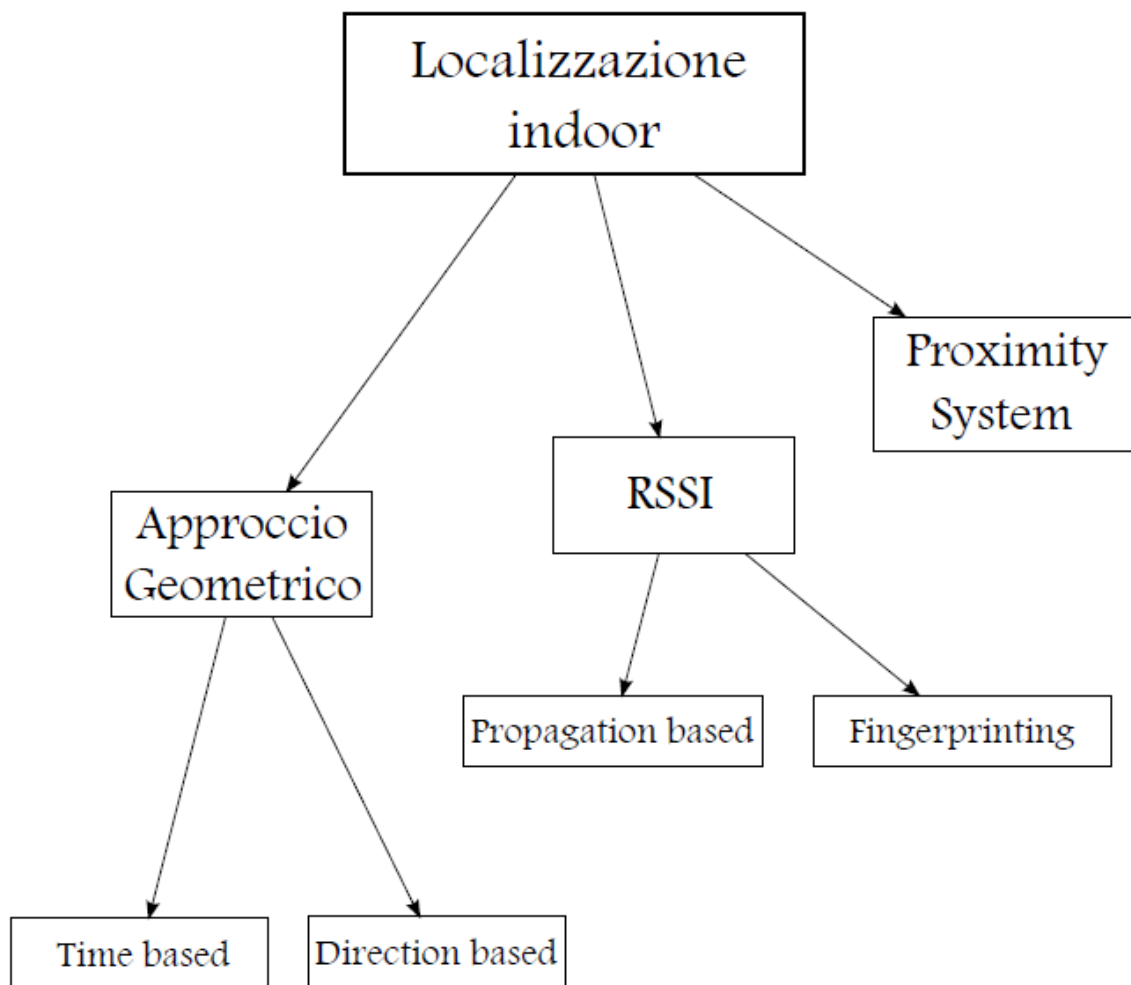


Figura 1: Classificazione delle tecniche di localizzazione indoor..

2.1 Approccio geometrico

Con l'approccio geometrico è possibile individuare la posizione del terminale utente mediante l'intersezione fra curve nel piano; il tipo di curva ottenuta dipende dal tipo di misurazione (parametro di localizzazione) che viene eseguita:

- Misure temporali (metodi time-based):
 - Time of Arrival (ToA);
 - Time Different of Arrival (TDoA);
- Misure angolari (metodi direction-based):
 - Angle of Arrival (AoA).

Per quanto riguarda le misurazioni temporali, è importante sottolineare la differenza fra sistemi a una e a due vie. Per esprimere questi concetti, si consideri uno scenario in cui sono presenti un trasmettitore e un ricevitore posti a distanza r . Si vuole calcolare tale distanza sfruttando il ritardo di propagazione dell'onda elettromagnetica. Si indichi con t_1 il tempo di arrivo al ricevitore e con t_0 il tempo di partenza dal trasmettitore, tale distanza è data dall'equazione:

$$r = c (t_1 - t_0) \quad (1)$$

dove c è la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica.

In realtà il trasmettitore e il ricevitore non sono perfettamente sincronizzati, nelle situazioni reali, fra il trasmettitore e il ricevitore è sempre presente un offset, δt , sulla temporizzazione che determina un calcolo errato della distanza. Indicando con ρ , la distanza affetta da offset, mentre r la distanza in accordo all'eq. (1), si ottiene:

$$\rho = c (t_1 - t_0) + c \cdot \delta t = r + c \cdot \delta t \quad (2)$$

Un errore di $1 \mu s$ comporta un errore di distanza di circa $300 m$, considerando c pari alla velocità della luce.

La situazione appena descritta è caratteristica dei sistemi a una via. Nei sistemi a due vie, invece, si sfrutta il segnale di andata e ritorno, in tal caso si parla di Round Trip Time - RTT, ovvero il segnale

trasmesso dal trasmettitore, viene rilanciato indietro dal ricevitore. Quindi la differenza temporale è valutata dal trasmettitore. In tal caso non è necessario il sincronismo tra trasmettitore e ricevitore, proprio perché si tiene in considerazione solo l'orologio del trasmettitore. Nei casi pratici, deve essere noto il tempo di latenza $\Delta_{RX/TX}$ del ricevitore, ovvero il tempo necessario alla ricezione e alla ritrasmissione del segnale da parte del ricevitore. Nel caso di misura a due vie, la distanza r è valutata secondo la seguente equazione:

$$r = c (t_1 - t_0 - \Delta_{RX/TX}) \quad (3)$$

Per quanto detto, si capisce l'importanza della sincronizzazione temporale in apparati che utilizzano segnali a radiofrequenza per effettuare misurazioni temporali. Per ottenere un'elevata sincronizzazione, in alcuni casi, si utilizzano degli orologi estremamente precisi (aumento dei costi), oppure si aumenta la complessità del sistema utilizzando degli algoritmi molto sofisticati [1]. Un'alternativa, per ridurre gli effetti causati dall'offset tra gli orologi, è quella di utilizzare gli ultrasuoni piuttosto che segnali RF. Infatti, la velocità di propagazione di un'onda sonora è molto più piccola della velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica in RF e un eventuale non sincronia si traduce in un errore in distanza notevolmente più basso.

2.1.1 Time of Arrival (ToA)

L'approccio ToA [2], [3] sfrutta un principio simile a quello che è alla base del sistema di localizzazione GPS. Con il ToA si misura l'intervallo di tempo che intercorre fra la trasmissione del segnale da parte dei nodi di rete e la ricezione da parte dell'apparato utente (misura del Time of flight). Tali differenze temporali si traducono in calcoli della distanza, considerando la velocità di propagazione c (velocità della luce nel vuoto). Dal punto di vista geometrico il problema dell'individuazione della posizione del terminale utente si riconduce all'intersezione di tre circonferenze nel piano (si veda Figura 2). Il problema è noto come Circular Lateration o Trilateration.

Dal punto di vista analitico il problema è il seguente:

$$c(t_i - t_0) = r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2} \quad (4)$$

dove t_i è l'istante temporale in cui viene ricevuto il segnale dal terminale utente proveniente dall' i -esimo nodo di rete, t_0 è l'istante di trasmissione da parte degli apparati di rete, $(t_i - t_0)$ è l'intervallo di tempo tra la trasmissione e la ricezione del segnale, r_i è la distanza tra l' i -esimo apparato di rete e il terminale utente, $(X_i; Y_i)$ sono le coordinate locali dell' i -esimo apparato di rete e $(x; y)$ sono le coordinate locali del terminale utente.

Nel caso 3D si aggiungono le coordinate Z_i e z che rappresentano rispettivamente le altitudini dell' i -esimo apparato di rete e del terminale utente. Nel caso di localizzazione su un sistema tridimensionale, sono necessarie quattro equazioni (ovvero quattro misurazioni temporali) per risolvere il sistema. Questa situazione è descritta nell'equazione:

$$c(t_1 - t_0) = r_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2} \quad (5)$$

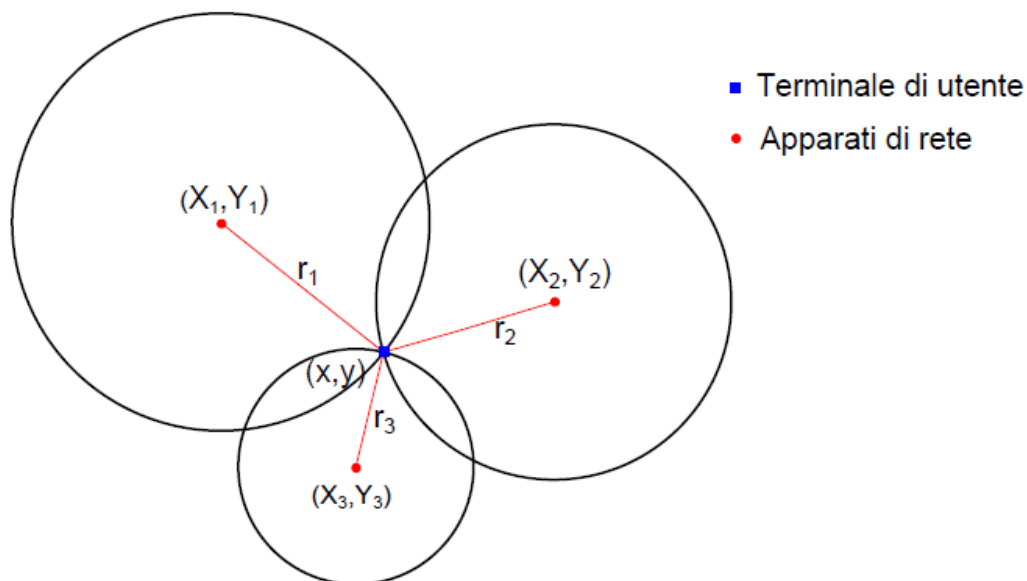


Figura 2: localizzazione del terminale utente mediante trilaterazione.

È importante sottolineare alcune considerazioni che scaturiscono direttamente da tale tecnica:

- Il problema che si è considerato è un problema di localizzazione nel piano, ovvero di ricerca di una coppia di coordinate locali, quindi sono necessarie tre misure temporali per individuare univocamente, nel caso ideale, la posizione dell'utente. Se il problema della localizzazione fosse nello spazio, sarebbero state necessarie 4 misure temporali (ovvero 4 distanze), e in tal caso la posizione del terminale è il risultato dell'intersezione tra sfere nello spazio. Più in generale servono $n + 1$ equazioni ($n + 1$ misurazioni temporali) e $n + 1$ coordinate di riferimento per determinare la posizione in un sistema n-dimensionale. Nel caso di localizzazione 2D, la "terza misura" è necessaria per eliminare l'ambiguità derivante dall'intersezione delle due circonferenze, che produce due diversi punti di posizionamento. Questa situazione è rappresentata in Figura 3. In questa situazione si è considerata una perfetta sincronizzazione trasmettitori/ricevitore.
- Nel sistema GPS, sono i satelliti che trasmettono il segnale allo stesso istante temporale e si valuta l'intervallo di tempo che intercorre fra la trasmissione dei segnali satellitari e la ricezione da parte del ricevitore GPS. Ciò implica che i satelliti debbano essere sincronizzati tra loro, ovvero che inizino a trasmettere nello stesso istante. Questo è possibile mediante l'utilizzo di orologi atomici e di tecniche supplementari che prevedono l'ausilio del control segment [2] per correggere eventuali errori di sincronizzazione tra satelliti. Inoltre, è necessaria la sincronizzazione tra gli orologi satellitari e l'orologio del ricevitore. Infatti, come detto all'inizio di questa sezione, in assenza di tale sincronizzazione in sistemi a una via, si commetterebbe un errore inaccettabile nel calcolo delle distanze (che poi si ripercuoterebbe nella valutazione della posizione dell'utente). In definitiva, nel caso GPS (caso tridimensionale), la quarta equazione è sfruttata, sia per eliminare l'ambiguità (l'intersezione tra sfere non genera un unico punto) che per valutare l'offset fra gli orologi satellitari e l'orologio del ricevitore. Tornando all'approccio ToA nel caso bidimensionale, valgono delle considerazioni analoghe: servono tre misurazioni, ovvero tre equazioni, così da eliminare l'ambiguità e valutare l'offset fra l'orologio del terminale utente e gli orologi dei nodi di rete.
- Per il calcolo del time of flight è necessario conoscere l'istante di trasmissione t_0 .

- Nel sistema ToA descritto, la posizione viene stimata dal terminale utente; per cui la localizzazione è interna.
- L'approccio ToA può essere anche applicato inversamente: il terminale utente trasmette e il segnale viene ricevuto da tre o più apparati di rete. In tal caso la localizzazione è esterna.

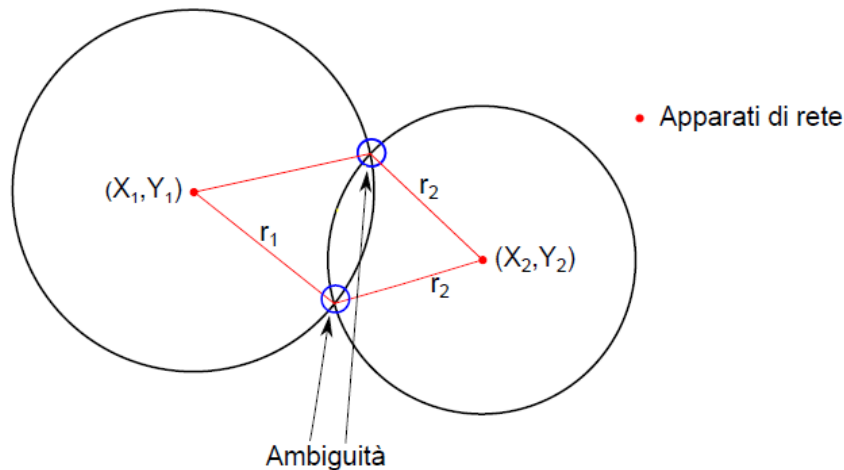


Figura 3: ambiguità presente nella localizzazione 2D con due misure a disposizione.

2.1.2 Time-Difference-of-Arrival (TDoA)

L'approccio TDoA [2], [3] può essere applicato sia lato utente che lato rete. Nel primo caso l'apparato utente deve essere in grado di misurare le differenze dei ritardi di propagazione fra gli apparati di rete e il terminale utente. Nel secondo caso, tre o più nodi di rete devono calcolare il TDoA di un segnale inviato dal terminale utente. Per meglio comprendere questo concetto, si consideri il caso lato utente: il terminale inizia a trasmettere al tempo t_0 . Si Indichi con t_1 , t_2 e t_3 gli istanti di tempo di arrivo del segnale ai tre apparati di rete:

$$\begin{cases} t_1 = t_0 + \Delta t_1 \\ t_2 = t_0 + \Delta t_2 \\ t_3 = t_0 + \Delta t_3 \end{cases} \quad (6)$$

dove Δt_i è data da:

$$\Delta t_i = \frac{\sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}}{c}, \quad \text{con } i = 1,2,3 \quad (7)$$

dove sono noti gli istanti di arrivo t_1 , t_2 e t_3 e le coordinate degli apparati di rete (X_i, Y_i) ; mentre risultano incognite: l'istante di inizio trasmissione t_0 e le coordinate (x, y) del terminale utente. Effettuando la differenza tra la seconda equazione del sistema (6) e la prima, e la terza equazione e la prima, si ottiene:

$$\begin{cases} t_2 - t_1 = \Delta t_2 - \Delta t_1 \\ t_3 - t_1 = \Delta t_3 - \Delta t_1 \end{cases} \quad (8)$$

Dall'eq. (8) si nota come nel caso dei sistemi basati su TDoA la misura di posizione sia poco influenzata dalla sincronizzazione tra il terminale utente e i nodi di rete, essendo gli errori di sincronizzazione compensati nell'operazione di sottrazione tra i diversi valori di TDoA.

Considerando l'equazione (7) e l'equazione (8), si ottiene:

$$\begin{cases} c \cdot (t_2 - t_1) = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ c \cdot (t_3 - t_1) = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \end{cases} \quad (9)$$

Ovvero si ottengono le equazioni di due iperboli che presentano i fuochi nei punti degli apparati di rete. Dall'intersezione fra le due iperboli, ovvero dalla risoluzione del sistema espresso nella (9), si ottengono le coordinate (x, y) che rappresentano appunto la posizione del terminale utente (vedi Figura 4). Questo problema è noto come Hyperbolic Lateration o Multilateration. Anche in questo caso è possibile estendere al caso 3D, considerando la quota.

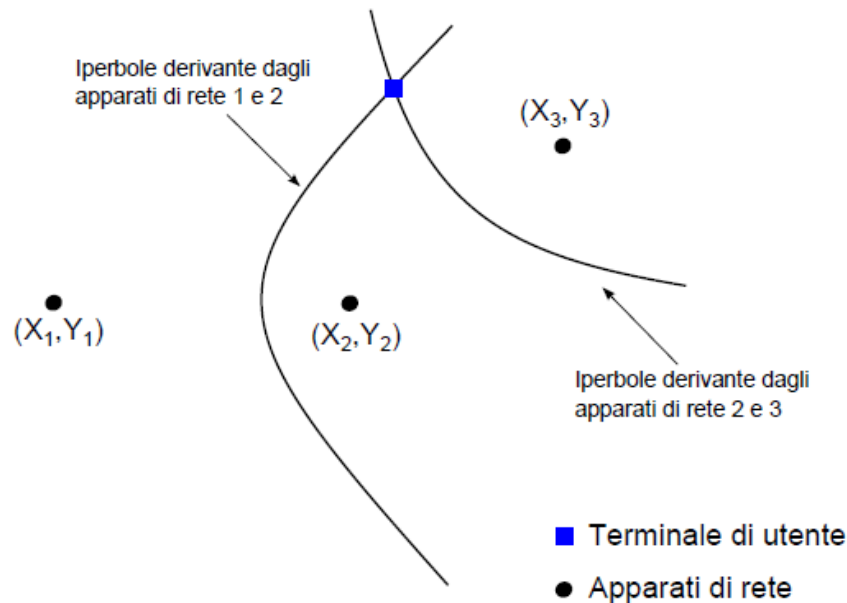


Figura 4: Stima della posizione del terminale utente mediante multilaterazione in un sistema TDoA.

Analogamente a quanto fatto per il ToA, è possibile fare alcune considerazioni:

- Il terminale utente deve essere in grado di comunicare con almeno tre apparati di rete, nel caso di posizionamento 2D, e con almeno quattro nodi di rete, nel caso di posizionamento 3D.
- Non è necessario conoscere l'istante di inizio trasmissione t_0 .
- È necessaria la sincronizzazione temporale tra tutti gli apparati di rete.
- La localizzazione, nel caso TDoA considerato, è esterna.

Tutti i sistemi di localizzazione basati su misure temporali sono influenzati dalla risoluzione temporale dei ricevitori utilizzati. In base alla risoluzione temporale consentita è possibile classificare tali sistemi in:

- Narrowband;
- Wideband;
- Ultra Wideband.

Nei sistemi narrowband, si utilizzano trasmissioni a banda stretta, e la stima del ritardo è effettuata stimando lo sfasamento che subisce il segnale durante la propagazione tra la trasmissione e la ricezione. Per cui la risoluzione temporale dipende dalla precisione sulla misura dello sfasamento.

Nei sistemi wideband, si utilizzano segnali a banda larga sfruttando la tecnica del Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS); il ritardo di propagazione viene stimato effettuando la cross-correlazione fra il segnale ricevuto e delle sue repliche che sono generate localmente. In tal caso, la risoluzione temporale dipende approssimativamente dall'inverso della banda utilizzata dal segnale. Questo è il caso delle reti WI-FI.

I sistemi ultrawideband utilizzano dei segnali impulsivi non modulati (a differenza dei segnali narrowband). In questi sistemi la risoluzione temporale è data approssimativamente dalla durata dell'impulso (che è pari a circa l'inverso della banda).

2.1.3 Angle of Arrival (AoA)

Con l'approccio AoA [2], [3] si sfrutta sempre un principio geometrico, ma si considerano le direzioni di arrivo, ovvero il sistema è basato su misurazioni angolari.

Il problema geometrico è l'intersezione tra due rette con angolazioni Φ_1 e Φ_2 , rispetto all'asse delle x (vedi Figura 5). In questo caso si parla di Triangulation.

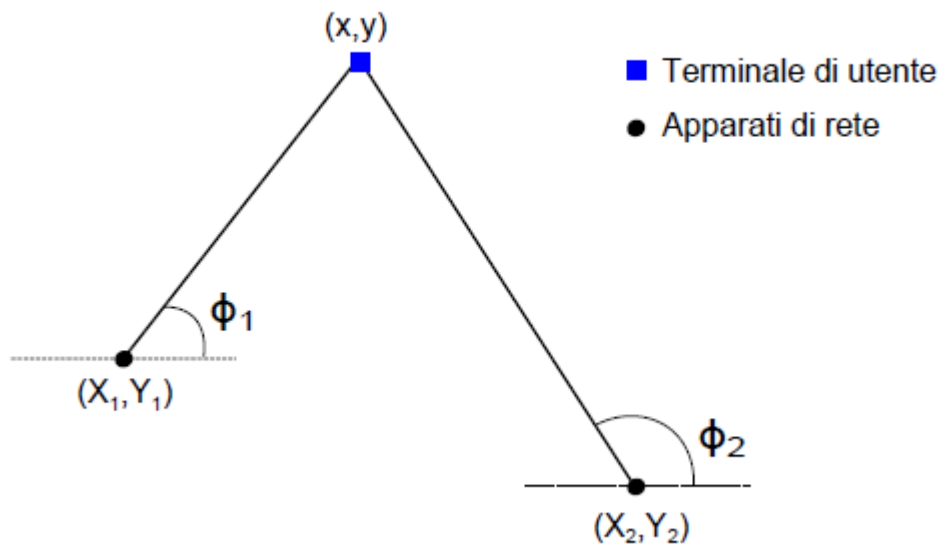


Figura 5: Sistema di localizzazione basato su misure di AoA e triangolazione.

Analiticamente il problema è quello della risoluzione del sistema di equazioni:

$$\begin{cases} y = x \cdot \tan(\Phi_1) + Y_1 - X_1 \cdot \tan(\Phi_1) \\ y = x \cdot \tan(\Phi_2) + Y_2 - X_2 \cdot \tan(\Phi_2) \end{cases} \quad (10)$$

È possibile fare le seguenti considerazioni riguardo il sistema AoA:

- Le misurazioni angolari sono normalmente svolte dagli apparati di rete; ovvero, una coppia di apparati di rete stima la direzione da cui proviene il segnale irradiato dal terminale utente e, sulla base di tali misurazioni, risolve l'algoritmo di stima della posizione e comunica la posizione al terminale utente.
- In linea teorica, sono sufficienti due sole misure di angolo per identificare univocamente nel piano la posizione del terminale di utente. Nel caso di misurazioni temporali, il terminale utente, doveva invece "vedere" almeno tre apparati di rete.
- Non è richiesta alcuna sincronizzazione tra gli apparati di rete.
- Analogamente a quanto detto per la risoluzione temporale dei sistemi TDoA e ToA, anche i sistemi AoA possono essere caratterizzati in termini di risoluzione angolare; in particolare tale valore coincide con la minima distanza angolare rilevabile. A partire dalla risoluzione

angolare è possibile capire la precisione nella misura dell'angolo e quindi l'eventuale errore nella stima della posizione dell'utente.

- La maggiore complessità di tale tecnica risiede nella misurazione degli angoli. Esistono molte tecniche di misurazione angolare, ma in pratica è possibile ricondursi a due categorie [1]: tecniche che sfruttano la risposta in ampiezza dell'antenna ricevente e quelle che usano la risposta in fase. Nella prima categoria rientrano, le antenne che effettuano una scansione (rotazione meccanica o elettronica). Tali antenne presentano un certo diagramma di irradiazione caratterizzato da una direzione di massimo, quando tale direzione coincide con la direzione di arrivo del segnale, si ha la misura dell'angolo. L'accuratezza che si vuole ottenere dipende fortemente dalle dimensioni dell'antenna L e dalla lunghezza d'onda λ (infatti la larghezza del fascio dipende dal rapporto λ/L). Alternativamente è possibile utilizzare più antenne e la direzione di arrivo del segnale è valutata confrontando l'intensità del segnale ricevuto su ogni antenna (con la conoscenza a priori dei diagrammi di irradiazione delle antenne). Per quanto riguarda la seconda categoria, si sfruttano due o più antenne (array di antenne) poste a distanza nota e si valuta lo sfasamento del segnale alle varie antenne. Se si volesse integrare un'infrastruttura esistente basata su WLAN, sarebbe necessario utilizzare dell'hardware aggiuntivo, ovvero un opportuno array di antenne presso l'Access Point (AP).
- È richiesta la condizione di line-of-sight (LOS) fra terminale e apparati di rete per ottenere una stima sufficientemente accurata. Inoltre, tale tecnica è fortemente influenzata da multipath e shadowing.

2.2 Sistemi basati su misure di prossimità

Per sistemi basati su misure di prossimità si fa riferimento a tutti quei sistemi di localizzazione che sono in grado di determinare l'apparato di rete che si trova più vicino al terminale utente, e questa, è l'unica informazione che viene utilizzata per la localizzazione dell'utente stesso. Ogni nodo di rete può essere visto come un sensore che copre una certa zona mediante segnale radio, infrarossi o ultrasuoni e quando, terminale e sensore di rete si vedono, si assegna al terminale la posizione in

relazione al nodo in vista. In particolare, le coordinate dell'apparato utente coincideranno o con quelle del nodo di rete più vicino, oppure con un punto che si trova nella sua zona di copertura. I nodi di rete emettono periodicamente dei segnali includendo il loro ID. Per cui con il "metodo di prossimità" gli apparati di rete o i terminali utente non devono calcolare nessun parametro e non ci saranno quindi problemi legati alla sincronizzazione e precisione nelle misurazioni temporali o di angolo di arrivo.

Data la semplicità dei sistemi di prossimità, negli ultimi anni si sono sviluppati molti sistemi di localizzazione specialmente in ambienti indoor [4] e [5].

In generale, in un sistema di prossimità, le "variabili" sono: l'area di copertura di ogni nodo di rete (legame con il diagramma di irradiazione dell'antenna) e la disposizione di tali nodi; dal dimensionamento di questi due parametri, scaturisce la sovrapposizione fra le aree di copertura dei vari nodi, e a questo punto si utilizzerà un certo algoritmo per stimare la posizione dell'utente, che meglio si adatta alla situazione. Si consideri ad esempio la tecnica del centroide: la posizione dell'utente (nel caso 2D) può essere calcolata come il baricentro del poligono i cui vertici sono i nodi di riferimento, questa situazione è rappresentata in Figura 6.

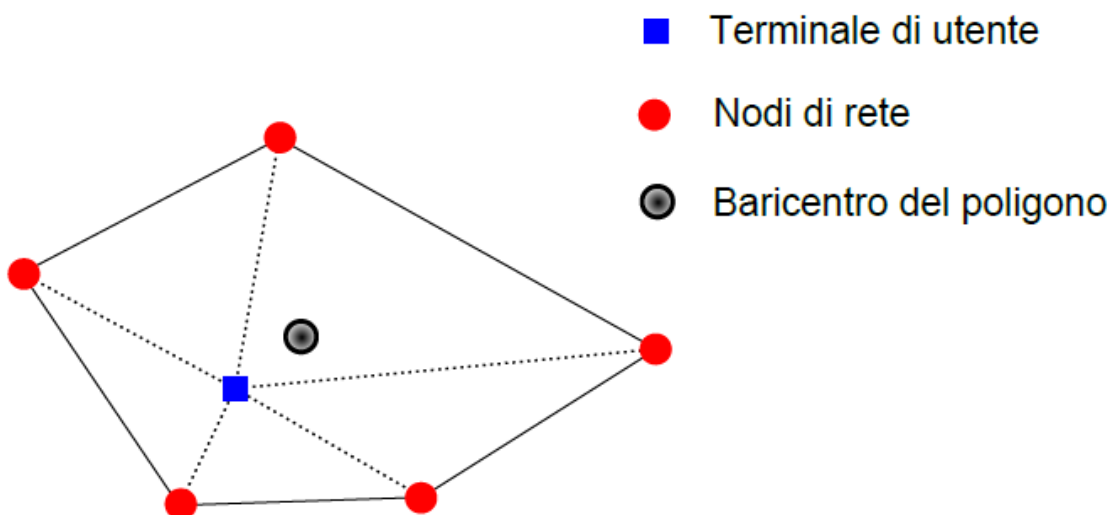


Figura 6: sistema di misura di posizione mediante misura di prossimità.

