

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Specialistica in Informatica

**UNA RASSEGNA DI TECNOLOGIE PER
POSIZIONAMENTO INDOOR**

Relatore:
Chiar.mo Prof.
LUCIANO BONONI

Presentata da:
DANIELE CATELLANI

Sessione 1
Anno Accademico 2016/2017

1. Indice

1. Indice	1
2. Introduzione	4
3. Storia dei dispositivi di posizionamento	5
4. Indoor Positioning System (IPS)	9
5. Metriche di valutazione	11
5.1. Precisione :	11
5.2. Area di copertura:	12
5.3. Scalabilità:	12
5.4. Consumo energetico:	12
5.5. Supporto/infrastruttura:	12
5.6. Usabilità/ user acceptance:	13
5.7. Sicurezza e Privacy:	13
6. Metodologie per determinare la posizione	14
6.1. Trilaterazione:	14
6.2. Triangolazione :	16
6.3. Riconoscimento delle vicinanze (Cell of Origin):	16
6.4. Posizione differenziale:	18
7. Glossario dei termini e delle sigle	19
7.1. Dispositivo Client	19
7.2. Area di posizionamento	19
7.3. Posizione Relativa e Assoluta	19
7.4. RSSI	20
7.5. SNR	20
7.6. LoS/NoLoS	20
7.7. RTT	20
7.8. Onde EM	20
7.9. Shadowing/Assorbimento	21
7.10. Multipath	21
7.11. Fase Offline/Training e fase attiva/online	22
7.12. TOA	22
7.13. TDOA o Multilaterazione	23
7.14. AoA	24
7.15. SLAM	24
8. Catalogazione delle tecnologie IPS	25

8.1. Training based	25
8.2. Stand-Alone:	25
8.3. Infrastructure:	25
8.4. Fenomeni fisici utilizzati:	26
9. Tecnologie:	27
9.1. Radiazioni EM	27
9.1.1. Wifi/WLAN	27
Modelli di propagazione:	28
Fingerprinting:	28
Pro:	29
Contro:	29
Evoluzioni:	30
Riassumendo:	33
9.1.2. UWB	34
ToA/AoA	35
RADAR	35
Fingerprinting	36
Pro:	36
Contro:	36
Riassumendo:	37
9.1.3. Passive Rfid	38
Pro	39
Contro	39
Riassumendo:	40
9.1.4. Lidar	41
Pro	43
Contro	43
Riassumendo:	44
9.1.5. Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons	45
Pro	46
Contro	46
Riassumendo	47
9.2. Luce visibile	48
9.2.1. Modulazione tramite Luce Visibile	48
Evoluzioni:	49
Pro	50
Contro	50

Riassumendo	51
9.2.2. Localizzazione tramite immagini	52
Marker locali	52
Motion Capture	52
Riconoscimento di caratteristiche specifiche dell'ambiente	52
Pro	54
Contro	54
Riassumendo	55
9.3. Campo Magnetico	56
Pro:	58
Contro:	58
Riassumendo	59
9.4. Pressione Atmosferica	60
Evoluzioni:	61
Pro	62
Contro	62
Riassumendo	63
9.5. Acoustic ultrasounds	64
9.5.1. TOF:	64
9.5.2. TDOA:	65
9.5.3. RSSI:	65
Pro	65
Contro	66
Riassumendo	67
9.6. Dead reckoning o navigazione inerziale	68
Pro	71
Contro	71
Riassumendo	72
10. Tecniche di miglioramento a posteriori	73
10.1. Kalman filters	73
10.2. Particles filter	74
11. Conclusioni	78
12. Bibliografia	79
13. Bibliografia Immagini	82

2. Introduzione

Questo documento nasce con lo scopo di catalogare e valutare le tecnologie allo stato dell'arte, attualmente disponibili o in fase di sviluppo, che permettano la localizzazione in interni o in luoghi in cui non è possibile fare affidamento sul segnale GPS.

Tale tecnologia rappresenta una sfida ancora irrisolta per la comunità scientifica e per il mondo dell'industria e servizi; nonostante diversi approcci siano stati ipotizzati o implementati per intaccare il problema, i risultati sono molto disparati.

In questo lavoro ci si è concentrati soprattutto sulle tecnologie applicabili al mondo degli smartphone che, per la sua diffusione di massa, si sta imponendo come guida in queste nuove tecnologie (basti pensare alla diffusione del GPS).

Nel corso del documento verrà esposta una breve storia dei sistemi di posizionamento e localizzazione realizzati durante la storia dell'umanità, passando poi ad illustrare la necessità di tecnologie in grado di funzionare in ambienti interni.

Verranno quindi mostrate le principali tecniche utilizzate per determinare la posizione relativa o assoluta, e verranno elencate le metriche scelte per la valutazione delle tecnologie esaminate e i loro raggruppamenti in macro gruppi.

Seguirà l'analisi delle tecnologie: per ognuna si procederà a spiegare il funzionamento di base, verranno sviscerati i pro e contro e verrà esposto un riassunto generale delle caratteristiche.

Questo lavoro si propone come una guida, per illustrare le migliori tecnologie IPS oggi disponibili e per aiutare un eventuale analista/progettista ad orientarsi verso la tecnologia più adatta alle sue necessità.

3. Storia dei dispositivi di posizionamento

La consapevolezza della propria posizione in relazione al mondo esterno è una delle facoltà più importanti per qualsiasi essere vivente. Grazie a questa informazione è possibile esplorare l'ambiente in modo efficace, potendo tornare a luoghi visitati in precedenza senza perdersi. Questa abilità, innata in molti animali superiori, è stata indubbiamente essenziale per lo sviluppo e per la sopravvivenza di queste specie; è un gran vantaggio infatti riuscire a ritornare in una posizione favorevole per la caccia o ad una tana sicura che possa proteggere da predatori.

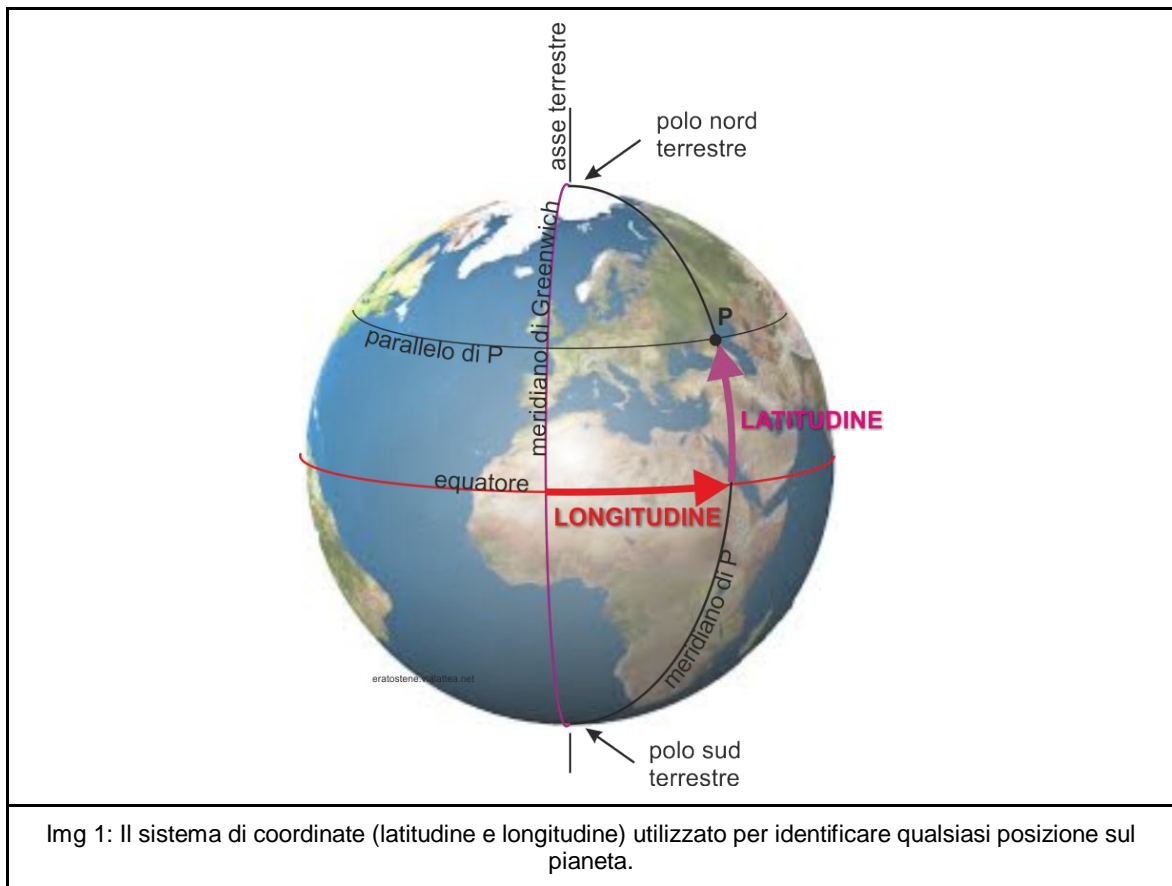
Più si espande il territorio controllato e più diventa difficile ma necessario l'orientamento, e l'uomo ha dovuto inventare e ottimizzare svariate tecniche che gli hanno permesso di ampliare e governare territori grandi come nazioni ed, infine, l'intero pianeta.

A partire dalle capacità innate di orientamento comuni a tutti i primati, l'uomo, quale utilizzatore di utensili, si è piano piano creato un insieme di tecnologie che lo aiutassero nell'impresa; ma arrivare ad ottenere degli strumenti di posizionamento affidabili e precisi è stato un percorso lungo e ramificato che ha attraversato vari approcci e diverse fasi, dalla sfida del posizionamento marittimo del XVI secolo fino alle costellazioni di satelliti degli anni '80.

Al di là dell'orientarsi sulla terra ferma, dove i punti di riferimento sono molteplici, la prima vera sfida è nata con la navigazione marittima lontano dalla costa. In mare infatti non esistono punti di riferimento evidenti, e sapere calcolare la propria posizione può fare la differenza tra la vita e la morte, permettendo di evitare errori di rotta e naufragi.

Nei secoli sono stati concepiti svariati sistemi che permettono l'orientamento marittimo, partendo dall'utilizzo della posizione relativa degli astri (stelle, luna e sole) che periodicamente appaiono in posizioni fisse o l'impiego del campo magnetico (bussole).

La posizione assoluta sulla superficie terrestre viene misurata in latitudine e longitudine: la prima rappresenta la distanza dal punto più vicino sulla linea dell'equatore mentre la seconda rappresenta la distanza da un meridiano di riferimento (chiamato meridiano 0 o di Greenwich, in nome del paese inglese che attraversa).



E' importante notare che esiste un legame strettissimo tra la precisione nella misurazione del tempo e la precisione di localizzazione: infatti la quasi totalità dei sistemi sviluppati per risolvere la posizione si basano sulla misurazione di un intervallo di tempo; quindi più sarà preciso lo strumento di misurazione del tempo, più precisa sarà la posizione misurata.

Un'ulteriore complicazione è stata introdotta da tecniche che prevedono la concezione di tempo "sincronizzato"; dove per sincronizzazione si intende l'idea che si possa misurare il passare del tempo in modo replicabile, cioè che gli strumenti di misurazione del tempo in due luoghi differenti leggano il passare del tempo con lo stesso ritmo, cosa non semplicissima da realizzare con gli orologi del passato.

Ad esempio, se per determinare la propria latitudine è possibile semplicemente misurare l'altezza del sole allo zenit (il punto più alto dell'arco relativo al passaggio del sole nel cielo) mentre per quanto riguarda la longitudine il problema risulta molto più complicato. Una delle tecniche utilizzate prevedeva la misurazione della differenza di tempo che intercorre tra il tramonto in un punto di riferimento e quello osservato nella propria posizione; dal momento che questa tecnica era frequentemente usata in mare aperto, spesso si utilizzava come riferimento il tempo del porto di partenza. Conoscendo la velocità di rotazione della terra è possibile misurare il moto apparente del sole e quindi calcolare quanto ci si è spostati di longitudine rispetto al punto di riferimento.

Ma far sì che un orologio su una nave misuri il tempo correttamente non è un'impresa facile, infatti fino al 17esimo secolo gli orologi più performanti erano quelli a pendolo, che

sfruttano la gravità e l'invarianza del periodo di oscillazione di un pendolo per scandire il tempo.

Nel rollio delle onde del mare in tempesta però questi orologi non era in grado di rimanere sincronizzati con il tempo del punto di riferimento. Vari tentativi di perfezionamento sono stati fatti ma fu solo verso la fine del 17esimo secolo che un orologiaio inglese di nome John Harrison riuscì nell'impresa di costruire un orologio in grado di mantenere lo scandire dei secondi con una sincronizzazione sufficiente per garantire una buona risoluzione della posizione.

Un'altra scoperta essenziale è stata quella del campo magnetico, fenomeno naturale, la cui scoperta e studio ha permesso la costruzione delle bussole.

La paternità dello strumento viene fatta risalire ad un dinastia cinese vissuta tra il 200 a.c e il 200 d.c. ma si diffonderà in europa solo 10 secoli più tardi. Si pensa che queste prime proto-bussole , create a partire da schegge di magnetite (un minerale magnetico) sospese in acqua, venissero usate come spettacolo magico e solo successivamente siano state apprezzate per la loro funziona più utile: mostrare la direzione del nord magnetico.

Grazie alle bussole è diventato possibile sapere, con una precisione senza precedenti e in qualsiasi condizione, la direzione lungo la quale si sta viaggiando.

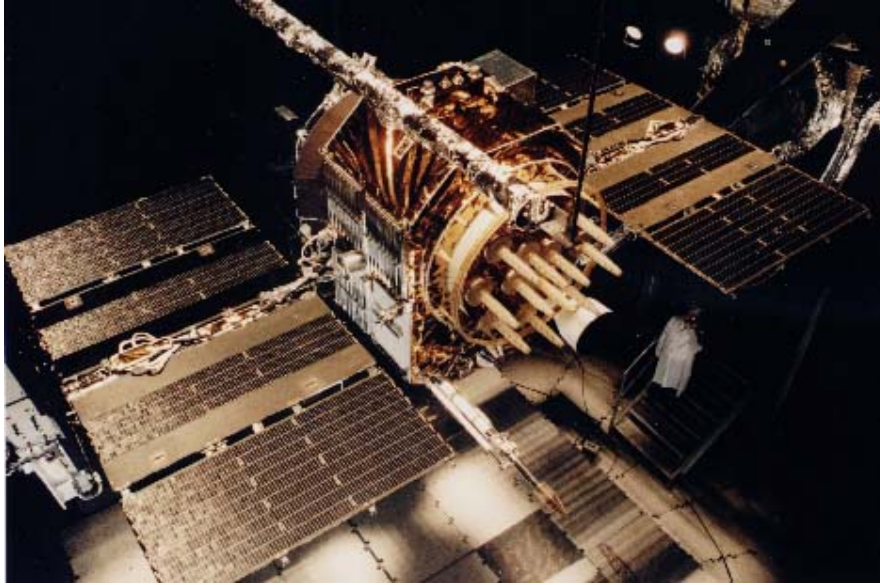
Sul fronte della precisione temporale invece gli orologi hanno continuato a raffinarsi e diventare più precisi, ma le cose sono rimaste pressoché invariate fino al XIX secolo. Solo grazie allo sviluppo dell'elettronica, infatti, si è arrivati a costruire orologi al quarzo, strumenti che marcano il tempo grazie al periodo di oscillazione costante di cristalli di minerale stimolati elettricamente.

In tempi più recenti, a partire dal 1949, abbiamo la creazione di orologi atomici, basati sul decadimento di atomi radioattivi. Questi sistemi, decisamente ingombranti e quindi difficilmente trasportabili, arrivano ad accuratezze incredibili: i primi esemplari perdevano solo 10-9 secondi al giorno mentre nel 2015 ne è stato inaugurato un modello che prevede la perdita di un secondo ogni 15 miliardi di anni, che è più dell'attuale età stimata dell'universo.

Grazie a questa rinnovata precisione temporale è stato possibile compiere il passo avanti più grande di tutti: verso l'inizio degli anni '80 è stata costruita e lanciata la costellazione del GPS (Global Positioning System), un insieme di satelliti (ad oggi 32) sparsi in orbita media intorno alla terra che trasmettono costantemente l'orario del proprio orologio atomico e le informazioni riguardanti la propria orbita.

Il GPS si è imposto come standard nel posizionamento globale rendendo possibile la localizzazione a chiunque in tempo reale e in maniera economica.

Attualmente sono in fase di costruzione altre due costellazioni simili: il progetto dell'ESA, Galileo, composto da 30 satelliti e atteso per il 2020; e la controparte russa, GLONASS, un insieme di 24 satelliti che dal 2011 permettono il posizionamento sull'intero suolo russo.



Img 2: Uno dei 32 satelliti che compongono la costellazione del GPS

Grazie ai sistemi di navigazione globale satellitare (o GNSS, global navigation satellite system) e alla miniaturizzazione dell'hardware è stato possibile costruire dispositivi che permettessero la localizzazione sempre più compatti e portatili, al punto che attualmente ogni smartphone possiede un ricevitore GPS tramite il quale è in grado di determinare la propria posizione.

Data questa diffusione, negli ultimi anni il posizionamento ha assunto un'importanza che va oltre la "semplice" navigazione: sono nati servizi, raggruppati sotto il nome di Location-Based Services (LBS), che utilizzano il posizionamento per fornire informazioni aggiuntive o migliorare la precisione dei dati forniti; come ad esempio applicazioni che permettono di conoscere quali attrazioni o ristoranti sono nelle nostre vicinanze.

Sono stati create applicazioni e giochi in Augmented Reality, che permettono di sovrapporre a quanto si sta inquadrando con la propria telecamera informazioni aggiuntive sul luogo in cui ci si trova; esistono piattaforme che grazie alla condivisione in tempo reale della posizione riescono a calcolare il traffico stradale e consigliare il percorso migliore, o addirittura sistemi pubblicitari che sfruttano la posizione dell'utente per proporre pubblicità mirate.

L'informazione della posizione negli ultimi anni si sta trasformando da un bisogno di sopravvivenza ad un vero e proprio business.

4. Indoor Positioning System (IPS)

Sebbene le tecnologie di GNSS (GPS e i suoi successori/concorrenti) sembrano rappresentare le tecnologie definitive per garantire il posizionamento, questi sistemi in realtà soffrono di un grave problema: basandosi su trasmissioni radio provenienti da satelliti (su una frequenza vicina ai 1500 MHz) purtroppo subiscono un pesante fenomeno di assorbimento qualora ci si trovi all'interno di edifici o in situazione in cui parte del cielo non è visibile. Essendo praticamente impossibile riuscire a ricevere il segnale GPS in interni, o almeno non con precisioni accettabili, la comunità scientifica si è trovata di fronte ad una nuova sfida: trovare un sistema efficiente e affidabile per ottenere la posizione in interni o comunque in ambienti in cui non è possibile fare affidamento sul GPS.

Avere un sistema affidabile che sia in grado di fornire la posizione in interni potrebbe portare a numerosi miglioramenti nella vita di tutti i giorni: sarebbe ad esempio un aiuto incredibile per le persone con deficit visivi, che con questa tecnologia potrebbero riuscire ad orientarsi anche in posti sconosciuti in maniera molto più efficace.

In un supermercato o un magazzino potrebbe permettere l'utilizzo di applicazioni di navigazione che, impostato un certo prodotto, ci guidi passo passo verso la corsia e scaffale dove questo si trova; o ancora all'interno di un museo si potrebbero creare audioguide che in base alla nostra posizione propongano contenuti contestualizzati. Un'altra possibile funzionalità importante è quella della navigazione autonoma; si potrebbe realizzare un sistema che permetta di migliorare l'efficienza delle automobili a guida automatica permettendo, ad esempio la navigazione in parcheggi interrati fino al più vicino posteggio disponibile. Nell'industria possiamo facilmente immaginare che, grazie ad un sistema di localizzazione in interni affidabile, potrebbero nascere magazzini completamente automatizzati ad alta produttività.

Un altro utilizzo importante potrebbe essere quello applicato alle persone in difficoltà e ai mezzi di soccorso: in caso di emergenze o se intrappolate in edifici in fiamme la posizione di chi è in difficoltà potrebbe essere condivisa con i mezzi di soccorso per garantire un intervento più rapido e preciso.

Nell'edilizia e architettura questa tecnologia permetterebbe il monitoraggio in tempo reale delle deformazioni subite da ponti o edifici fornendo le informazioni per anticipare eventuali cedimenti strutturali.

Si possono pensare applicazioni anche a campi più "frivoli", come quello della domotica e dell'automazione casalinga dove una casa intelligente potrebbe, in base alla posizione e ai movimenti dell'utente, prevedere le esigenze dell'abitante; possiamo immaginare che mentre ci stiamo spostando per cambiando stanza, le luci di quest'ultima si accendano automaticamente prima del nostro ingresso, oppure un sistema audio distribuito grazie al quale la musica riprodotta ci segua tra le varie stanze mentre ci spostiamo.

Per non parlare poi delle potenziali svolte nel campo dell'intrattenimento, con la creazione di giochi in cui la nostra posizione viene riconosciuta e utilizzata per far muovere un nostro avatar nel mondo virtuale.

Considerando tutte queste potenzialità non è difficile capire perché si stia svolgendo tanta ricerca e si stiano spendendo tante energie per riuscire a sviluppare una tecnologia in grado di garantire il posizionamento in interni.

Ad oggi sono state messe a punto tecnologie che riescono nell'impresa di localizzare oggetti o persone in interni in maniera accurata, ma purtroppo questo avviene grazie ad

hardware altamente specializzato e piuttosto costoso, ed a sensori che devono però essere posizionato preventivamente all'interno di un ambiente ristretto; tali sistemi raggiungono anche precisioni sub-millimetriche ma a discapito di usabilità, costo e scalabilità.

La vera sfida, che rimane ancora aperta, è lo sviluppo di un sistema di posizionamento che sia relativamente economico (sia per utente che per il gestore), poco esigente nel suo mantenimento e in grado di scalare con il minor impatto possibile.

Per garantire una diffusione simile a quella che ha avuto il GPS in passato queste caratteristiche sono essenziali: senza di esse qualsiasi tecnologia sviluppata non arriverà mai ad una diffusione capillare ed ad imporsi come uno standard.

La strada più promettente, da questo punto di vista, sembra essere quella di utilizzare gli smartphones come dispositivo client (ovvero di rilevazione da parte degli utenti). Oggi infatti la maggior parte della popolazione (quantomeno negli stati più sviluppati) dispone di un telefono con elevate capacità di calcolo e, quello che più conta, svariate tecnologie di sensori inclusi nell'apparecchio.

Tutti i dispositivi più moderni infatti contengono una rilevatore di campo magnetico (bussola) e un accelerometro a 3 assi (che permette di determinare l'accelerazione a cui il dispositivo è sottoposto), mentre alcuni telefoni sono anche dotati di giroscopio e di barometro.

Immane poi ormai sono il ricevitore per le comunicazioni wireless (802.11 Wifi e 802.15 bluetooth) che garantiscono anche una fonte di connettività verso altri componenti o la rete internet.

Oltre a questa pletora di sensori un'altra caratteristica importante è costituita dal fatto che questi dispositivi siano costantemente collegati alla rete, garantendo così la possibilità di recuperare dati essenziali al posizionamento raccolti in un momento precedente e di trasmettere informazioni sulle letture attuali dei sensori del dispositivo, consentendo così di decentrare la complessità di calcolo verso datacenter o strutture predisposte.

In generale le tecnologie che sono analizzate in questo lavoro sono orientate verso sistemi di posizionamento che possono sfruttare i sensori degli smartphones in modo da mantenere bassi i costi di implementazione e privilegiando i sistemi che riescono a minimizzare il consumo energetico.

5. Metriche di valutazione

Come vedremo nelle prossime sezioni, il mondo dell'IPS è popolato da moltissimi approcci e tecnologie, anche molto diverse tra loro, ognuna delle quali è stata sviluppata per una certa esigenza e, solitamente, ha attributi che la rendono preferibile secondo certi aspetti e carenze o limiti legati alla sua stessa natura.

Per riuscire a comprendere quale di queste tecnologie sia la migliore (se esiste) o la più utile da applicare in un certo contesto, è necessario creare delle metriche secondo le quali valutare ogni tecnologia.

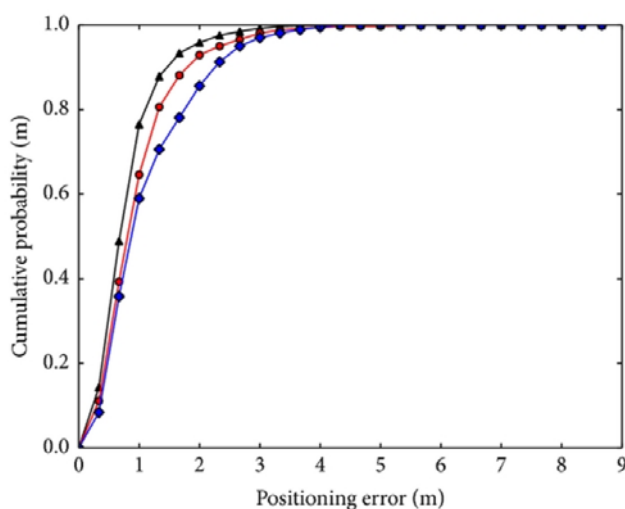
Queste metriche sono state scelte appositamente per coprire sia le complessità tecniche sia la facilità di diffusione sul mercato di massa e grazie ad esse risulterà più pratico comprendere quali siano gli aspetti più brillanti e i punti deboli degli approcci analizzati, riuscendo quindi a selezionare quello che più si adatta ai vincoli e ai requisiti richiesti dall'implementatore.

Spesso nella ricerca e sviluppo di nuovi sistemi di posizionamento si è puntato a riempire nicchie con esigenze specializzate; non è pertanto incomune trovare tecnologie che eccellono in un certo parametro ma risultano scarse sotto altri punti di vista (come ad esempio sistemi molto accurati ma con una copertura molto bassa).

L'importante è comprendere i punti di forza e l'applicazione per la quale è stata realizzato l'approccio esaminato.

5.1. Precisione :

Rappresenta la valutazione della differenza media tra la posizione rilevata e la posizione effettiva (ground truth). Come vedremo, nella quasi totalità delle tecnologie questo valore non è fisso ma oscilla in relazione a svariati parametri e verrà perciò espresso in precisione minima e massima. Questi dati sono l'interpretazione semplificata di una rappresentazione standard utilizzata per valutare la precisione di una tecnologia, i grafici CDF (Cumulative Distribution Function) che rappresentano la distribuzione di probabilità della quantità di errore nella localizzazione.



Img 3: Un grafico CDF rappresenta la distribuzione stocastica dell'errore in precisione (la distanza tra la posizione misurata e quella reale)

Grazie ad essi è possibile rendersi conto di quanto una determinata tecnologia sia “stabile”, ovvero per quanta percentuale del tempo di utilizzo fornisca una posizione accurata o meno.

5.2. Area di copertura:

Questo parametro indica la superficie utile all'interno della quale la tecnologia esaminata risulta efficace. In caso di tecnologie difficilmente o non scalabili questo valore rappresenta la superficie locale massima coperta, mentre nel caso di applicazione di tecniche che riescono a scalare (aumentando il loro livello di copertura) verrà rappresentata la distanza o l'area che può essere coperta da una singola cella.

Come vedremo questo parametro varierà di molto tra gli approcci esaminati e spesso al suo crescere si abbasserà la precisione della misurazione.

5.3. Scalabilità:

Per scalabilità si intende la facilità con cui la tecnologia può essere estesa, intendendo sia l'area di copertura che il numero degli utenti supportati contemporaneamente.

Quasi tutti i sistemi analizzati sono limitati nello spazio o nel numero di dispositivi che possono servire. Per superare questo limite è necessario estendere il sistema originale (aggiungendo ad esempio trasmettitori per coprire aree precedentemente irraggiungibili dal segnale), la qual cosa non sempre risulta fattibile o facile da implementare.

5.4. Consumo energetico:

Dal momento che stiamo considerando dispositivi elettronici portatili risulta ovvio che questi saranno alimentati da qualche tipologia di batteria. Ognuno di questi dispositivi avrà perciò un proprio budget energetico e, più risulterà basso l'impatto della tecnologia di posizionamento, maggiore sarà il tempo in cui quest'ultima potrà essere utilizzata prima di drenare la carica del dispositivo.

Se consideriamo dispositivi multifunzione (come ad esempio gli smartphones) il parametro di consumo energetico risulta ancora più importante per l'utente, in quanto il più rapido scaricamento della batteria andrà a discapito anche dell'autonomia di tutte le altre funzioni del dispositivo (telefonate, connettività etc..)

5.5. Supporto/infrastruttura:

Questa metrica rappresenta cosa è necessario al sistema per operare, ovvero se sono necessarie apparecchiature hardware specifiche o funziona grazie ad un semplice smartphone e se, come molte delle tecnologie che vedremo, fa affidamento sull'integrazione di un'infrastruttura collocata nell'area di localizzazione, come ad esempio sensori o trasmettitori di qualsiasi tipo.

Ovviamente la densità e il costo di queste infrastrutture aggiuntive grava sulla capacità di espansione delle tecnologia se, per coprire aree più vaste, si rende necessario l'utilizzo di più nodi dell'infrastruttura.

5.6. Usabilità/ user acceptance:

Questo è forse il parametro che fra tutti risulta più importante all'espansione delle tecnologia sul mercato: esso rappresenta infatti quanto la tecnologia risulta comoda e utilizzabile all'utente finale.

Meno invasiva, trasparente e autoconsistente (ovvero non necessita di sensori specializzati o di un'infrastruttura mantenuta dall'utente) sarà una tecnologia, più facile sarà che gli utenti la trovino utilizzabile e utile, rendendola così appetibile alla diffusione di massa sul mercato consumer.

5.7. Sicurezza e Privacy:

Un aspetto che, durante le prime concitate fasi della ricerca della tecnologia migliore, viene spesso considerato secondario è quello della sicurezza intrinseca della tecnologia. Questa metrica è stata scelta per fornire indicazioni su quanto sia facile/difficile che qualcuno possa modificare il sistema per averne vantaggio o solamente per recare danno, e risponde a domande come "chi ha accesso all'informazione sulla nostra posizione?".

6. Metodologie per determinare la posizione

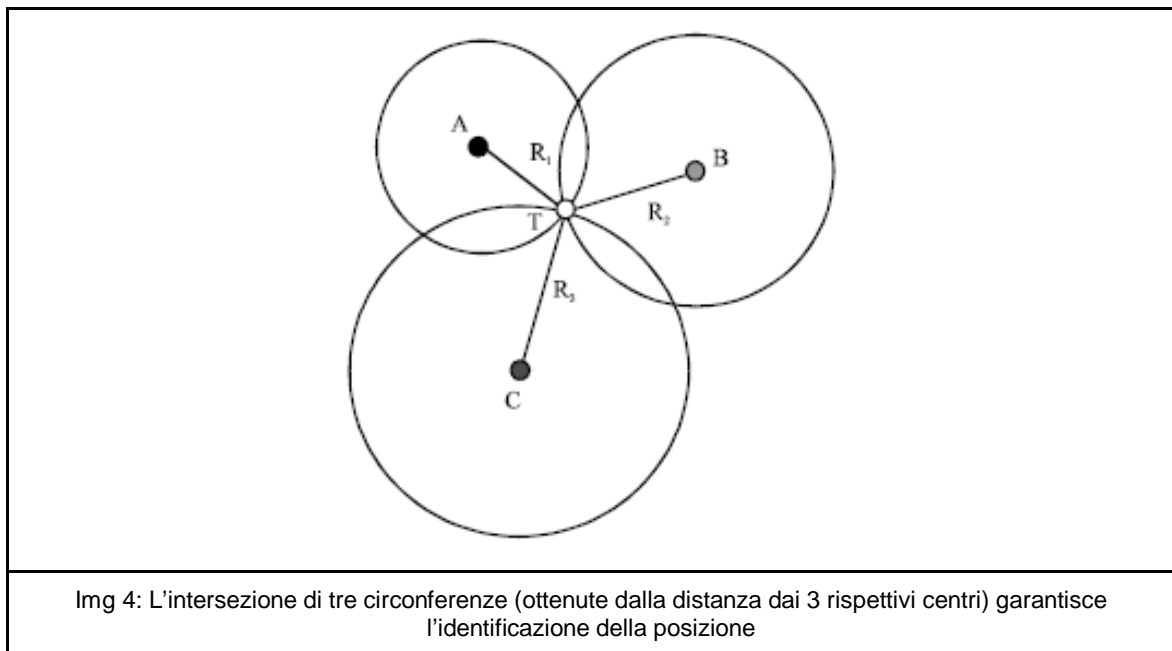
Prima di parlare di quali tecnologie sono state ideate finora è necessario comprendere quali fenomeni siano stati sfruttati per riuscire a determinare la posizione degli utenti. Queste tecniche sono state ideate nel corso dei secoli da matematici e ingegneri e utilizzate in moltissimi campi tra cui anche il posizionamento in ambienti esterni, e solo ultimamente sono state adattate e utilizzate dalle tecnologie di IPS.

Tutte le tecnologie che vedremo utilizzano approcci diversi per riuscire a determinare distanze o angoli o ancora caratteristiche ambientali da usare come input di queste equazioni.

6.1. Trilaterazione:

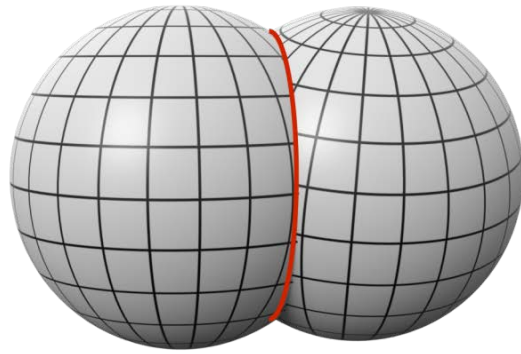
Questa tecnica utilizza la misurazione della distanze da almeno 3 differenti punti fissi la cui posizione sia nota (4 in caso di posizionamento in 3 dimensioni).

Per ognuna di queste distanze è possibile limitare la nostra posizione, ancora sconosciuta, ad una circonferenza di punti, e intersecando a sistema le tre circonferenze così create è possibile identificare in maniera univoca la nostra posizione.

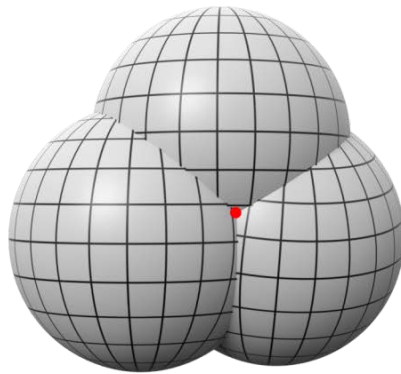


Questa tecnica è la più usata in assoluto all'interno di tutte le tecnologie, in quanto la maggior parte di esse è strutturata per ricavare in qualche modo le misure di distanza da punti noti.

In caso di posizionamento in 3 dimensioni è necessario un punto aggiuntivo in quanto dalla singola distanza tra la nostra posizione quella di uno dei punti verrà creata una sfera di posizioni ipotetiche, ed è necessario intersecare 4 sfere per poter determinare una posizione univoca nello spazio tridimensionale.



When two spheres intersect, the intersection creates a circle (red).

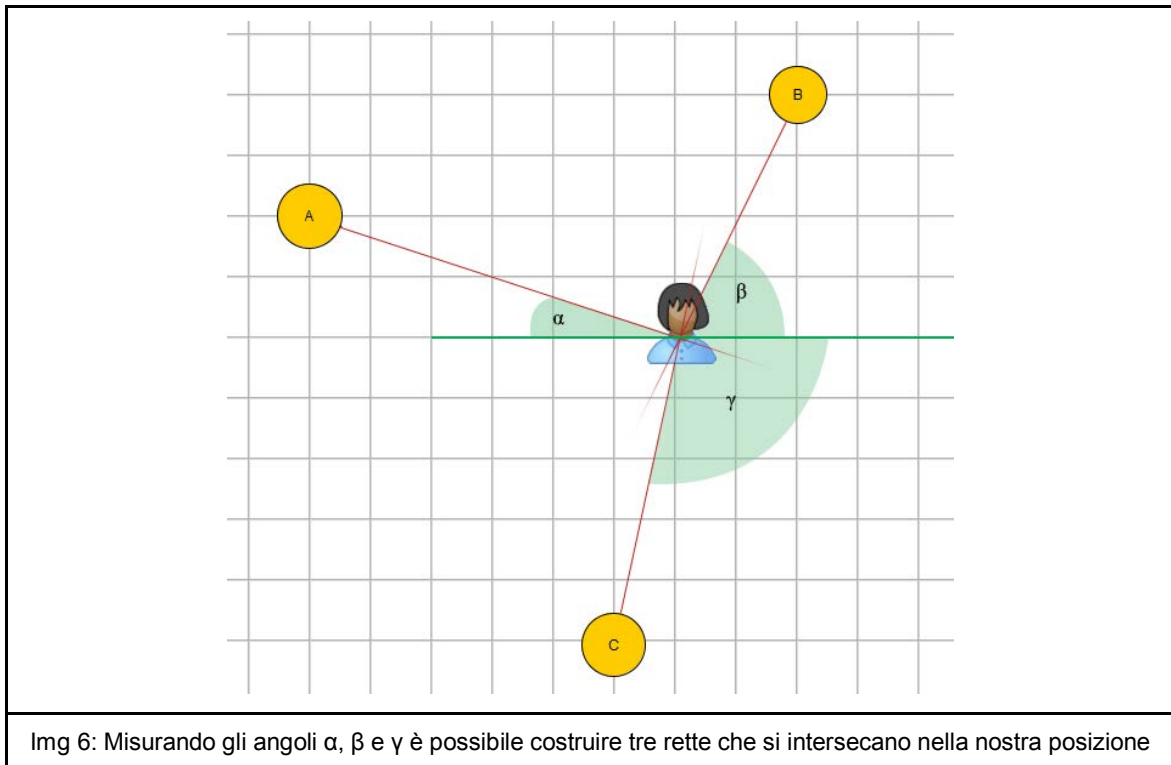


When three spheres intersect, there are only two points common to all three spheres (one each side).

Img 5: Nel caso tridimensionale sono necessarie 4 distanze perché da ognuna di esse è possibile generare una sfera, ed è necessaria l'intersezione di 4 di esse per determinare un singolo punto.

6.2. Triangolazione :

Nota anche come multi-angolazione, questa tecnica è molto simile alla precedente e si basa sulla misurazione degli angoli relativi tra la nostra posizione e punti fissi distinti di cui conosciamo la posizione relativa. Grazie alle proprietà dei triangoli è possibile determinare univocamente la nostra posizione: conoscendo l'ampiezza dell'angolo tra il punto di riferimento è possibile tracciare la retta che passa per quel punto con la data inclinazione; ripetendo l'operazione per tutti i punti ci ritroveremo con rette che si intersecano esattamente nella nostra posizione.



Img 6: Misurando gli angoli α , β e γ è possibile costruire tre rette che si intersecano nella nostra posizione

6.3. Riconoscimento delle vicinanze (Cell of Origin):

Il modo più intuitivo per stabilire la propria posizione è stabilire dei punti di riferimento che siano il più possibile univocamente riconoscibili, in modo che si possano identificare in un secondo momento qualora ci si trovi nelle loro vicinanze.