Esistono molte altre strategie: intersezioni fra triangoli, uso del centro di gravità tra aree sovrapposte o tecniche probabilistiche. Alcune di queste tecniche necessitano di un hardware specifico, ma sono in grado di ottenere una buona precisione. Il grosso vantaggio delle tecniche basate sulla prossimità è la semplicità, che in alcune tecnologie si traduce in costi bassi.

È intuitivo quindi, che l'accuratezza sul posizionamento sarà tanto maggiore quanto più "fitta" sarà la copertura, ovvero l'errore medio sulla posizione dell'utente diminuisce al crescere dei nodi di rete.

2.3 Received Signal Strength Indication

Con l'approccio geometrico, si è visto che i parametri utilizzati per la localizzazione sono le differenze temporali e gli angoli. Un approccio alternativo è quello che prevede l'utilizzo dell'intensità della potenza come parametro di localizzazione, in particolare si parla di tecniche Received Signal Strength Indication (RSSI) che si basano sul fatto che l'intensità del segnale radio si attenua durante la propagazione e per questo motivo è possibile legare tale attenuazione ad una distanza e quindi alla posizione di un terminale [4], [5], [6]. Sono possibili due diversi approcci basati sulla misura dell'intensità della potenza ricevuta:

- Propagation Based;
- Fingerprinting.

L'approccio Propagation Based si basa su dei modelli statistici, che cercano appunto di modellizzare la propagazione di un'onda elettromagnetica, così da valutare la potenza ricevuta. Il caso più generale è quello di propagazione nello spazio libero, in cui la potenza ricevuta da un terminale posto a distanza d dal terminale trasmittente vale:

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r \quad (11)$$

dove P_t è la potenza trasmessa, G_t e G_r sono i guadagni dell'antenna trasmittente e ricevente, e λ è la lunghezza d'onda. Un modello di questo tipo è valido nello spazio libero e non rispecchia la situazione reale. In molti ambienti, soprattutto in ambito indoor, bisogna considerare fenomeni

quali shadowing, riflessioni, interferenze ed altri effetti che modificano fortemente la propagazione rispetto al caso nello spazio libero, e quindi la potenza ricevuta. In questi casi vengono utilizzati altri modelli che descrivono meglio l'attenuazione del segnale. Tali modelli si basano su distribuzioni log-normali o variabili calcolate empiricamente; alcuni modelli noti [1] sono: il modello Longley-Rice, il modello di Durkin, Okumura, Hata, etc. A titolo di esempio si riportano i risultati ottenuti con il modello descritto in [5]:

$$P_r = P_0(d_0) - \eta \cdot 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (12)$$

dove $P_0(d_0)$ indica la potenza ricevuta ad una distanza di riferimento d_0 , η indica l'esponente della path-loss, X_σ è una variabile che tiene conto degli effetti dovuti al fading ed è una variabile aleatoria log-normale con varianza σ^2 . Per il calcolo della distanza d si utilizzerà la stima a massima verosomiglianza. Si riporta direttamente il risultato:

$$\hat{d} = d_0 \left(\frac{P_r}{P_0(d_0)} \right)^{-1/\eta} \cdot e^{-(\alpha^2/2)(\sigma^2/\eta^2)} \quad (13)$$

dove $\alpha = \ln(10) / 10$.

In molti casi, le tecniche che fanno uso del RSSI utilizzano un approccio completamente diverso, che viene indicato con il termine fingerprinting. Per poter applicare questo metodo è necessaria una analisi preventiva dell'ambiente. Si distinguono due fasi: la fase offline e la fase online.

Nella fase offline, la zona che si vuole coprire viene suddivisa da una griglia, caratterizzata da un certo numero di punti. Per ognuno di questi punti, viene creato un vettore di valori, chiamato appunto fingerprint, i cui elementi sono i valori RSS misurati rispetto ai diversi nodi di rete. Per ogni punto della mappa, le misurazioni vanno effettuate considerando diversi orientamenti tra trasmettitore e ricevitore, questo a causa dell'attenuazione prodotta dal corpo umano, che determina risultati diversi. Un parametro di cui tener conto in fase di misurazione è il tempo di osservazione, che è l'intervallo di tempo in cui viene "osservata" l'intensità del segnale ricevuto in un certo punto, in generale al crescere del tempo di osservazione si riescono a raccogliere un maggior numero di campioni, e si avrà una migliore caratterizzazione statistica del fenomeno. Il

tempo di calibrazione è dell'ordine di decine di secondi. I dati così ottenuti per ogni punto vanno memorizzati in un database.

Nella fase online, il terminale utente misura i valori di RSSI. A tal proposito un altro parametro di interesse è il tempo impiegato per la misurazione da parte del ricevitore (tempo di analisi); questo parametro deve essere adeguatamente valutato, perché se risulta essere troppo basso, si avranno a disposizione un numero di campioni di intensità di potenza ricevuta troppo basso per eseguire un confronto "efficace" con i valori di potenza memorizzati nella fase offline e ciò potrebbe determinare un degrado delle prestazioni. L'approccio fingerprinting presenta il grosso svantaggio, che le misurazioni offline effettuate sono adatte solo all'area studiata, per cui ad ogni nuovo progetto, e ad ogni aggiunta o modifica dei dispositivi di rete le misurazioni andranno nuovamente svolte, inoltre questa tecnica risulta poco efficace in ambienti radio con caratteristiche altamente dinamiche. Comunque, l'approccio fingerprinting trova ampio utilizzo perché è una soluzione dai costi non elevati dato che non è richiesto alcun hardware particolare. In generale le tecniche fingerprinting sono in grado di fornire delle prestazioni migliori, sotto il profilo dell'accuratezza sulla stima della posizione, rispetto alle tecniche propagation-based.

2.4 Sorgenti di errore nei sistemi di localizzazione

Nelle sezioni precedenti, si sono trattati argomenti quali sincronizzazione, risoluzione temporale e principi di funzionamento dei diversi sistemi di localizzazione, considerando solo in parte quelle che sono le problematiche che si riscontrano in un ambiente indoor reale e gli errori di varia natura che si commettono. In generale, i fattori che contribuiscono ad una errata stima della posizione dell'utente sono i seguenti:

1. errori causati dal multipath;
2. errori causati da imprecisioni nel sistema;
 - a. misura dei parametri di localizzazione;
 - b. algoritmi utilizzati;
 - c. posizione degli apparati di rete;
3. errori causati dalla propagazione Non-Line-of-Sight (NLoS);

4. errori dovuti alla riduzione del fattore geometrico.

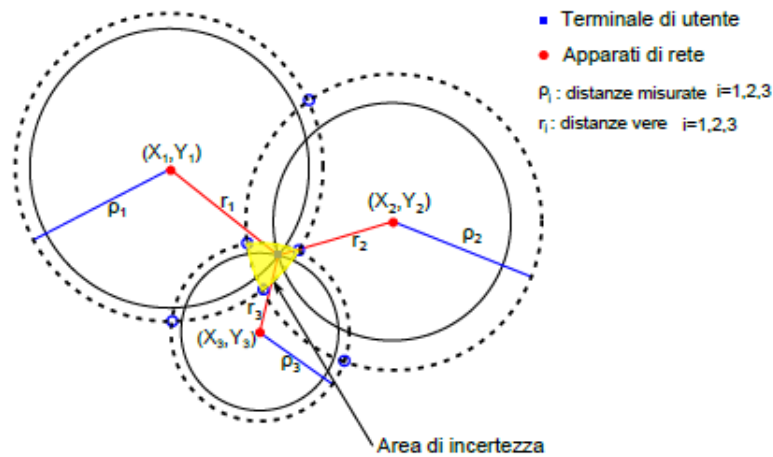


Figura 7: influenza degli errori di misura temporali sulla stima della posizione del terminale utente nel caso di sistema ToA.

Il multipath è un fenomeno che va attentamente considerato, soprattutto in ambito indoor: in ricezione giungeranno tante repliche ognuna caratterizzata da un certo ritardo e attenuazione; si avrà quindi un'interferenza fra i diversi cammini ricevuti e un'oscillazione sulla potenza ricevuta, infatti si ha un'attenuazione supplementare, che si aggiunge all'attenuazione in spazio libero, soggetta ad aleatorietà, che viene indicata con il termine fading. Il fading causa degli errori sulle misure di potenza, di distanza e angolo: una determinata misurazione non può essere effettuata se il segnale ricevuto è troppo basso, inoltre in presenza di una molteplicità di contributi ricevuti, si commettono degli errori sulle misure di tempi e angoli, poiché la potenza ricevuta è distribuita su un intervallo temporale/angolare più ampio. In generale, è possibile asserire che la precisione ottenibile con un generico sistema di localizzazione degrada, in misura che dipende dalla capacità del sistema di sopportare e gestire cammini multipli. Tali capacità dipendono, dal tipo di sistema utilizzato: i sistemi narrowband sono particolarmente affetti da multipath; con i sistemi wideband, la banda cresce ed è possibile risolvere parzialmente il problema dei cammini multipli, con i sistemi ultra wideband si ha una buona immunità al multipath.

Ogni sistema è affetto da imprecisioni che dipendono da più fattori. Un fattore è ovviamente l'errore sulle misurazioni temporali, angolari o di potenza. Un altro errore è causato dall'algoritmo utilizzato per calcolare la posizione dell'utente; ad esempio nel sistema GPS il ricevitore non risolve in forma

chiusa il sistema di quattro equazioni, ma utilizza una risoluzione numerica che sfrutta delle approssimazioni, che inevitabilmente generano degli errori. Inoltre, ci sono degli errori già “in partenza”, come ad esempio, quelli relativi alle coordinate locali degli apparati di rete. Tali errori si ripercuotono, in maniera più o meno rilevante, sulla misura di posizione del terminale utente.

In condizioni NLoS, ovvero in assenza di visibilità diretta fra trasmettitore/ricevitore, si commetterà sempre un errore sulle misurazioni. Sui metodi time-based si può commettere un errore grossolano sulla stima delle distanze, in particolare, in condizione NLoS si avrà sempre una sovrastima delle misurazioni temporali (ovvero delle distanze) proprio perché tutti i cammini hanno percorso distanze maggiori rispetto al cammino LOS. L'errore di posizione, oltre a dipendere fortemente dall'errore commesso sulla valutazione delle distanze, dipenderà anche dalla geometria, ovvero dalla posizione dei diversi apparati di rete rispetto al terminale utente.

Si consideri, a titolo di esempio, un sistema di localizzazione bidimensionale che utilizza un approccio ToA, affetto da errore sul calcolo delle misure temporali, causato da uno o più fattori descritti in precedenza. La situazione è quella descritta nella Figura 7. La distanza tra i tre apparati di rete e il terminale utente è pari a r_i , ma a causa di errori temporali di varia natura, si andranno a misurare le distanze ρ_i . Da un punto di vista geometrico, non esiste nessun punto di intersezione fra le tre circonferenze, ma ci possono essere fino a un massimo di sei punti di intersezione fra coppie di circonferenze, per cui non è possibile stimare la posizione sulla base delle intersezioni fra cerchi. A questo punto è necessario applicare una certa strategia, per stimare una posizione univoca. Un approccio potrebbe essere quello di considerare che il punto di interesse sia nella regione comune a tutte e tre le circonferenze e scegliere poi come posizione di stima, il baricentro di tale zona. Un altro possibile approccio è descritto nella Figura 8: il punto di localizzazione, coincide con l'intersezione fra i tre segmenti di colore verde; ogni segmento è costruito a partire dai due punti di intersezione fra le diverse coppie di circonferenze.

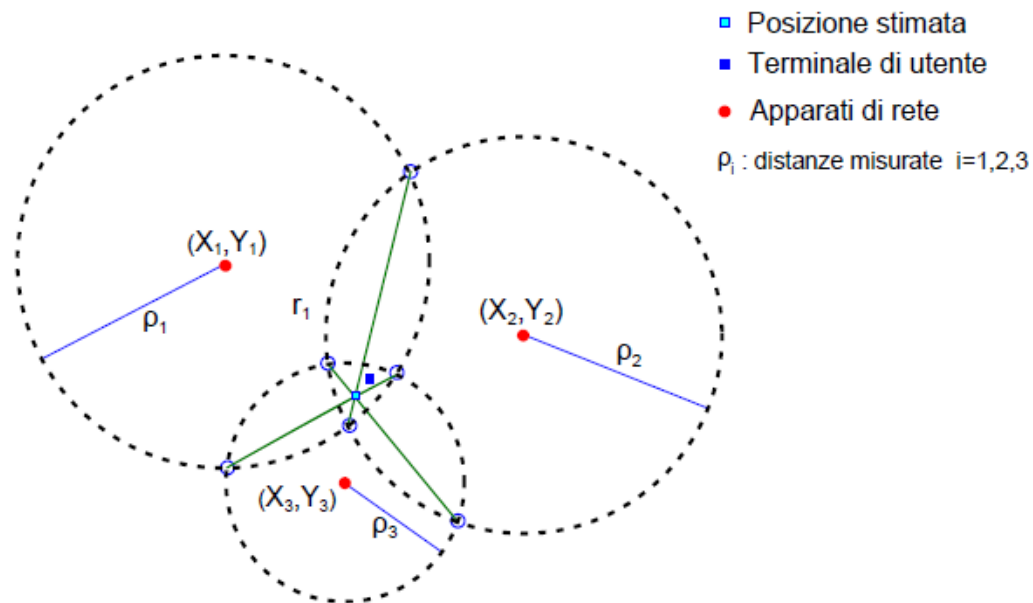


Figura 8: calcolo della posizione dell'utente come intersezione fra rette costruite a partire dalle intersezioni tra le circonferenze nel caso di sistema ToA.

2.5 Breve descrizione dei sistemi di localizzazione indoor presenti in letteratura

In questa sezione si descriveranno alcuni dei sistemi di localizzazione per ambienti indoor presenti sul mercato che si basano su diverse tecnologie: suoni, ultrasuoni, infrarossi, Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth, reti ultra wideband (UWB). Nel caso in cui si utilizzino delle infrastrutture dedicate, il terminale utente deve essere equipaggiato con badge o tag proprietari in grado di acquisire i diversi tipi di segnali; questo è ad esempio il caso, delle tecnologie RF-ID, UWB o ultrasuoni. Se invece la localizzazione è realizzata usando delle reti Wi-Fi o bluetooth, l'utente potrà utilizzare il proprio smartphone e specifiche applicazioni per finalità di localizzazione.

A questo punto è importante fare una distinzione in base agli obiettivi finali del processo di localizzazione, ovvero ha senso svolgere la localizzazione dell'utente, per due diverse finalità:

- legate al controllo di varco e al controllo di aree riservate;
- legate alla navigazione.

Il controllo di varco è effettuato per finalità di controllo accessi in zone riservate: un esempio pratico è all'interno di un ospedale, in cui si desidera che un medico abbia accesso in certi reparti, perciò

non appena il medico si trova nei pressi dell'ingresso, l'apparato di rete legge il tag, indossato dall'utente e comanda l'apertura della porta. Più in generale, il controllo di varco può essere adoperato in tutte quelle sedi dove ci sono delle aree accessibili solo da alcuni utenti; altre possibili applicazioni sono l'identificazione veicolare (il sistema più conosciuto è telepass) o l'accesso ai magazzini. Il controllo di aree riservate invece è utilizzato per monitorare gli utenti o le cose in zone riservate; questo è ad esempio il caso di applicazioni aeroportuali, in cui si vogliono localizzare passeggeri e bagagli. Nei due casi descritti, l'utente non ha l'obiettivo di navigare, ma è il sistema che vuole localizzare l'utente; nel caso di controllo di varco, si vuole localizzare l'utente per permettergli di usufruire di servizi legati alla propria posizione. Nel caso di controllo di aree riservate, si cerca di monitorare lo spostamento di cose e persone in strutture molto estese o complesse. In applicazioni di questo tipo, la sicurezza è un aspetto di fondamentale importanza. È diretto il legame con i proximity system.

Invece, quando la finalità del sistema di localizzazione è la navigazione, è l'utente che vuole sapere qual è la propria posizione all'interno della struttura, interagendo ad esempio con una mappa. Si assiste l'utente indicando interattivamente il percorso da seguire per raggiungere una destinazione impostata dall'utente stesso; in questi sistemi gli aspetti legati alla sicurezza sono secondari. Si parla in questi casi di Real Time Location - RTL.

Nel seguito si descriveranno alcuni sistemi di localizzazione presenti sul mercato, classificandoli in:

- sistemi time based (ToA, TDoA);
- sistemi angle based;
- sistemi RSSI.

La divisione appena fatta è solo indicativa, nel senso che molti sistemi usano approcci ibridi, adoperando ad esempio sia approcci time based che angle based, oppure basati sulla potenza e sulle differenze temporali. Infatti, la tendenza è quella di sfruttare contemporaneamente diversi approcci, per aumentare al massimo la precisione della localizzazione e minimizzare gli eventuali effetti negativi di ogni approccio.

2.5.1 Sistemi time based

In linea teorica, con qualsiasi tecnologia è possibile misurare il Time of flight (una via) o il Round Trip Time (due vie), ma per finalità di localizzazione, si rendono indispensabili alcuni requisiti al fine di ottenere delle misurazioni con una precisione sufficiente per consentire un'accurata stima delle distanze. In particolare, nei paragrafi precedenti si è sottolineata l'importanza della sincronizzazione: e che si dovrebbero avere precisioni dell'ordine dei ns per avere delle misure accettabili, inoltre diverse sono le problematiche in un ambiente reale che influenzano la stima della posizione (per esempio multipath, NLoS, ecc.). È possibile affiancare alle tecnologie a RF, dei segnali a ultrasuoni sfruttando la loro ridotta velocità di propagazione e quindi i minori problemi legati alla sincronizzazione, evitando quindi di usare costosi orologi. La tecnologia a ultrasuoni però, oltre a necessitare dell'hardware dedicato, comporta dei rischi dal punto di vista della sicurezza.

Le tecnologie maggiormente usate con i metodi time-based (ToA e TDoA) sono RFID, Wi-Fi e UWB, si possono però anche usare ultrasuoni, infrarossi e segnali laser.

I sistemi basati su Ultra Wideband stanno trovando negli ultimi anni un grande utilizzo; infatti, come accennato in precedenza, l'impulso di brevissima durata, offre i seguenti vantaggi:

- elevata immunità al multipath: a causa della breve durata dell'impulso;
- alta efficienza energetica che implica praticamente una lunga durata della batteria nei tag;
- buone capacità di penetrazione dei materiali, almeno rispetto a sistemi a banda più stretta e ciò implica un aumento di probabilità, che in ricezione si abbia il contributo diretto;
- alta risoluzione temporale che si traduce in piccoli errori sulle misure delle distanze;
- difficile da intercettare: infatti l'elevata larghezza di banda determina una densità spettrale di potenza molto bassa, per cui il segnale UWB risulta avere un'intensità molto bassa.

Il principio di funzionamento di un sistema di localizzazione UWB, basato su metodi time based, è il seguente: i terminali di rete, sono dei tag attivi che emettono dei segnali molto brevi di durate comprese tra i $100 ps$ e $1.2 ns$, su una banda operativa molto larga, banda maggiore di $500 MHz$.

Gli impulsi trasmessi dai tag, contengono l'identificativo del singolo tag ed altre informazioni accessorie. I tag trasmettono periodicamente impulsi di breve durata, e ciò implica un basso consumo energetico (durata della batteria per molti anni). Se (almeno) tre ricevitori UWB (sensori) ricevono gli impulsi irradiati dal tag, è possibile misurare il time of flight e mediante opportuni algoritmi, viene stimata la posizione dell'utente. A tal proposito, è possibile raggiungere risoluzioni temporali di 40 *ps*, che si traducono in errori sul calcolo del range di appena 12 *mm*. I tag possono inoltre disporre, di una convenzionale trasmissione radio in banda ISM (per esempio 2 *GHz* e 4 *GHz*) che può essere utilizzata come canale di controllo e telemetria. Oltre ai tag e ai ricevitori UWB, è necessaria un'unità centrale, chiamata hub, a cui sono connessi i ricevitori UWB e che deve poter connettere e gestire un elevato numero di ricevitori e deve essere in grado di calcolare la posizione dell'utente sulla base delle informazioni fornite dai ricevitori. La tecnologia UWB si presta bene ad essere impiegata in applicazioni indoor, visto anche il corto raggio d'azione a causa delle limitazioni sulla potenza emessa.

Le grosse limitazioni di tale tecnologia sono legate principalmente agli elevati costi dell'infrastruttura di rete.

Alcuni sistemi di localizzazione UWB sono i seguenti:

- Ubisense (www.ubisense.net);
- Uraxs (www.uraxs.com);
- Timedomain (www.timedomain.com).

In Figura 9 sono mostrati i sensori e i tag Ubisense [7]: sulla sinistra il sensore serie 7000 a destra Ubisense Slim Tag.



Figura 9: sensori e tag del sistema Ubisense [7].

Per quanto riguarda i sensori Ubisense 7000:

- Utilizzano le tecnologie AoA e TDoA combinate, così da garantire una stima più affidabile sulla posizione dell'utente. Ogni sensore contiene un array di cinque antenne UWB e permette di calcolare sia l'azimut che l'elevazione del segnale UWB (tramite AOA), ottenendo un vettore per ciascun tag. Grazie all'array di antenne è possibile avere la stima della posizione anche utilizzando la ricezione su un unico sensore; ciò riduce i requisiti dell'infrastruttura, dato che sarà possibile usare un minor numero di sensori. Inoltre, si sfrutta il TDoA: i sensori sono collegati fisicamente tra loro, tramite un cavo di sincronizzazione, il tag emette l'impulso che viene rilevato dai sensori, che possono usare la Multilateration per la stima.
- I sensori sono connessi tra loro, o con cavi standard Ethernet o tramite adattatori wireless Wi-Fi, utilizzando infrastrutture preesistenti.
- I tag e i sensori Ubisense sono in grado di comunicare tra loro sfruttando la banda ISM a 2.4 GHz. Questa comunicazione permette di gestire in maniera ottimale i tag (informazioni di controllo e telemetria).

- Ogni sensore utilizza una frequenza di aggiornamento di 160 Hz, ciò implica che ogni tag può essere visto ogni 6.25 ms.
- I sensori includono algoritmi di filtering per i dati spaziali così da migliorare la precisione della localizzazione;
- Alcune specifiche tecniche dei sensori sono descritte in Tabella 1.

Tabella 1: Specifiche tecniche del sensore Ubisense serie 7000.

Dimensioni	20 cm × 13 cm × 6 cm
Massa	650 g
Range operativo	≥ 160 m
Frequenze radio UWB	6 GHz a 8 GHz
Frequenze radio telemetria	2.4 GHz
Condizioni operative	-20 °C a 60 °C

Tabella 2: Specifiche tecniche del tag Ubisense slim.

Dimensioni	83 mm × 42 mm × 11 mm
Massa	32 g
Update rate	fino a 33.75 Hz
Frequenze radio UWB	6 GHz a 8 GHz
Frequenze radio telemetria	2.4 GHz
Condizioni operative	-20 °C a 60 °C

Vediamo adesso alcune caratteristiche dei tag Ubisense:

- Il tag trasmette impulsi radio in modalità UWB; tale comunicazione è monodirezionale.
- In una tipica applicazione in cui un tag viene utilizzato per individuare un utente ogni 3 secondi, la batteria ha una durata media di 4 anni.
- Alcune specifiche tecniche dei tag sono descritte in Tabella 2.

Altre caratteristiche del sistema Ubisense sono le seguenti:

- Possibilità di effettuare le simulazioni sul comportamento del sistema (tag e sensori), in ambienti Windows e Linux, così da progettare ed ottimizzare la copertura;
- In quegli ambienti in cui i costi di cablaggio sono elevati o laddove il cablaggio è difficile da eseguire, è possibile adoperare degli appositi moduli: Network e Timing Combiner (NTC). Questi dispositivi, connessi ai sensori, permettono di ridurre il numero di cavi.

- Con il sistema proposto da Ubisense è possibile raggiungere una precisione di rilevazione di 10 cm in 3D.

Un'altra tecnologia che è stata oggetto di molti studi negli ultimi anni è il Wi-Fi basato sullo standard IEEE 802.11. Gli apparati appartenenti a questa tecnologia sono sostanzialmente dispositivi a basso costo. Sono stati fatti molti studi a riguardo nell'ultima decade, vista la massiccia diffusione del Wi-Fi. In [8], è proposto un sistema di localizzazione basato su rete Wi-Fi che utilizza la misura del Round Trip Time. Gli esperimenti sono stati eseguiti su schede 802.11g e 802.11e; si è ottenuto un errore sulle misure dell'ordine di 10 m. Un differente approccio è descritto in [9] in cui si utilizza una tecnica TDoA e dell'hardware dedicato per la sincronizzazione tra gli apparati di rete, ottenendo una più elevata accuratezza. In ogni caso, le soluzioni di localizzazione basate su tecnologia Wi-Fi, sfruttano di solito approcci ibridi, ad esempio RSSI + time-based per incrementare la precisione delle misurazioni.

Altra tecnologia utilizzata per scopi di positioning sono gli ultrasuoni. I segnali a ultrasuoni permettono di raggiungere un'elevata precisione e non interferiscono con i segnali in RF. Però, come accennato in precedenza, il grosso problema è legato alla sicurezza e alla necessità di un'infrastruttura dedicata. Nel seguito verranno descritti i due principali sistemi di localizzazione basati su ultrasuoni: Bat System e Cricket.

Nel Bat System [10] l'infrastruttura di rete, così come il terminale utente (dedicato) utilizza i segnali a ultrasuoni su una frequenza di 433 MHz e le misure del time of flight. L'apparato utente è un trasmettitore ad ultrasuoni contraddistinto da un codice identificativo e che presenta una batteria con durata media di 18 mesi. L'infrastruttura di rete è invece costituita da una griglia di sensori ad ultrasuoni posti sul soffitto e da trasmettitori in grado di emettere segnali in RF. Il funzionamento è il seguente: l'unità centrale trasmette, per finalità di sincronizzazione, il segnale in RF che viene ricevuto sia dal terminale utente, che dai sensori. Il terminale utente non appena riceve il segnale RF, emette l'impulso ad ultrasuoni. Il tempo che intercorre fra la trasmissione del segnale ad ultrasuoni da parte del terminale utente e la ricezione da parte dei sensori di rete è utilizzato per il calcolo della posizione dell'utente. Il Bat System è in grado di raggiungere accuratezze di 3 cm. I

maggiori problemi di localizzazione si hanno in corrispondenza di aree ad alto assorbimento del segnale ad ultrasuoni, come ad esempio gli angoli di una stanza. Un aspetto di interesse è che possono essere utilizzati fino a un massimo di 15 sensori per la stima della posizione del terminale, ovvero 15 misurazioni. Il principio di funzionamento e gli elementi del Bat System sono riportati in Figura 10.

Il sistema Cricket è analogo al Bat System, ma sono i sensori a trasmettere i segnali ad ultrasuoni. Perciò nel sistema Cricket i sensori sono trasmettitori, mentre nel Bat System i sensori agivano solo da unità riceventi. Ciò implica che nel sistema Cricket la localizzazione è eseguita a livello locale dal terminale utente, mentre nel Bat System, la localizzazione era esterna. Grazie a questo approccio è richiesto un minor numero di sensori. Esistono diverse versioni del sistema Cricket: Grillo e Compass, ed è possibile raggiungere accuratèzze fino a 1 cm.

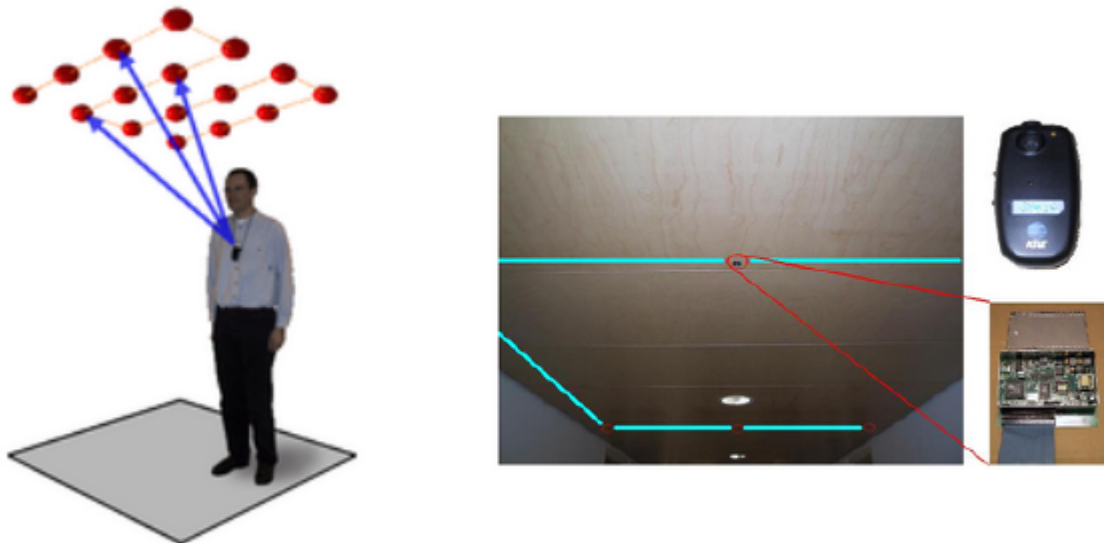


Figura 10: Il Bat System.

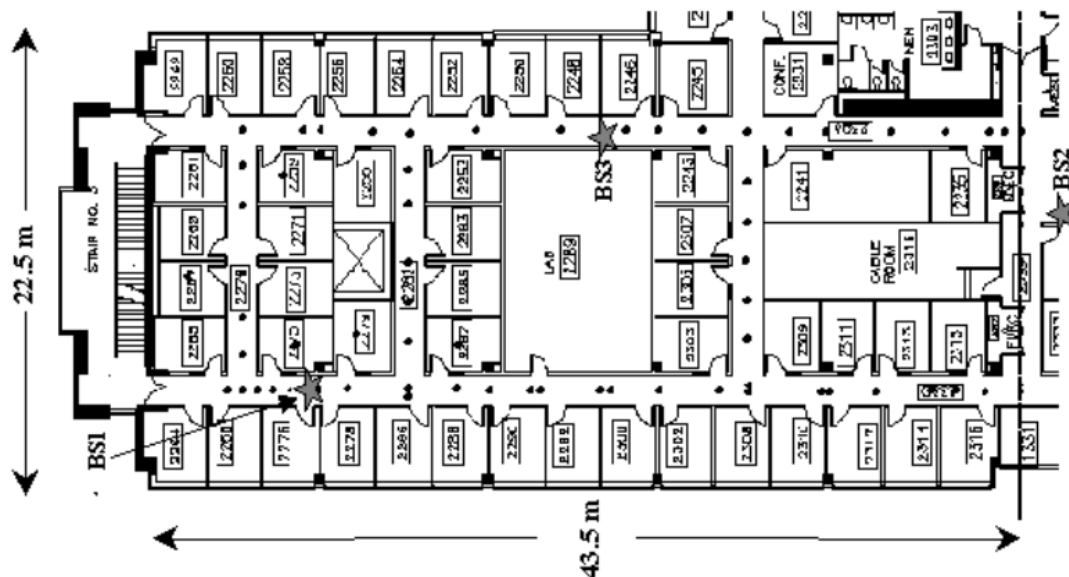


Figura 11: Scenario di test del progetto RADAR.

Un'altra possibile tecnica di localizzazione è quella che fa uso della tecnologia laser. In questi casi si parla di LIDAR, acronimo che sta per Light Detection And Ranging. La tecnologia Laser è simile alla tecnologia radar, per cui la distanza dell'oggetto è determinata misurando il tempo trascorso fra l'emissione dell'impulso e la ricezione del segnale retrodiffuso. In realtà, questa tecnologia è maggiormente utilizzata in robotica piuttosto che in ambito di positioning indoor.

2.5.2 Sistemi RSSI

Nella prima parte di questa sezione ci si sofferma su alcuni sistemi di localizzazione basati su Wi-Fi, in particolare che sfruttano l'approccio fingerprintg da misure RSSI. Verrà descritto ampiamente, dapprima, il sistema RADAR, che rappresenta il capostipite dei sistemi Wi-Fi che sfruttano l'approccio fingerprintng e in seguito il sistema Ekahau, che attualmente rappresenta una delle soluzioni più complete sul mercato basate su Wi-Fi. In seguito, verrà descritto un approccio ibrido che sfrutta sia la tecnologia Wi-Fi che la tecnologia Bluetooth. Infine, verrà descritto il sistema Landmarc che fa uso di un di un approccio propagation based.

RADAR [11] è stato uno dei primi progetti completi di localizzazione e tracciamento basati su tecnologia Wi-Fi. Si basa sul fingerprinting. Merito dei progettisti non è stato solo quello di

assicurare una buona accuratezza nella localizzazione dell'utente, ma anche quello di fornire una documentazione chiara e completa che affronta tutte le problematiche di interesse. Nel progetto RADAR gli esperimenti sono stati condotti in un'area abbastanza estesa, pari a $980 m^2$ con più di 50 stanze e coperto da tre Base Station, come mostrato in Figura 11. Il terminale utilizzato per le misurazioni è dotato di scheda NIC (Network Interface Card) Digital RoamAbout basata su tecnologia WaveLAN RF che permette di avere informazioni sulla potenza del segnale (SS - Signal Strength) e sul Signal-to-Noise Ratio SNR. La rete opera in banda ISM a $2.4 GHz$ e presenta una velocità di trasmissione di $2 Mbps$. Il clock del terminale e delle base station è sincronizzato (entro $5 ms$).

Le misurazioni caratteristiche della fase off-line sono state eseguite in questo modo:

- In determinati punti (bidimensionali) di interesse (x, y) vengono inviati da parte del terminale mobile 4 pacchetti UDP al secondo di 6 byte ciascuno di payload.
- Ogni BS registra l'intensità del segnale ss (signal strength) insieme al timestamp (t) .
- Verrà memorizzata nel database una terna di valori (t, BS, ss) .

È utile sottolineare che le misure relative al rapporto SNR non sono in pratica utilizzate a causa delle forti fluttuazioni dovute al rumore, quindi l'unica misurazione presa in considerazione è il ss . Inoltre, sono state registrati in 70 punti diversi i segnali che giungono al ricevitore dalle tre base station. In particolare, per ognuno dei punti di analisi (x, y) , il terminale è stato considerato in 4 diverse direzioni (nord, sud, ovest, est), la direzione si è indicata con d . Infatti, si è visto che la potenza del segnale in un determinato punto può variare fino a $5 dBm$ in base alla direzione in cui è disposto il terminale stesso. Ciò è dovuto alla posizione del corpo, che quando si interpone tra BS e terminale, genera un'attenuazione supplementare che incide notevolmente sulle potenze ricevute. Per ognuna delle 70 posizioni (x, y) e per ognuno dei quattro possibili orientamenti sono stati raccolti 20 campioni di potenza del segnale, tutte queste informazioni sono legate al timestamp t . In seguito, si sono unite le informazioni raccolte durante la fase off-line: sono state calcolate per ogni terna di valori (x, y, d) la media, deviazione standard e mediana dei valori di ss per ogni BS. Per il calcolo della posizione dell'utente, si è considerato dapprima l'algoritmo Nearest Neighbor in Signal Space (NNS). Con l'algoritmo NNS viene valutata la distanza, nello spazio del segnale, tra l'insieme di

misure osservate (SS_1, SS_2, SS_3) e tutti gli altri ss registrati ($ss_{i,1}, ss_{i,2}, ss_{i,3}$) (per 70 posizioni), e poi si sceglie la posizione (x, y) , legata ai ss registrati, che minimizza tale distanza. Quanto detto può essere scritto matematicamente come segue:

$$D_i = \sqrt{(SS_1 - ss_{i,1})^2 + (SS_2 - ss_{i,2})^2 + (SS_3 - ss_{i,3})^2} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, 70 \quad (14)$$

Alla distanza D_i più piccola risultante, sono “legate” le coordinate (x, y) , legate a loro volta ai valori $(SS_{i,1}, SS_{i,2}, SS_{i,3})$.

Con l’approccio descritto, la posizione scelta per la localizzazione dell’utente può essere solo tra quelle della griglia, per cui l’accuratezza che si ottiene dipenderà dalla granularità della griglia utilizzata nella fase off-line.

In seguito, si è considerato una sorta di “evoluzione” di questo algoritmo, chiamato Multiple Nearest Neighbors; questo algoritmo è anche indicato in letteratura con il nome di Nearest Neighbor in Signal Space Average (NNSS-AVG) [12]. Invece di considerare solo la distanza più piccola, ovvero solo una coppia di coordinate (x, y) che genera la distanza D_i minore, si considerano le k coordinate più vicine nello spazio del segnale, che generano le k distanze più piccole. Operando la media di queste k coordinate si ottiene il posizionamento finale. Un esempio è mostrato in Figura 12, in cui si considerano $k = 3$ nearest neighbors.

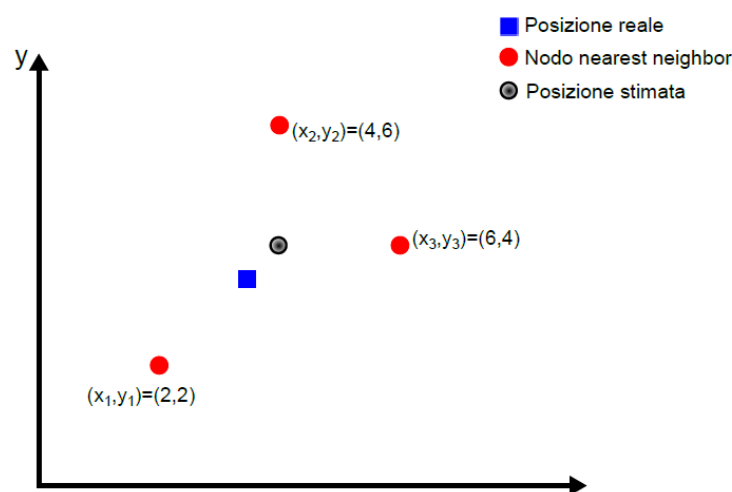


Figura 12: Algoritmo NNSS-AVG.

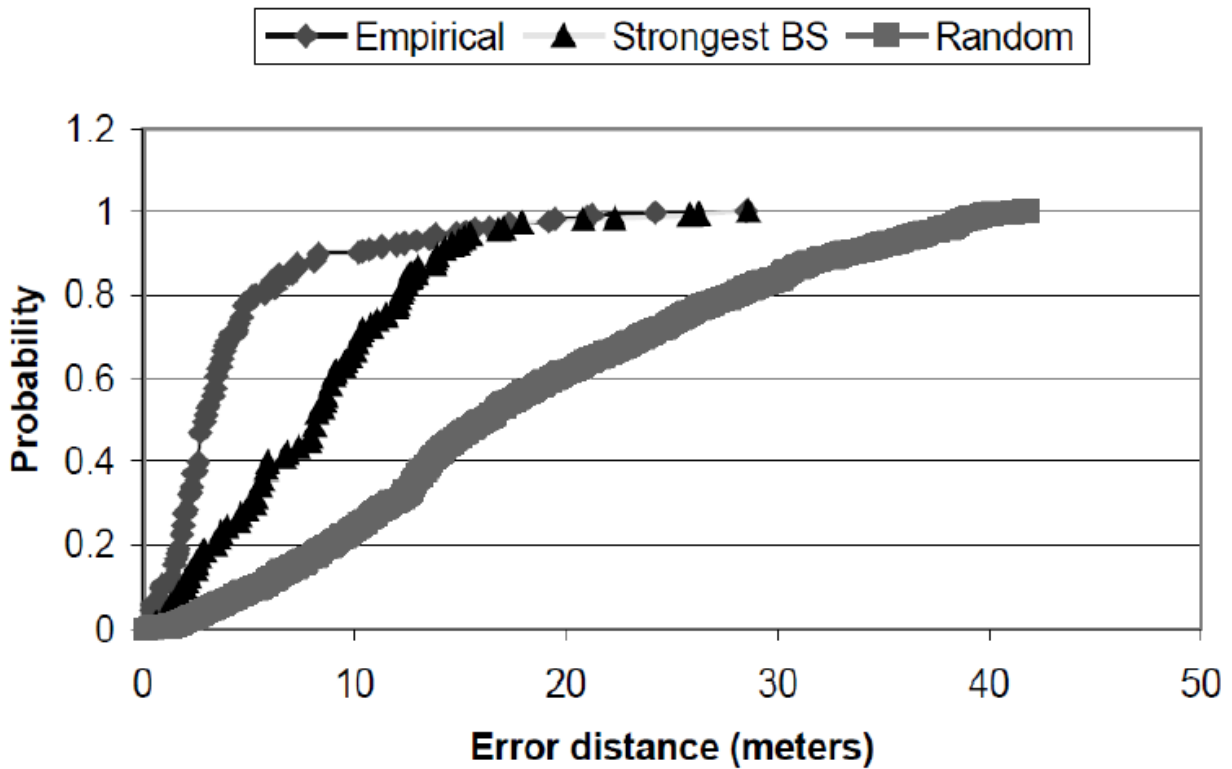


Figura 13: CDF dell'errore sulla stima della posizione dei metodi NNSS-AVG, strongest BS e random

Tabella 3: 25th, 50th (mediana) e 75th percentile dell'errore in distanza con i tre approcci considerati.

METODO	25 th [m]	50 th [m]	75 th [m]
NNSS-AVG	1.92	2.94	4.69
STRONGEST BS	4.54	8.16	11.5
RANDOM	10.37	16.26	25.63

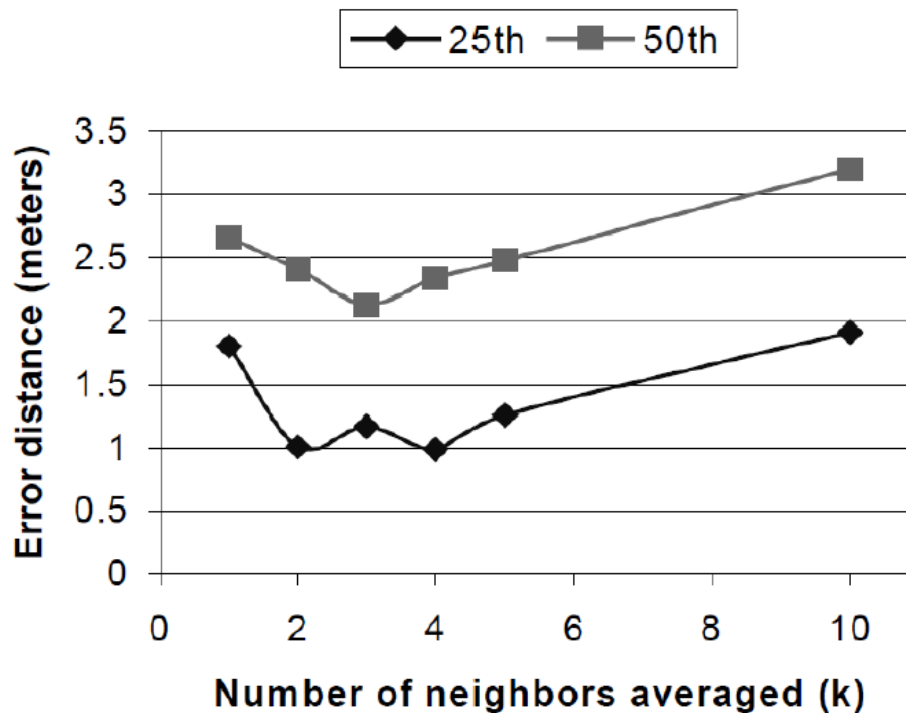


Figura 14: Prestazioni del sistema RADAR al variare del numero k di nearest neighbors.

I risultati ottenuti con questo approccio empirico sono stati confrontati con altri due metodi:

- **Strongest BS:** si sceglie la posizione dell'utente considerando solo il segnale della BS più forte.
- **Random:** La posizione dell'utente è scelta casualmente, indipendentemente dai valori ss .

Le prestazioni ottenute sono mostrate in Figura 13 in cui si confrontano la cumulative distribution function (CDF) nei tre casi. In tabella 2.3, sono invece riassunte le informazioni contenute nella figura in termini di valori del 25, 50 (mediana) e 75 percentile dell'errore in distanza con i tre approcci considerati.

Un risultato di notevole interesse è quello mostrato in Figura 14: gli errori minori in distanza, relativi al 25th e 50th percentile si hanno applicando l'algoritmo NNSS-AVG rispettivamente con $k = 2$ e $k = 3$ nearest neighbors. Inoltre, risulta che l'errore in distanza che si ottiene decresce al crescere del numero di campioni considerati per ogni posizione.

Altro sistema di localizzazione basato su tecnologia Wi-Fi con un approccio fingerprinting, che rappresenta uno dei principali punti di riferimento, è il sistema Ekahau [13]. Questo sistema non richiede alcun hardware specifico ed è in grado di localizzare terminali utente di vario tipo, dai PDA ai TAG specifici Ekahau.

Il sistema Ekahau propone diverse soluzioni per effettuare ricerche su oggetti o persone, per gestire allarmi, per funzionalità di messaggistica tra utenti (sfruttando la rete Wi-Fi) o per funzionalità di tracking e mapping in real time, in particolare si parla di RTLS, ovvero Real Time Location System. Vediamo alcune elementi del sistema:

- **Tag Wi-Fi:** 10 diversi tipi di tag per i diversi casi d'uso, tutti caratterizzati dalla possibilità di comunicare bidirezionalmente e con un'elevata durata della batteria.
- **Ekahau RTLS Controller:** è l'unità centrale del sistema, che contiene gli algoritmi di elaborazione e gestisce e controlla l'intero sistema.
- **Ekahau Site Survey:** interfaccia per le diverse funzionalità: tracking, mapping, allarmi, comunicazioni.

In condizioni normali è possibile ottenere precisioni da 1 a 3 metri.

Esistono altri sistemi di localizzazione che sfruttano il Wi-Fi con un approccio fingerprinting; si citano anche i sistemi Horus e Bussola.

L'approccio fingerprinting può essere utilizzato anche con la tecnologia Bluetooth, questo è il caso del sistema blueps [14]. Anche in questo caso esiste una fase on-line e una off-line analogamente al sistema RADAR. In particolare, è possibile ottenere un errore sulla localizzazione di 1 o 2 metri nel 79 % dei casi, avendo in vista tre sensori. Il bluetooth è una tecnologia a bassissimo costo nata per connettere le periferiche senza l'utilizzo dei cavi e che presenta delle basse velocità (rispetto alle moderne reti Wi-Fi), inoltre è una tecnologia a corto raggio (Personal Area Network - PAN). Dalle considerazioni appena fatte sul sistema bluetooth scaturiscono due importanti caratteristiche di tali sistemi:

- Per sole finalità di positioning, la velocità di trasferimento non è un parametro essenziale, mentre i costi rappresentano un elemento fondamentale.
- Il fatto che si abbia corto raggio, se da una parte è un aspetto “negativo” perché non permette l’uso su wide area, dall’altra parte può essere visto come un vantaggio perché si riduce il margine di errore nel caso in cui il dispositivo sia sotto la copertura di un unico nodo di riferimento.

Altro sistema di notevole interesse è quello proposto in [15]: si utilizzano le tecnologie Wi-Fi e Bluetooth con una tecnica fingerprinting. L’aspetto di maggiore interesse nell’approccio proposto è che si sfrutta il fingerprinting basato sulla Signal Strength Difference (SSD), ovvero sulle differenze dell’intensità di potenza percepite. Con questo concetto non si utilizzano le potenze “assolute” (RSS) e quindi si rende indipendente il sistema dal livello di potenza, che varia per diversi dispositivi. Infatti, nello scenario considerato e durante la fase off-line, si sono valutate, le potenze ricevute da due access points (con la medesima tecnologia) da parte di un terminale mobile (PDA o laptop). Il parametro preso come riferimento è la differenza di questi due livelli di potenza. Gli esperimenti, in fase off-line, sono stati condotti su 20 diversi punti e i risultati dell’esperimento condotto sono mostrati nella Figura 15 e nella Figura 16.

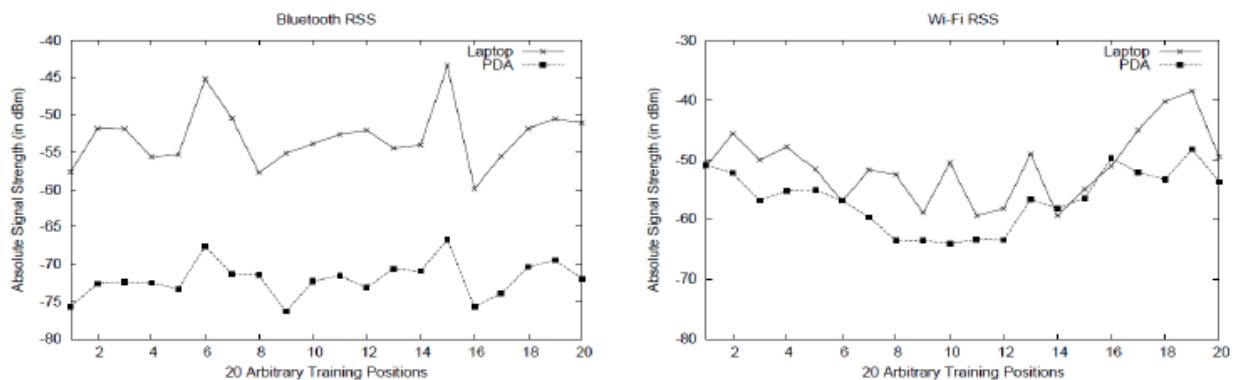


Figura 15: RSS misurato su un access point Bluetooth e un access point Wi-Fi.

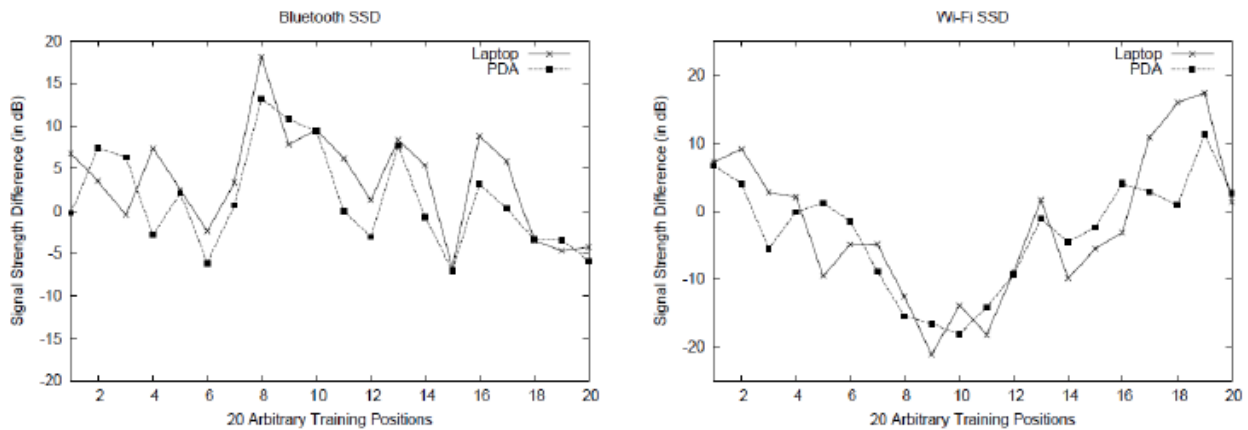


Figura 16: SSD misurato tra una coppia di access point Bluetooth e access point Wi-Fi.

Dalla Figura 15 si nota come i livelli di potenza ricevuti da un access point siano diversi, sia nel caso Wi-Fi che in quello Bluetooth, utilizzando, nello stesso punto, due dispositivi diversi: Laptop e PDA. Per cui, in generale è possibile asserire, che con lo scenario considerato non è possibile, sfruttare le misure RSS per la localizzazione dell'utente.

Dalla Figura 16 si vede invece come i livelli di potenza SSD, nei casi di Laptop o PDA, si eguagliano.

L'ultimo sistema analizzato è il sistema Landmarc [16] basato su tecnologia RFID (Radio Frequency Identification); questo sistema sfrutta un approccio propagation based, per cui, a differenza dei sistemi descritti in precedenza, non è prevista alcuna fase off-line.

Un sistema RFID si compone di tre elementi fondamentali:

- **Reader:** sono gli elementi dell'infrastruttura di rete (apparati di rete); sono dei ricetrasmittitori in grado di interrogare e ricevere informazioni in risposta dai tag;
- **Tag:** è l'apparato utente, ne esistono di due tipi:
 - *passivi:* ricavano l'energia per il funzionamento dal segnale irradiato dal Reader; i tag passivi reirradiano il segnale del Reader. Le distanze a cui possono operare sono dell'ordine di pochi metri al massimo.
 - *attivi:* sono dotati di ricevitore e trasmettitore e sono alimentati da batteria. Possono operare a distanze anche molto elevate, nell'ordine di decine o centinaia di metri.

- **Sistema centrale:** è il sistema a cui sono connessi i Reader e che è preposto alla gestione del sistema e alle operazioni di localizzazione.

Il sistema Landmarc (LocAtioN iDentification based on dynaMic Active Rfid Calibration), è stato pensato così da ridurre il numero di readers, che rappresentano il costo principale nei sistemi RFID; per questo scopo, si utilizzano come apparati dell'infrastruttura di rete, oltre ai suddetti reader, anche dei tag attivi, che sono collocati in posizione nota all'interno dell'area di interesse, questi tag vengono infatti chiamati "reference tag". Tali tag di riferimento, presentano un raggio di lettura di circa 150 metri, che può essere eventualmente incrementato a 1000 metri con l'aggiunta di antenne specifiche. Oltre al vantaggio economico, l'utilizzo dei reference tags consente di compensare eventuali variazioni ambientali e di migliorare l'accuratezza di stima di localizzazione. Ogni reader è in grado di gestire fino ad un massimo di 500 tag e le aree di copertura dei diversi reader possono essere anche differenti (si veda la Figura 17). Il tag del terminale utente è invece chiamato tracking tag. La frequenza di funzionamento del sistema è di 308 MHz ed è presente anche un'interfaccia 802.11b per la comunicazione. Il sistema permette di localizzare in tempo reale la posizione di uno o più tag di tracking.

Si suppone di avere n readers, m reference tags e u tracking tags. Per ogni tracking tag si definisce il vettore dell'intensità del segnale (RSSI), $\mathbf{S} = (S_1, S_2, \dots, S_n)$, in cui gli elementi S_i , con $i = 1, \dots, n$, denotano l'intensità del segnale del tracking tag percepito dall' i -esimo reader. Si costruiscono inoltre gli m vettori riferiti ai reference tag $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ dove θ_i indica sempre l'intensità della potenza. Per ogni tag p , con $p \in (1, u)$, si definisce la distanza euclidea come segue:

$$E_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - S_i)^2} \quad \text{con } j \in (1, m) \quad (15)$$

Si ottengono quindi m distanze euclidee riferite all'intensità del segnale: $\mathbf{E} = (E_1, E_2, \dots, E_m)$.

Si scelgono le k distanze più piccole, e rispetto a queste, si determina la posizione del tag, come segue:

$$(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i (x_i, y_i) \quad (16)$$

In cui w_i sono i pesi attribuibili a ciascuna coppia di coordinate (x_i, y_i) ; (x_i, y_i) , sono le coordinate dei k tag di riferimento per i quali i valori della distanza euclidea E_i è il risultato minore rispetto a quello calcolato per gli altri $m - k$ tag di riferimento. La scelta di tali pesi è un altro parametro di progetto. Ovvero, si vuole che i pesi corrispondenti alle distanze euclidee più piccole, siano maggiori. Si è quindi utilizzata la seguente espressione per il calcolo di questi pesi:

$$w_j = \frac{1/E_i^2}{\sum_{i=1}^k 1/E_i^2} \quad (17)$$

Gli esperimenti sono stati condotti considerando $n = 4$ readers, $m = 16$ reference tags e $u = 8$ tracking tags, come indicato nella Figura 18.