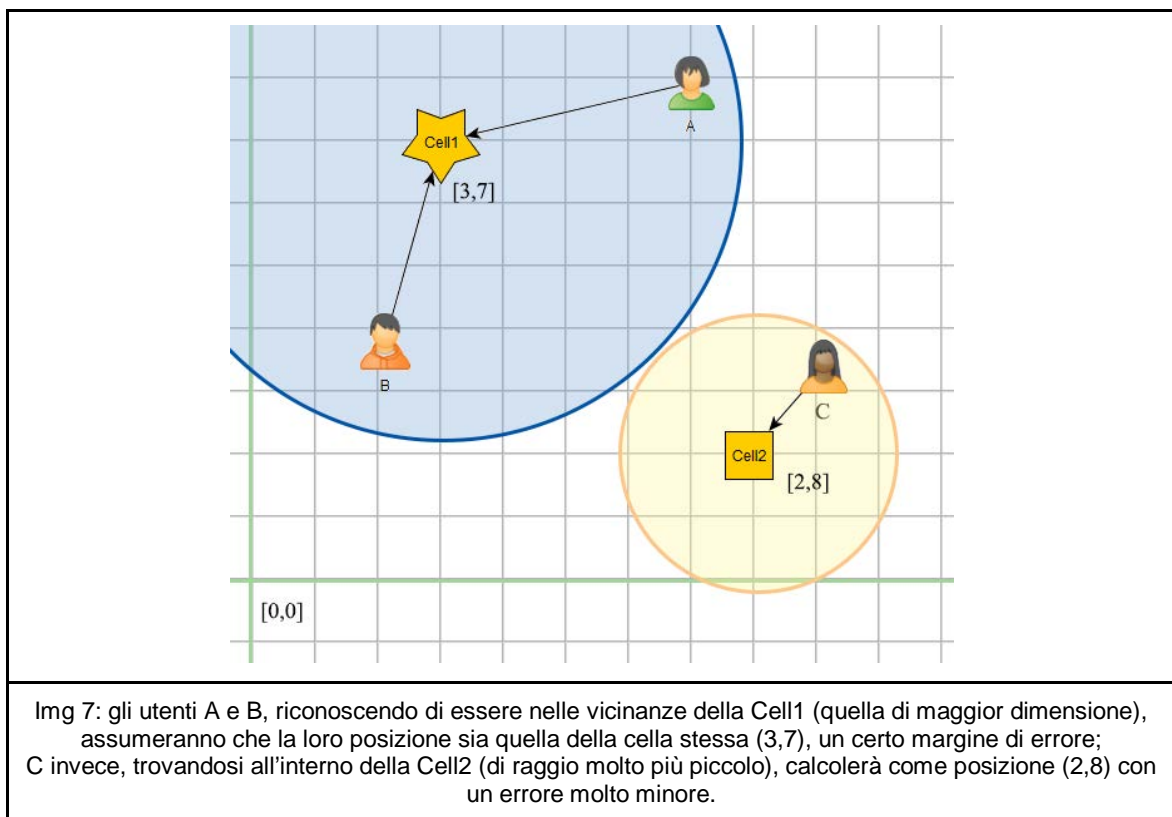
Questo approccio è quello più comunemente utilizzato, in maniera istintiva dalla maggior parte degli animali, uomo compreso in quanto non si basa su calcoli matematici ma sul riconoscimento di elementi caratteristici dell'ambiente.

Nel mondo dell'IPS questo concetto è stato esteso oltre al semplice riconoscimento visivo di luoghi fisici particolari, generalizzandolo al riconoscimento di determinate caratteristiche locali, specifiche di una certa posizione nell'ambiente (come ad esempio la presenza o meno di un determinato segnale radio, o il riconoscimento di una certa immagine, come un codice QR) per poter così assumere che la propria posizione sia nei dintorni di questo luogo noto.

Esiste un legame implicito tra il tipo di caratteristica utilizzata e la precisione dell'identificazione della posizione legata al riconoscimento di questo luogo.

Prendiamo per esempio il caso di un riconoscimento visivo: data la dimensione dell'oggetto e la risoluzione del dispositivo di acquisizione video è possibile porre un limite superiore alla distanza oltre la quale risulta impossibile identificare il nostro "punto di riferimento"; nel caso in cui la peculiarità utilizzata sia un segnale radio invece possiamo calcolare, conoscendo l'intensità del segnale alla sorgente e utilizzando opportuni modelli di propagazione, la distanza massima a cui questo risulta captabile dall'antenna di un eventuale dispositivo client.

Il riconoscimento di queste caratteristiche, proprio per la natura delle stesse, rende la precisione di questa tecnica molto variabile, in quanto più è grande il raggio di caratterizzazione più sarà facile trovarsi al suo interno ma parallelamente meno precisa sarà l'informazione sulla posizione: in quanto tutti i luoghi che ricevono questo segnale vengono identificati con la posizione della sorgente; viceversa una posizione caratterizzata da una proprietà che sia determinabile in un'area ristretta risulterà più precisa ma sarà meno probabile il fatto che ci si trovi proprio nel suo intorno.



Questo tipo di tecnica è anche nota con il nome di "Cell Of Origin" in quanto comunemente usata nelle trasmissioni radio a copertura cellulare (come nelle tecnologie UMTS/GSM) per determinare la posizione grazie alla posizione dell'antenna di terra.

Per aumentare il livello di precisione è possibile caratterizzare questo "punto di riferimento" utilizzando il maggior numero di informazioni disponibili su di esso: usando più parametri contemporaneamente sarà più difficile che due punti abbiano tutti questi parametri a valori simili; e diventa perciò più facile determinare univocamente il punto esatto nel quale ci si trova.

Risulterà quindi più sicuro aumentare la densità del campionamento di questi punti di riferimento senza correre il rischio di confonderli uno con l'altro, aumentando così a tutti gli effetti la precisione della nostra localizzazione.

Le tecnologie che usano questo approccio sono ad esempio quelle che utilizzano il "Fingerprinting", analizzate nel dettaglio nei prossimi capitoli, che si basano sulla catalogazione di informazioni (solitamente i segnali radio ricevuti) in svariati punti dell'area interessata.

6.4. Posizione differenziale:

Questo approccio è particolarmente diverso dai precedenti; infatti, mentre le altre tecniche sono incentrate sul calcolo della posizione a posteriori (ovvero nel determinare la localizzazione della nostra attuale sconosciuta posizione), questo approccio lavora a priori, permettendo di stimare la nostra localizzazione a partire dalla nostra precedente posizione nota e dall'entità dello spostamento effettuato.

Tramite svariate tipologie di sensori, approfondite nel paragrafo dedicato alla "navigazione inerziale", è possibile misurare la direzione e la distanza di un spostamento; grazie a queste informazioni e assumendo di conoscere a priori la nostra posizione iniziale, risulta facile calcolare la posizione finale dello spostamento.

Questa tecnica è tra le più antiche utilizzate nella navigazione marittima, dove l'assenza di punti di riferimento rende gli altri approcci limitati o inutilizzabili.

7. Glossario dei termini e delle sigle

Questo capitolo è dedicato alla spiegazione delle principali sigle che verranno utilizzate all'interno di questo documento, siano esse acronimi o sigle, che rappresentano nomenclatura tecnica, algoritmi o tecnologie legate al mondo del posizionamento.

7.1. Dispositivo Client

Con questo termine si intende lo strumento che l'utente finale utilizza per cercare di determinare la propria posizione; normalmente questo è un dispositivo mobile che si sposta con l'utente, può essere uno strumento attivo o passivo (in base alla tecnologia utilizzata) nella determinazione della posizione e funge da interfaccia per comunicare all'utente la localizzazione calcolata.

7.2. Area di posizionamento

Dal momento che quasi nessuna tecnologia IPS ha copertura globale, l'area in cui è possibile utilizzare la tecnologia risulta limitata. Spesso questo limite dipende dalla disposizione sull'area di una rete di sensori e altri apparecchi, altre volte questa limitazione è dovuta al fatto che solamente all'interno di quest'area è stato svolto un lavoro di mappatura a priori necessario per la corretta risoluzione della posizione.

7.3. Posizione Relativa e Assoluta

Teoricamente il concetto stesso di posizione non può che essere relativo, in quanto rappresenta la distanza da un punto definito a priori noto come origine; le coordinate (ovvero la posizione) misurate in relazione a questo punto vengono definite come appartenenti a quel "sistema di riferimento", sono cioè valide solo se rapportate al punto d'origine in questione.

Dal momento che non esiste un'origine assoluta, appare immediatamente ovvio che possano essere costruiti infiniti sistemi di riferimento, ognuno con un punto di origine specifico e diverso da tutti gli altri.

Sembra quindi avere poco senso il parlare di posizione assoluta; ma questa in realtà non è tanto intesa in senso spaziale quanto più in senso sociale. Per posizione assoluta si intende infatti un sistema di coordinate condivise tra tutti gli utilizzatori del sistema; ad esempio a livello planetario è stato definito un sistema di coordinate (espresse con la coppia latitudine/longitudine, con l'aggiunta dell'altitudine sul livello del mare in caso di rappresentazioni a 3 dimensioni) con un'origine univoca, definita a priori, che permette di localizzare univocamente qualsiasi luogo posto sulla superficie terrestre.

Quando si parla di posizione relativa ci si riferisce invece ad un sistema di coordinate che non è necessariamente noto (o di interesse) di tutti. Viene considerata relativa, ad esempio, la localizzazione di un client in relazione ad una stazione base; conoscendo distanza e direzione della trasmittente è come se utilizzassimo la posizione di quest'ultima come origine di un sistema di riferimento locale.

Nel momento in cui si conosce la posizione assoluta di un oggetto all'interno del sistema di riferimento relativo, si possono convertire tutte le coordinate all'interno del sistema di riferimento locale in coordinate assolute.

Questo è spesso l'approccio adottato dalle tecnologie IPS che si basano su una infrastruttura la cui posizione assoluta sia nota; tramite la tecnica utilizzata dalla

tecnologia di turno viene calcolata la posizione relativa del dispositivo client nel sistema di riferimento dell'infrastruttura e successivamente è possibile convertirla in una posizione assoluta.

7.4. RSSI

Il Received Signal Strength Indicator è una misurazione che rappresenta l'intensità del segnale in ingresso sull'antenna ricevente; viene misurato in Dbm, una scala logaritmica, e ad un valore più alto corrisponde una trasmissione più forte.

E' importante notare come questo valore sia calcolato dal sistema di ricezione, e come la sua funzione di implementazione sia spesso differente tra i vari produttori di hardware/drivers, rendendo questo parametro di difficile comparazione su hardware differenti.

7.5. SNR

Signal to Noise Ratio rappresenta il livello del segnale in relazione al rumore presente; essendo un rapporto tra segnale / rumore, nel caso in cui assuma valore maggiore dell'unità ci fa capire che l'intensità del segnale trasmesso è più forte del rumore di fondo, e viceversa se minore di uno.

7.6. LoS/NoLoS

Questo è l'acronimo di "Line of Sight" con il quale si intende che esiste un percorso diretto e non ostruito che collega i due punti in questione; quanto si parla di punti con LoS si intende quindi che questi siano direttamente visibili tra loro. Contrariamente, NoLoS fa riferimento a situazioni dove un percorso diretto non è disponibile, ma potrebbe comunque essere possibile effettuare una trasmissione, tramite fenomeni di multipath.

7.7. RTT

Il Round-Trip Time è il tempo che impiega un segnale per viaggiare dalla sorgente alla destinazione e tornare nuovamente a chi lo ha emesso; questo tempo viene spesso utilizzato per derivare la distanza tra i due punti della trasmissione. Se non si parla di un segnale riflesso, allora è possibile definire due componenti, difficilmente separabili, in questa misurazione: il primo è il tempo di volo, ovvero il tempo che il segnale impiega per propagarsi nello spazio, la seconda componente è legata al ritardo introdotto in fase di ricezione, analisi e ritrasmissione del segnale sul nodo di destinazione. Il ritardo introdotto in questa seconda fase non è proporzionale alla distanza tra i nodi e, se non compensato accuratamente, è spesso causa di rumore o di un errore nella misurazione della distanza.

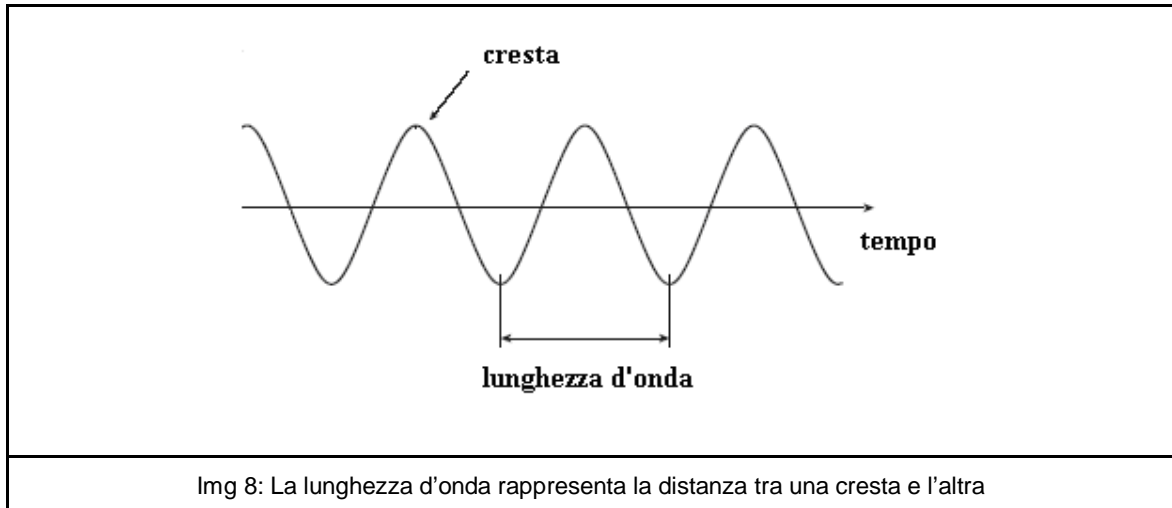
7.8. Onde EM

La maggior parte delle tecnologie che sono state analizzate si basano sulla trasmissione di onde Elettromagnetiche, ovvero radiazioni che causano differenze di potenziale combinate nel campo elettrico e magnetico.

Fanno parte di questa categoria tutte le comunicazioni che sfruttano una qualche modulazione (di ampiezza, volume e fase) per codificare un contenuto sulla portante

dell'onda, come ad esempio le trasmissioni WiFi (802.11), il segnale ricevuto dai satelliti del GPS o la comunicazione di un tag RFID.

Queste radiazioni hanno diverse caratteristiche interessanti, una delle più importanti è la distanza che separa le creste dell'onda all'interno del segnale: essa può essere espressa direttamente con la distanza misurata (in questo caso si parla di lunghezza d'onda) oppure venire rappresentata tramite la frequenza, ovvero il numero di creste d'onda che, viaggiando alla velocità della luce, attraversano un punto fisso ogni secondo.



7.9. Shadowing/Assorbimento

Questo fenomeno, intrinseco alla fisica dei materiali, fa sì che la propagazione di un'onda sia limitata dagli ostacoli che incontra sul suo percorso. In base ad alcuni parametri, tra cui la lunghezza d'onda, la dimensione dell'oggetto e il materiale di cui è fatto, l'ostacolo assorbe parte dell'energia della trasmissione radio diminuendone così l'effettiva portata. Questo fenomeno è la causa principale della scarsa ricezione del segnale GPS in ambienti interni; infatti la frequenza di lavoro del GPS è stata scelta per ottimizzare la trasmissione attraverso l'atmosfera (aria e l'acqua in sospensione) ma viene fortemente assorbita da materiali come il cemento o la ceramica, rendendo la ricezione del segnale in interni pressoché impossibile.

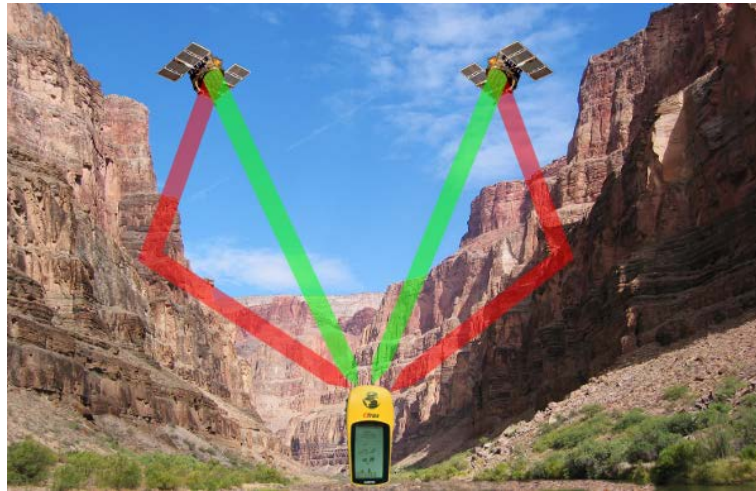
7.10. Multipath

Un altro fenomeno che interessa la propagazione delle onde EM è il multipath o echo; quando una trasmissione colpisce un materiale, in base ad alcune caratteristiche di quest'ultimo è possibile che parte dell'onda venga riflessa.

Questo comportamento è un'arma a doppio taglio nelle comunicazioni radio: da una parte può essere sfruttato per permettere ad un segnale di raggiungere "di rimbalzo" una posizione che non è in LoS rispetto alla trasmittente, ma dall'altro lato è una delle principali cause di rumore.

A seguito di una trasmissione, sul nodo di destinazione verranno ricevuti sia il segnale "diretto" che tutti gli echo dovuti ad effetti di multipath; questi ultimi però, avendo seguito un percorso più lungo a causa dei propri "rimbalzi", arriveranno fuori fase rispetto alla portante creando così rumore aggiuntivo.

Le trasmissioni UWB, che vedremo più avanti, sono più immuni a questo fenomeno e anzi possono sfruttare queste informazioni per migliorare la precisione delle precisioni ricavate.



Img 9: Il segnale trasmesso può raggiungere il client dopo essere "rimbalzato" contro un ostacolo, creando interferenze distruttive

7.11. Fase Offline/Training e fase attiva/online

Questi termini si riferiscono a due fasi distinte necessarie all'utilizzo di molte delle tecnologie IPS; molti di questi approcci infatti necessitano di una raccolta preventiva di informazioni (siano essi fingerprint, survey visivi o altro) essenziale per il futuro funzionamento del sistema.

Durante una prima fase, detta "offline", chi è addetto alla manutenzione/creazione dell'impianto di posizionamento deve condurre una visita dell'area interessata e, per più punti possibile del territorio, registrare in un database alcune caratteristiche (legate alla tecnologia utilizzata) intrinseche di ogni posizione.

Una volta ultimata questa esplorazione è possibile passare alla seconda fase, nota come "online", che rappresenta l'effettiva utilizzo della tecnologia da parte degli utenti; questi ultimi solitamente attingono informazioni dai sensori del loro dispositivo client e le confrontano con quelle registrate nel database nella prima fase, ricavandone così la propria posizione.

E' importante far notare che la creazione di questa mappa "offline" è un'operazione spesso esosa in termini di tempo, e che per alcune tecnologie questi dati devono essere aggiornati periodicamente.

7.12. TOA

Con Time of Arrival si intende il calcolo del tempo di volo, ovvero il tempo che intercorre tra la partenza e l'arrivo a destinazione di un segnale.

Per poter determinare questa quantità è necessario conoscere il tempo al momento della partenza, in modo che quando il segnale sarà ricevuto sarà possibile calcolare l'effettivo tempo di intercorso.