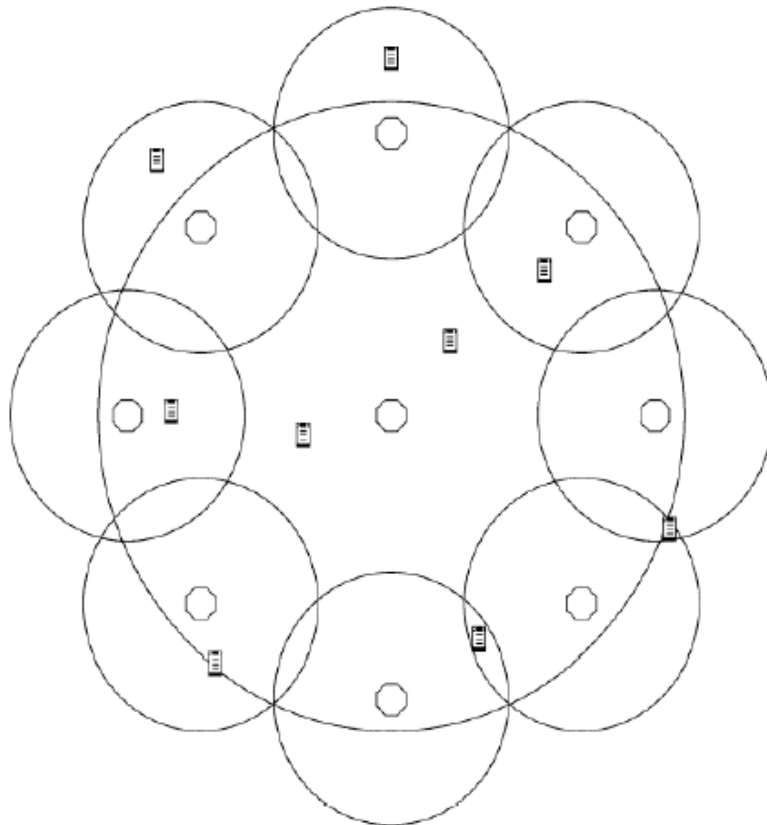


Figura 17: Esempio di posizionamento di 9 readers che presentano due differenti regioni di copertura.

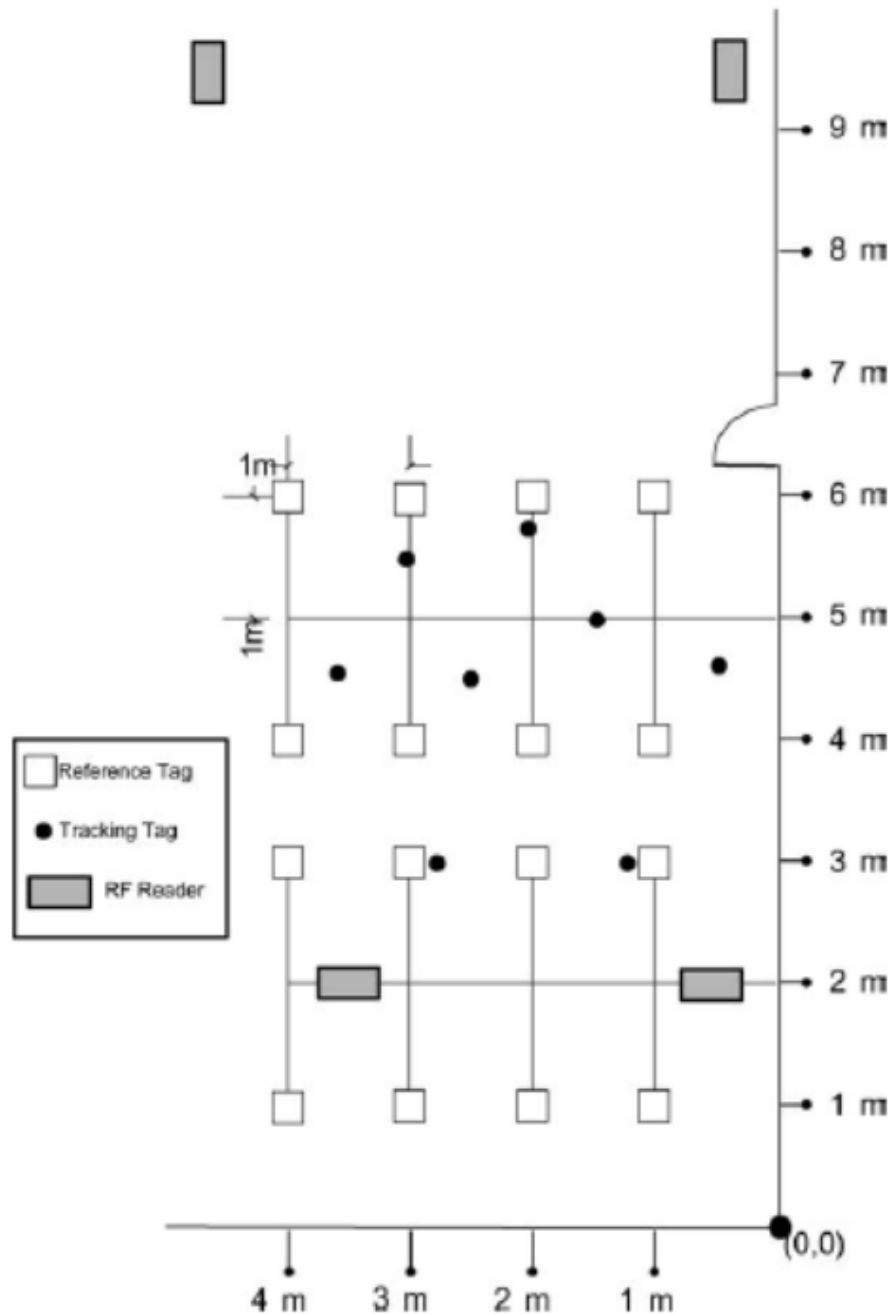


Figura 18: Sistema Landmarc: la mappa di riferimento con il posizionamento dei 4 readers, dei 16 reference tags e degli 8 tracking tags.

Sono state effettuate una serie di misurazioni nello scenario descritto nell'arco di 48 ore, valutando di volta in volta l'errore commesso nella stima della posizione. Indicando con (x_0, y_0) le coordinate reali del reference tag e con (x, y) le coordinate stimate, l'errore commesso vale:

$$e = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (18)$$

Le prestazioni sono riportate in Figura 19, Figura 20 e Figura 21.

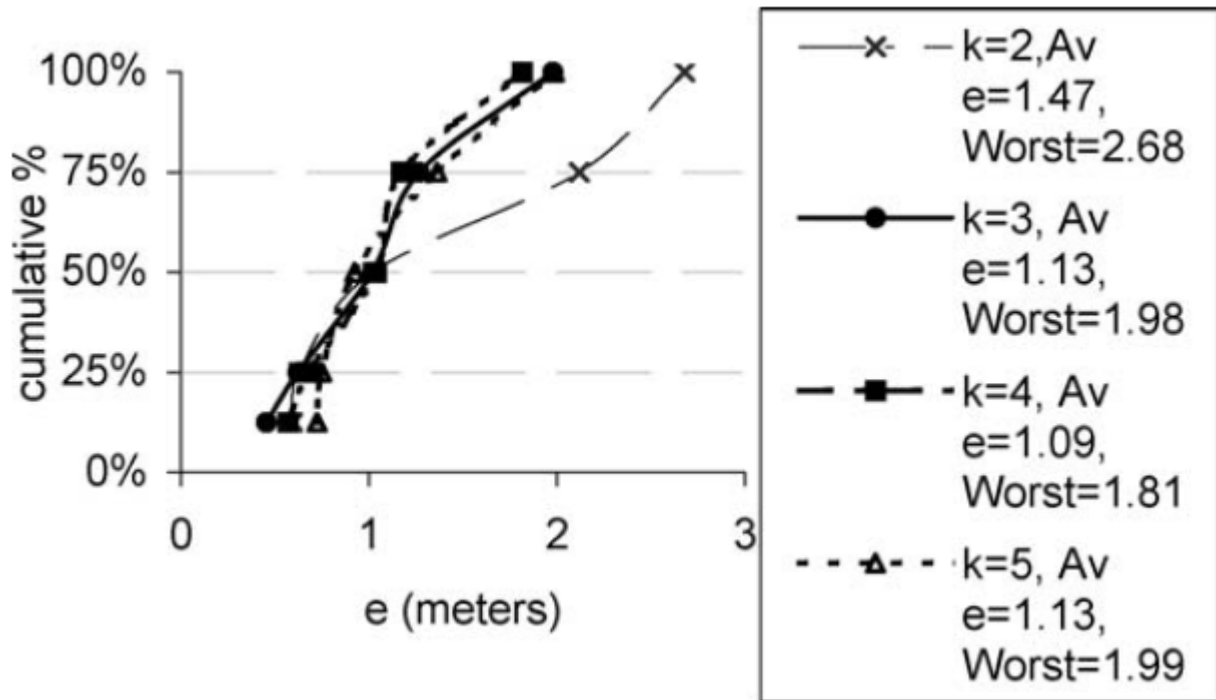


Figura 19: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento al variare delle k distanze euclidee scelte.

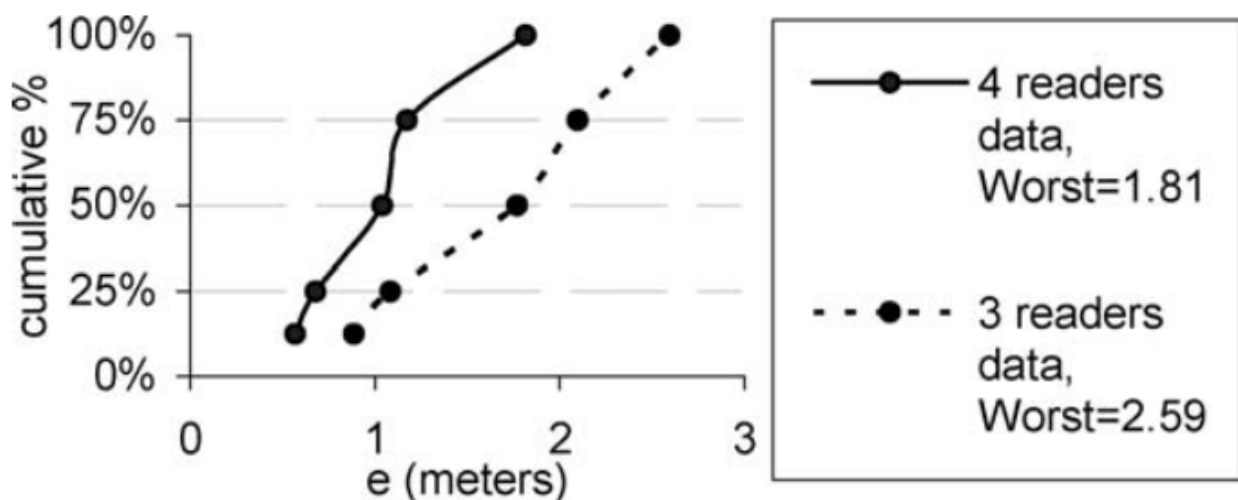


Figura 20: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento per n = 3 e n = 4 readers

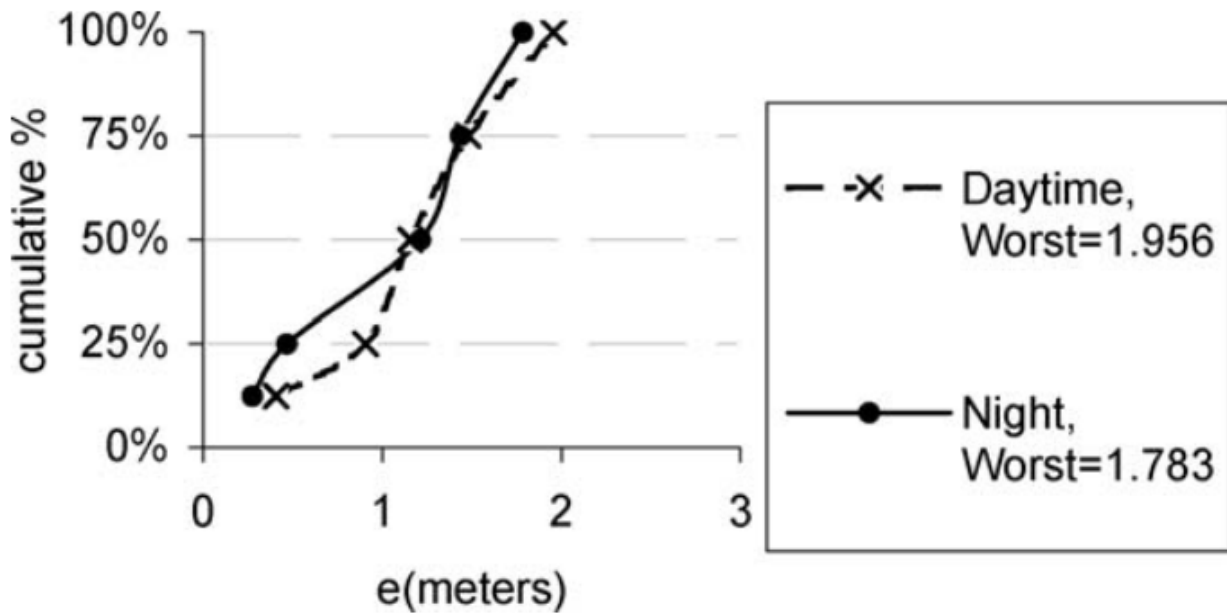


Figura 21: Sistema Landmarc - Errore percentile cumulativo sul posizionamento, valutato durante le ore diurne e notturne

Si nota che gli errori minori si ottengono per $k = 3$ e $k = 4$, adoperando 4 readers e durante le ore notturne (a causa del minore affollamento).

3 Sistemi basati su dead-reckoning

Il progresso tecnologico ha permesso di realizzare dispositivi mobili sempre più complessi, potenti e dotati di un sempre maggior numero di funzionalità. Il classico telefono cellulare, si è evoluto sempre più avvicinandosi, in termini di prestazioni e funzionalità, ai PDA (Personal Digital Assistant). Il risultato di questa evoluzione tecnologica ha creato una nuova categoria di dispositivi: gli smartphone. Essi contengono un insieme di funzionalità sempre più ampio: oltre alle caratteristiche di un telefono cellulare e di un PDA, si sono aggiunti altri strumenti, quali lettore MP3, navigatore satellitare, fotocamera, ecc., oltre all'incredibile crescita hardware e software e all'integrazione di sensori quali accelerometri, giroscopi, bussole, magnetometri, sensori di prossimità, ecc.

In questa sezione è descritto un diverso approccio alla navigazione in ambito indoor rispetto ai sistemi di localizzazione descritti nella sezione precedente, basata sui concetti di dead reckoning.

Il termine "dead reckoning" deriva da "deduced reckoning", ovvero stima derivata [17]. Il dead reckoning è il processo mediante il quale è possibile stimare la posizione attuale a partire da una posizione nota in precedenza sfruttando un insieme di misurazioni effettuate da sensori inerziali. In sostanza, è necessario conoscere, oltre al punto di partenza, la distanza percorsa e la direzione in un certo intervallo temporale per stimare la posizione attuale del terminale utente. Con un approccio geometrico risulterà che: la distanza percorsa determina una circonferenza; conoscendo la direzione e il verso (orientamento), sarà possibile collocarsi nella circonferenza come mostrato in Figura 22.



Figura 22: Rappresentazione geometrica del dead reckoning.

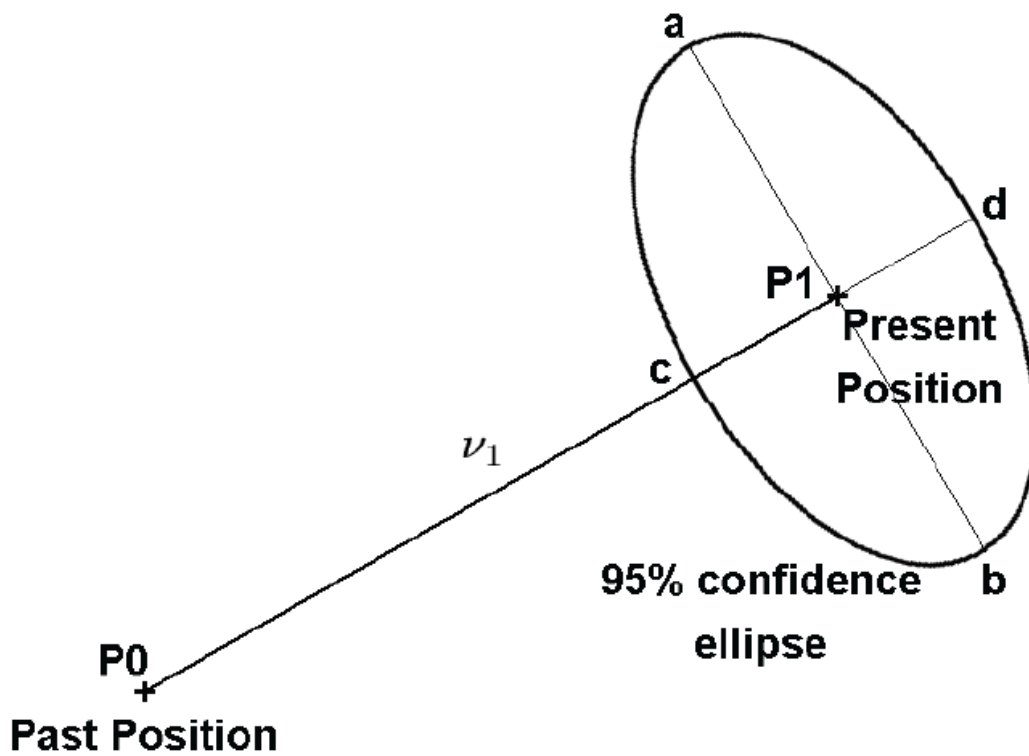


Figura 23: Ellisse di confidenza che contiene al 95% l'errore commesso.

Il principale svantaggio delle tecniche basate su Dead Reckoning è che gli errori sulla posizione aumentano con il tempo, sia se il terminale utente è fermo, sia se è in moto. Ciò è dovuto al fatto che la nuova posizione viene stimata solo sulla base della posizione precedente e quindi l'errore di stima, inevitabilmente crescerà. Per tale motivo se il sistema inerziale è usato per lunghi periodi di tempo, ha bisogno di essere rifasato, e il rifasamento avviene mediante l'utilizzo di un altro sistema di localizzazione come quelli descritti nella sezione precedente.

In [18] per valutare l'errore commesso, si considera un'ellisse di Confidenza che rappresenta un'ellisse di errore (come mostrato in Figura 23). Il principio è il seguente: P_0 rappresenta il punto di partenza. In un determinato intervallo temporale, vengono raccolte le misurazioni dei sensori inerziali e, sulla base di questi, si stima la nuova posizione P_1 . La posizione reale sarà intorno al nuovo punto stimato, in particolare sarà al 95% contenuta nell'ellisse di semiasse maggiore ab e semiasse minore cd . L'ampiezza del semiasse minore cd dipende dall'accuratezza sul calcolo della distanza (ovvero velocità e accelerazione), mentre l'estensione del semiasse maggiore ab dipende dall'accuratezza della stima della direzione. Ovviamente, tanto maggiore sarà l'errore sulle misurazioni e tanto più grande sarà tale ellisse di confidenza. v_1 rappresenta il vettore di movimento stimato tra la posizione di partenza nota P_0 e la posizione stimata inerzialmente P_1 .

Quella appena descritta rappresenta la valutazione dell'errore dopo una stima; l'errore sulla posizione ottenuta dopo n passi viene calcolata come somma cumulativa di tutti gli errori commessi fino al passo n :

$$P_n = P_0 + \sum_{i=1}^n (v_i + v_e) \quad (19)$$

In cui v_e rappresenta il vettore di errore ad ogni passo. Assumendo che l'utente si muova lungo un percorso rettilineo, l'ellisse di confidenza dopo n iterazioni è un'ellisse i cui semiassi maggiore e minore valgono rispettivamente $n \cdot ab$ e $n \cdot cd$; in ogni caso l'ellisse cresce al crescere della distanza percorsa. Da quanto detto si capisce l'importanza sull'accuratezza delle misurazioni e sulla stima iniziale.

3.1 I sensori inerziali

In questa sezione sono descritti i sensori inerziali utilizzati per implementare algoritmi di dead reckoning.

3.1.1 Accelerometro

L'accelerometro è un dispositivo in grado di misurare le accelerazioni lineari in m/s^2 . In genere, i moderni smartphone sono dotati di accelerometri in grado di valutare l'accelerazione lineare lungo tre fissate direzioni (x, y, z) del sistema di riferimento (sdr) body, come mostrato in Figura 24.

É possibile fare una distinzione fra accelerometri meccanici, che sfruttano le accelerazioni che agiscono su una massa di prova, e acceleratori a vibrazione, che valutano l'accelerazione misurando le variazioni della frequenza di oscillazione dei materiali piezoelettrici. Il principio di funzionamento degli oscillatori meccanici è sostanzialmente il seguente: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando questa viene sottoposta ad una accelerazione. La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un sensore di solito capacitivo ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile dai sistemi di misura. Nel gergo meccanico, la massa e l'elemento elastico, sono chiamati rispettivamente massa sismica e trave di sospensione e il movimento della massa è chiamata deflessione. I sensori di accelerazione, sono in genere dei sensori basati su misure di capacità, ovvero sensori capacitivi. Il funzionamento generale è questo: la massa sismica e la struttura fissa, rappresentano le due armature di un condensatore; sotto l'effetto di un'accelerazione, la massa di prova si muove provocando una variazione della distanza fra le armature e una conseguente variazione della capacità. Dalla variazione di capacità è calcolabile lo spostamento e quindi l'accelerazione. Un aspetto di notevole interesse degli accelerometri, è che possono essere miniaturizzati. Strumenti di questo tipo vengono chiamati MEMS (Micro Electro Mechanical System). Gli accelerometri, quindi sono fissati al loro sdr, ruotano e si muovono con esso, per cui con la sola informazione delle accelerazioni non sarà possibile capire l'orientamento del sdr body, rispetto al sdr della navigazione. Un importante

considerazione che scaturisce dall'analisi dei valori di accelerazione lungo i tre assi, è che sfruttando l'accelerazione gravitazionale "subita" dal terminale, è possibile carpire com'è disposto il terminale in condizioni statiche rispetto al piano terrestre. Si consideri che il dispositivo sia poggiato sul piano creato dagli assi (x, y) secondo la Figura 24, e che questo sia parallelo al piano tangente alla superficie della terra, e perpendicolare all'asse z , con l'asse z positivo uscente dalla superficie terrestre. In pratica, questa è la situazione del terminale poggiato su un piano "dritto", con il display rivolto verso l'alto. In questo caso, in linea teorica, si dovrebbero leggere dei valori $(a_x, a_y, a_z) = (0g, 0g, -1g)$. Rovesciando il terminale, con il display verso il basso si dovrebbero avere dei valori $(a_x, a_y, a_z) = (0g, 0g, 1g)$. Tenendo in verticale il dispositivo si dovrebbe riscontrare la terna $(a_x; a_y; a_z) = (0g; -1g; 0g)$, e così via per le altre tre possibili situazioni. In sostanza, a partire dalla terna di informazioni delle accelerazioni è possibile trarre informazioni riguardanti la disposizione statica del terminale rispetto ad un piano tangente alla sfera terrestre.

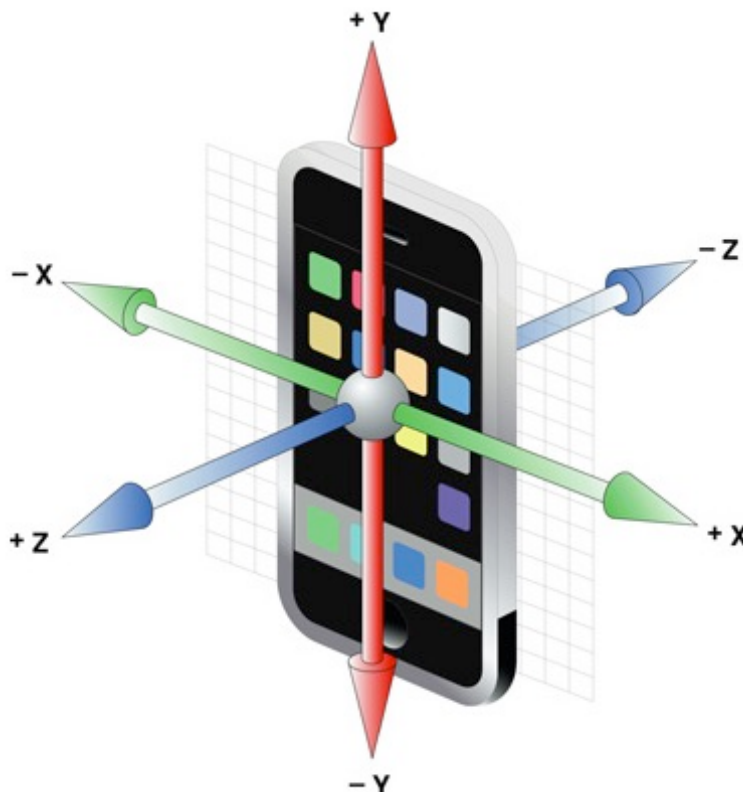


Figura 24: assi di riferimento di un accelerometro integrato in uno smartphone.

3.1.2 Giroscopio

Il sensore di accelerazione, anche in un caso puramente teorico di misurazioni non affette da errore, non è in grado da solo, di caratterizzare completamente il movimento di un terminale. Ecco perché, per finalità di positioning, basate su dead reckoning, è necessario un altro dispositivo in grado di percepire le velocità angolari. Tale dispositivo, è il giroscopio. Il giroscopio è un sensore in grado di misurare la velocità angolare rispetto ad un determinato asse. Un giroscopio a tre assi, quindi, valuta le velocità angolari, in rad/s o $gradi/s$, rispetto alla terna di assi del proprio sdr inerziale.

In riferimento alla Figura 25, nel giroscopio meccanico “classico” si ha un rotore libero di ruotare intorno al proprio asse di rotazione (Spin axis). Questo asse è montato su una sospensione cardanica, così che tale asse possa orientarsi in qualsiasi direzione dello spazio. La velocità angolare è valutata tenendo conto del principio di conservazione del momento angolare secondo cui il momento angolare di un sistema è costante nel tempo se è nullo il momento delle forze esterne che agiscono su di esso. È possibile identificare due macro-classi di giroscopi: elettromeccanici e ottici. I giroscopi elettromeccanici si basano sul momento angolare di una massa in rotazione, come detto in precedenza, oppure sull’effetto di Coriolis. I giroscopi ottici sono invece basati sul principio di Sagnac.

Dato che il giroscopio valuta le velocità di rotazione in rad/s lungo i tre assi del sdr body: (v_x, v_y, v_z) , risulterà che se il terminale è fermo verrà misurata una terna nulla, indipendentemente dalla posizione del terminale.

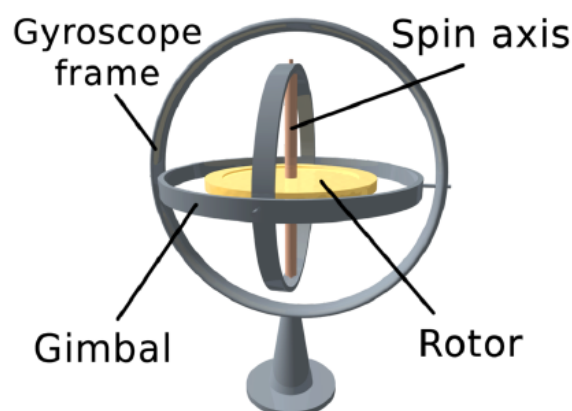


Figura 25: Schema di principio di un giroscopio meccanico.