In base alla tecnologia utilizzata per la trasmissione esistono svariati sistemi che permettono di risalire al ToA, il più semplice dei quali consiste nel codificare il tempo di

trasmissione all'interno del messaggio stesso (timestamp); questo approccio però ha il grosso difetto di richiedere che trasmittente e ricevente siano sincronizzati, cosa non sempre facilmente fattibile.

Conoscendo la velocità di propagazione del segnale e il ToA è possibile calcolare la distanza percorsa dalla trasmissione e quindi desumere la posizione ipotetica della trasmittente sulla circonferenza che ha centro sulla ricevente e raggio uguale alla distanza misurata.

7.13. TDOA o Multilaterazione

Con la tecnica nota come Time Difference Of Arrival vengono misurati i tempi di arrivo di vari segnali di riferimento, e dalla differenza di queste misurazioni è possibile determinare la propria posizione.

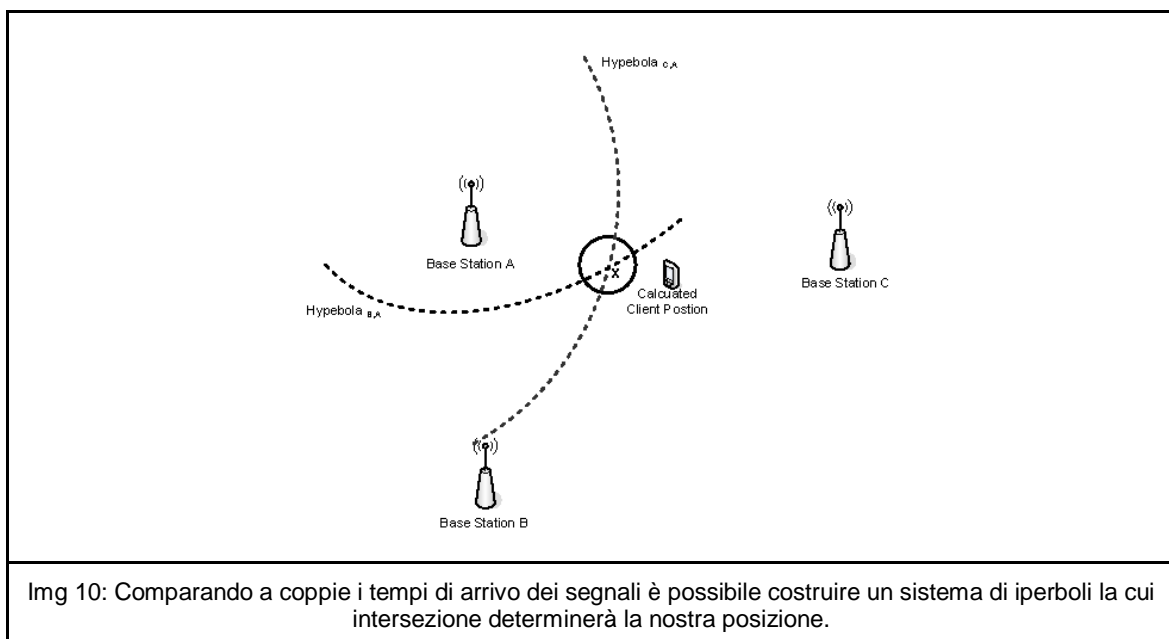
I requisiti necessari perché questa tecnica sia applicabile sono:

- che si riceva il segnale da almeno 3 trasmittenti (o 4 in uno spazio tridimensionale) sincronizzate tra loro in modo da trasmettere tutte contemporaneamente;
- che sia possibile identificare quale stazione ha emesso il segnale;
- che sia nota la posizione relativa delle varie trasmittenti;

A differenza del ToA i messaggi trasmessi non veicolano un timestamp in quanto la differenza nel tempo di ricezione è già un'informazione sufficiente a garantire a localizzazione.

Dal momento che la velocità di propagazione del segnale è costante (almeno per tutti i nodi trasmittenti utilizzate in questa tecnica) è possibile calcolare la differenza di distanza relativa tra due trasmittenti misurando il tempo che intercorre dalla ricezione dei relativi segnali.

Questa Informazione ci permette di restringere la nostra posizione ad una curva iperbolica (composta da infiniti punti), e per determinare la nostra posizione esatta sarà necessario ripetere la misurazione con altre coppie di segnali in modo da intersecare il set di curve ottenute e ottenere un singolo punto.



Img 10: Comparando a coppie i tempi di arrivo dei segnali è possibile costruire un sistema di iperboli la cui intersezione determinerà la nostra posizione.

7.14. AoA

L'Angle of Arrival è una tecnica utilizzabile nel caso in cui il client disponga di più di due antenne.

Tramite il confronto dei tempi di ricezione di uno stesso segnale da parte di almeno tre sistemi di ricezione è possibile determinare la direzione relativa da cui questo segnale è stato trasmesso.

E' possibile iterare questa misurazione con segnali da più emittenti in modo da poter poi applicare algoritmi di triangolazione.

7.15. SLAM

Questo acronimo sta per "Simultaneous Localization And Mapping" e rappresenta una tecnica, utilizzata moltissimo in robotica, che prevede la creazione della mappa dell'ambiente contemporaneamente alla localizzazione della posizione, senza conoscenze a priori.

E' inutile dire che questo approccio è uno dei più complicati da realizzare, in quanto non sfrutta nessuna infrastruttura o informazione raccolta in precedenza e si propone di determinare la posizione del client all'interno di una mappa che viene costruita e aggiornata mano a mano che l'utente procede con l'esplorazione dell'ambiente.

Questo sistema risulta l'approccio vincente per tutte le applicazioni robotizzate (auto a guida autonoma, rover, droni e altri apparecchi senza conducente) che non hanno vincoli di tempo troppo rigidi sulla propria localizzazione e possono "perdere tempo" ad esplorare l'ambiente; può però anche essere sfruttato per la creazione della mappa durante un'eventuale fase offline (possibilmente tramite le rilevazioni di più utenti, con tecnologie di crowdsourcing) in modo da abbattere i costi di manutenzione di una tecnologia.

Le tecnologie con cui questa tecnica è spesso impiegata sono quelle di riconoscimento visivo o telemetrico (algoritmi come il point cloud, trattati nel capitolo relativo) in quanto sono in grado di rilevare ostacoli alla navigazione meglio di altri approcci.

8. Catalogazione delle tecnologie IPS

Nel corso del tempo varie tecnologie sono state applicate al problema del posizionamento in interni, ognuna delle quali affronta la questione da un diverso punto di vista, sfruttando differenti fenomeni fisici.

Molte di essere però utilizzano approcci simili e possono perciò essere raggruppate secondo alcuni macro gruppi non esclusivi:

8.1. Training based

In questo gruppo ricade la quasi totalità degli approcci sviluppati. Si tratta di tecnologie che prevedono due fasi: in un primo tempo (fase offline) si raccoglie un insieme di dati (chiamato training set) a partire da rilevazioni fatte in vari punti della superficie che si vuole mappare. La mole di questi dati è spesso notevole, perciò essi vengono elaborati e filtrati in modo che il carico nella fase successiva sia il più ridotto possibile.

Nella seconda fase (fase online) l'utente si muove liberamente nella struttura e le rilevazioni effettuate dal suo dispositivo vengono confrontate con i dati del training set, allo scopo di trovare quella che più si avvicina alla lettura attuale.

Come è facile intuire, più sono stabili e distinguibili le informazioni che vengono rilevate durante la fase offline, più accurato sarà il posizionamento nella seconda fase.

Lo svantaggio di questo gruppo di tecnologie è che spesso questa mappa non è stabile nel tempo, e richiede perciò periodici aggiornamenti.

8.2. Stand-Alone:

Ovvero quei sistemi che non fanno affidamento che su se stessi e/o fenomeni naturali onnipresenti per calcolare la localizzazione. Ne sono un esempio l'utilizzo dell'orientamento del campo magnetico (per determinare la direzione del moto) o la pressione atmosferica (per l'altitudine). Spesso queste tecnologie permettono un discreto posizionamento relativo ma, non avendo riferimenti esterni, hanno bisogno di un punto di partenza per trasformare questa posizione da relativa ad assoluta.

8.3. Infrastructure:

Questa classe di tecnologie fa affidamento su componenti (ricevitori, trasmettitori, markers o altro) che devono essere disposti all'interno della struttura, precedentemente all'utilizzo da parte dell'utente.

Questi componenti aggiuntivi hanno spesso il ruolo di "punti di riferimento" la cui posizione è nota a priori o ricavabile da essi stessa, e la cui identificazione permette di calcolare la propria posizione in base alla distanza rilevata.

Un sistema che si basa su un'infrastruttura è per sua natura più difficilmente scalabile di altri, in quanto necessita di una copertura del territorio perché la localizzazione funzioni, ma spesso garantisce una precisione e una resistenza alle perturbazioni molto più alta di altri tipi di sistemi IPS.

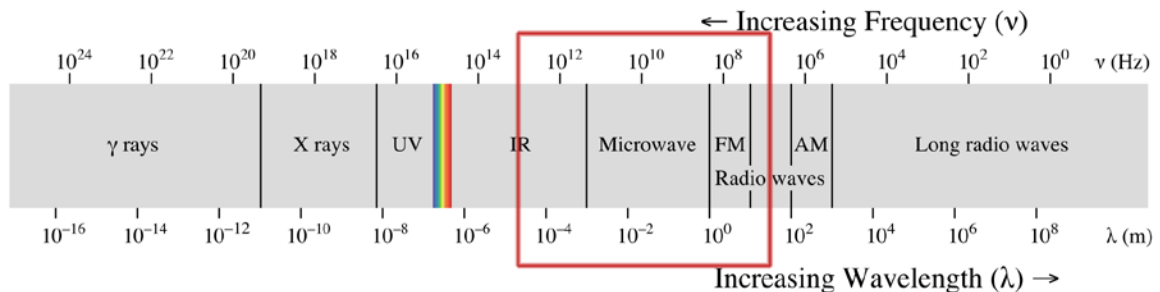
8.4. Fenomeni fisici utilizzati:

Un'ultima categorizzazione interessante che si può effettuare è quella che distingue in base al fenomeno fisico (o fenomeni) sfruttato dalla tecnologia per garantire il posizionamento.

Come vedremo la lista è molto variegata: sono state sfruttate varie bande dello spettro delle radiazioni EM, mentre altri approcci si sono concentrati su un tipo differente di onde, quelle sonore e ultrasoniche; altri ancora hanno scartato la modulazione di segnali per intraprendere la strada più algoritmica del riconoscimento di immagini sulla luce visibile. Nell'elenco che segue le tecnologie sono state raggruppate secondo questi fenomeni fisici in modo da facilitarne il confronto a parità di medium utilizzato.

9. Tecnologie:

9.1. Radiazioni EM



Le tecnologie raggruppate in questa sezione utilizzano tutte una modulazione di radiazioni EM per localizzare il client. In alcuni casi questi vengono emessi dalle stazioni di terra (o beacons) e ricevuti dal client; in altri approcci, al contrario, la parte attiva la svolge il dispositivo dell'utente.

Visto il medium utilizzato, una caratteristica da tenere presente è che tutti questi sistemi sono interessati da fenomeni di assorbimento e rumore (che limita la distanza massima del segnale) e di multipath (che può essere causa di interferenze distruttive).

9.1.1. Wifi/WLAN

Questa tecnica è attualmente la più diffusa, e si basa sul campionamento dei dati ricevuti dagli access point presenti nell'area dove si svolge la localizzazione.

Gli access point Wifi che operano sul protocollo 802.11 infatti prevedono l'invio periodico di pacchetti, detti beacon, per coordinare la trasmissione dei clients ad esso associati. Questi beacon sono trasmessi solitamente da antenne omnidirezionali dipolo, in modo da garantire la copertura più ampia possibile ai client, che spesso sono disposti eterogeneamente nell'area.

L'infrastruttura di Access Point (AP), spesso già presente nell'area con lo scopo di garantire la connettività, garantisce che ogni punto della mappa del nostro ambiente sia caratterizzato dalla presenza di diversi beacons.

La presenza di molteplici beacons è dovuta al fatto che sono spesso presenti diversi AP che veicolano segnali di diverse reti sovrapposte, oppure a svariati AP di una singola rete installati per far fronte all'attenuazione del segnale trasmesso e a fenomeni di rifrazione e/o shadowing.

Questa configurazione garantisce che non tutti gli AP non saranno "visibili" contemporaneamente, creando così una caratterizzazione del segnale ricevuto in ogni singolo punto della mappa.

Analizzando i pacchetti/beacons ricevuti si possono estrarre diverse informazioni utili che possiamo usare per cercare di determinare la nostra posizione.

Tra le informazioni più importanti che possiamo recuperare troviamo: l'identificativo univoco della stazione che ha trasmesso il segnale (il mac address) e l'RSSI che, come abbiamo visto in precedenza, rappresenta la potenza del segnale ricevuto.

A partire da queste informazioni sono state sviluppate due tecniche separate per determinare la posizione dell'utente: la prima cerca di desumerla dalla distanza tra noi e le stazioni di trasmissione mentre la seconda è incentrata sulla caratterizzazione di punti dell'ambiente in modo da poter ri-identificare queste caratteristiche e determinare la posizione tramite Cell of Origin.

Modelli di propagazione:

Supponendo di conoscere intensità e direzionalità del segnale trasmesso dall'AP è teoricamente possibile calcolare, tramite modelli di propagazione, l'intensità del segnale in ogni punto della mappa.

Questo approccio rende possibile ad un dispositivo cliente che misuri il segnale ricevuto stimare la distanza tra sé e la stazione che lo ha emesso; ripetendo il calcolo su 3 segnali diversi otteniamo le informazioni che ci servono per calcolare la nostra posizione tramite trilaterazione (supponendo che le posizioni degli AP siano note).

La creazione di un modello di propagazione funzionale non è però un'impresa facile; un primo approccio utilizzato prevedeva di calcolare il calo di intensità in base alla distanza: infatti in tutte le trasmissioni radio la potenza del segnale si affievolisce con il cubo della distanza, in quanto il volume iniziale viene "spalmato" via via su una sfera di superficie sempre maggiore.

Questo modello, seppur corretto, non è sufficientemente preciso se applicato agli ambienti interni dove fenomeni di multipath e assorbimento da parte di oggetti influenzano il segnale molto più dell'attenuazione dovuta alla distanza. Sono perciò stati sviluppati altri modelli che tenessero conto dell'assorbimento da parte di mura lungo il percorso più breve, o lungo il percorso con intensità di segnale migliore, ma nessuno di questi è completo, sufficientemente preciso o computazionalmente utilizzabile su dispositivi portatili, facendo sì che questa tecnica non sia molto utilizzata se non per stimare un valore limite della distanza tra client e AP.

Fingerprinting:

Questa seconda tecnica si basa sull'utilizzo dei beacons ricevuti in una griglia di punti nell'area interessata, cercando di garantire la caratterizzazione più possibile univoca di queste posizioni, in modo da poter riconoscere a quale di queste ci si trova più vicini (Cell of Origin).

E' prevista una prima fase "offline" in cui si localizzano sulla mappa una serie di punti, possibilmente equidistanti ed uniformemente distribuiti, e per ognuno di questi si raccolgono e analizzano le informazioni sui segnali ricevuti.

Come abbiamo detto precedentemente, i dati che si possono ricavare dai segnali ricevuti dagli AP sono molteplici e questo ha portato alla creazione di diversi algoritmi per analizzarli e trasformarli in una "fingerprint", ovvero un set ristretto di informazioni che rappresenti nella maniera più efficace e possibilmente univoca i segnali ricevuti in quella posizione.

Per questa operazione di raccolta delle fingerprint è necessario spostarsi per la struttura e registrare i segnali ricevuti in ogni punto (spesso vengono effettuate più registrazioni e poi viene fatta una media dei valori); questa è ovviamente un'operazione costosa in termini di tempo ed è suscettibile a cambiamenti della configurazione degli access point (evento però non troppo frequente).

Una volta raccolti tutte le fingerprint dell'area si potrà dare il via alla fase "online", durante la quale gli utenti in cerca di posizionamento genereranno un fingerprint dei beacons ricevuti nella loro attuale posizione e quindi procederanno a confrontarlo con il database, creato nella fase precedente, alla ricerca di quello che più si avvicina al loro campione. Dal momento che un fingerprint spesso raccoglie molteplici informazioni, come ad esempio il numero degli AP presenti e il loro relativi RSS, il metodo più usato per calcolare la "vicinanza" è la funzione di distanza euclidea, che prevede di considerare ogni informazione come una dimensione a sé stante e calcolare semplicemente la distanza su n-dimensioni.

Ci si troverà quindi in una situazione in cui si sono calcolate le "distanze" da tutti i fingerprint della mappa, ed a questo punto sarà possibile stimare la propria posizione con algoritmi di aggregazione mediata come ad esempio K-NN (K nearest neighbours): questo algoritmo prevede la selezione dei K fingerprint più vicini e fa una media ponderata delle loro relative posizioni, in modo da determinare una stima della posizione attuale dell'utente.

Pro:

Grazie all'enorme diffusione del WiFi in qualsiasi luogo, moltissimi AP sono spesso già presenti sul territorio e possono essere sfruttati come infrastruttura preesistente, abbattendo notevolmente il costo iniziale.

Un altro punto a favore è il fatto che i fingerprint raccolti durante la fase offline sono mediamente stabili nel tempo, a meno di rilocazione degli AP o l'introduzione di nuovi oggetti voluminosi all'interno dell'area, cosa che normalmente non avviene spesso.

Contro:

Come abbiamo visto le tecniche che sfruttano i modelli di propagazione del segnale WiFi non si sono dimostrate particolarmente precise e perciò molti si sono orientati sul più promettente WiFi fingerprinting.

Questa, essendo una tecnica basata su un'infrastruttura, rende necessaria la predisposizione di AP nel caso questi non siano già presenti, e inoltre necessita del campionamento dei fingerprints durante la fase offline, richiedendo tempo e lavoro aggiuntivo che non è presente invece nei sistemi che non usano questo tipo di approccio. Oltretutto, dal momento che il protocollo 802.11 prevede l'utilizzo di frequenze tra i 2 e i 5 Ghz, in interni l'attenuazione dovuta all'assorbimento/rifrazione di queste frequenze fa sì che il segnale di un access point mediamente non arrivi oltre i 10-20 metri di distanza, imponendo l'utilizzo di numerosi AP per riuscire a coprire effettivamente tutta l'area.

Durante la fase online è necessario l'utilizzo continuo del WiFi per raccogliere i fingerprint dalla attuale posizione e questo può impattare molto sul consumo di batteria del dispositivo, rendendo questo approccio uno dei più esosi a livello di corrente utilizzata.

Seppure questa tecnica garantisca una precisione bidimensionale discreta (almeno a livello di stanza) nella maggior parte dei casi, purtroppo la componente verticale risulta la più prona ad incertezze a causa della difficoltà di campionamento e la scarsa eterogeneità dei fingerprint in relazione all'altezza.

Un ultimo punto rilevato da molti è il fatto che gli RSSI misurati da diverse schede wireless sono tutt'altro che costanti, bensì sembrano essere legati all'implementazione del driver di interfaccia; questo introduce un possibile errore se la fase offline e quella online vengono svolte con dispositivi diversi (cosa che solitamente avviene, in quanto non è pratico forzare l'utente ad utilizzare una precisa implementazione hardware).

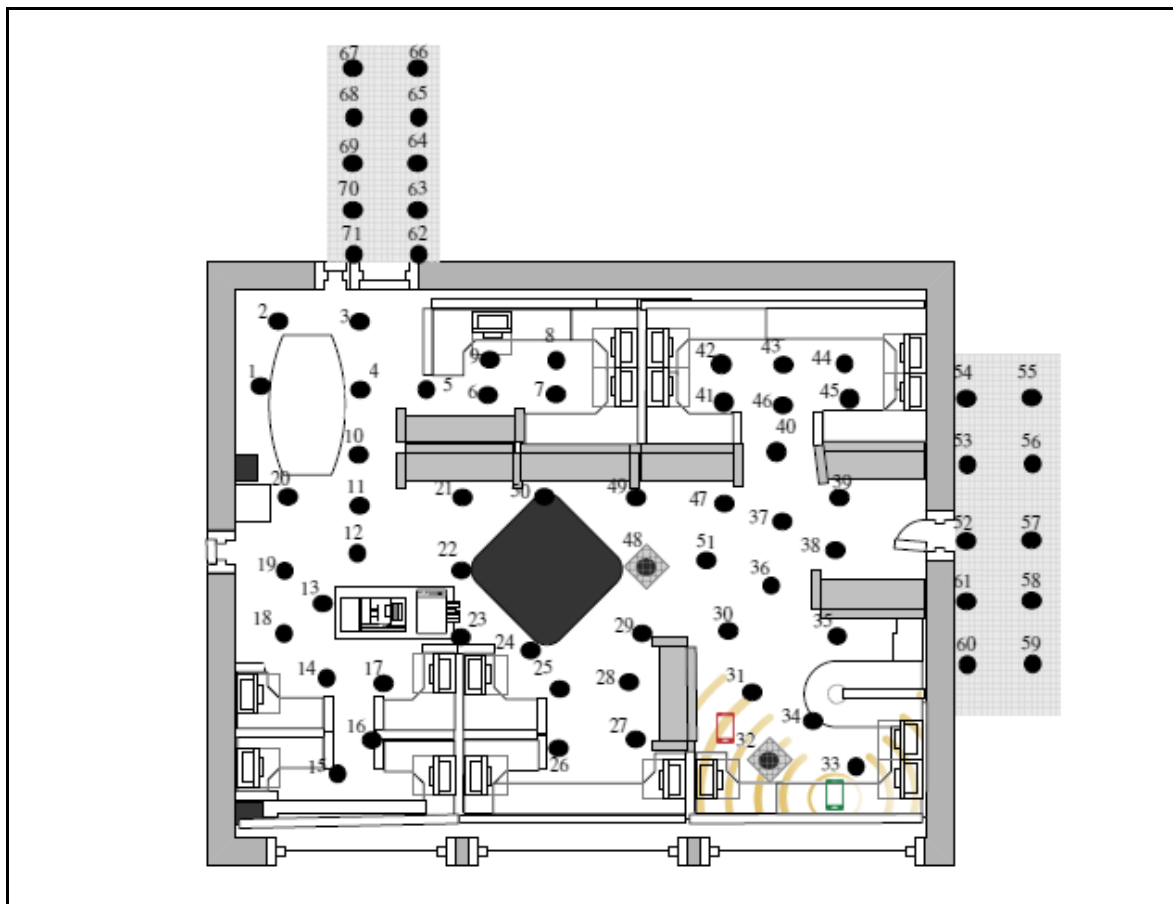
Per concludere è stato rilevato che la posizione del corpo rispetto al dispositivo può influenzare notevolmente il segnale ricevuto (assorbendo parte dei segnali); per ovviare al problema è possibile aumentare il tempo di scansione e poi fare una media dei segnali ricevuti, ma questo approccio limita molto il rate di aggiornamento di questa tecnica.

Evoluzioni:

Nell'analizzare i casi in cui la posizione, calcolata tramite l'utilizzo di fingerprint, si discosta di più dalla posizione reale, ci si è resi conto che la causa era spesso dovuta al fatto che due o più fingerprint, che rappresentavano punti anche molto lontani fra loro, erano tuttavia molto simili in valore.

Questo fa sì che il dispositivo dell'utente finisca per scegliere come più vicina una posizione che in realtà non lo è.

Per ovviare al problema, nell'articolo "Push the Limit of WiFi Based Localization for Smartphones." [14], gli autori hanno creato un sistema collaborativo che sfrutta l'interazione tra i dispositivi degli utenti. Grazie a segnali audio inviati tra i client, i dispositivi scambiano informazioni e riescono a coordinarsi con un server centrale che trasmette loro le reciproche posizioni. Dal momento che solamente i dispositivi effettivamente vicini nello spazio riceveranno il segnale emesso dal client "in dubbio", sappiamo che questo client non potrà essere troppo distante dalla loro attuale posizione. Questa informazione permette di imporre un limite (o bound) alla possibile posizione in cui il nostro dispositivo possa trovarsi, eliminando così il dubbio tra più posizioni simili.



Img 11 : Dal momento che le fingerprint registrate nei punti 48 e 32 sono molto simili, il dispositivo in rosso (vicino al punto 32) potrebbe erroneamente determinare di essere invece in prossimità del punto 48. Grazie all'introduzione del sistema acustico riesce però a comunicare con il dispositivo in verde (in prossimità di 33), determinandone la distanza e escludendo così la possibilità di trovarsi a 48.

Un altro approccio molto ingegnoso è stato affrontato in "ZiLoc: Energy Efficient WiFi Fingerprint-based Localization with Low-power Radio." [16] dove gli autori hanno affrontato il problema del consumo energetico della scheda wlan. Come detto in precedenza, infatti, tenere costantemente acceso il sintonizzare dell'antenna WiFi richiede parecchie risorse in termini di batteria; per ovviare al problema si è pensato di utilizzare un dispositivo ricevente che utilizzasse il protocollo Zigbee (IEEE 802.15.4) visto che questo utilizza uno spettro di frequenze condivise con l'802.11 ma è molto meno oneroso in termini di corrente.

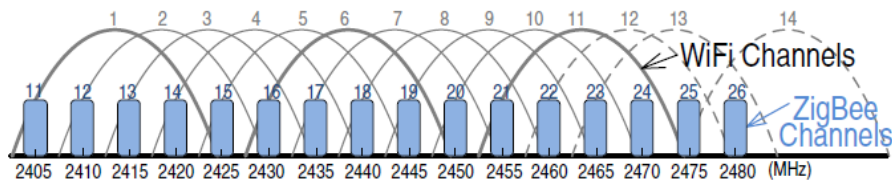
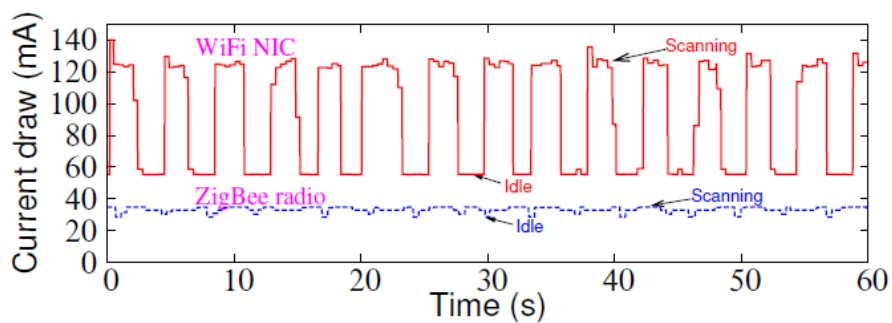


Fig. 1. 802.11 and 802.15.4 channels overlap in 2.4GHz ISM band



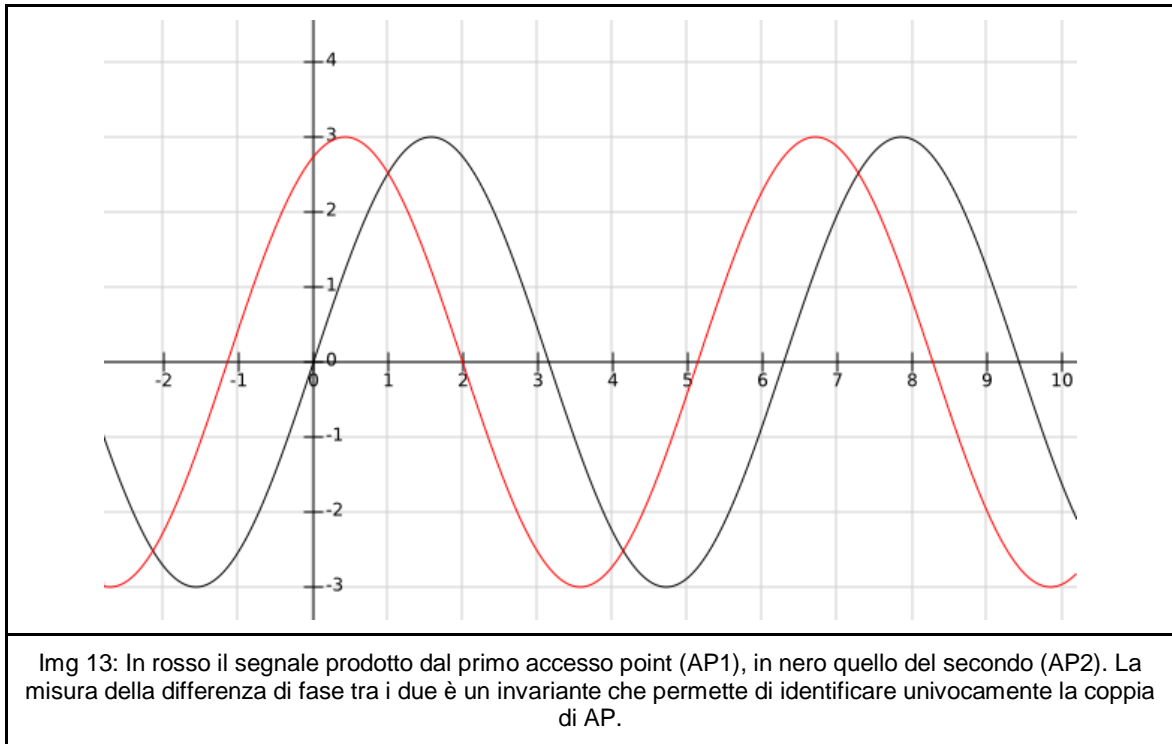
Img 12: Sovrapposizione tra i canali del WiFi e quelli di ZigBee e relativo consumo energetico

Tramite la ricevente zigbee e una tecnica nota come Common Multiple Folding (CMF) è stato possibile riconoscere la trasmissione del segnale beacon inviato dagli AP 802.11, grazie alla sua periodicità relativamente stabile; infatti gli autori hanno appurato che ogni beacon viene emesso con estrema regolarità ogni circa 102.4 ms dalla maggior parte dei dispositivi.

Essendo però i protocolli mac completamente incompatibili non è purtroppo possibile accedere alle informazioni contenute nel beacon, rendendo così impossibile l'identificazione dell'AP tramite il SSID o altri dati.

Per riuscire a caratterizzare il segnale e attribuirlo ad una precisa stazione, gli autori hanno sfruttato, oltre al canale, la differenza di fase temporale dei beacon ricevuti dai vari AP.

Grazie proprio all'estrema stabilità del periodo è possibile misurare il tempo che intercorre nella ricezione di due beacon da due specifici AP e, dato che questa misura sarà all'incirca costante, è possibile identificare la coppia di AP univocamente.

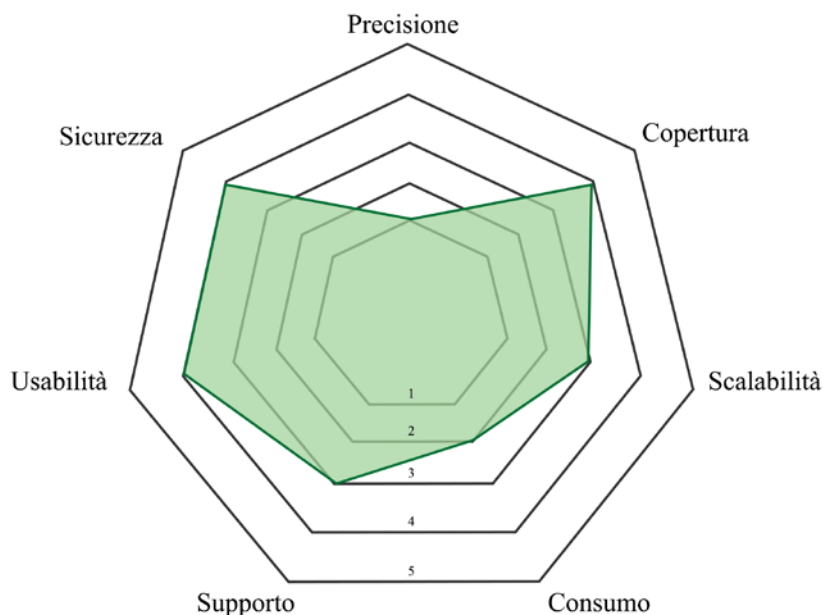


Sfruttando queste misurazioni è possibile quindi generare un database offline di fingerprints sul quale andare poi a calcolare le distanze nella fase online, garantendo una precisione superiore a livello di stanza (quindi comparabile a molte tecniche che usano l'802.11) con un consumo ridotto fino al 66%.

Riassumendo:

Wifi/Wlan		
Parametro	Valore	Note
Precisione	1-7 metri	La precisione varia molto tra le varie implementazioni ed è relativa al numero di AP
Copertura	10-15 m	La copertura di un singolo AP è limitata dalla potenza del segnale.
Scalabilità	media	E' necessario distribuire e mappare nuovi AP.
Consumo	Alto	La ricezione di segnali a queste frequenze è abbastanza onerosa
Supporto/infrastruttura	Alto	E' necessaria una rete di AP e di client in grado di riceverne i beacons
Usabilità/Fattore di diffusione	buona	All'utente è richiesta solamente un dispositivo dotato di scheda WiFi
Sicurezza	buona	Solitamente la posizione è calcolata lato client se viene reso disponibile

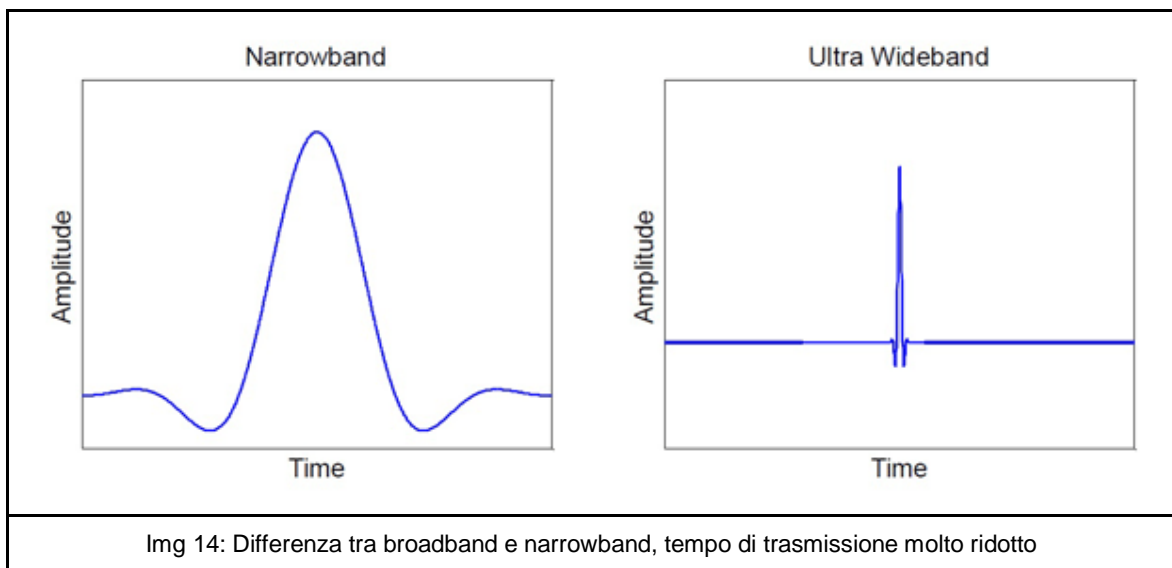
Grafico



9.1.2. UWB

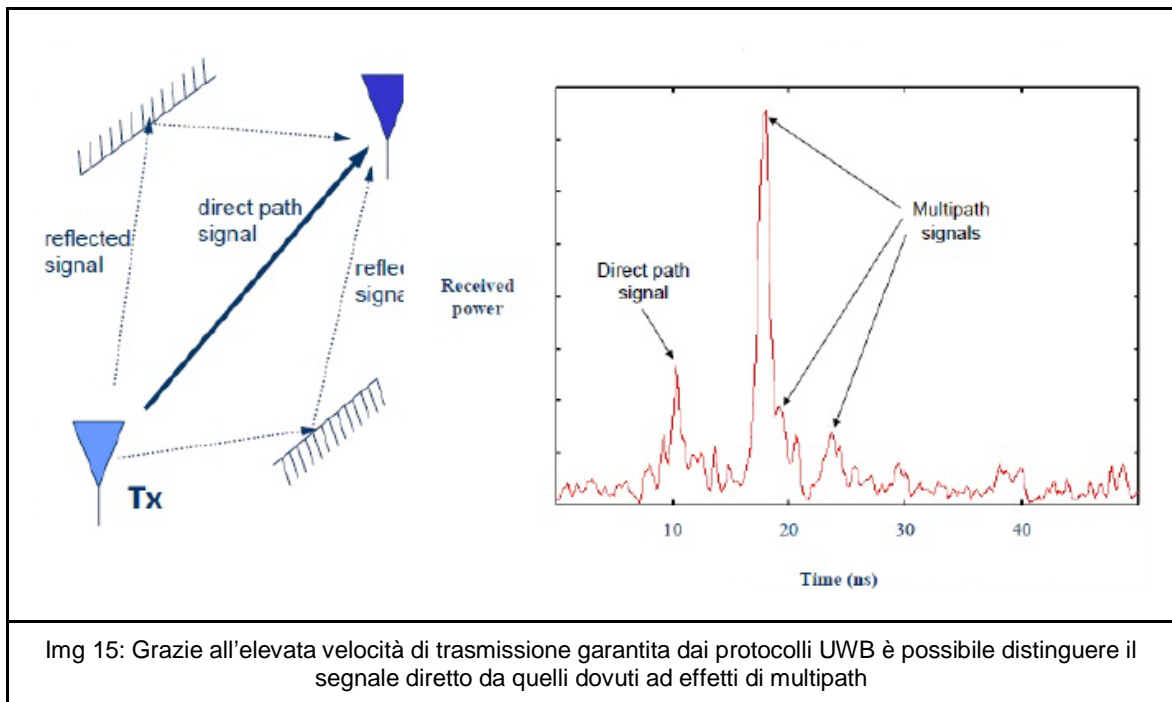
Per trasmissioni Ultra-Wide Band si intende la modulazioni di segnali che sfruttano una larga porzione dello spettro EM (tecnicamente sono considerate UWB tutte le trasmissioni distribuite su 500 Mhz o più, o comunque che occupano più del 20% della frequenza centrale) con lo scopo di ridurre la potenza di trasmissione ma soprattutto per garantire una banda molto alta.

Questo tipo di modulazione garantisce vantaggi molto interessanti: data la ampia larghezza di banda le trasmissioni impiegano tempi molto brevi (nell'ordine di 10^{-12} secondi) e perciò sono molto più resistenti a disturbi dovuti a rifrazioni (multipath), in quanto nel tempo aggiuntivo che impiega una trasmissione rifratta per raggiungere il destinatario, la trasmissione in LoS è già stata ricevuta.



Questa maggiore velocità di trasmissione garantisce una certa immunità a fenomeni di rumore sul canale in quanto la probabilità di trovare una trasmissione in atto saranno più basse, dato che ogni trasmissione impiega meno tempo; garantisce inoltre una precisione temporale incredibilmente alta grazie al fatto che viene sprecato meno tempo in attesa che l'intero pacchetto modulato venga ricevuto dal nodo di destinazione, caratteristica questa che, quando abbinata a tecniche come quelle di ToA, TDoA o AoA, garantisce una precisione spaziale/angolare senza paragoni tra le tecnologie basate su trasmissioni radio, permettendo la localizzazione con errori anche inferiori ai 10 cm.