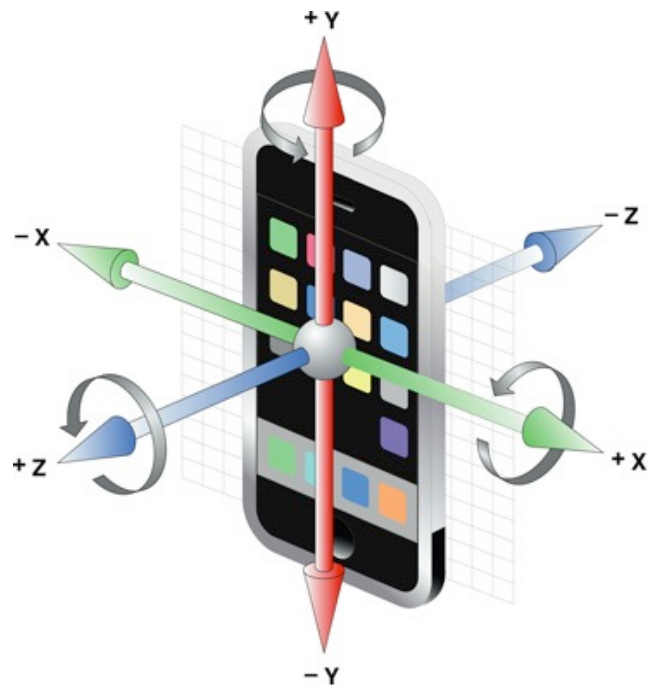


Figura 26: Orientamento basato sulla terna di angoli Roll, Pitch e Yaw).

3.1.3 Sensori di campo magnetico

Altro sensore di cui sono dotati gli smartphone di ultima generazione, è il sensore di campo magnetico; con questo sensore vengono effettuate delle misurazioni dell'intensità e della direzione del campo magnetico in μT . Le misurazioni effettuate sono sempre espresse rispetto agli assi cartesiani del sdr inerziale. La misura delle componenti di campo magnetico lungo le tre direzioni permette di definire in maniera univoca il vettore campo geomagnetico terrestre e di conseguenza è possibile calcolare l'angolo azimutale tra la direzione del sensore e il polo nord magnetico.

È importante sottolineare che le misure sono relative al nord magnetico e non al nord geografico; in particolare il nord magnetico cambia posizione con il tempo ed è spostato verso occidente rispetto al nord geografico. L'angolo compreso tra nord magnetico e nord geografico è indicato come declinazione magnetica, per cui tale valore, oltre a cambiare nel corso del tempo, varia anche in base al luogo in cui ci troviamo. La declinazione è valutata utilizzando le informazioni relative alla latitudine e alla longitudine mediante il GPS integrato.

La differenza fra il magnetometro e la classica bussola è che quest'ultima funziona solo in orizzontale, mentre il magnetometro fornisce indicazioni sul nord magnetico indipendentemente dall'orientamento del dispositivo.

La presenza di "forti" campi magnetici nell'intorno del terminale genera degli errori di misurazione del campo magnetico terrestre.

In alcuni casi, si rende necessaria la calibrazione della bussola a causa di forti interferenze ambientali o magnetiche. La calibrazione solitamente avviene manualmente, con il posizionare il dispositivo che integra il sensore a diversi orientamenti.

3.1.4 Orientamento

Dall'analisi dei tre sensori scaturiscono le seguenti considerazioni:

1. Attraverso il magnetometro è possibile individuare il nord magnetico (misure in μT).
2. Attraverso l'accelerometro è possibile capire la disposizione di un dispositivo rispetto ad un piano tangente alla superficie terrestre (misure rispetto a $1g = 9.82 m/s^2$).
3. Attraverso il giroscopio è possibile valutare gli spostamenti del dispositivo (misure in *gradi/sec*).

In definitiva è possibile capire l'orientamento di un dispositivo che integra tali sensori sfruttando le informazioni derivanti dai tre sensori stessi. Tutti i dati sull'orientamento possono essere riassunti dalla terna (Roll; Pitch; Yaw). Questi tre valori sono espressi in gradi. In riferimento alla Figura 26:

- **Roll:** rappresenta la rotazione del terminale, espressa in gradi, intorno all'asse y. Il range di variazione è da -180° a $+180^\circ$. Il caso $roll = 0^\circ$, si ha quando il piano individuato dagli assi xy , è parallelo al piano tangente alla superficie terrestre. Ruotando il terminale, rispetto all'asse y, in senso orario, si ottengono i valori crescenti di roll tra 0° e $+180^\circ$. Ruotando in senso antiorario si ottengono i valori decrescenti di roll, tra 0° e -180° .

- **Pitch:** esprime la rotazione, in gradi, intorno all'asse x. Ruotando l'asse x, ruoteranno gli assi y e z. La rotazione è espressa nell'intervallo $-90^\circ, +90^\circ$. $Pitch = 0^\circ$ si ha nei casi in cui il terminale (ovvero il piano xy) è parallelo al piano tangente alla superficie terrestre.
- **Yaw:** indica la rotazione, in gradi, del terminale intorno all'asse z. Tale rotazione è espressa nell'intervallo $-180^\circ, +180^\circ$. La rotazione dell'asse z determina una rotazione degli assi x e y.

In alcuni casi, la terna (Roll; Pitch; Yaw) è scelta in maniera tale che l'asse y positivo sia orientato verso il nord magnetico; ovvero per $yaw = 0^\circ$, l'asse y è orientato verso il nord magnetico. Per $yaw = +180^\circ$ o $yaw = -180^\circ$, l'asse y positivo è quindi orientato verso il sud magnetico. Per $yaw = 90^\circ$ e $yaw = -90^\circ$, l'asse y positivo è orientato rispettivamente verso ovest ed est.

3.1.5 Errori nelle misure inerziali

Gli errori sulle misurazioni inerziali possono essere suddivisi in due categorie [17]:

- **Errori sistematici:** sono delle deviazioni della misura, rispetto al valore reale, costanti in entità e che mantengono lo stesso segno. Sono errori sistematici il bias e il fattore di scala, e nel caso di sensori inerziali, si possono considerare anche gli effetti legati alla non perfetta ortogonalità delle terne di accelerometri e giroscopi. Gli errori sistematici possono essere eliminati o ridotti mediante delle operazioni di calibrazione.
- **Errori casuali:** sono dovuti a fattori non controllabili e sono di segno alterno; determinano la variabilità delle misurazioni intorno a un certo valor medio (a parità di condizioni sperimentali). L'origine degli errori casuali può essere interna o esterna; nel primo caso si parla di rumore e nel secondo di disturbo. L'effetto derivante dagli errori casuali può essere ridotto ripetendo più volte la misura, oppure utilizzando degli appositi filtri.

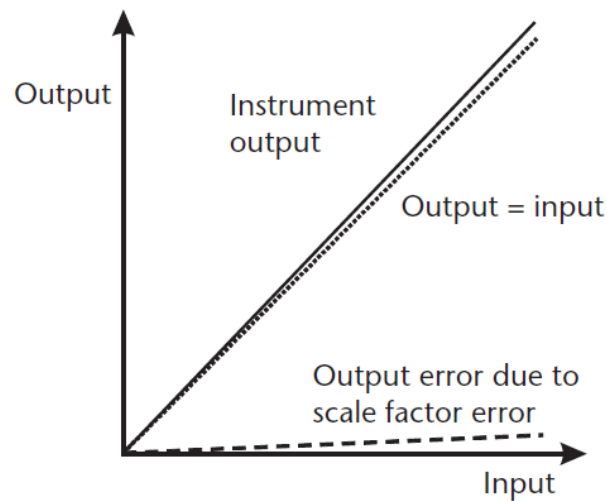


Figura 27: errori legati al fattore di scala.

Le prestazioni dei sensori inerziali variano notevolmente a seconda del tipo. Per i sensori MEMS un importante fattore di cui tener conto è quello legato alla componente di errore run-to-run, che è un errore di polarizzazione che varia ad ogni nuovo utilizzo del sensore, ma che rimane costante all'interno di ogni esecuzione, ovvero è un errore sistematico sostanzialmente costante per il singolo utilizzo, ma variabile tra diverse misurazioni. Altro tipo di errore sistematico è quello legato alla variazione di temperatura che, analogamente al fattore di scala e al bias, può essere parzialmente compensato in fase di calibrazione.

Questo tipo di errore è indicata come in-run bias. Vediamo più nel dettaglio i vari tipi di errore descritti.

Il bias o polarizzazione, è un errore costante, presente in tutti gli accelerometri e giroscopi indipendentemente dalla forza o dalla velocità angolare applicata. Nella maggior parte dei casi, il bias rappresenta la principale causa d'errore nelle misure inerziali. Questa componente di errore può essere espressa come un vettore rispetto alla terna di riferimento (x, y, z) , in tal caso si avrà per l'accelerometro (pedice a) e per il giroscopio (pedice g) rispettivamente $b_a = (b_{a,x}, b_{a,y}, b_{a,z})$ e $b_g = (b_{g,x}, b_{g,y}, b_{g,z})$. Tramite l'espressione vettoriale è possibile scindere le componenti di errori su ogni asse. In alternativa, è possibile effettuare una caratterizzazione del bias mediante la somma della componente statica e dinamica. La componente statica include l'errore run-to-run e la

componente di bias residua dopo la calibrazione (dato che il bias varia per ogni utilizzo). La componente dinamica è invece una componente che varia anche in intervalli di tempo ridotti, intorno al minuto, ed è legata alle variazioni della temperatura del sensore.

Il fattore di scala rappresenta il rapporto che esiste fra l'output e l'input del sensore. Questo rapporto dovrebbe essere pari a 1 per ogni input. Questo concetto è espresso nella Figura 27, in cui è visualizzata la relazione input/output di un sensore inerziale. Il caso ideale è quello in cui input = output (curva tratteggiata), invece l'output dello strumento produce una curva non a 45°, per cui al crescere della forza applicata (accelerometro) o della velocità angolare (giroscopio), crescerà l'errore causato dal fattore di scala.

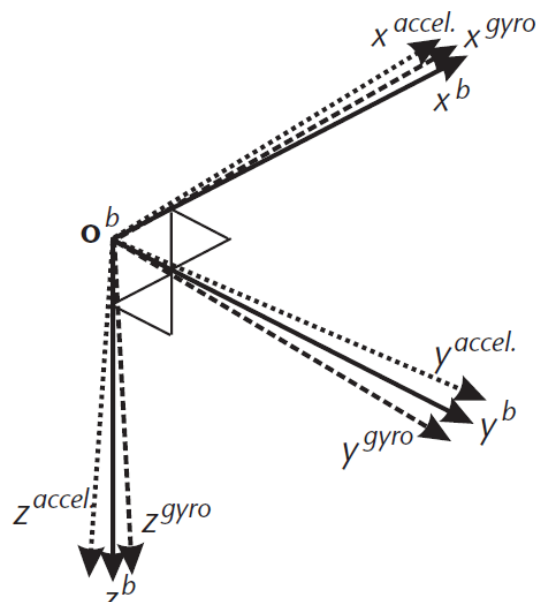


Figura 28: Errori legati alla non ortogonalità degli assi dei sensori.

Altro errore sistematico è quello legato alla non ortogonalità degli assi rispetto alla terna del sistema di riferimento (sdr), ovvero si ha un disallineamento fisico degli assi del giroscopio e dell'accelerometro, rispetto alla terna di riferimento (sdr body) a cui sono riferite le misure inerziali. Questo concetto è rappresentato in Figura 28, [17].

Gli errori di fattore di scala e non ortogonalità vengono di solito indicati in parti per milione (soprattutto nei sensori ad alte prestazioni) o in percentuale. Nei sensori MEMS gli errori legati al fattore di scala e alla non ortogonalità sono dell'ordine del 1%.

Anche per gli errori casuali può essere effettuata una caratterizzazione vettoriale. Ogni campione misurato dall'accelerometro e dal giroscopio, è affetto da una componente di rumore o disturbo espressa dalle terne $w_a = (w_{a,x}, w_{a,y}, w_{a,z})$ e $w_g = (w_{g,x}, w_{g,y}, w_{g,z})$.

Tali errori si ripercuotono sulle stime di velocità e posizione fornite dai sistemi inerziali. Si consideri che le misure di accelerazione \ddot{x}_m siano affette da un errore di polarizzazione b_a ; e che non ci siano altre componenti di errore sulla misura. Risulterà $\ddot{x}_m = \ddot{x} + b_a$, dove \ddot{x} è l'accelerazione senza errore. La velocità misurata vale:

$$\dot{x}_m = \int \ddot{x}_m \cdot dt = \int \ddot{x} \cdot dt + \int b_a \cdot dt = \dot{x} + b_a \cdot t \quad (20)$$

Mentre la posizione risultante è:

$$x_m = \int \dot{x}_m \cdot dt = \int \dot{x} \cdot dt + \int b_a \cdot t \cdot dt = x + \frac{1}{2} \cdot b_a \cdot t^2 \quad (21)$$

Considerando i seguenti errori di polarizzazione $b_a = (-0.0225g, -0.0109g, -0.0253g)$, si avrà che dopo $t = 20 s$, gli errori di polarizzazione determinano un errore in metri su ogni asse, pari a:

$$\begin{cases} e_x = \frac{1}{2} \cdot b_{a,x} \cdot t^2 = -44.2 m \\ e_y = \frac{1}{2} \cdot b_{a,y} \cdot t^2 = -21.4 m \\ e_z = \frac{1}{2} \cdot b_{a,z} \cdot t^2 = -49.6 m \end{cases} \quad (22)$$

Dati gli elevati errori spesso negli algoritmi di stima della distanza mediante dead reckoning si stima la distanza mediante il conteggio dei passi dalle misure di accelerazione. In ogni caso, è possibile asserire che non è possibile sfruttare i valori di accelerazione in "modo diretto", in sensori di questo tipo, dato che questi produrrebbero degli errori inaccettabili sulla posizione.

3.2 Calcolo della distanza da misure inerziali

L'idea che sta alla base del calcolo della distanza è quella di sfruttare le misurazioni effettuate tramite accelerometro, così da capire il numero di passi eseguiti e sulla base di informazioni integrative sul soggetto, valutare la distanza. Per cui il terminale, viene utilizzato come un vero e

proprio contapassi (anche chiamato podometro). In particolare, il conteggio dei passi è effettuato andando ad analizzare il modulo dell'accelerazione.

I podometri commerciali vengono solitamente fissati alla cintura o al polso, e sono in grado di valutare la distanza percorsa semplicemente moltiplicando il numero di passi, per la lunghezza del passo stesso. Il principio che si vuole applicare è lo stesso. Esistono alcune applicazioni Apple che effettuano il conteggio dei passi, una di queste è Pedometer, che valuta anche il tempo e quindi la velocità. In questo contapassi per dispositivi Apple, come nei comuni podometri, è necessario inserire l'altezza e il peso (per il conteggio delle calorie), inoltre è presente una manopola che controlla la sensibilità dei passi; il livello della sensibilità deve essere tarato direttamente dall'utente. Il grosso problema dei podometri è il calcolo dei passi durante percorsi in salita o in discesa, ad esempio durante una passeggiata in montagna; in questi casi la lunghezza del passo varia notevolmente rispetto al caso in pianura, e ciò determina un errore sul calcolo della distanza che cresce linearmente con il numero di passi. Questo problema non è però riscontrabile in ambito indoor, dove i percorsi sono solitamente in pianura. L'unica variazione di distanza si potrebbe eventualmente avere sulle scale.

Di seguito sono riportati dei test effettuati sulle misure di accelerazione estrapolate dall'applicazione xSensor Pro installata su iPhone 4 per effettuare il conteggio dei passi. I dati sono stati raccolti con una frequenza di campionamento pari a 32 Hz. Il primo test è stato effettuato nelle seguenti condizioni:

- terminale in mano (destra) con display rivolto verso l'alto, la camminata viene effettuata lungo la direzione dell'asse y crescente;
- primo passo dopo 2 secondi dallo start;
- stop dopo 14 passi;
- il terminale è tenuto cercando di "simulare" l'osservazione del display, quindi senza farlo oscillare eccessivamente;
- cammino rettilineo.

Le misure di accelerazione lungo i tre assi e il modulo dell'accelerazione sono visibili nelle Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

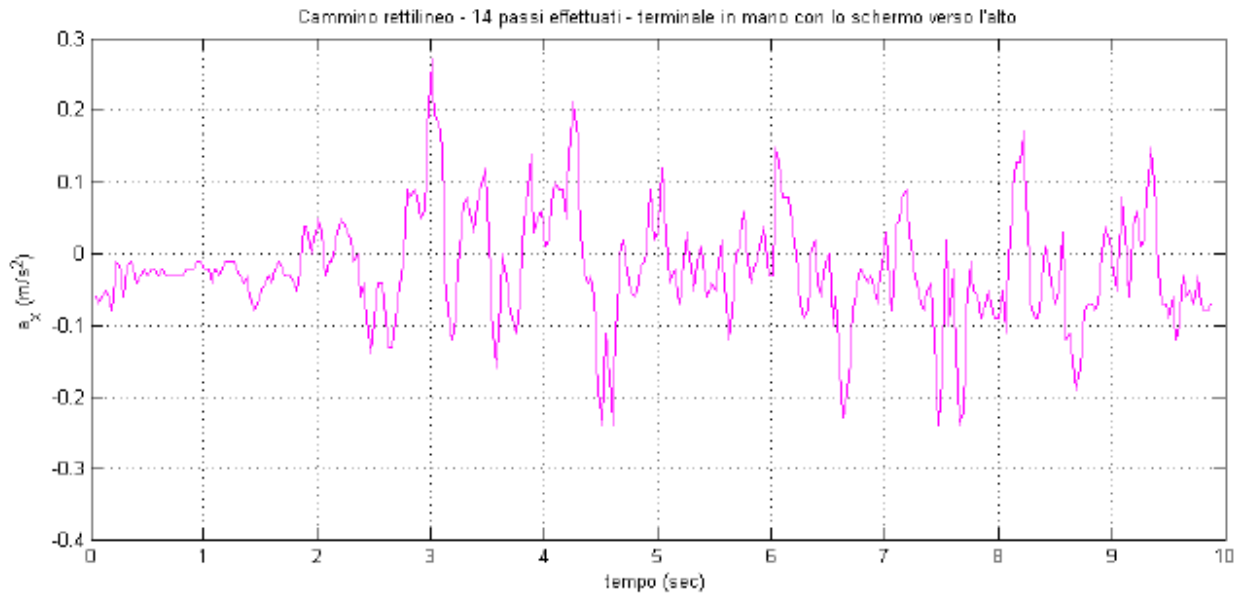


Figura 29: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse x.

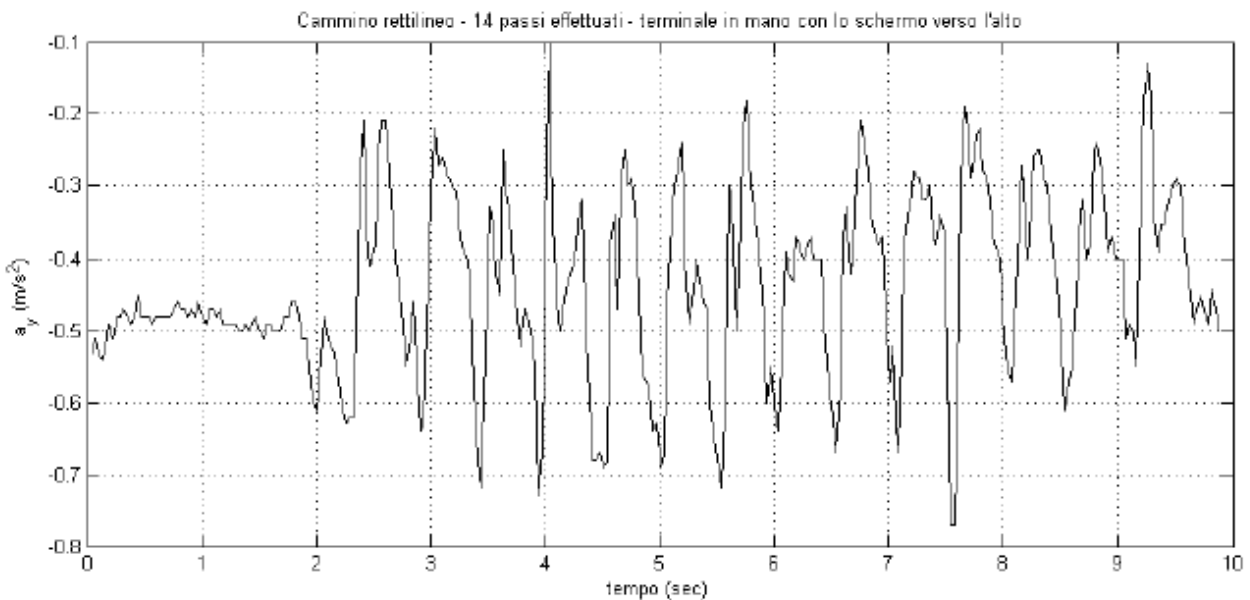


Figura 30: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse y.

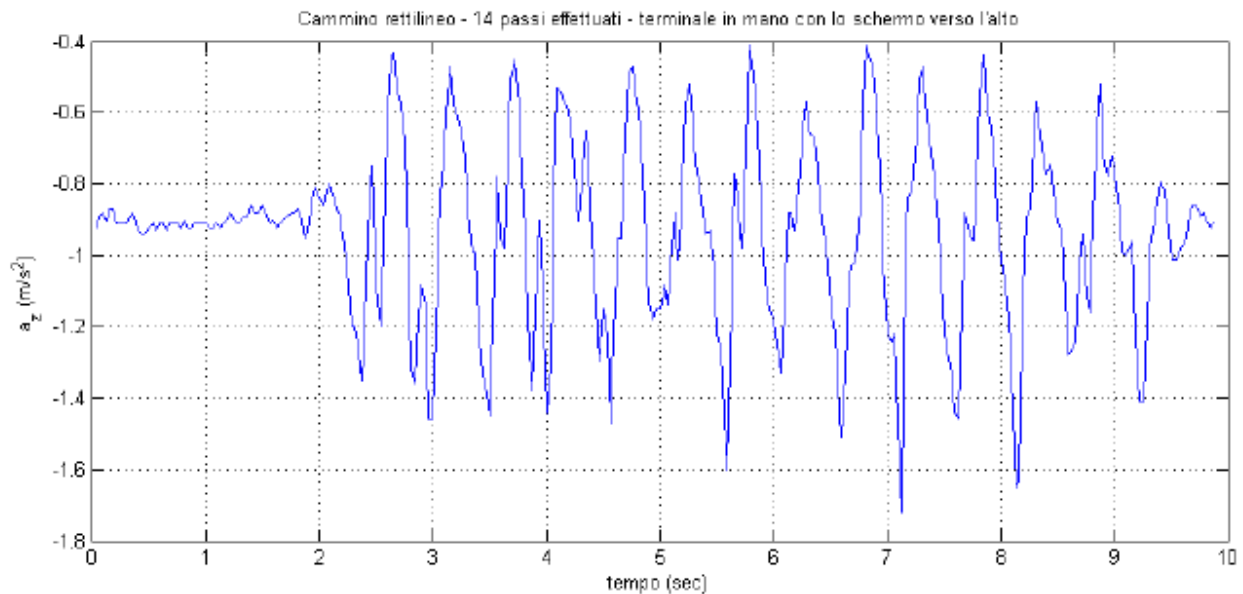


Figura 31: cammino rettilineo - valori di accelerazione lungo l'asse z.

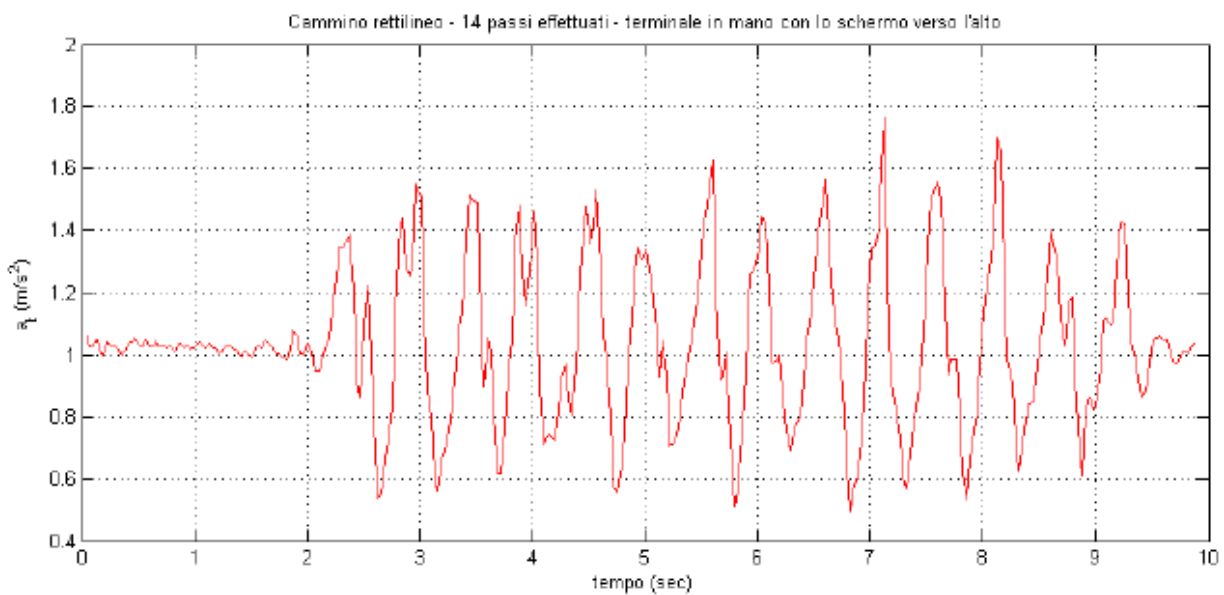


Figura 32: cammino rettilineo - modulo dell'accelerazione.

Dalla Figura 29, si notano delle variazioni di accelerazione piccole, proprio perché durante il cammino non sono state effettuate variazioni di direzione, ma si è mantenuta sempre la stessa traiettoria. Dai grafici nella Figura 30 e nella Figura 31, si notano delle accelerazioni coerenti con il

movimento della camminata, in “avanti” e “su e giù”. Dall’ultimo grafico, che rappresenta la somma quadratica delle accelerazioni, si notano dei picchi più netti.

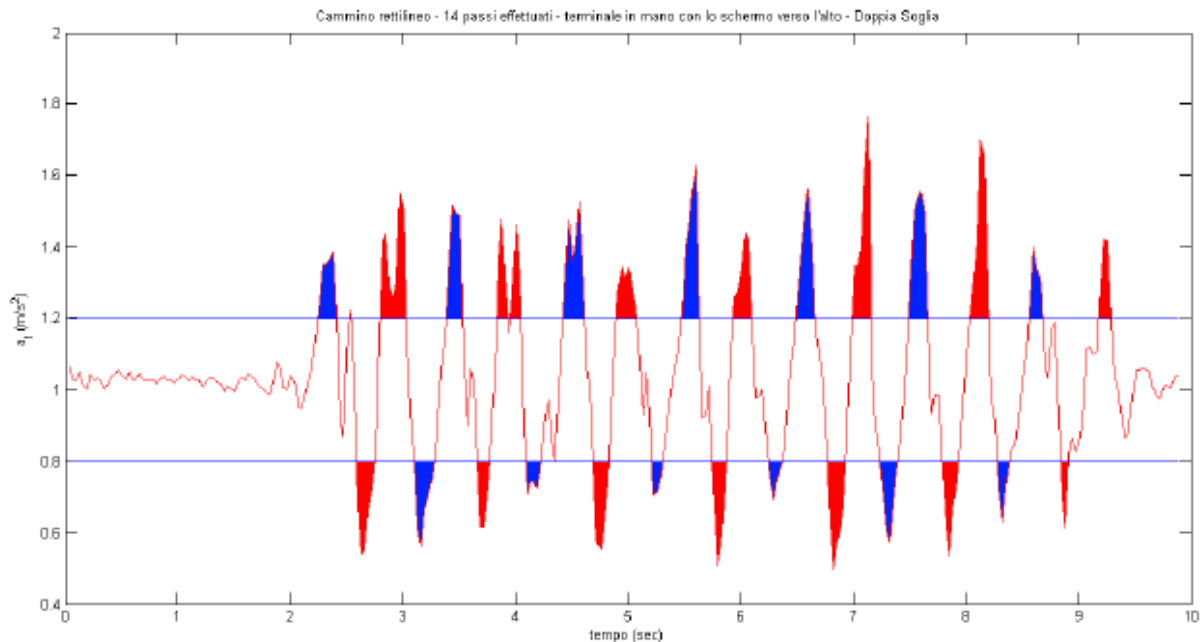


Figura 33: Cammino rettilineo: Doppia Soglia per valutare il numero di passi effettuati.

Per calcolare il numero di passi sarebbe sufficiente fissare una soglia superiore: il numero di passi effettuato è pari al numero di intervalli in cui la soglia è stata oltrepassata. In realtà è stata considerata una doppia soglia, inferiore e superiore.