Un altro vantaggio di questa tecnologia è che, sempre grazie all'elevata velocità di trasmissione, è possibile identificare la ricezione dei segnali che raggiungono l'antenna ricevente dopo aver effettuato dei rimbalzi su superfici intermedie (NLoS); questi segnali possono essere esclusi per limitare il rumore, rendendo così questo tipo di trasmissione una delle tecniche preferibili in ambienti il cui fenomeni di multipath sono preponderanti, come ad esempio all'interno di edifici.



Le trasmissioni UWB sono state utilizzate come sistemi di posizionamento in interni in maniera variegata, sfruttando le diverse proprietà di questo tipo di modulazione:

ToA/AoA

Grazie al principale vantaggio di questa tecnica di trasmissione, ovvero la sua velocità di propagazione, è possibile utilizzare un'infrastruttura di trasmettitori UWB e misurare sul dispositivo client il ToA o l'AoA dei segnali ricevuti, ricavando quindi le relative distanze/angoli dai nodi trasmettenti.

La maggior precisione rispetto ad altre trasmissioni radio si riflette in un incremento della precisione spaziale della posizione identificata.

RADAR

L'aspetto più interessante delle trasmissioni UWB è forse rappresentato dal fatto che la capacità di identificazione dei segnali multipath può essere sfruttata come una sorta di radar.

E' possibile inviare un segnale e attendere che questo sia riflesso da qualcosa nell'ambiente; nel momento in cui la trasmittente originale riceve il segnale di echo può calcolare, facendo la differenza tra il tempo di invio e quello di ricezione (ToA), la distanza a cui si trova l'oggetto che l'ha riflessa.

Supponendo di predisporre un'infrastruttura di base station trasmettenti UWB, è possibile per ognuna di queste calcolare un echo "statico" composto dai segnali di ritorno dovuti ai segnali che rimbalzano all'interno di ostacoli statici presenti nella struttura. Risulta quindi facile, nel momento in cui l'impronta di questi segnali riflessi cambi, identificare che un nuovo oggetto/utente è subentrato nell'ambiente.

La cosa più interessante è che risulta quindi possibile calcolare, triangolando le distanze calcolate da più base station, la posizione di questo oggetto anche se quest'ultimo è passivo (non emetta trasmissioni), purché si trovi nel campo di azione illuminato dall'infrastruttura.

Fingerprinting

Grazie alle informazioni aggiuntive identificabili nei segnali è possibile la creazione di fingerprint molto accurati e quindi meno confondibili tra loro.

Le fingerprint UWB possono essere composte, oltre che all'identificativo del nodo trasmittente e relativo l'RSSI, dalla struttura dei segnali ricevuti dovuti a multipath (possiamo marcare il tempo e l'intensità di questi segnali) che, come abbiamo visto, sono dovuti alla disposizione fisica degli ostacoli tra la trasmittente e la posizione in cui vengono raccolte.

Così facendo si va ad aumentare la caratterizzazioni di ogni singolo punto raccolto durante la fase offline, rendendoli matematicamente più distanti fra loro, e risulterà quindi molto più difficile, durante la fase online, che un dispositivo client si trovi a far fronte alla scelta tra due posizioni con segnali simili.

Pro:

Questa tecnica di modulazione è la più precisa tra quelle che si basano su trasmissioni tramite modulazione di onde EM analizzate. La precisione ottenibile, il consumo energetico relativamente basso (sfruttando la trasmissione a banda larga) e la resistenza ad interferenze fanno di questa tecnologia una delle più promettenti.

Contro:

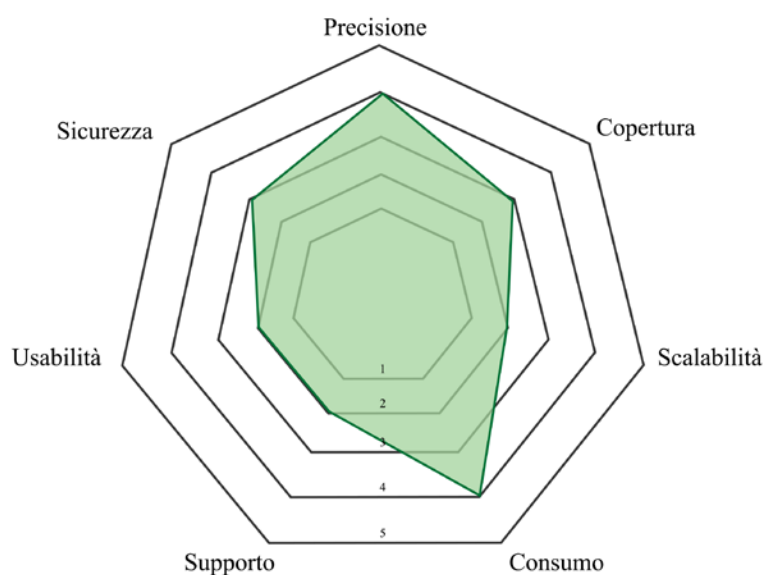
Trattandosi di una tecnologia fortemente incentrata su una infrastruttura è necessaria una spesa iniziale e un costo di manutenzione in tempo e denaro, soprattutto in caso si utilizzi l'approccio che sfrutta le fingerprints.

Inoltre, a causa del sistema di modulazione e delle frequenze utilizzate, è necessario un apparato di trasmissione radio non compatibile con quelli attualmente presenti all'interno degli smartphones, rendendo necessario l'acquisto di hardware specifico.

Riassumendo:

UWB		
Parametro	Valore	Note
Precisione	10-100 cm	La precisione è direttamente proporzionale alla velocità di modulazione.
Copertura	5-10 metri	A causa dell'alta frequenza utilizzata, la penetrazione degli ostacoli risulta molto limitata
Scalabilità	media	E' necessario distribuire e mappare nodi trasmettenti, e in caso di utilizzo come radar si rende necessaria una copertura ancora più capillare
Consumo	Medio	I segnali inviati hanno una bassa intensità(decimi di milliwatt)
Supporto/infrastruttura	Alto	E' necessaria il deploy dei nodi statici o base station, e hardware dedicato UWB nel dispositivo client.
Usabilità/Fattore di diffusione	pessimo	Necessita di sistemi radio ad-hoc non compatibili con 802.11.
Sicurezza	buona	In base alla tecnica utilizzata la posizione può essere calcolata dal client o dall'infrastruttura con successiva condivisione con l'utente.

Grafico



9.1.3. Passive Rfid

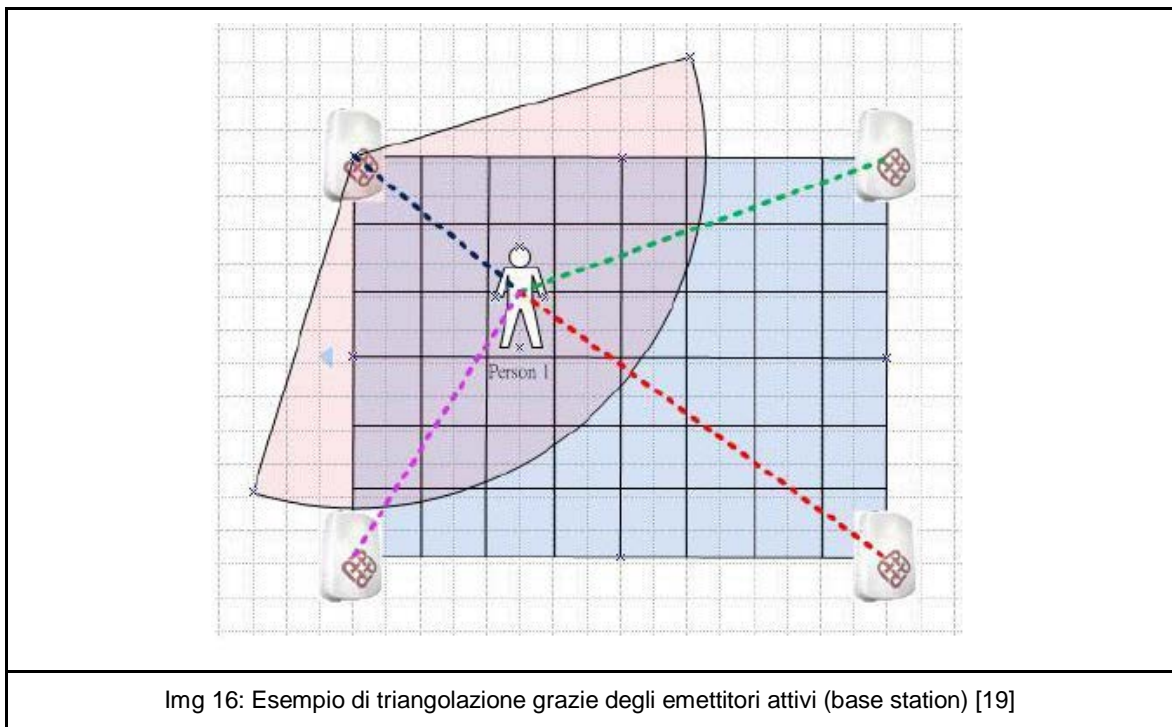
La tecnologia RFID passiva consiste nell'utilizzo di tags non alimentati (passivi) e di un lettore o base-station che ad intervalli regolari invia segnali radio.

Il tag è costruito in modo da poter operare estraendo l'energia necessaria direttamente dal segnale radio in arrivo dalla stazione base. Quando riceve il segnale, il tag si attiva e risponde con un'altra trasmissione radio che modula il suo codice identificativo (da qui Radio Frequency IDentification).

L'utilizzo di tags passivi permette la costruzione di dispositivi molto piccoli e versatili, dal momento che non richiedono alimentazione, da utilizzare in accoppiata con più trasmettitori o base station.

L'approccio al posizionamento in interni che utilizza la tecnologia di RFID passivi, contrariamente alle tecniche precedenti, sposta la logica e la computazione della posizione sull'infrastruttura piuttosto che sul client che sta cercando di orientarsi. Essendo il calcolo decentrato verso le base stations questo sistema ha necessariamente bisogno di un canale di comunicazione preesistente tra l'infrastruttura e il client perchè altrimenti, una volta calcolata la posizione, i dispositivi dell'infrastruttura non sarebbero in grado di comunicarla all'utilizzatore finale.

Similmente a quanto viene fatto nelle tecniche di wifi-fingerprinting, l'area da mappare viene costellata di trasmettitori RFID che comporranno la nostra infrastruttura di supporto e, nella fase offline, per ognuno di essi si genera una mappa dell'intensità del segnale ricevuto dal tag (RSSI) in ogni punto dell'area interessata.



Durante la fase online il client, dotato di tag, attraversa l'area venendo illuminato (e alimentato) dalle trasmissioni in arrivo dai vari lettori, ai quali risponderà con il proprio identificativo.

In base all'intensità del RSSI del segnale di risposta del tag, ricevuta dai lettori, risulterà quindi facile calcolare a quale delle letture mappate in precedenza il segnale sia più simile, determinando così la posizione del client.

Come scritto in precedenza, a questo punto solamente l'infrastruttura è a conoscenza della posizione del tag, e c'è quindi bisogno di un canale di comunicazione che permetta di trasmettere questa informazione al client.

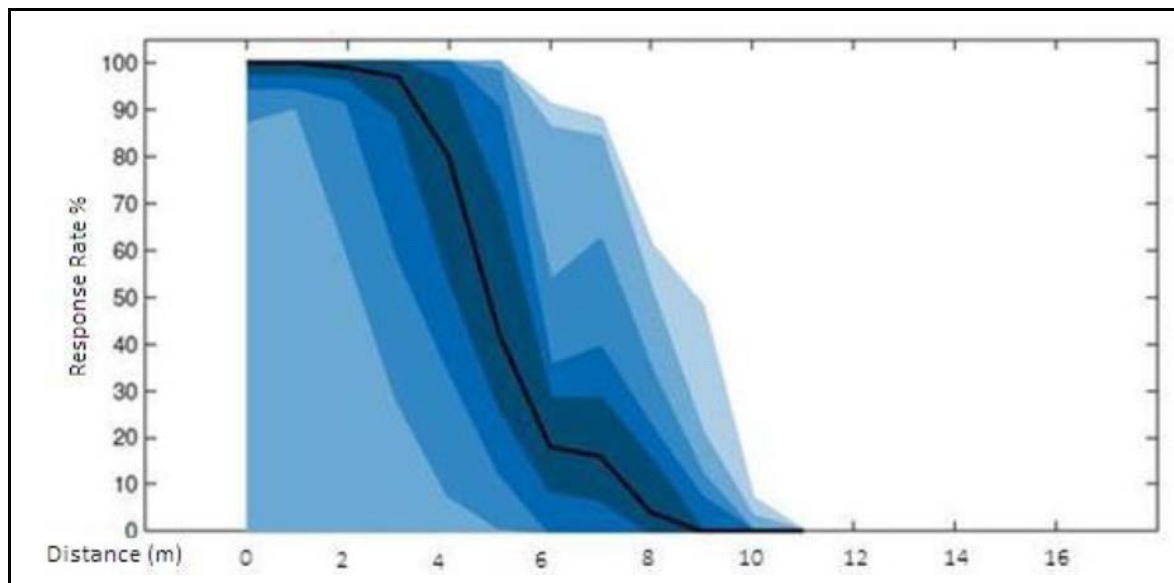
Pro

Quest'approccio porta a zero il consumo energetico per la localizzazione sul client, sfruttando correttamente l'idea che sia più facile alimentare le componenti dell'infrastruttura (i lettori RFID) che il client; ma introduce però il bisogno di un mezzo di comunicazione che permetta al client di ricevere la propria posizione una volta che questa sia stata calcolata dall'infrastruttura.

Contro

Essendo il tag passivo e non alimentato, l'energia di cui abbisogna deve essere fornita dal segnale trasmesso dai lettori/ stazioni base, le quali devono emettere un segnale anche 1000 volte più potente di quello effettivamente necessario al fine della sola comunicazione dati, gravando così sui consumi energetici dell'infrastruttura e sulla quantità di rumore generato.

Un altro punto a sfavore è il limitato raggio di utilizzo di questi tags: infatti appena dopo i 4-5 metri i dispositivi passivi iniziano a rispondere in maniera inaffidabile; questo è dovuto sia dal fatto che la potenza del segnale inizia ad essere troppo bassa per alimentare i tags sia per colpa della bassa intensità del segnale identificativo da loro emesso quando vengono illuminati.



Img 17: response rate al variare della distanza dalla base station. [19]

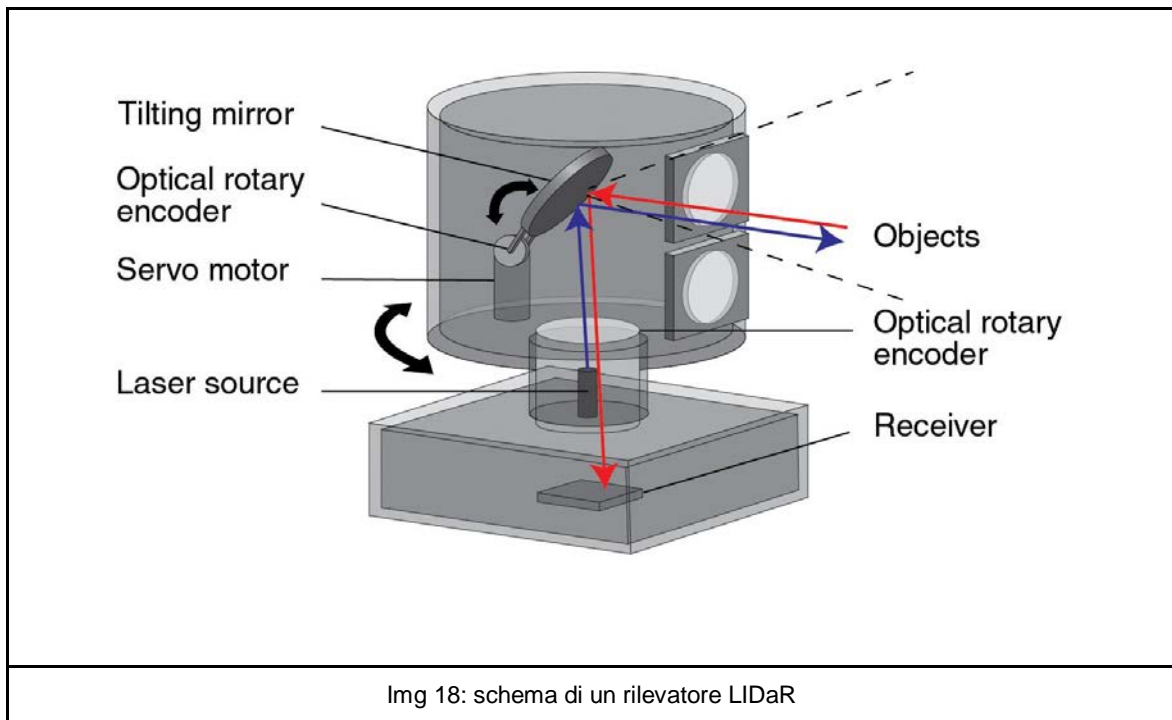
Riassumendo:

RFID passivi		
Parametro	Valore	Note
Precisione	1-2 m	La precisione è sufficiente ad identificare un oggetto/tag a livello di stanza
Copertura	3-5 metri	La potenza del segnale emesso si disperde velocemente, risultando insufficiente all'alimentazione del tag passivo già dopo 3-5 metri.
Scalabilità	bassa	Per espandere l'area di copertura bisogna predisporre ulteriori trasmettenti.
Consumo	Bassissimo	Il consumo lato client è praticamente ridotto a zero
Supporto/infrastruttura	Alto	E' necessario un alto numero di base station per riuscire ad illuminare con potenza sufficiente l'area,
Usabilità/Fattore di diffusione	medio	L'utente è obbligato ad utilizzare tag RFID passivo. Ma le dimensioni di quest'ultimo sono irrisorie, nell'ordine di pochi cm ² e spessi decimi di mm, del tutto simili ad etichette adesive.
Sicurezza	scarsa	La posizione viene calcolata lato infrastruttura e necessita di un medium per essere comunicata indietro al client.
Grafico		
<p>The radar chart displays seven performance metrics for passive RFID technology. The metrics are arranged around a central point, with five concentric rings representing performance levels from 1 (innermost) to 5 (outermost). The metrics and their approximate values are: Precisione (4), Copertura (2), Scalabilità (1), Consumo (5), Supporto (3), Usabilità (3), and Sicurezza (2).</p>		

9.1.4. Lidar

Questa sigla è l'acronimo di "Light Detection and Ranging" e rappresenta una delle tecnologie più utilizzate nel mondo della robotica e della scansione tridimensionale di ambienti.

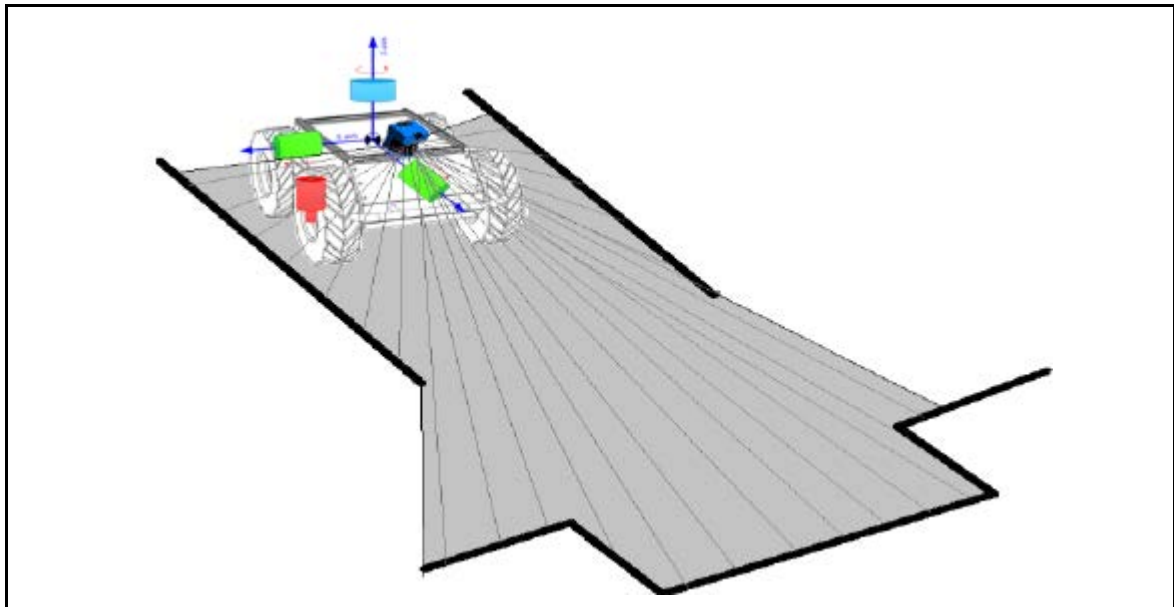
Il dispositivo di misurazione è suddiviso in 2 parti: un emettitore e un ricevitore, i quali possono essere opzionalmente montanti su una struttura semovente (di solito un sistema che ne permette la rotazione su se stessi).



Il principio di funzionamento è semplice ma garantisce risultati molto accurati; sfrutta la misurazione del tempo di propagazione di un impulso laser (solitamente sulla banda tra l'ultravioletto e l'infrarosso) che, inviato dall'emettitore, viaggerà in linea retta e colpirà prima o poi un ostacolo, rimbalzando (in parte) indietro verso il ricevitore del LIDAR. Misurando il ToF tra l'invio dell'impulso e la ricezione del suo riflesso è possibile calcolare la distanza tra lo strumento e l'ostacolo.

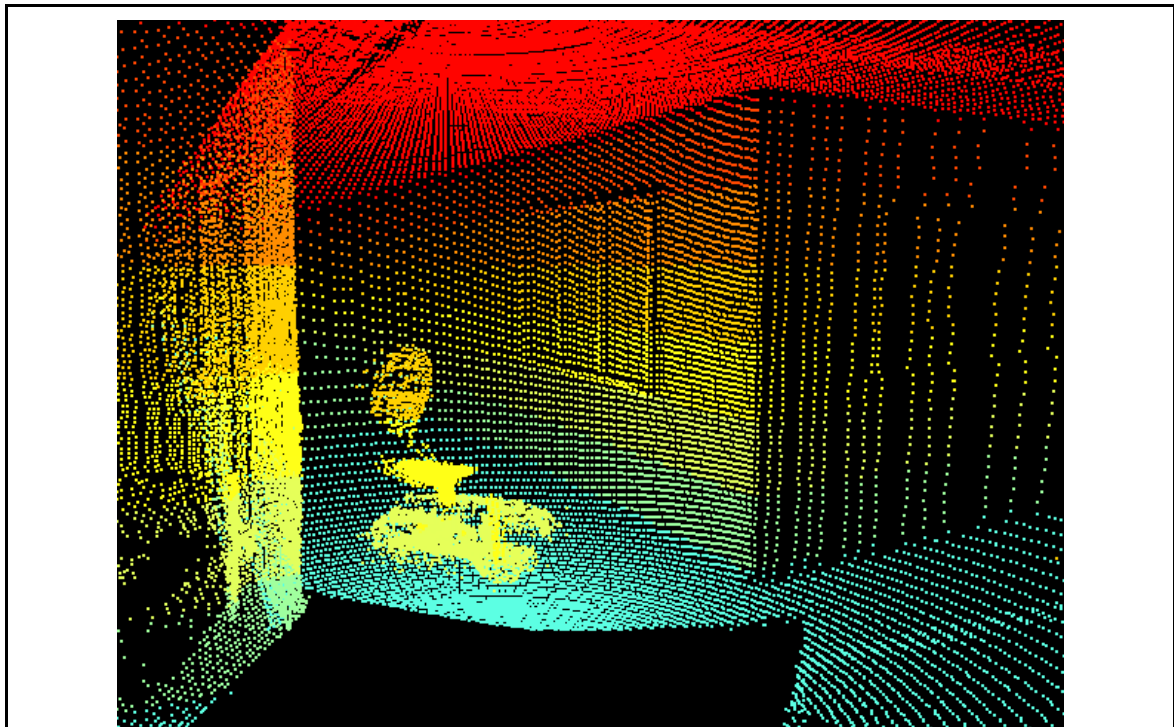
Questo sistema necessita di un'altissima precisione temporale, ma non ha bisogno di nessuna sincronizzazione con fonti esterne in quanto il segnale viene ricevuto dallo stesso dispositivo che lo ha emesso.

La vera potenza di questo strumento di misurazione risiede nel fatto che è in grado di inviare migliaia di impulsi al secondo rendendo possibile la misurazione di moltissimi punti nell'arco di pochissimi istanti; viene infatti solitamente utilizzato in combinazione con un motore che permette di far ruotare lungo due assi la componente ricevitore/trasmittitore che, in decimi di secondo, riesce a misurare la distanza di ogni punto lungo la sfera che ha per centro la posizione del misuratore.



Img 19: Ruotando su se stesso il laser illuminerà via via tutti i punti, determinandone la distanza

Il risultato di questa misurazione è una mappa di punti (o point cloud) disposti nell'ambiente che rappresentano gli ostacoli (mura o altri oggetti) presenti nell'ambiente. Iterando questo tipo di misurazione per più punti dell'area, e conoscendo direzione ed entità dello spostamento tra una misurazione e l'altra, è possibile creare, durante una fase offline, una mappa completa dell'ambiente interessato, che è possibile utilizzare come riferimento successivamente, identificandone caratteristiche univoche.



Img 20: Point Cloud generata tramite LIDaR

L'output prodotto da questi tipi di dispositivi è spesso enorme (si arriva facilmente a miliardi di punti) e risulta quindi necessaria una normalizzazione o riduzione verso strutture più ottimizzate. Sono stati realizzati algoritmi capaci di riconoscere geometrie a partire dall'insieme di punti che le compongono: possiamo immaginare ad esempio che una serie di punti complanari possa essere convertita in un piano unico, e che sia possibile trasformare una superficie composta da punti non allineati in una tassellata da geometrie triangolari, nell'ottica di ridurre la complessità computazionale legata all'elaborazione di questa mappa.

Una volta che abbiamo a disposizione una mappa dell'ambiente, semplificata in modo da essere computazionalmente analizzabile, è possibile utilizzare una scansione LIDaR in tempo reale (durante la fase online) per comparare le le geometrie identificate nel suo output con quelle della mappa dell'ambiente.

Gli algoritmi sono del tutto simili a quelli "naturali" che utilizziamo quando ci troviamo di fronte alla cartina di un luogo che non conosciamo: analizziamo l'ambiente circostante e ricerchiamo sulla mappa le caratteristiche che consideriamo più univoche; nel caso di algoritmi IPS queste potrebbero essere ad esempio la posizione relativa tra strutture facilmente identificabili, come porte e punti di riferimento, o il riconoscere la conformazione di corridoi o altre strutture dalla conformazione univoca.

Pro

L'output di questo strumento (mappa dei punti o point cloud) costruisce una rappresentazione l'ambiente con una precisione altissima e permette di identificare punti di riferimento univoci facili da ritrovare durante la fase online, e dal momento che ogni punto è collocato nello spazio in relazione all'emettitore, risulta facile risalire alla posizione attuale dello strumento/client.

Contro

Purtroppo non esistono LIDaR integrati in smartphone dal momento che questo non costituisce certamente uno strumento che possiamo definire "portatile", a causa delle sue dimensioni e del fabbisogno energetico; con esso ci discostiamo di molto dal nostro target "smartphone", ma quest'approccio è stato censito ugualmente per garantire una panoramica delle tecnologie esistenti più promettenti e utilizzate.

Questo sistema di misurazione viene solitamente utilizzato in robotica a bordo di rover e altri robot, per ricognizioni geografiche aeree su larga scala oppure montato su attrezzatura tecnica specifica, come zaini dotati di multisensori e camere, operati appositamente per la creazione di modelli tridimensionali dell'area (come ad esempio la creazione di mappe 3d di scene del crimine).

Riassumendo:

LIDaR		
Parametro	Valore	Note
Precisione	5-10 cm	Grazie all'elevata precisione della componente temporale, la precisione è una delle più alte disponibili finora
Copertura	0.5-100 metri	Con l'aumentare della distanza aumenta il cerchio di dispersione del laser, rendendo la misurazione meno precisa
Scalabilità	Alta	E' solamente necessario creare la mappa del nuovo ambiente.
Consumo	Alto	Il dispositivo non è tra i più rispettosi verso i consumi energetici.
Supporto/infrastruttura	Media	E' necessario l'impiego di un misuratore LIDAR
Usabilità/Fattore di diffusione	Basso	L'hardware specifico e costoso rende questo approccio poco consono all'utilizzo di massa. Ma rimane un ottimo sistema per creare mappe di interni che possono essere successivamente utilizzate con altre tecnologie.
Sicurezza	Alta	La posizione è derivata lato client dal riconoscimento di punti caratteristici sulla mappa.
Grafico		
<p>The radar chart displays performance levels for LIDAR across seven parameters. The outermost green line represents the highest performance level (level 5), while the innermost line represents the lowest (level 1). The parameters are arranged in a circle: Precisione (top), Copertura (top-right), Scalabilità (right), Consumo (bottom-right), Supporto (bottom), Usabilità (left), and Sicurezza (top-left). Precisione, Copertura, and Sicurezza show high performance, reaching level 5. Usabilità and Consumo show low performance, reaching level 1. Supporto shows medium performance, reaching level 3.</p>		

9.1.5. Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons

A partire dal 2006 si è iniziato a parlare di dispositivi bluetooth a basso consumo energetico, per coprire un'esigenza di comunicazione per quella che sarà successivamente definita come Internet of Things (IoT). Lo sviluppo di questo protocollo permette di incorporare, in qualsiasi tipo di dispositivo, capacità di trasmissione bluetooth mantenendo i consumi a livelli bassissimi, esigenza indispensabile qualora il dispositivo si affidi ad una batteria di piccola capacità e per non costringere l'utente a ricaricarlo ogni giorno (come accade ad esempio per gli smartphones).

Questa tecnologia trasmissiva, che ottiene questo risultato limitando il tempo di trasmissione e la potenza del segnale emesso (riducendo perciò la banda e il raggio effettivo di copertura), risulta perfetta per tutte le implementazioni che necessitano di trasferire pochi dati alla volta, di cui si voglia massimizzare l'autonomia, come ad esempio sensori remoti che comunicano ad un nodo centrale le proprie letture.

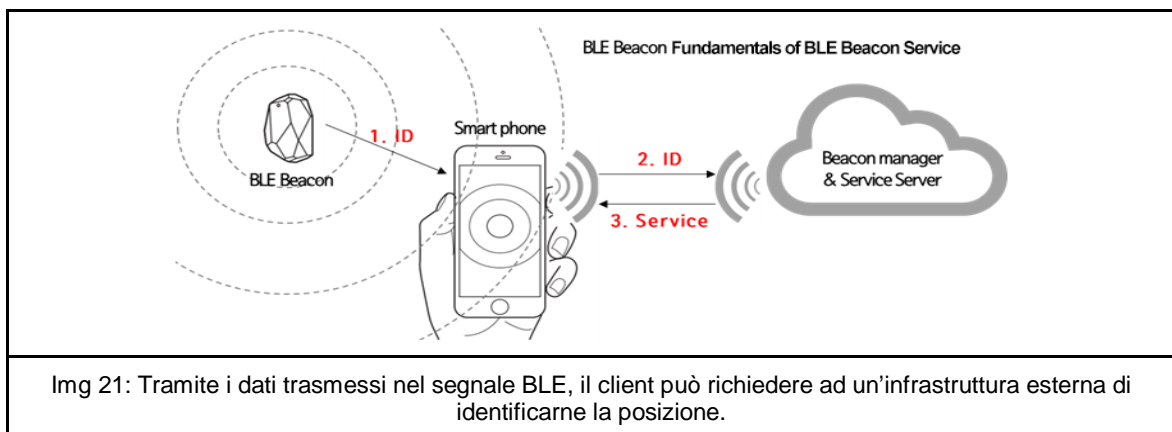
Sfruttando questo protocollo nasce l'idea dei Beacons BLE, distribuita inizialmente da Apple con il nome di iBeacon e in seguito da altro produttori, rappresenta la più commercializzata soluzione per il posizionamento attualmente presente sul mercato di massa.

L'idea di base consiste nel disporre un'infrastruttura di trasmettitori BLE nell'area interessata, configurando ognuno di essi per emettere un segnale univoco e alcuni dati aggiuntivi; il dispositivo client dell'utente può a questo punto identificare in maniera univoca la Cell of Origin, grazie anche ai dati che il beacon trasmette.

I protocolli Bluetooth e BLE non sono compatibili tra loro ma, grazie alla diffusione del BLE e ad un lavoro di unificazione delle specifiche delle nuove release, quasi tutti gli smartphone di nuova generazione sono compatibili con entrambi gli approcci, permettendo di usare un semplice telefono, alla portata di tutti, come dispositivo client.

La precisione di questa tecnologia è ovviamente abbastanza bassa, parliamo di livello di stanza o poco più, ma la sua facilità d'uso, grazie all'utilizzo di smartphones e di beacons la cui batteria ha una durata di 6-12 mesi, permette la creazione di un'infrastruttura in grado di comunicare all'utente la vicinanza a punti di interesse particolari, permettendogli di effettuare azioni legate a quella particolare posizione.

La comunicazione avviene a senso unico dai beacons verso i dispositivi clients, garantendo così la sicurezza e la privacy da parte dell'infrastruttura sull'informazione della localizzazione dell'utente; questo fa sì che l'eventuale mapping tra l'id dei beacons e la loro posizione deve essere effettuato sul dispositivo client, spesso tramite app dedicate che, leggendo l'identificativo e i dati ricevuti dall'ambiente, risolvono la localizzazione su una base dati precedentemente popolata.



Img 21: Tramite i dati trasmessi nel segnale BLE, il client può richiedere ad un'infrastruttura esterna di identificarne la posizione.

Grazie al protocollo degli IBeacons è possibile identificare un'area generica (come ad esempio la propria casa) o una stanza specifica, permettendo al dispositivo utente di reagire di conseguenza. Diventa infatti facile immaginare una gestione di profili di suonerie/notifiche in base all'area in cui ci si trova (silenzioso al lavoro e attivo a casa) o ancora è possibile per il telefono proporre contenuti e applicazioni in base alla nostra posizione all'interno della casa; potrebbe chiederci di lanciare su netflix la nostra serie preferita nel momento in cui si accorga che siamo vicini al beacon collocato nel divano di fronte al televisore

Un altro approccio utilizzabile è quello che prevede l'inversione tra infrastruttura e beacons; è possibile infatti predisporre un'infrastruttura di lettori BLE attivi (alimentati dalla rete elettrica) disposti nell'area di localizzazione che monitorizzano il passaggio di un beacon BLE.

In questo modo è possibile, dotando gli utenti o oggetti di beacon, seguire i loro spostamenti a livello di stanza, garantendoci così un sistema di tracking di dispositivi mobili con un bassissimo livello di manutenzione.

Queste informazioni potrebbero essere utilizzate come l'equivalente "fisico" dei cookies http; ovvero potrebbe essere possibile identificare se un utente sia già passato per un certo punto, quando vi abbia transitato e per quanto vi sia rimasto. Alcuni esempi pratici potrebbe essere: installare i lettori all'interno di un supermercato e un beacon in ogni carrello della spesa in modo da poter tracciare quali corsie vengono visitate dall'utente per finalità di marketing personalizzato; o ancora dotare di beacons le attrezzature sanitarie di un ospedale in modo da sapere sempre in che stanza si trovino.

Pro

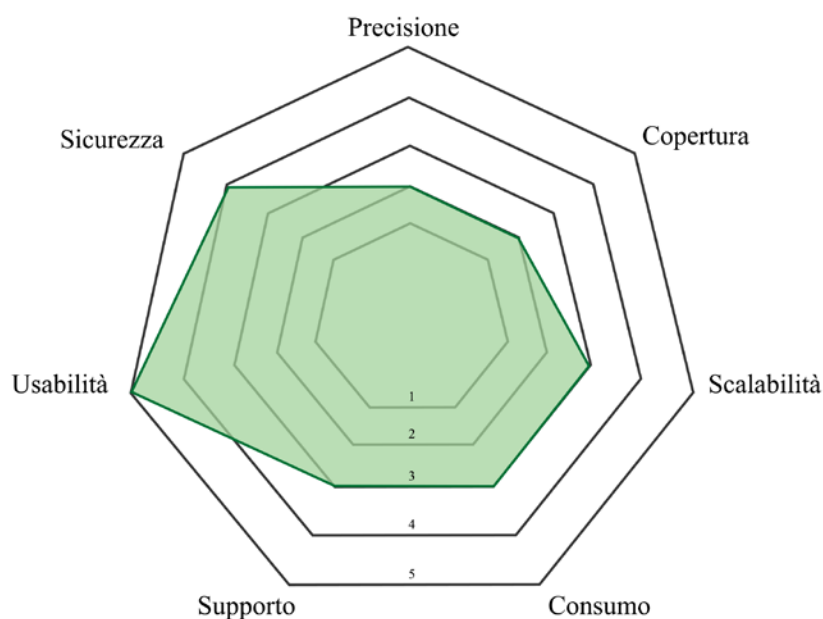
L'economicità dell'hardware e il bassissimo costo di mantenimento (grazie alla lunga durata della batteria) sono il punto forte di questa tecnologia. Fra tutte quelle analizzate questa è l'unica già fortemente diffusa sul mercato, grazie anche alla facilità d'uso; basta infatti attivare un nuovo beacon e, tramite app, mappare eventuali azioni da fare nel caso in cui si riceva il segnale da quest'ultimo, qual'ora ci si trovi nelle sue vicinanze.

Contro

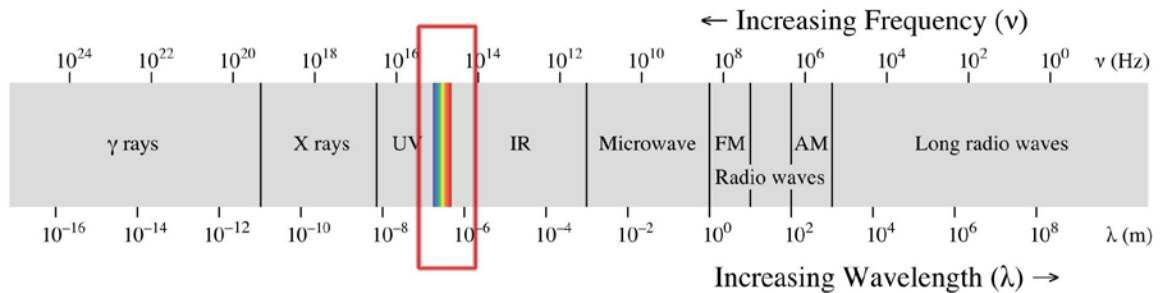
Quello che questo sistema guadagna in usabilità lo sacrifica in precisione; non rappresenta infatti nemmeno lontanamente un'alternativa indoor del GPS in quanto, basandosi sulla tecnica del Cell of Origin, siamo in grado solamente di determinare a quale beacon siamo vicini.