Si consideri il passo effettuato se viene oltrepassata la soglia superiore, quando in precedenza era stata oltrepassata la soglia inferiore, ad eccezione del primo passo, in cui si considera che la soglia inferiore sia stata già oltrepassata. Così facendo si evita il problema del superamento multiplo della soglia. Questo concetto è espresso nel grafico in Figura 33: i colori rosso e blu indicano rispettivamente gli intervalli sottosoglia e sopra soglia presi in esame per il conteggio del singolo passo.

Il secondo test è analogo al precedente, solo che questa volta il percorso prevede una “curva” a destra dove si è cercato di fare oscillare al minimo il terminale. Le condizioni del test sono le seguenti:

- terminale in mano (destra) con display rivolto verso l'alto;
- primo passo circa 1 secondo dallo start;
- stop dopo 15 passi;
- percorso con una curva a destra.
- il terminale tenuto cercando di "simulare" l'osservazione del display: quindi senza farlo oscillare troppo.

I grafici, che mostrano l'andamento delle accelerazioni, sono mostrati nella Figura 34 e nella Figura 35. L'algoritmo descritto prima, con soglie fissate a $0.9 g$ e $1.2 g$, risulta efficace e conteggia effettivamente 15 passi.

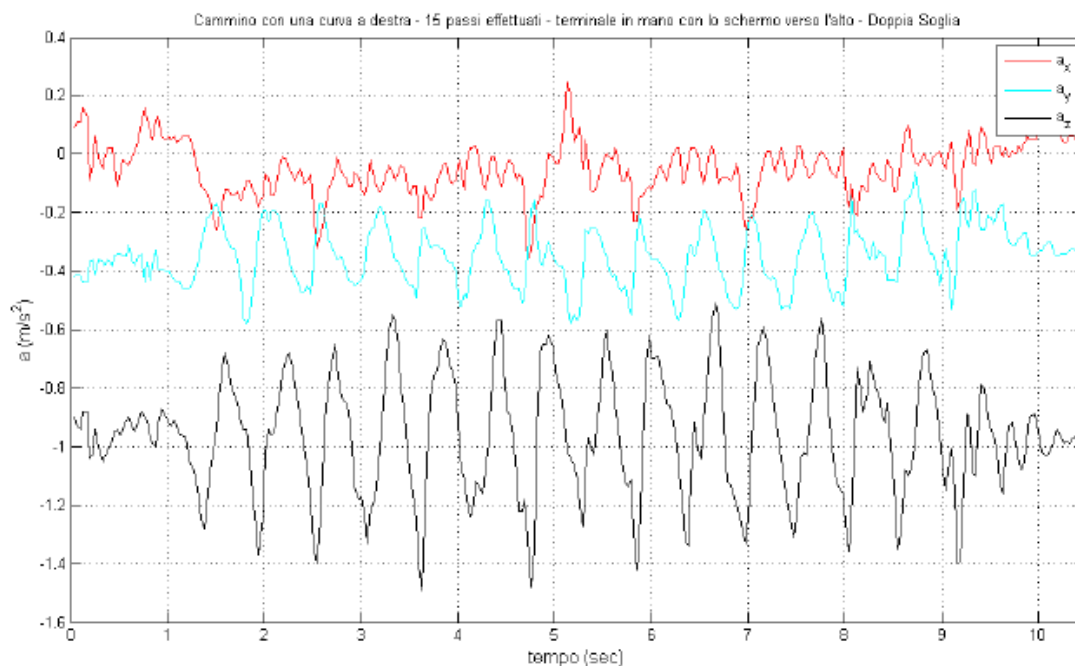


Figura 34: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano destra: valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi

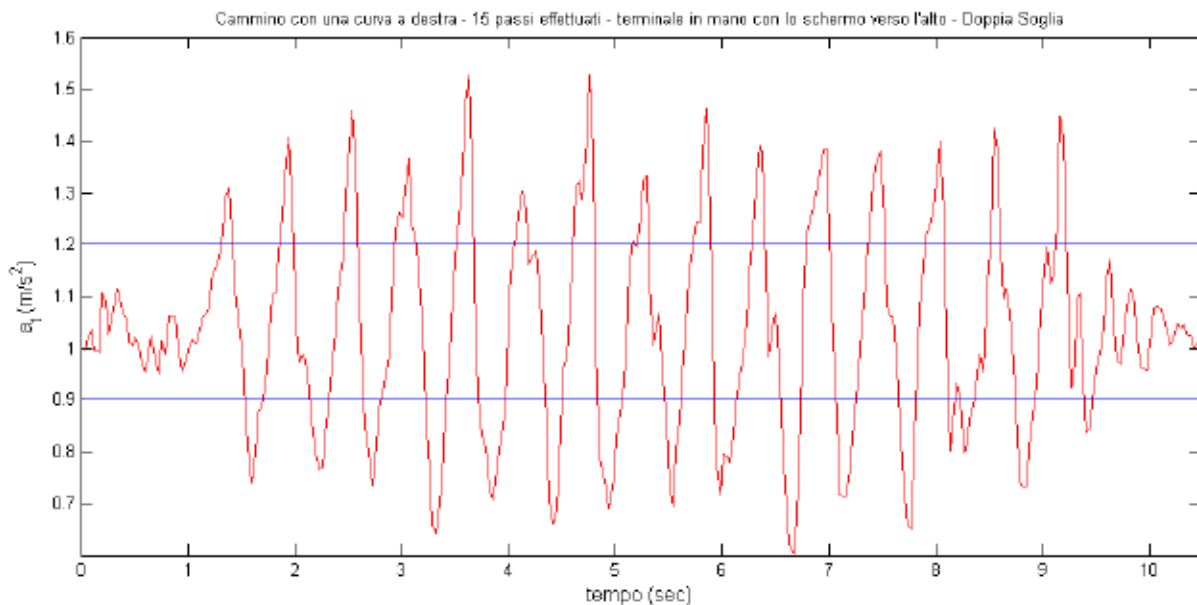


Figura 35: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano destra: modulo dell'accelerazione.

Dalla Figura 34 relativa ad a_x , si vede come lungo l'asse x i valori oscillano intorno al valore di $0 g$, proprio perché il terminale è tenuto, circa orizzontalmente. Intorno al quinto secondo, sempre sull'andamento relativo ad a_x si vedono dei picchi, dovuti alla curva a destra. Infatti, le accelerazioni laterali vengono percepite maggiormente su questo asse.

Dall'andamento di a_y si nota che questo è centrato intorno a $-0.3 g$, questo sempre a causa del posizionamento del terminale, leggermente inclinato sull'asse y, per poter vedere lo schermo; infatti con il terminale in un piano orizzontale, si ha $a_y = 0g$, mentre se si ruota il terminale di 90° lungo l'asse y (ovvero in verticale), risulta $a_y = -1g$. Infine, dalla curva nera, relativa ad a_z , si registrano le maggiori oscillazioni, dovute all'oscillazione verticale della camminata.

La scelta di utilizzare il modulo dell'accelerazione svincola il problema dal posizionamento del terminale, infatti anche tenendo il dispositivo in un'altra posizione, i risultati sarebbero gli stessi. Questo concetto trova un utile applicazione, nel caso in cui l'iPhone sia impugnato orizzontalmente; questo è il caso tipico di visualizzazione orizzontale della schermata. In questa situazione, si ha che i valori misurati lungo gli assi x e y si invertono, ma il risultato sull'accelerazione totale è il medesimo. Altra possibile situazione è un utente che impugna lo smartphone con la mano sinistra e lo tiene

inclinato lungo l'asse x, oltre che lungo l'asse y. Quest'ultima situazione è mostrata nella Figura 36 e nella Figura 37, in cui è stato ripetuto il precedente test, variando solo l'impugnatura del terminale. Si nota, rispetto al caso precedente, come le componenti x e y, presentino un maggior contributo (in valore assoluto), invece è diminuito il contributo di accelerazione lungo l'asse z. Il contributo totale è invece analogo.

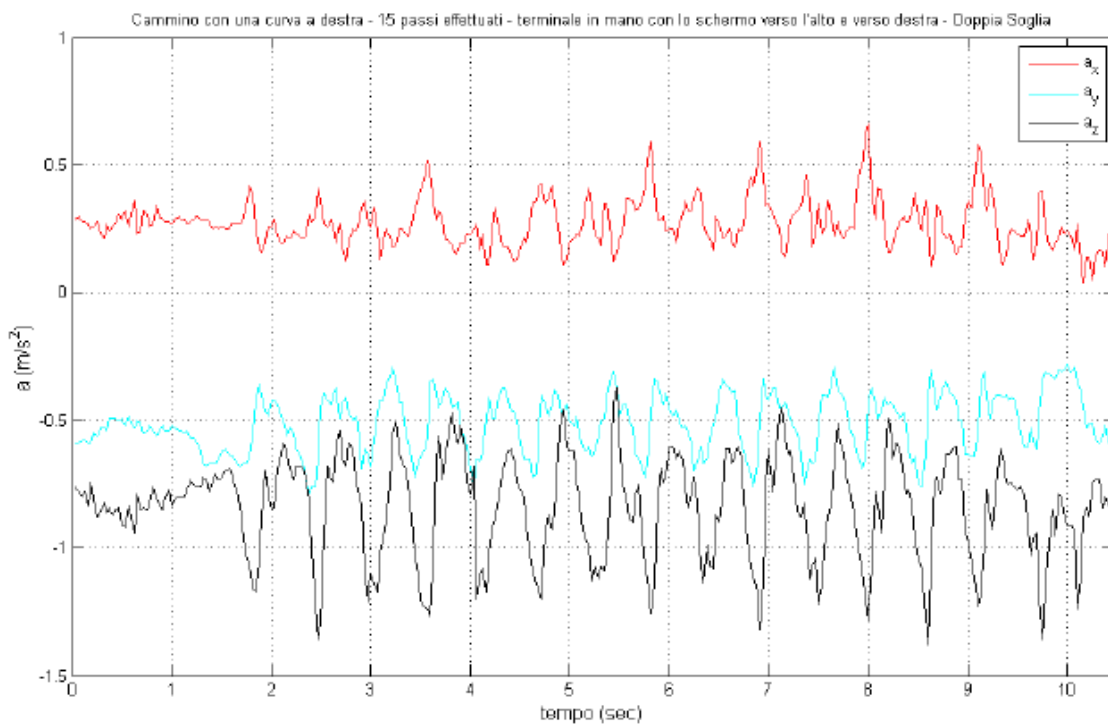


Figura 36: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano sinistra: valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi.

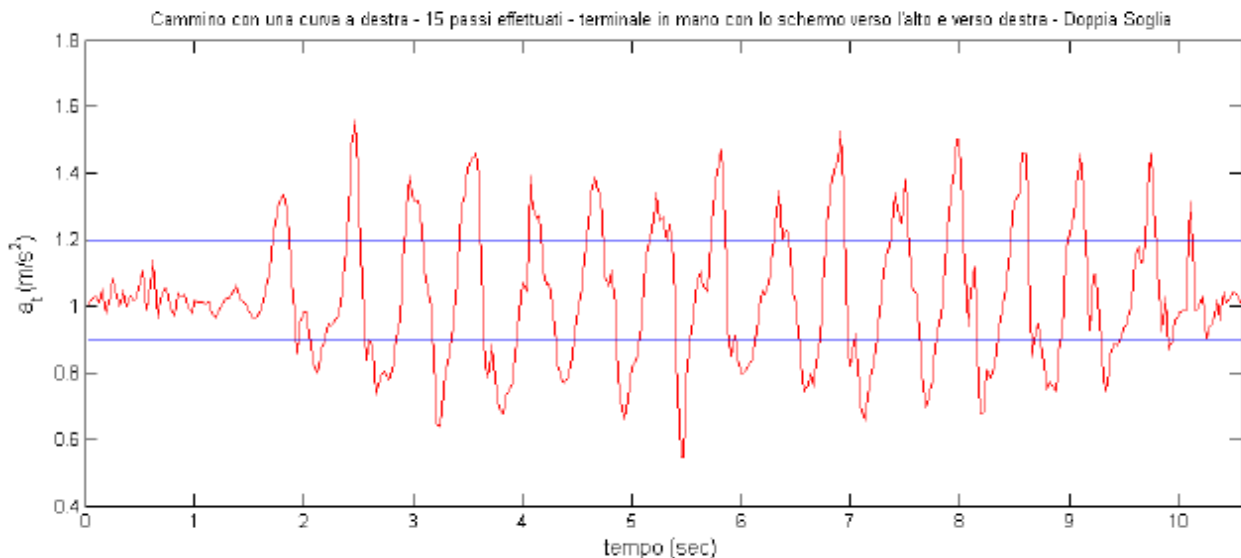


Figura 37: Cammino con curva a destra e terminale impugnato con la mano sinistra: modulo dell'accelerazione.

Nel test successivo, sono stati valutati gli andamenti dell'accelerazione nel caso di 10 scalini percorsi in salita. Il test è stato eseguito nelle seguenti condizioni:

- terminale in mano con il display rivolto verso l'alto;
- primo passo dopo circa 1 secondo dallo start;
- scalinata in salita: un passo per ogni gradino (si potrebbero fare due o più gradini con un unico passo);
- stop dopo 10 gradini;
- il terminale tenuto cercando di "simulare" l'osservazione del display: quindi senza farlo oscillare eccessivamente.

I risultati del caso di scalinata in salita sono mostrati nella Figura 38 e nella Figura 39.

I risultati ottenuti nel caso di scala percorsa in discesa sono ancora più bruschi, ovvero picchi positivi e negativi ancor più marcati, e "facili" da conteggiare.

Un elemento di fondamentale importanza lo giocano le soglie. Si potrebbe operare una scelta analoga a quella dell'applicativo "Pedometer", ovvero variare la sensibilità, così da spostare le soglie in base alla calibrazione effettuata dall'utente.

Un'altra possibilità è quella di avere delle soglie adattative elaborando i dati relativi all'accelerazione.

L'altra parte essenziale del metodo descritto per determinare la distanza percorsa è quello di valutare la lunghezza del passo. In alcuni podometri, questa lunghezza viene inserita direttamente dall'utente; di solito i manuali dei contapassi suggeriscono di effettuare 10 passi, calcolare la distanza percorsa e dividere per 10; altra tecnica suggerita è di misurare direttamente la distanza di un passo, tra l'appoggio di un tallone e quello dell'altro tallone. In altri podometri, si inserisce l'altezza e viene adoperato un opportuno fattore di scala moltiplicato per l'altezza dell'individuo. Tale fattore è intorno a 0.4 e può dipendere da diversi parametri, ad esempio dal sesso della persona.

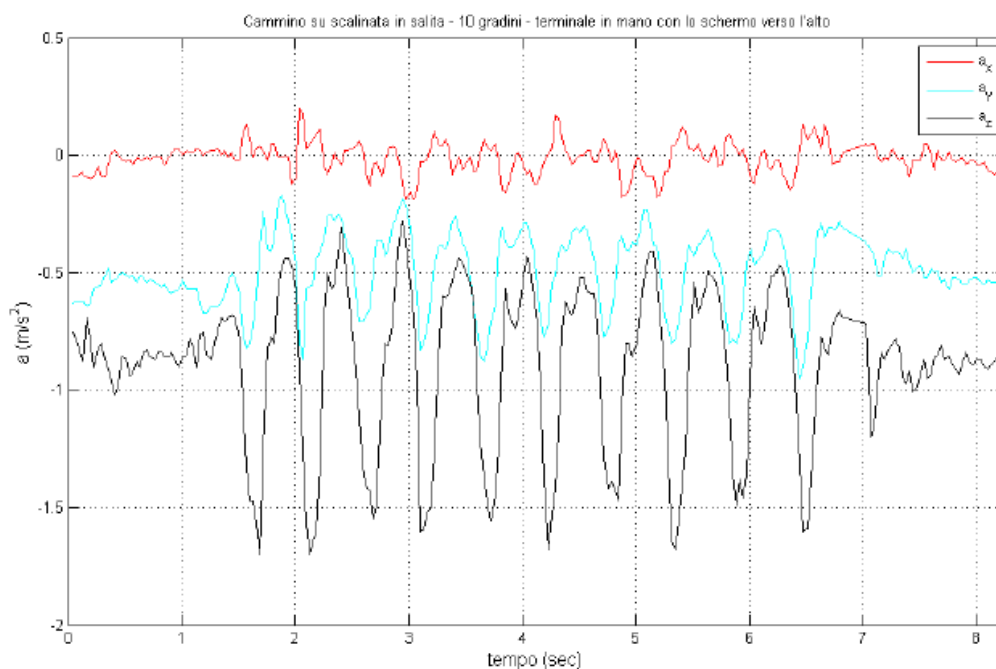


Figura 38: Scala in salita: valori di accelerazioni misurati lungo i tre assi

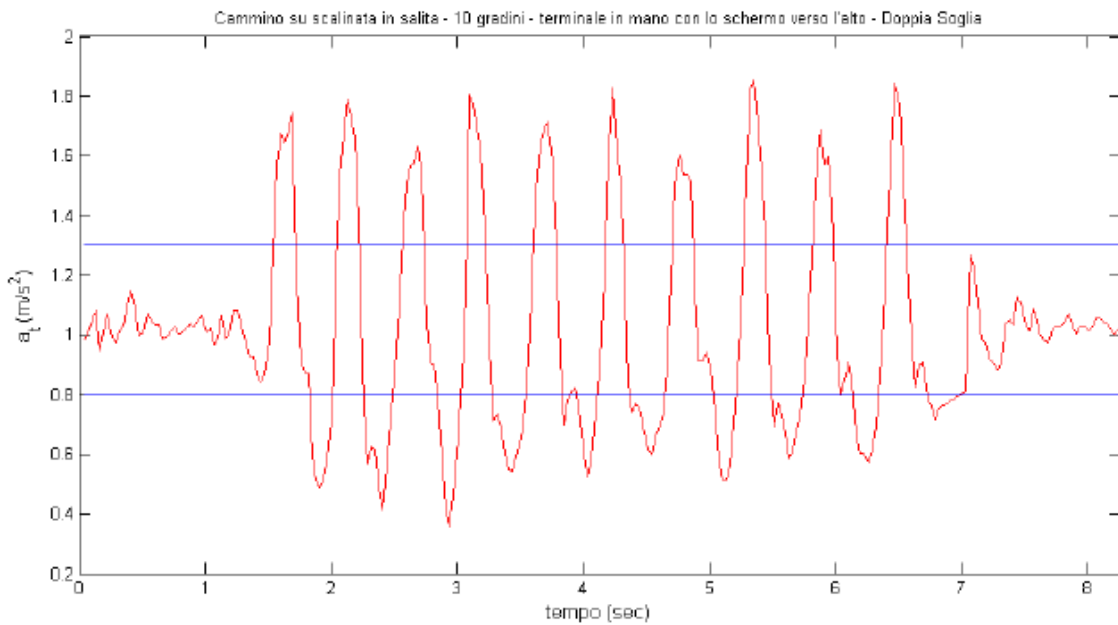


Figura 39: Scala in salita: modulo dell'accelerazione

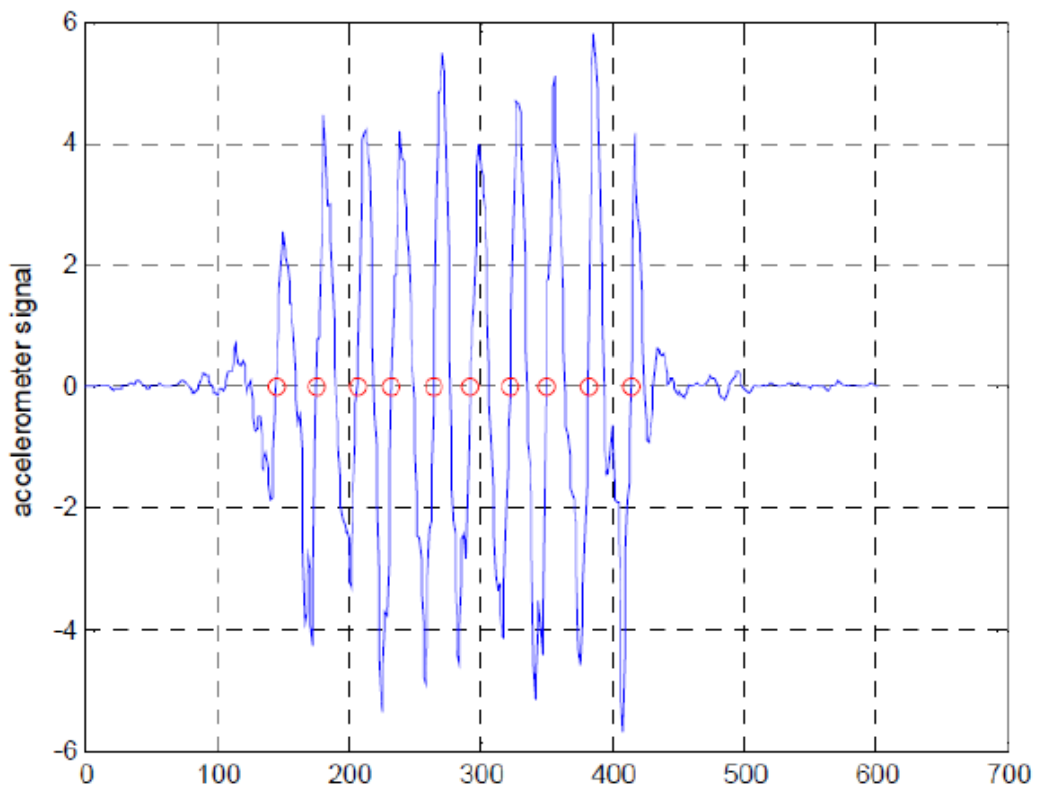


Figura 40: Conteggio del numero dei passi con metodo Zero-Crossing [19].

Nei casi descritti si considera quindi, che il passo della camminata sia costante e basato solo sui dati fisici dell'utente. Un altro approccio che è possibile seguire è quello di considerare i passi di lunghezza variabile, in cui la lunghezza del passo è scelta ogni volta in base alle misurazioni effettuate dai sensori di accelerazione. Un approccio di questo tipo è descritto in [19], in cui si sono utilizzati dei sensori MEMS. Per il calcolo del numero di passi viene utilizzato il metodo zero-crossing, come da Figura 40.

La lunghezza del passo l_k è calcolata considerando la frequenza della camminata la varianza dell'accelerazione come segue:

$$l_k = \alpha \cdot f_k + \beta \cdot v_k + \gamma \quad (23)$$

$$f_k = \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \quad (24)$$

$$v_k = \sum_{t=t_{k-1}}^{t_k} \frac{(a_{t_k} - \bar{a}_k)^2}{N} \quad (25)$$

dove:

- α, β e γ sono dei parametri derivanti dalla fase di calibrazione;
- l_k è la lunghezza del k-esimo passo;
- t_k è il tempo al passo k-esimo;
- f_k è la frequenza della camminata tra il (k-1)-esimo e il k-esimo passo;
- \bar{a}_k è la media dell'accelerazione durante un passo;
- a_{t_k} è l'accelerazione al tempo t_k ;
- N è il numero di output dei sensori durante un passo;
- v_k è la varianza dell'accelerometro.

La distanza percorsa D dopo n passi è valutata come:

$$D = \sum_{i=1}^n \alpha \cdot f_i + \beta \cdot v_i + \gamma \quad (26)$$

I risultati degli esperimenti [19] sono riportati in Figura 41 e mostrano la lunghezza del passo al variare della frequenza della camminata e della varianza dell'accelerazione. Secondo lo studio effettuato in [19], sfruttando l'algoritmo del passo adattativo descritto, per una camminata in pianura e nel peggiore dei casi, si raggiungono accuratèzze del 95% sulla stima del passo. Inoltre, dallo studio emerge che le condizioni del fondo su cui si cammina determinano in maniera decisiva l'accuratèzza sulla stima della lunghezza del passo.

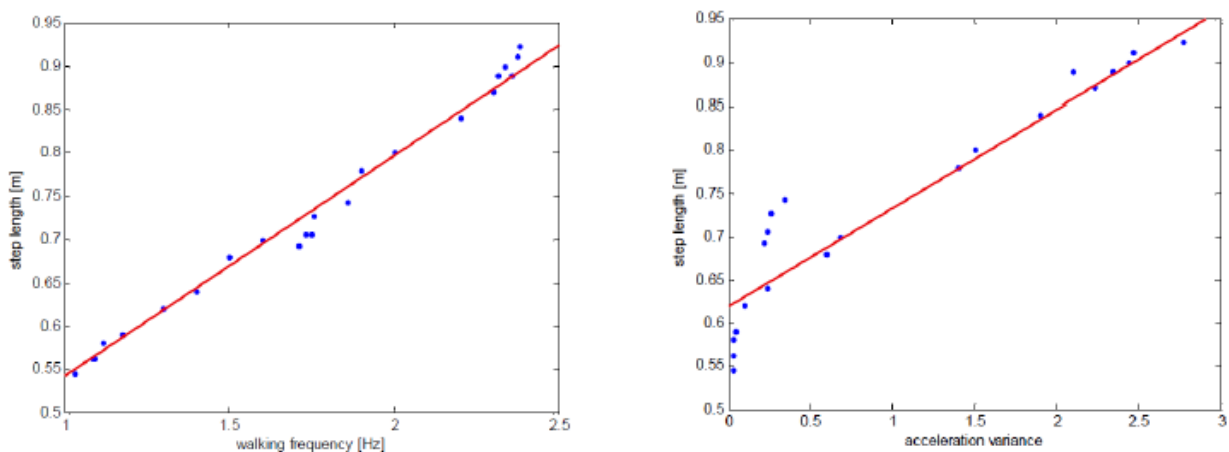


Figura 41: Frequenza della camminata vs. lunghezza del passo. Varianza dell'accelerazione vs. lunghezza del passo

3.3 Calcolo della direzione da misure inerziali

È possibile descrivere l'assetto spaziale di un generico corpo in diversi modi, ad esempio con:

- Angoli di Eulero;
- Quaternioni.

Gli angoli di Eulero comportano il problema denominato gimbal lock; inoltre una rappresentazione matriciale per le rotazioni introduce una elevata onerosità computazionale. I quaternioni risolvono entrambi questi inconvenienti, per questo motivo vengono scelti come strumento matematico nella descrizione e implementazione dei filtri per la stima dell'orientamento [20].

3.3.1 Gli angoli di Eulero

Indichiamo una terna destrogira di riferimento cartesiana fissa S , la quale rappresenta il sistema di riferimento inerziale coincidente con la terra. Indichiamo con S_0 un secondo sistema di riferimento cartesiano destrogira la cui l'origine coincide con S ma in generale non allineato con quest'ultimo (S_0 rappresenta il sistema solidale al sensore).

È sempre possibile individuare 3 angoli ψ , θ e ϕ che permettono di ruotare (attorno agli assi di S di "partenza") S_0 ed allinearlo con il sistema fisso. Tali angoli prendono il nome di Angoli di Eulero, in particolare: ψ rappresenta la rotazione attorno all'asse z (angolo di yaw), θ è la rotazione attorno a y (angolo di pitch) mentre ϕ quella attorno a x (angolo di roll). In generale può essere scelta una qualsiasi sequenza di assi attorno a cui ruotare (ad esempio zyx o zyz) purché questi siano, in sequenza, uno ortogonale all'altro.

Ogni rotazione intorno all'origine di S si può rappresentare come composizione di 3 rotazioni, sintetizzate (nel sistema di riferimento di partenza) da: $R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$.

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Da notare come le matrici esposte siano tutte ortonormali e quindi rappresentino una isometria (rotazione nello spazio euclideo).

La matrice di rotazione complessiva da S a S_0 si ottiene in questo modo:

$$R_S^{S_0} = R_z(\psi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\phi) \quad (30)$$

Che sviluppata diventa:

$$R_x(\Phi) = \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & c(\psi)s(\theta)s(\phi) - s(\psi)c(\phi) & s(\psi)s(\phi) + c(\psi)s(\theta)c(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & s(\psi)s(\theta)s(\phi) + c(\psi)c(\phi) & s(\psi)s(\theta)c(\phi) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Nel caso della matrice (32) il problema si presenta con $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$: in questa configurazione esistono infinite combinazioni di ψ e ϕ che portano alla stessa matrice di cambiamento di coordinate.

3.3.2 I quaternioni

Nel piano è possibile rappresentare le rotazioni mediante l'impiego dei numeri complessi, in uno spazio tridimensionale le rotazioni possono essere completamente caratterizzate dai quaternioni [20]. I quaternioni sono una quadrupla di componenti scalari $\in \mathbb{R}$ del tipo:

$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4) \quad (32)$$

dove q_1 è detto parte scalare e $\mathbf{w} = (q_2, q_3, q_4)$ viene chiamata parte vettoriale. È dunque possibile usare tale notazione $q = (q_1, \mathbf{w})$. Se $\mathbf{w} = \mathbf{0}$ allora \mathbf{q} si dice quaternione reale. Se $q_1 = 0$, allora q si dice quaternione puro (o vettoriale). Come per la notazione dei numeri complessi è possibile utilizzare una scrittura algebrica dei quaternioni, si definiscono così:

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \quad (33)$$

dove, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ si comportano similmente all'unità immaginaria per i numeri complessi. È possibile definire un quaternione nel seguente modo:

$$\mathbf{q} = q_1 + q_2 \cdot \mathbf{i} + q_3 \cdot \mathbf{j} + q_4 \cdot \mathbf{k} \quad (34)$$

L'operazione di somma di quaternioni è definita componente per componente secondo le usuali regole di somma tra numeri reali (non presenta un particolare significato al fine della trattazione).

3.3.3 Relazione tra quaternioni e angoli di Eulero

Le relazioni per ottenere dai quaternioni gli angoli di Eulero sono le seguenti:

$$\psi = \operatorname{atan2}\left(\frac{2q_2q_3 - 2q_1q_4}{2q_1^2 + q_2^2 - 1}\right) \quad (35)$$

$$\theta = -\sin(2q_2q_4 + 2q_1q_3) \quad (36)$$

$$\phi = \operatorname{atan2}\left(\frac{2q_3q_4 - 2q_1q_2}{2q_1^2 + q_4^2 - 1}\right) \quad (37)$$

3.4 Algoritmi per la stima dell'orientamento

La letteratura è ricca di diverse soluzioni e tecniche impiegate per la stima dell'orientamento a partire dai dati forniti dalla IMU. Ne sono un esempio le tecniche di filtraggio che si basano sulla teoria del filtro di Kalman, o sul filtro di Madgwick [21] o ancora su algoritmi di sensor fusion complementari, ognuno dei quali presenta punti di forza ad esempio: la soluzione ottima raggiunta dal primo o la velocità di esecuzione del secondo. Non esiste una soluzione definitiva, la scelta di un filtro piuttosto di un altro è funzione delle risorse disponibili o dal grado di qualità cercato o, più in generale, dalla specifica realizzazione. Di seguito viene riportata una breve descrizione del filtro Madgwick.

3.4.1 Filtro Madgwick

Le misure di velocità angolare provenienti dal giroscopio possono essere integrate per ottenere, dopo un certo tempo, l'assetto del sensore. L'integrazione porta però ad un progressivo errore di bias, la sola misura di velocità angolare non è dunque sufficiente. L'uso di un accelerometro o di un magnetometro risulta essenziale per correggere la stima precedente. La misura del vettore accelerazione gravitazionale e quella del vettore campo magnetico terrestre forniscono la possibilità di tale correzione. Queste ultime stime sono affette da numerosi errori, ad esempio le accelerazioni non gravitazionali percepite dal sensore o variazioni di campo magnetico locali prodotte da apparecchiature nelle vicinanze del sensore. Il compito del filtro successivamente esposto è quello

di calcolare una stima di assetto attraverso una “fusione” dei dati del giroscopio, accelerometro e magnetometro.

Nei primi istanti di funzionamento del filtro il sensore misura solamente l’accelerazione di gravità (nessuna accelerazione lineare) e il magnetometro misura solo il campo magnetico terrestre (non vi è alcuna alterazione locale). Il confronto tra il vettore accelerazione misurato dal sensore (nel sistema del sensore) e la direzione del vettore gravità rispetto al riferimento della terra, posto verticale, permette la determinazione della rotazione reciproca dei due sistemi di riferimento. Tre parametri devono essere determinati, intuitivamente si può pensare ai tre angoli di Eulero.

L’utilizzo di un solo vettore permette di calcolare solamente due parametri, il terzo rimane indeterminato. Non è possibile determinare l’angolo relativo attorno ad un asse parallelo al vettore usato come riferimento. Ad esempio, utilizzando solo il vettore gravità risulta indeterminato l’angolo di Yaw (attorno all’asse z). Ecco perché si utilizza anche il vettore campo magnetico (purché non parallelo a g) per la determinazione dell’assetto del sensore. Si affronta di seguito il problema di determinare il quaternioni di assetto dalla misura di un singolo vettore di velocità angolare o dai vettori contenenti le misure fornite dal magnetometro e dall’accelerometro, successivamente si effettua la fusione dei quaternioni stimati dai singoli vettori.

Le 3 misure di velocità angolari prodotte dal giroscopio sono raccolte in un vettore velocità angolare denominato \mathbf{S}_w a cui corrisponde il seguente quaternioni $\mathbf{q}_w = (0; \mathbf{S}_w)$. L’orientamento del sensore rispetto alla terra al tempo t , $\mathbf{q}_{E,g}$, può essere calcolato integrando numericamente il quaternioni \mathbf{q}_w conoscendo le condizioni iniziali.

In base alle misure fornite dall’accelerometro e dal magnetometro, il quaternioni che permette la rotazione dal sistema di riferimento della terra al sistema del sensore può essere determinato minimizzando una funzione d’errore (seguendo il tipico approccio di un problema di ottimizzazione): $\min f(\mathbf{q}_{E,a,m}, \mathbf{d}_E, \mathbf{q}_S)$, dove \mathbf{d}_E rappresenta il quaternioni del campo rispetto alla terra, \mathbf{q}_S rappresenta il quaternioni ottenuto dalle misure del campo (gravitazionale o magnetico) e \mathbf{q}_E è il quaternioni da calcolare con la risoluzione del problema di ottimizzazione. Da notare come tutti questi quaternioni siano delle stime ottenute dai sensori o calcolate dal filtro.

Esistono diversi algoritmi per la determinazione di una soluzione al problema posto, ne è un esempio l'algoritmo iterativo di "discesa del gradiente" (usato nel filtro di Madgwick [21]) o l'algoritmo di Gauss-Newton.

Il filtro proposto da Madgwick [21] non utilizza iterativamente l'algoritmo di discesa del gradiente, né tantomeno calcola in tempo reale lo step-size, basandosi sull'Hessiana della funzione obiettivo.

Tutto questo rende il filtro molto più rapido nell'esecuzione in tempo reale rispetto agli altri. Tali approssimazioni possono comportare errori di second'ordine (ininfluenti) nel caso in cui l'assetto del sensore non vari troppo repentinamente.

Le due stime dell'assetto del sensore ottenute dalle misure fornite dal giroscopio, $\mathbf{q}_{E,g}$, e dalle misure fornite da magnetometro e accelerometro, $\mathbf{q}_{E,a,m}$ vengono fuse assieme al fine di ottenere una stima più accurata del quaternione cercato, come segue:

$$\mathbf{q}_{est,t} = \lambda_t \cdot \mathbf{q}_{E,a,m} + (1 - \lambda_t) \cdot \mathbf{q}_{E,g} \quad (38)$$

Un λ_t tendente a 0 implica che la stima di posizione prevista dal filtro è data solamente dalle misure di velocità fornite dal giroscopio, mentre se λ_t tende a 1, il risultato è una stima completamente influenzata dai vettori gravità e campo magnetico misurati.

λ_t può essere scelta in modo che la tendenza a divergere di $\mathbf{q}_{E,g}$, quaternione fornito dalle misure del giroscopio influenzato da errore di bias eguagli la convergenza di $\mathbf{q}_{E,a,m}$.

3.5 Esempio di stima della posizione mediante misure di distanza e di orientamento

Dalle misure di distanza e orientamento è possibile calcolare la nuova posizione del terminale utente. Si suppone che sia nota la posizione iniziale del terminale nello specifico sistema di riferimento considerato. Tale posizione può essere fornita mediante sistemi di localizzazione presenti nell'ambiente. Il sistema di riferimento della mappa è composto da un asse cartesiano, in cui si avrà un certo rapporto pixel/metro sugli assi, ovvero ogni metro sarà rappresentato da un fissato numero di pixel. Per una mappa che rispecchia correttamente le proporzioni lungo i due assi,

i rapporti pixel/metro sono i medesimi lungo i due assi. Consideriamo il caso di una mappa bidimensionale dove si è interessati a stimare la posizione per due sole dimensioni. Si indichi con (a', b') la posizione che si vuole stimare e con D la distanza percorsa in pixel in un certo intervallo di tempo. La situazione descritta è rappresentata in Figura 42.

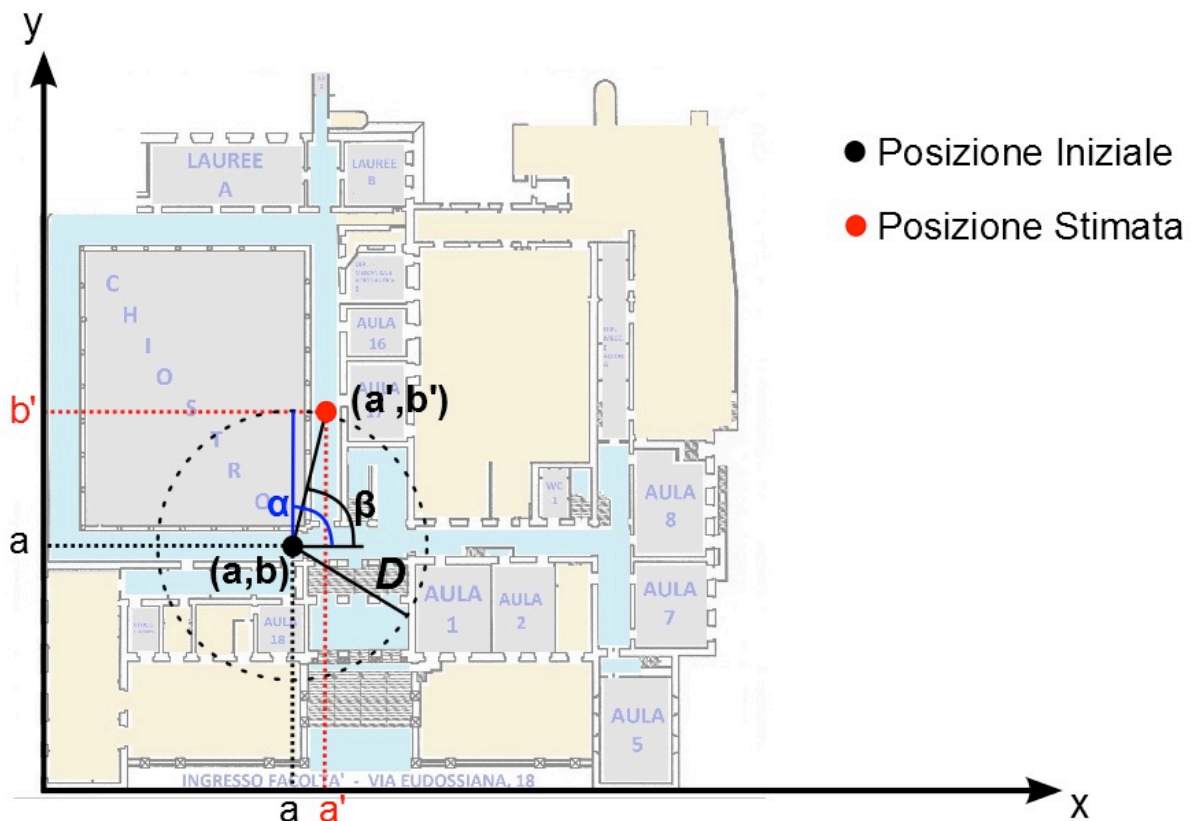


Figura 42: schema semplificato per la stima della posizione da misure di distanza e orientamento.

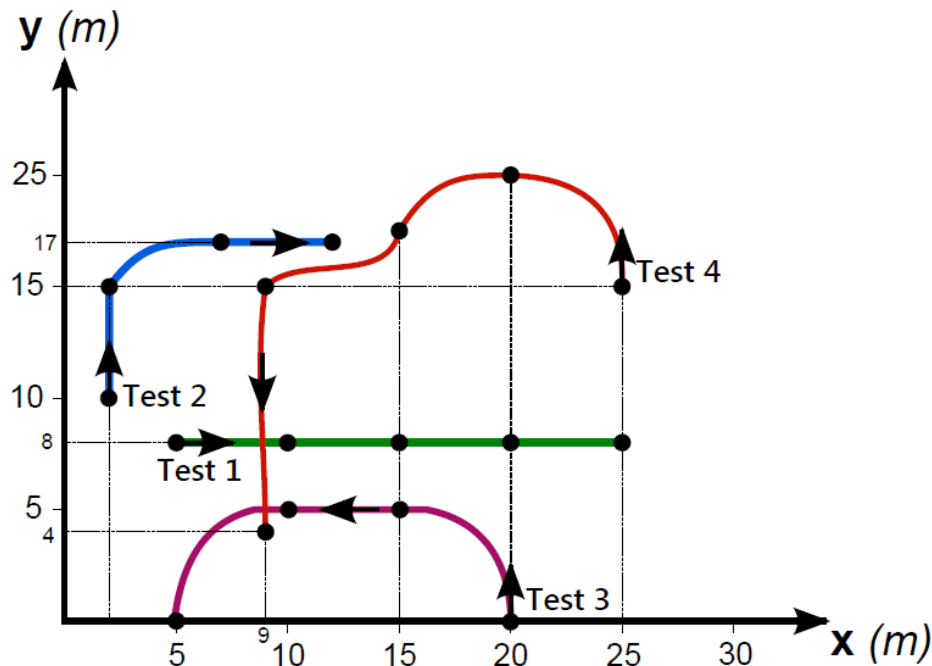


Figura 43: percorsi utilizzati per i test sperimentali.

La nuova posizione può essere valutata come segue:

$$\begin{cases} a' = a + D \cdot \cos(\beta) \\ b' = b + D \cdot \sin(\beta) \end{cases} \quad (39)$$

dove (a, b) è la posizione iniziale e β è la misura di orientamento lungo il piano xy , intorno all'asse z , (angolo di Yaw).

Applicando l'eq. 39 di seguito vengono riportati i risultati ottenuti da test sperimentali per la stima della posizione del terminale utente mediante utilizzo di sensori magneto inerziali.

In particolare, vengono riportati i risultati nel caso di quattro diversi percorsi, come mostrato in Figura 43.

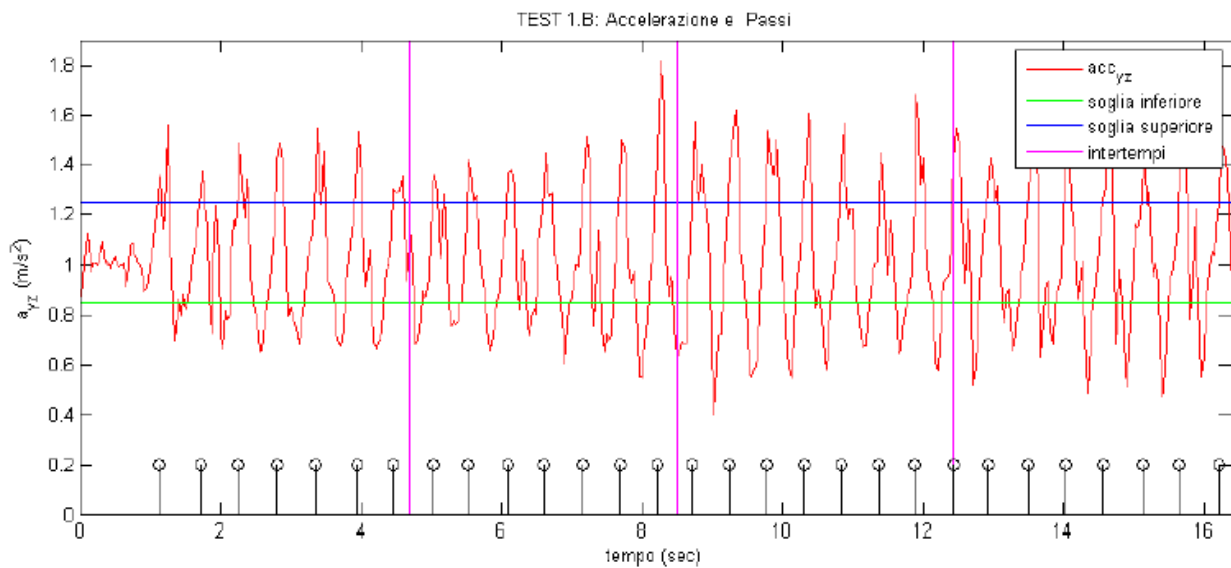
Le condizioni operative sono le seguenti:

- Per la valutazione della posizione si sono sfruttate le misurazioni dell'accelerometro e del giroscopio dello smartphone iPhone 4, estrapolate mediante l'applicazione "xSensor Pro". Si considera una frequenza di campionamento di 32 Hz.

- Il terminale si è impugnato con la mano destra, con l'asse delle y circa parallelo alla direzione della camminata (presa verticale), con la "classica" inclinazione dovuta all'osservazione del display. I risultati che si ottengono impugnando il terminale con l'asse delle x parallelo alla direzione della camminata (presa in orizzontale) sono i medesimi. Infatti, come detto in precedenza, è possibile capire il posizionamento dello smartphone osservando i valori di accelerazione percepiti rispetto all'accelerazione gravitazionale. Questo implica che l'applicazione per iPhone può funzionare sia in vista orizzontale che in vista verticale.
- Si è considerata una lunghezza del passo costante e pari a $D = 0.67m$. Per la valutazione si è misurata la lunghezza di 10 passi, dividendo poi la lunghezza totale per 10. Sono state effettuate 10 diverse prove, scartando i due risultati più bassi e più alti ed è stata poi calcolata la media sulla base dei valori rimanenti.
- I test sono stati eseguiti in un ambiente di circa $600 m^2$.
- Sono note le coordinate di partenza e la direzione rispetto al sistema di riferimento (x, y) .
- Per ogni test sono presenti dei punti intermedi, oltre ai punti di partenza e di arrivo. Tali punti sono stati presi come riferimento durante la camminata, ovvero il percorso è stato eseguito passando sopra questi punti. Questi punti sono chiamati nodi del percorso.
- Sono stati memorizzati gli intervalli di tempo tra i passaggi ai diversi nodi del percorso, mediante un cronometro esterno in grado di registrare più intertempi. Le misurazioni sono state effettuate con la seguente procedura:
 - al tempo $t = 0$, start del cronometro e delle misurazioni dei sensori inerziali (start alla registrazione nell'applicazione xSensor Pro);
 - primo passo effettuato dopo circa 1 secondo dallo start;
 - registrazione cronometrica degli intertempi al passaggio ai nodi del percorso;
 - stop del cronometro al passaggio sul nodo di arrivo;
 - in seguito al passaggio sul nodo di arrivo, stop alle misurazioni dei sensori inerziali: si considerano le sole misurazioni dei sensori effettuate nel tempo registrato dal cronometro, ovvero si prendono in esame le misure inerziali entro il tempo di percorrenza del percorso.

- Per la valutazione del numero di passi effettuati si è considerato il modulo delle accelerazioni lungo i tre assi e le seguenti soglie, soglia superiore pari a 1.25 m/s^2 , e soglia inferiore pari a 0.85 m/s^2 .
- Per la valutazione della direzione si è considerata la misura dell'angolo di Yaw.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per il percorso relativo al test 1, (Figura 44).



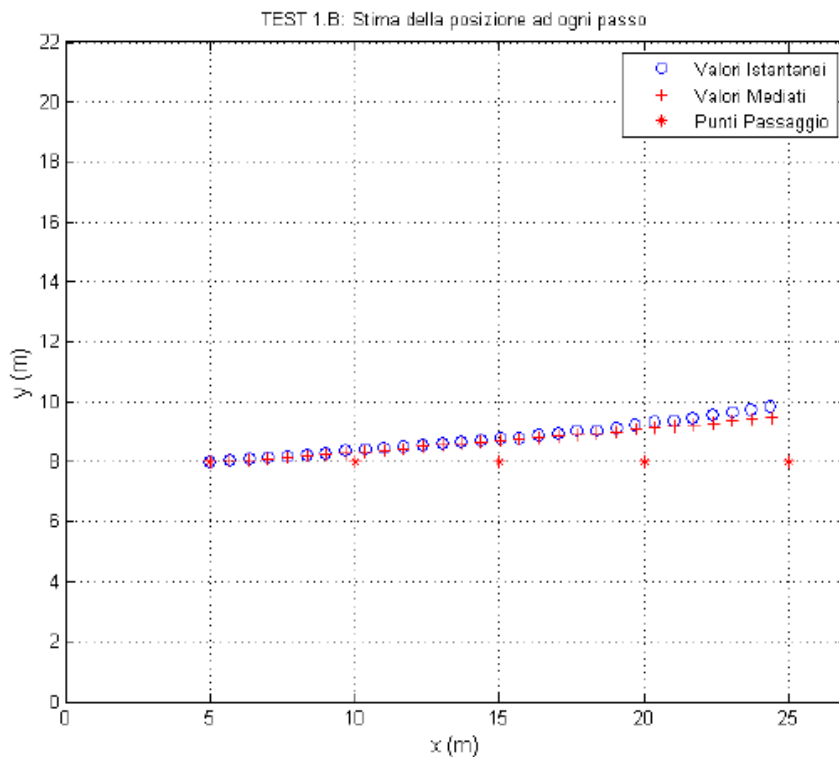
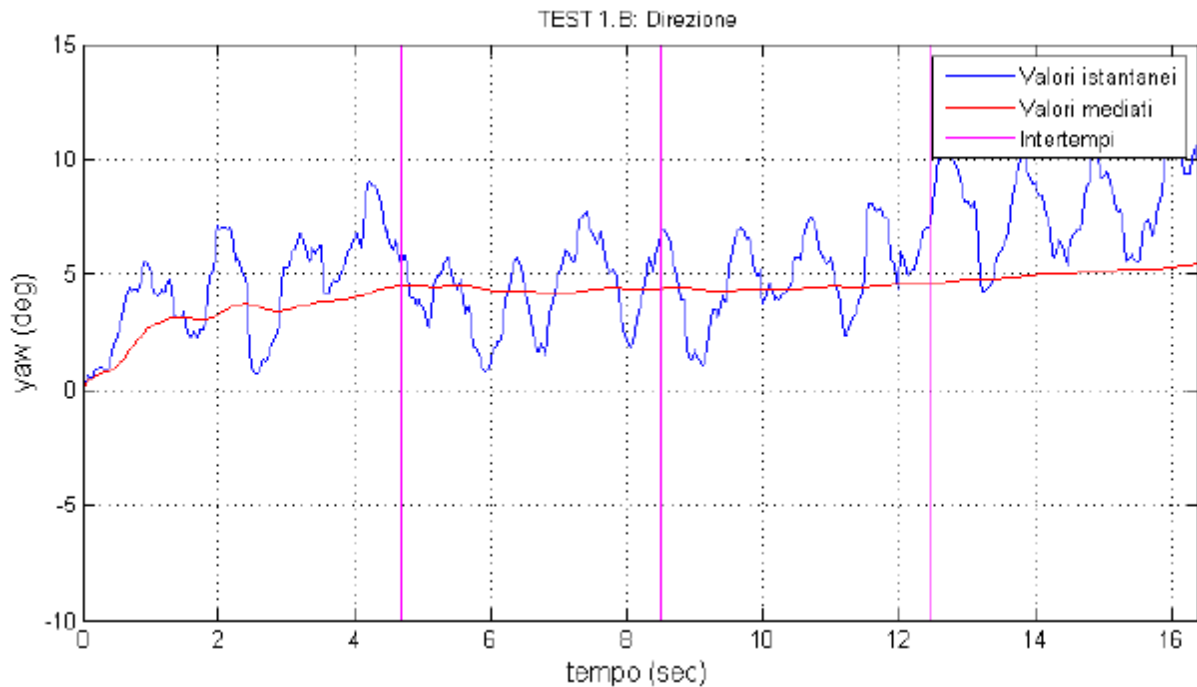


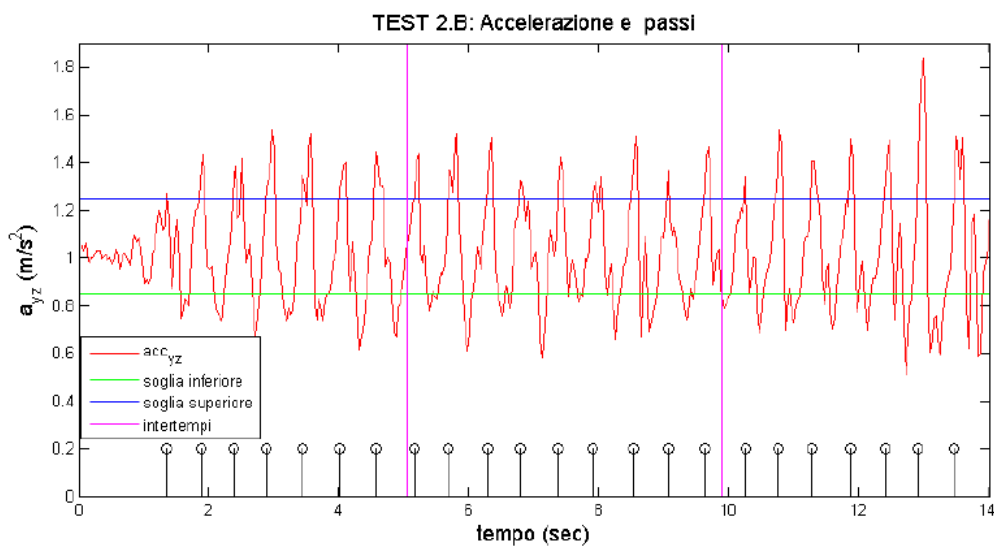
Figura 44: risultati del test 1 (percorso rettilineo).

Nel primo grafico è riportato, in rosso, l'andamento dell'accelerazione nel tempo. Con i colori blu e verde sono rappresentate rispettivamente la soglia superiore e inferiore. I segmenti verticali viola

raccontano gli istanti di passaggio nei nodi del percorso (misurati tramite cronometro esterno). Nella parte bassa del grafico, in nero, sono invece tracciati gli istanti temporali in cui viene “percepito” un nuovo passo dall’algoritmo.

Nel secondo grafico sono mostrati gli andamenti dello yaw istantaneo (curva blu) e dello yaw mediato al tempo t (in rosso). Anche in questo caso sono indicati i valori temporali degli intertempi in viola.

Nell’ultimo grafico, si riportano le stime delle posizioni effettuate ad ogni passo (cerchi blu) e i punti dei nodi di passaggio (asterischi rossi). La stima della nuova posizione è eseguita utilizzando le equazioni (39) ed è basata unicamente sulla posizione precedente. Nel grafico relativo al test rettilineo (Test 1), sono riportate anche le stime basate sulla media istantanea dello yaw (croci in rosso). Di seguito sono riportati gli stessi grafici per tutti i percorsi considerati (Figura 45, Figura 46 e Figura 47).



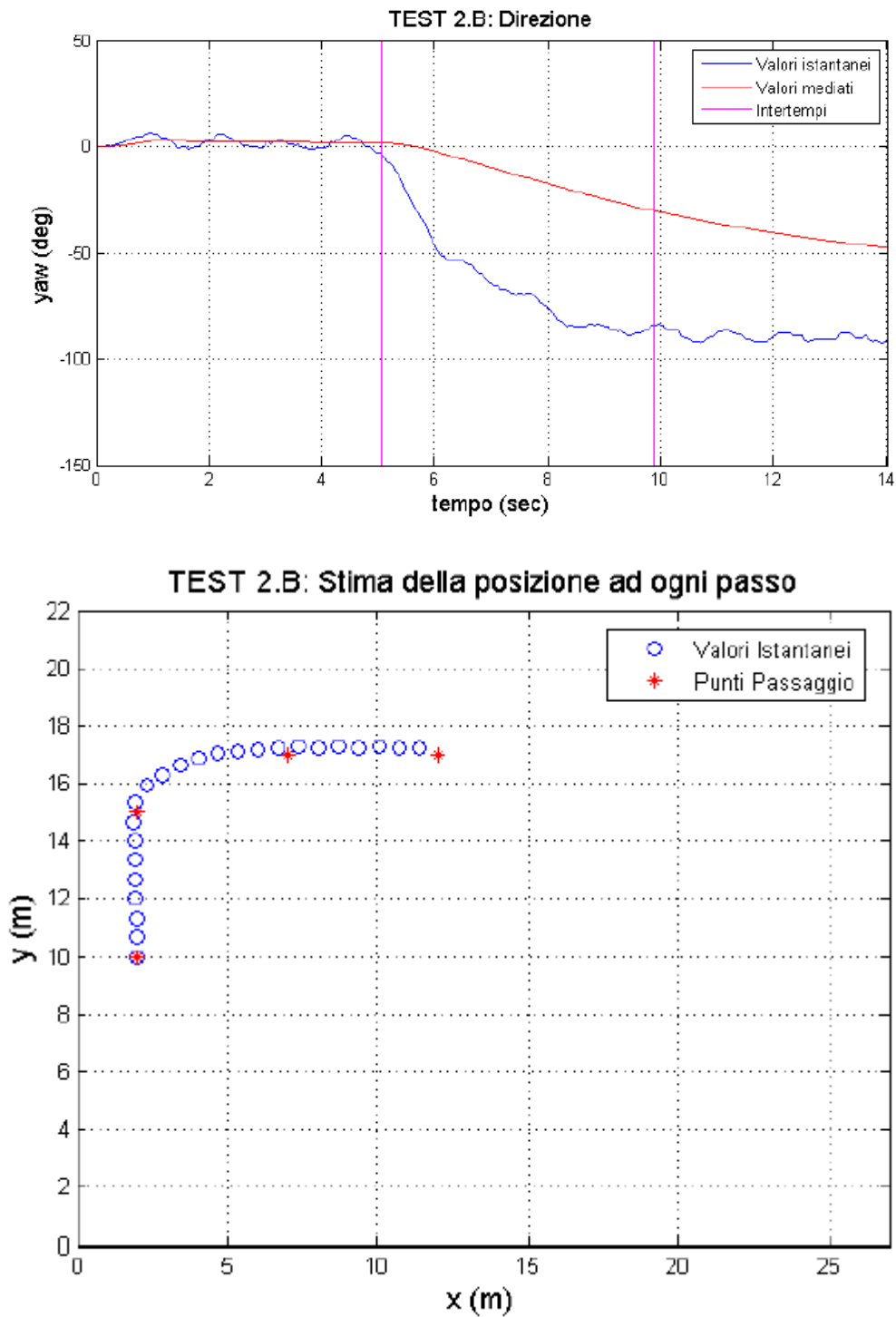
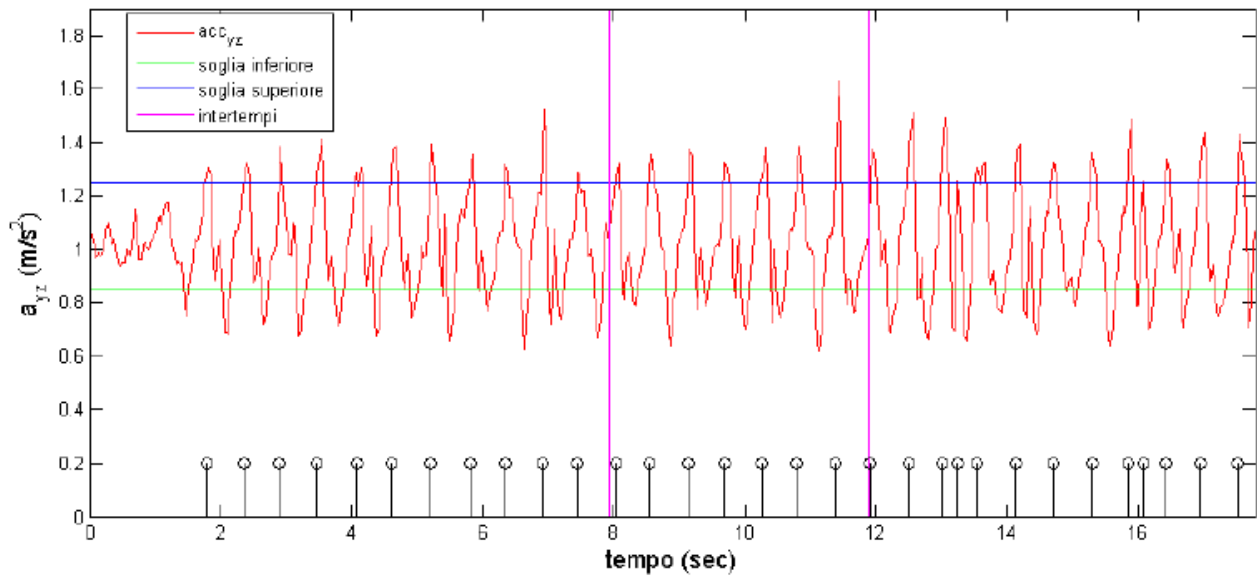
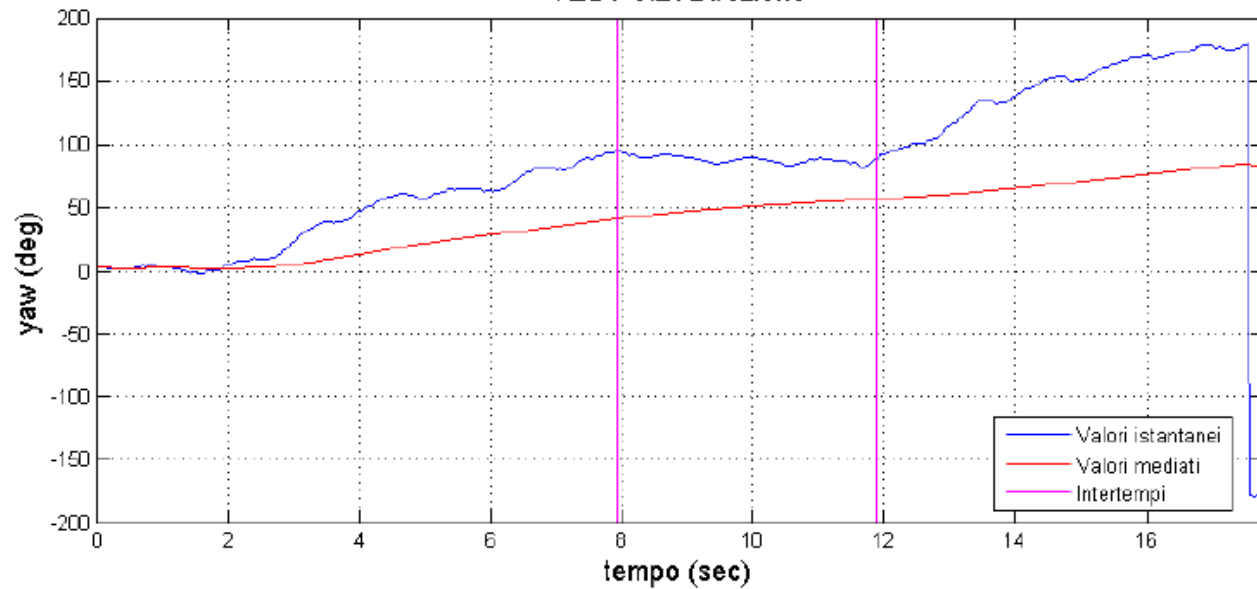


Figura 45: risultati del test 2 (percorso con curva a destra).

TEST 3.B: Accelerazione e passi



TEST 3.B: Direzione



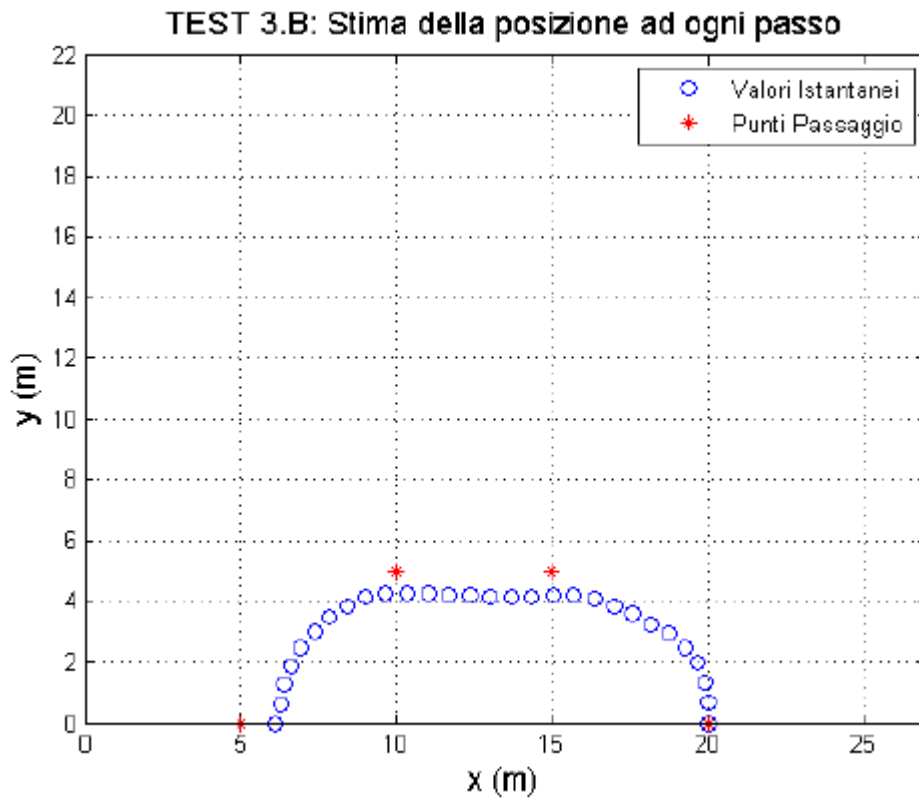
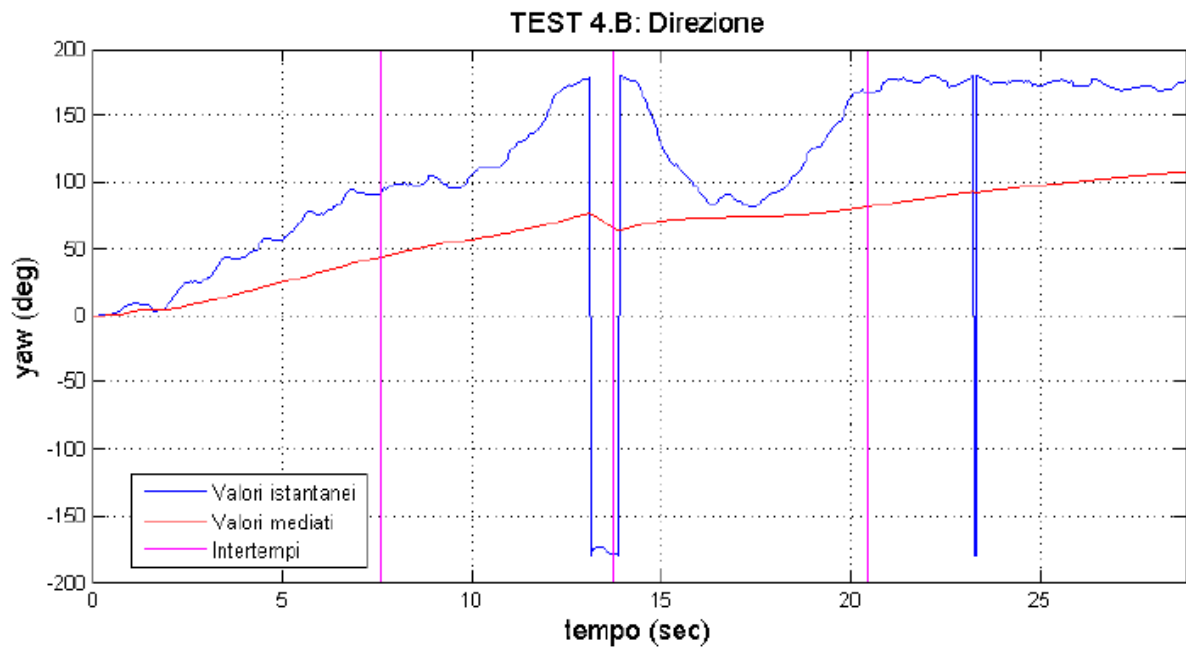
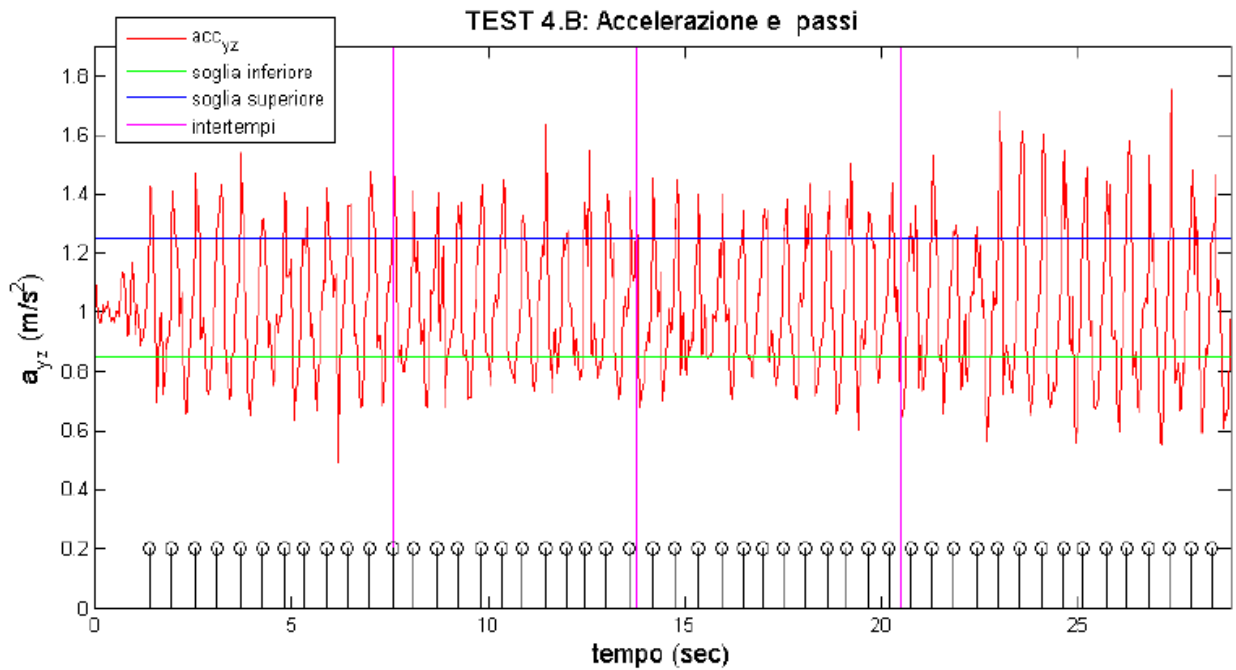


Figura 46: risultati del test 3 (percorso con doppia curva a sinistra).



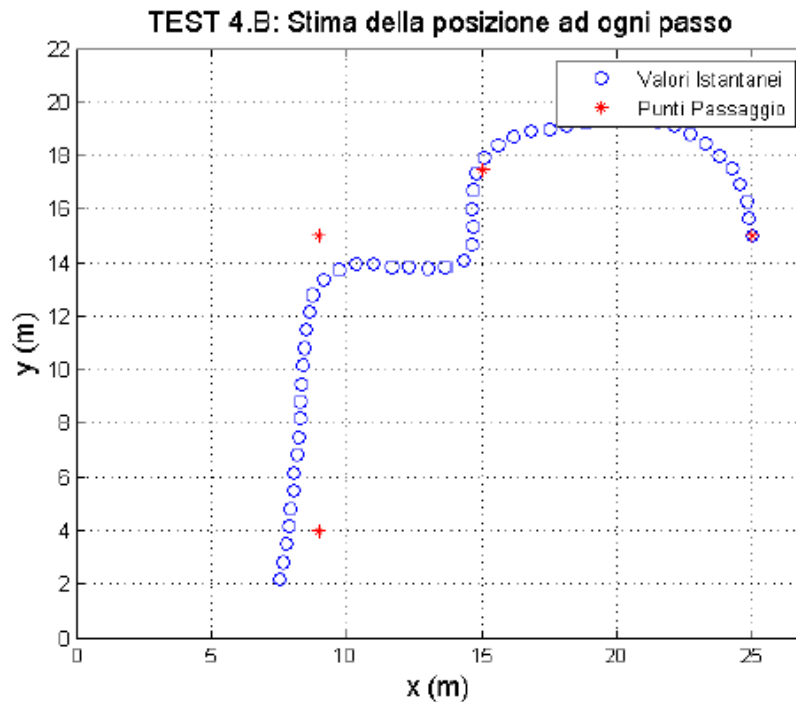


Figura 47: risultati del test 4 (percorso misto con 4 curve).

I percorsi sono stati ripetuti tre volte. Nel seguito si riportano le stime delle posizioni ottenute nei tre test di ogni percorso. Si riportano anche il numero totale di passi calcolati durante il percorso ($cont_a$, $cont_b$, $cont_c$) e le coordinate dell'ultima stima di posizione effettuata (x_a , y_a), (x_b , y_b) e (x_c , y_c), vedi Figura 48, Figura 49, Figura 50 e Figura 51.

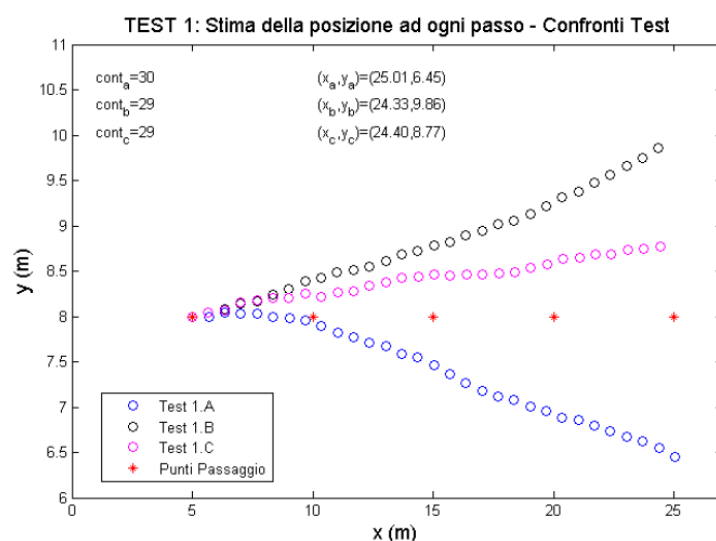


Figura 48: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 1 - numero di passi contati.

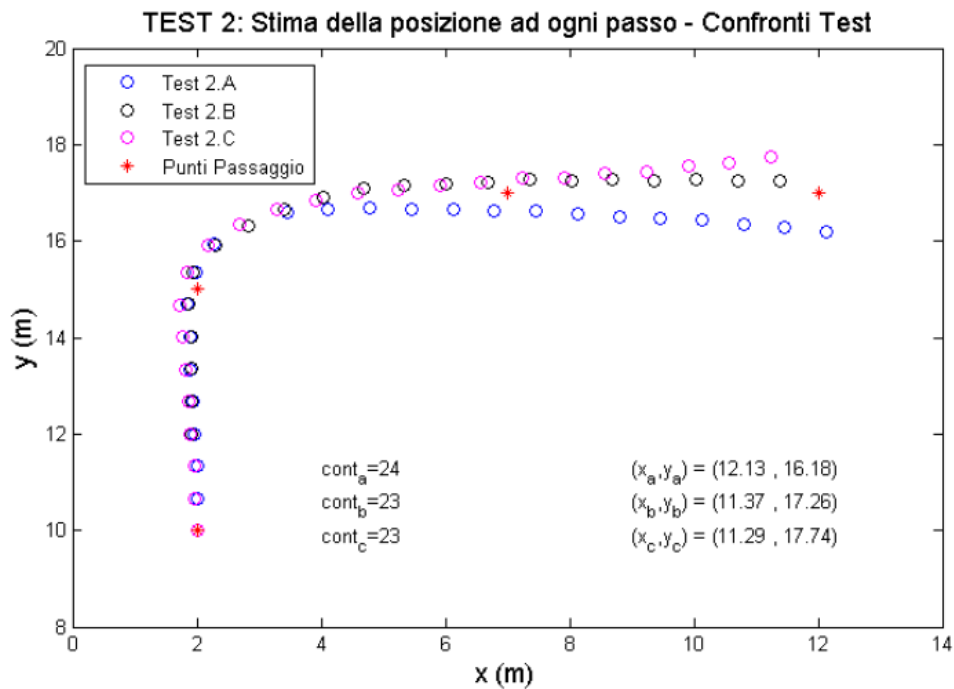


Figura 49: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 2 - numero di passi contati.

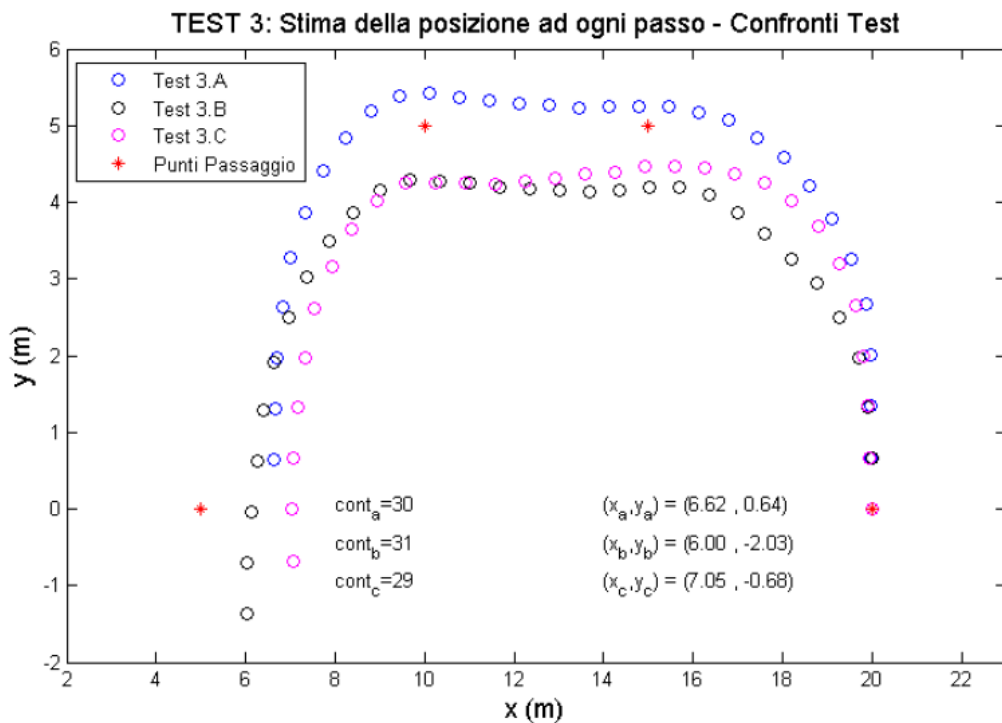


Figura 50: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 3 - numero di passi contati.

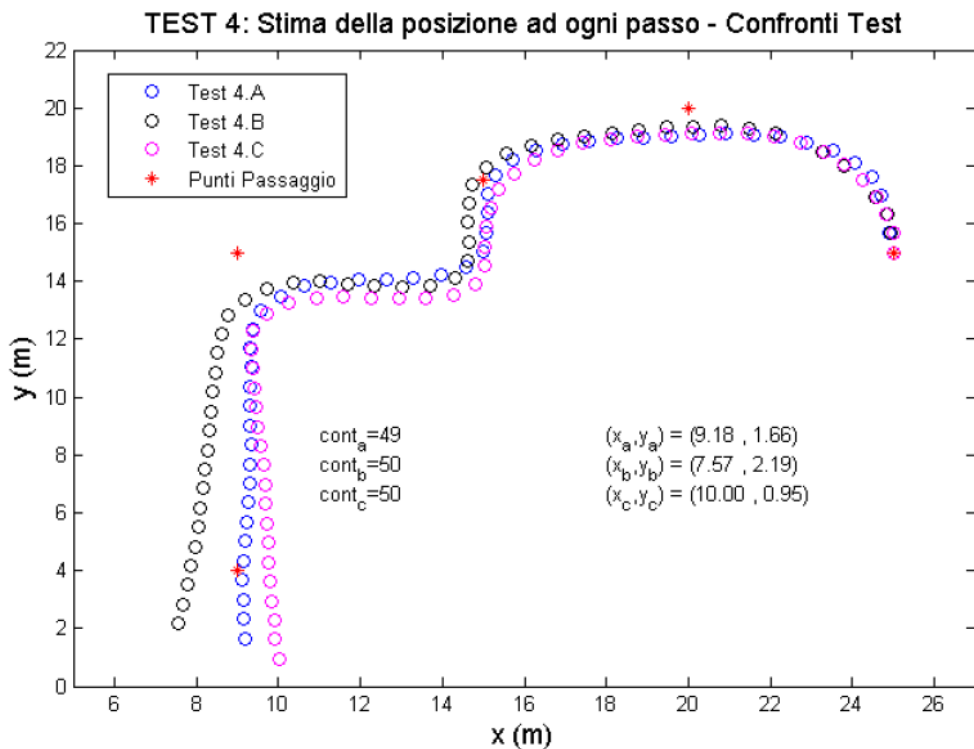


Figura 51: Stime di posizione ottenute nelle tre prove del Test 4 - numero di passi contati.

Dalle analisi, si nota che l'errore tra le misure di posizione fornite dall'algoritmo di dead reckoning e le posizioni di riferimento cresce come atteso durante il percorso eseguito dall'utente. In particolare, è possibile notare un errore massimo di circa 3 m e una variazione sulle stime delle posizioni dello stesso ordine di grandezza nei diversi test. Questo evidenzia il fatto che il dead reckoning può risultare utile quando supportato da un altro sistema di navigazione indoor come quelli descritti nella sezione precedente, in modo tale da allineare le misure di posizione ogni qual volta si raggiungono delle specifiche posizioni già referenziate.

Riferimenti bibliografici

- [1] Guoqiang Mao e Bar Fidan, "Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks. Information Science Reference", 2009.
- [2] Ahmed El Rabbany, "Introduction to GPS - The Global Positioning System", Artech House Mobile Communications Series, 2002.
- [3] Guoqiang Mao e Bar Fidan, "Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks", Information Science Reference, 2009.
- [4] Martin Eladio et al, "Positioning Technologies in Location-Based Services", in Location-Based Services Handbook - Applications, Technologies, and Security, Taylor e Francis Groups, 2011.
- [5] Liu Yunhao e Yang Zheng, "Location, Localization, and Localizability – Location awareness Technology for Wireless Networks", Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2011.
- [6] Cristiano Monti et al, "Indoor Localization System based on Wireless Sensor Networks", in: The Fifth IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (2009).
- [7] Eximia Srl, cur. Tecnologia RTL Ubisense. 2010. url: www.eximia.it
- [8] André Gunther e Christian Hoene, "Measuring Round Trip Times to Determine the Distance between WLAN Nodes", (2005), pp. 768 –779.
- [9] Patrick Loschmidt, Georg Gaderer e Thilo Sauter, "Clock Synchronization for Wireless Positioning of COTS Mobile Nodes", in Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication. IEEE International Symposium (2007), pp. 64 –69.
- [10] A. Runge, M. Baunach and R. Kolla, "Precise self-calibration of ultrasound based indoor localization systems", 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Guimaraes, 2011, pp. 1-8.
- [11] Paramvir Bahl e Venkata N. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF based User Location and Tracking System", in: INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2000, pp. 775 –784.
- [12] A. Roxin et al, "Survey of Wireless Geolocation Techniques", In Globecom Workshops, IEEE (2007), pp. 1 –9.
- [13] Ekahau. Ekahau Real Time Location System (RTLS) Overview. url: <http://www.ekahau.com/>
- [14] Miguel Rodriguez, Juan P. Pece e Carlos J. Escudero, "In-building location using Bluetooth", 2005.
- [15] A.K.M. Mahtab Hossain et al, "Indoor Localization using Multiple Wireless Technologies", in Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE International Conference (2007), pp. 1 –8.
- [16] M.Ni Lionel et al, "LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID", in Pervasive Computing and Communications, IEEE International Conference, 2003, pp. 407 –415.
- [17] JPaul D. Groves, "Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems", Artech House, 2008.

- [18] Cliff Randell, Chris Djallil e Henk Muller, “Personal Position Measurement Using Dead Reckoning”, in *Wearable Computers*, 2003. Proceedings. Seventh IEEE International Symposium (2005), pp. 166 –173.
- [19] J. W. Kim H. S. Hong J. M. Lee S. H. Shin C. G. Park. “Adaptive Step Length Estimation Algorithm Using Low-CostMEMS Inertial Sensors”, in *IEEE Sensors Applications Symposium* (2007), pp. 1 –5.
- [20] J. B. Kuipers, “Quaternions and rotation sequences: A primer with applications to orbits, aerospace and virtual reality”, 1999.
- [21] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison, and R. Vaidyanathan, “Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm”, in *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 1–7, June 2011.