BLE Beacons		
Parametro	Valore	Note
Precisione	3-5 m	La precisione massima è a livello di stanza
Copertura	3-5 m	Essendo una trasmissione a bassa intensità il raggio risulta limitato.
Scalabilità	Bassa	E' necessario un notevole numero di beacons, almeno uno per stanza.
Consumo	Basso	Lo standard BLE è stato creato appositamente per garantire consumi energetici ridotti.
Supporto/infrastruttura	Medio	Bisogna disporre i beacons e utilizzare un client BLE compatibile.
Usabilità/Fattore di diffusione	Alta	L'hardware poco costoso combinato con la facilità d'uso è alla fonte del successo di questa tecnologia.
Sicurezza	Alta	L'infrastruttura in sé non è a conoscenza della posizione dell'utente. Rimane il problema della fiducia nell'app sul dispositivo client che rileva la posizione.

Grafico



9.2. Luce visibile



Molte delle tecnologie esaminate si sono focalizzate sull'utilizzo di medium non percepibili dall'uomo per garantire una "pacifica" convivenza ed evitare che la trasmissione o la modulazione dei segnali in questione fossero causa di disagi o distrazioni per gli utenti che utilizzano queste tecnologie di localizzazione in interni.

Questo non vale però per tutti gli approcci ricercati: infatti alcune tecniche fanno esplicitamente uso della banda dello spettro percepibile dall'occhio umano come strumento per determinare la posizione dell'utente.

Questa scelta è dovuta al fatto che, per garantire l'illuminazione artificiale, un'infrastruttura di led e lampade è sempre presente negli ambienti interni, e questa infrastruttura può essere riutilizzata con il vantaggio di mantenere bassi i costi mantenimento.

Le ricerche che sono state portate avanti si possono dividere in due categorie: quelle che sfruttano la modulazione della luce come una qualsiasi altra onda EM e quelle che invece utilizzano passivamente l'illuminazione preesistente per poter effettuare il riconoscimento di punti di riferimento noti tramite tecniche di riconoscimento delle immagini.

9.2.1. Modulazione tramite Luce Visibile

Questa classe di tecnologie utilizza approcci simili a quelli visti nel capitolo precedente dedicato alle trasmissioni EM, ma lo fa sulla parte di spettro percepibile dall'occhio umano; questo permette di sfruttare una serie di componenti (come i LED) di bassissimo costo e altissima reperibilità, abbattendo così i costi di sviluppo e creando i presupposti per una produzione di massa di dispositivi basati su questi componenti.

Alla base di queste tecniche vi è la modulazione di messaggi che veicolano l'identificativo di una certa sorgente luminosa su banda visibile, in modo da permettere al client ricevente (composto in questo caso di diodi fotoricettori, altri componenti elementari ed economici) di identificare la propria posizione tramite tecniche di Cell of Origin.

La modulazione del segnale viene spesso fatta in ampiezza (variando cioè la potenza dell'impulso emesso per rappresentare bit accesi o spenti) e con una frequenza di variazione temporale possibilmente più alta di quella percepibile dall'occhio umano; in questo modo, anche se l'impulso luminoso risulterebbe visibile, l'utente non riesce a percepire la modulazione del segnale.

Come detto precedentemente il vantaggio di queste tecniche sta nel fatto che in ambienti interni è già presente un'infrastruttura di emettitori luminosi (come lampade e led etc..) per garantire la visibilità negli ambienti; questa può quindi essere modificata, sostituendo gli

emettitori tradizionali con una versione modificata, sviluppati appositamente per trasmettere la modulazione del proprio identificativo.

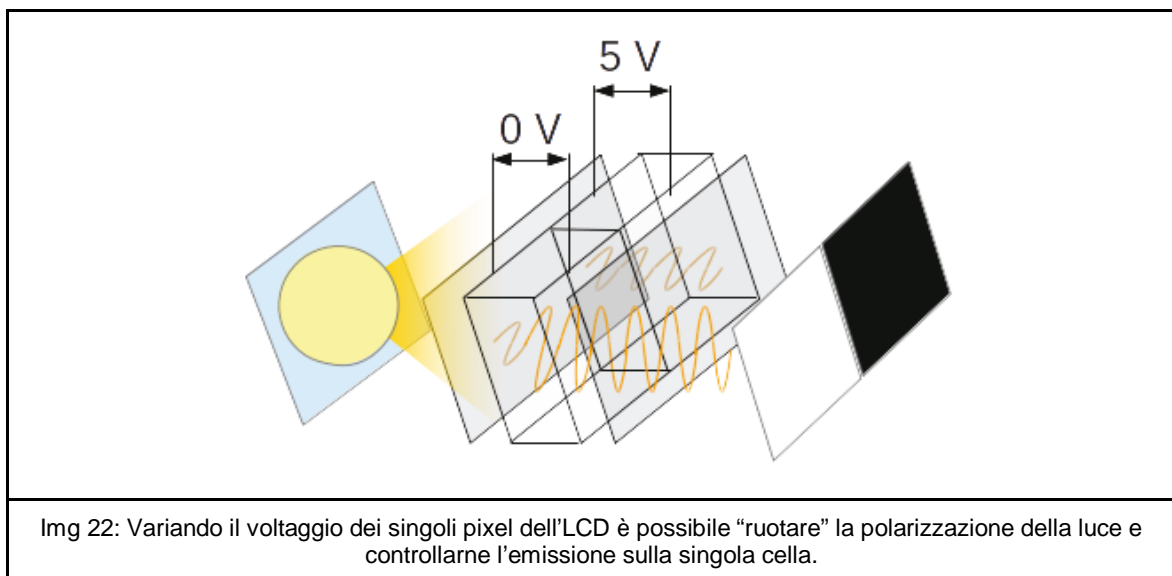
Dal momento che la luce visibile ha una frequenza molto alta, la sua dispersione risulta molto più limitata rispetto alle microonde e altre frequenze utilizzate in altri approcci, garantendo così che la trasmissione con origine in una certa stanza raramente lascerà quest'ultima, aumentando così la precisione del sistema di localizzazione.

Evoluzioni:

Un approccio innovativo è stato utilizzato dagli autori di "LiBeam" [22] i quali si sono concentrati sul creare un sistema basato sulla modulazione di impulsi luminosi ad alta precisione.

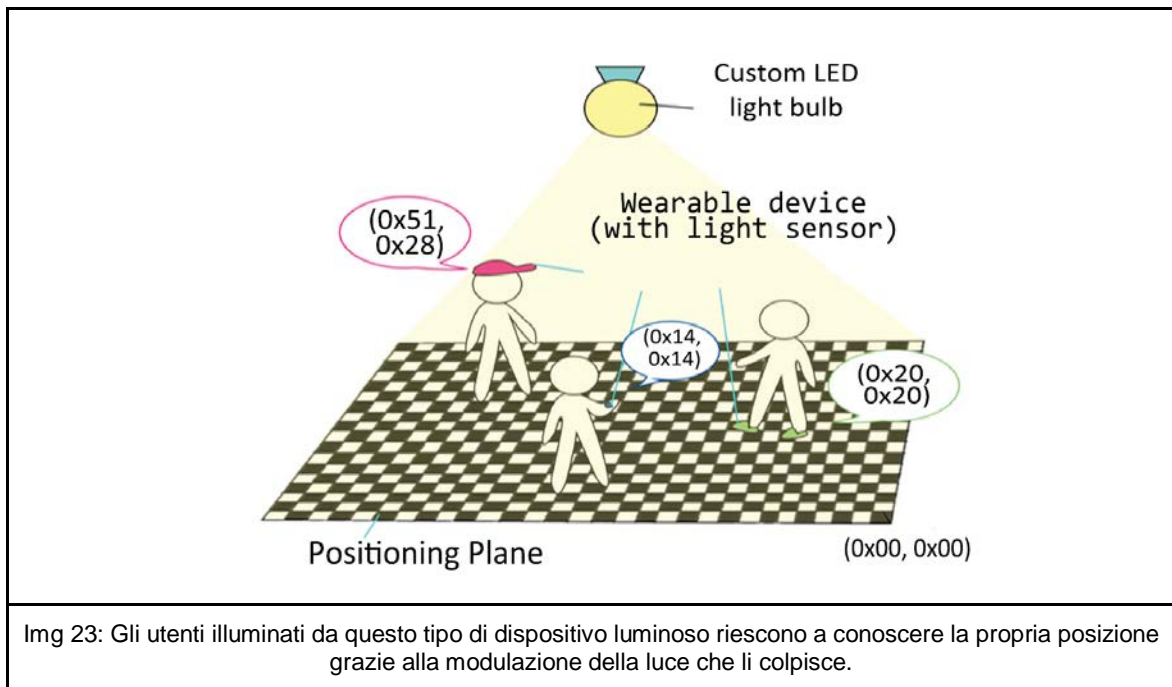
Il prototipo realizzato si basa su un emettitore composto da più componenti; la luce viene emessa da una fonte luminosa e attraversa vari strati prima di essere proiettata sull'area interessata: il primo strato, dopo aver lasciato l'emettitore, è costituito da un filtro polarizzato che permette il passaggio solamente delle onde orientate lungo un piano specifico filtrando le altre; questo permette di allineare la luce emessa in modo da poterla meglio modificare successivamente.

A seguire troviamo un display a cristalli liquidi che, comandato elettronicamente, permette di ruotare la polarizzazione della luce che attraversa i pixel "accesi"; l'ultima componente è un altro filtro polarizzato allineato al primo che permette di filtrare la luce "ruotata" dal passaggio attraverso l'LCD.



Img 22: Variando il voltaggio dei singoli pixel dell'LCD è possibile "ruotare" la polarizzazione della luce e controllarne l'emissione sulla singola cella.

In questo modo è possibile tagliare completamente la luce in uscita sul singolo pixel, riuscendo così a proiettare una matrice in cui ogni cella può essere accesa e spenta a piacere con lo scopo di riuscire a modulare un segnale specifico all'interno di ogni singola cella. Un dispositivo client, dotato di fotoricettori, potrà quindi identificare in quale delle celle proiettate si trovi semplicemente demodulando il segnale ricevuto, risolvendo così la propria posizione.



Il prototipo sviluppato è, per ora, abbastanza limitato in quanto i dispositivi riceventi, per evitare rumore (introdotto da altre fonti luminose), utilizzano anch'essi filtri polarizzati orientati e richiedono il mantenimento di un allineamento preciso con l'emettitore. La precisione di localizzazione di questo sistema è legata a quanto è grande l'area di proiezione e quanto densa è la griglia di pixel dello schermo LCD, ma dai risultati pubblicati si nota una precisione al centimetro su un'area proiettata di diversi m².

Pro

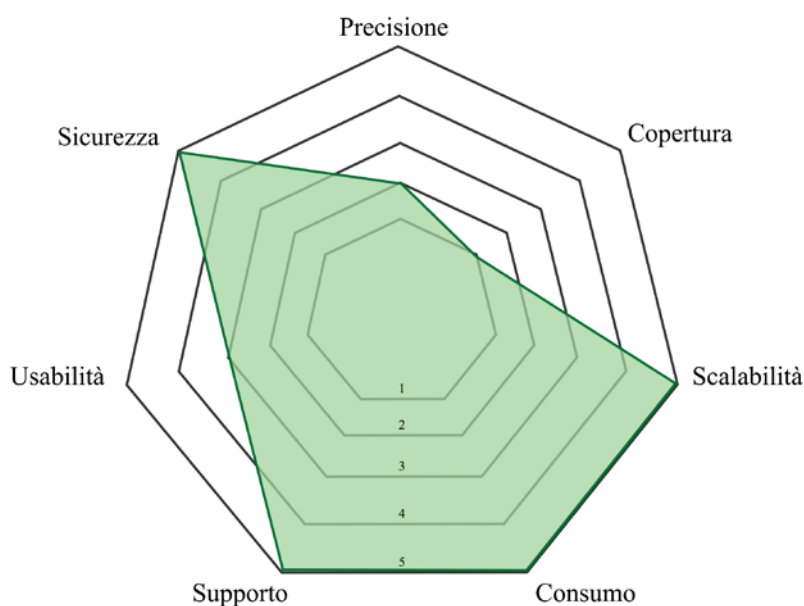
I vantaggi di questa tecnica risiedono nel fatto che, una volta affinata, sarà sufficiente utilizzare delle lampadine specifiche in grado di trasmettere la propria posizione al dispositivo client che se ne trovi illuminato, rendendo in pratica gratuito il riuso dell'infrastruttura di illuminazione artificiale.

Contro

Questo tipo di implementazione, utilizzando la parte di spettro EM percepibile dall'occhio umano, soffre molto di fenomeni di interferenza da parte di altre fonti luminose installate per permettere la visione da parte dell'utente; inoltre è necessario cercare di minimizzare l'impatto della modulazione del segnale rispetto alla sua percezione da parte dell'utilizzatore in modo da non risultare un fastidio piuttosto che un'utilità.

Modulazione della luce visibile		
Parametro	Valore	Note
Precisione	Stanza	La precisione è legata all'area illuminabile.
Copertura	2-10m ²	L'area effettiva è quella che risulta possibile illuminare.
Scalabilità	Alta	E' possibile espandere il sistema semplicemente installando nuove fonti luminose.
Consumo	Basso	Il consumo è pressappoco lo stesso di una lampadina classica
Supporto/infrastruttura	Bassa	Sfrutta l'impianto di illuminazione
Usabilità/Fattore di diffusione	Medio	E' possibile utilizzare i sensori fotoricettori presenti nei più comuni smartphone ma il rate di aggiornamento risulta limitato rispetto ad hardware dedicato.
Sicurezza	Alta	Anche in questo caso l'infrastruttura non è a conoscenza della localizzazione dal momento che questa viene calcolata lato client

Grafico



9.2.2. Localizzazione tramite immagini

Questa categoria di tecnologie sfrutta la luce visibile nella maniera più intuitiva possibile: tramite foto/videocamere registra le immagini dell'ambiente circostante, illuminate da luce naturale o artificiale, ricercando all'interno di queste caratteristiche utili alla determinazione della posizione. Dal momento che esistono svariati tipi di informazione che possono essere riconosciute all'interno di un'immagine sono stati sviluppati diversi algoritmi, in grado di riconoscere di ognuna di queste caratteristiche differenti.

Marker locali

E' possibile utilizzare dei marker che, oltre ad essere punti di riferimento in sé possano veicolare autonomamente informazioni sulla propria posizione, come ad esempio codici a barre o QR code; per questa tecnica è necessario un dispositivo utente (come uno smartphone) in grado di analizzare in tempo reale le immagini in arrivo dalla telecamera, determinare la presenza di uno di questi codici ed effettuare la decodifica.

I dati veicolati da questo tipo di marker possono essere svariati; si può passare dal "semplice" identificativo univoco, da confrontare con un database prepopolato contenente id e posizione di ognuno di essi, fino all'incorporare direttamente le informazioni di posizione all'interno del codice del marker.

Nel momento in cui il client sarà in grado di leggere uno dei marker si potrà assumere che esso si trovi all'incirca nelle sue vicinanze, determinando così la posizione tramite l'algoritmo di Cell of Origin.

Motion Capture

Un approccio molto utilizzato in cinematica e altri ambiti specializzati, è quello del cosiddetto Motion Capture: l'idea consiste nell'avere un set di telecamere in posizioni fisse e determinate, e di far muovere all'interno dell'area di ripresa uno o più target, utilizzando software appositi per identificarli e seguendone lo spostamento nel tempo. Se i target sono univocamente identificabili, utilizzando almeno due telecamere è possibile sfruttare l'effetto di parallasse per calcolare la distanza dai due dispositivi di ripresa, ricavando così la localizzazione tridimensionale del punto tracciato.

Questa tecnica può risultare molto precisa ma, prevedendo un alto controllo della scena e un alto costo computazionale per il tracking di più target contemporaneamente in tempo reale, viene utilizzata solamente in ambienti ristretti e per discipline specializzate, come ad esempio la digitalizzazione dei movimenti di persone in carne ed ossa allo scopo di muovere più verosimilmente modelli 3D per effetti cinematografici.

Riconoscimento di caratteristiche specifiche dell'ambiente

Al contrario delle tecniche precedenti, che prevedevano esplicitamente l'utilizzo di marker e target, la categoria di sistemi che vedremo ora fa affidamento solamente sul riconoscimento di ciò che è già presente nell'ambiente per determinare la localizzazione, evitando così il bisogno di introdurre e mappare oggetti aggiuntivi.

Il funzionamento di questa tecnologia si divide in due fasi: durante la prima fase si procede con il campionamento di immagini, raccolte tramite telecamere, relative ad ogni zona dell'area di posizionamento; a queste immagini verrà associato manualmente posizione e orientamento in cui sono state prese e verranno utilizzate per popolare un database di caratteristiche che possano essere di riferimento alla localizzazione.

Successivamente, durante la fase attiva, gli utenti o dei sistemi automatici (come rover e altri tipi di robot) potranno scattare immagini prese dal punto in cui si trovano e confrontarle con quelle del database creato durante la fase precedente, con lo scopo di trovare somiglianze tra esse e poter così desumere la propria posizione.

Un'immagine o un video (composto da tanti frame o immagini in sequenza) si compone di pixel, solitamente divisi su tre canali di colore: rosso, verde e blu (RGB in inglese); dal momento che in base alla quantità di luce o anche solo l'orientamento il contenuto dei pixel cambia drasticamente (ci basti pensare a come si modifica un'immagine in base alla prospettiva), per rendere possibile l'identificazione e il riconoscimento tra due immagini è necessario quindi non ragionare a livello di pixels e cercare di astrarre per riuscire a riconoscere tra queste informazioni qualcosa di più.

Varie tecniche sono state studiate per far fronte a questa problematica: molte si basano su un algoritmo noto come SIFT (scale-invariant feature transform), come fanno ad esempio gli autori di "Indoor Positioning Using Smartphone Camera" [23]: questa procedura permette di identificare e catalogare all'interno dell'immagine la presenza di forme conosciute, a prescindere dalla loro effettiva dimensione nel frame, dato che sappiamo non essere attendibile in quanto variabile in base alla distanza da cui è stata scattata l'immagine.

Analisi di questo tipo richiedono però molta potenza di calcolo e vengono quindi generalmente svolte su un server centrale, al quale i client inviano le immagini scattate, in modo che esso possa processarle e confrontarle con quelle presenti nel database del training set.

Per cercare di aumentare la scalabilità di questo sistema sono stati messi a punto algoritmi specializzati in grado di operare anche su dispositivi con limitata potenza di calcolo, come il SURF (Speeded up robust features) che vanta capacità di riconoscimento simili al SIFT ma con un tempo di esecuzione molto ridotto.

Altre tecniche si sono orientate sulla riduzione dei dati esaminati nell'immagine come ad esempio l'identificazione delle linee di fuga prospettiche per riuscire a determinare la forma dei corridoi o delle stanze, o ancora l'analisi di una specifica parte dell'ambiente, come ad esempio i soffitti; quest'ultimo approccio è molto utilizzato per la guida automatica di robot, in quanto è sufficiente dotarli di una telecamera orientata verso il soffitto per garantirne la localizzazione.

Oltre alle tecniche di immagine tradizionali, quelle che generano un insieme di pixel con tre canali di colore, negli anni sono state sviluppate tecnologie cosiddette RGBD, le quali aggiungono alle informazioni di colore anche una misurazione della distanza misurata per ogni pixel.

Una delle prime tecniche utilizzate per recuperare l'informazione sulla distanza è stata quella delle telecamere stereoscopiche, ovvero l'utilizzo simultaneo di due sistemi di ripresa orientati lungo lo stesso asse e separati da una distanza nota (baseline); una volta tenuto conto della lunghezza focale, utilizzando tecniche di parallasse e misurando lo spostamento dei pixel tra i due frame registrati diventa possibile desumere la distanza di ogni singolo punto delle due immagini registrate.

A partire dal 2010, grazie ad un innovativo sviluppo di Microsoft, teso alla creazione di un controller per videogiochi, è nato Kinect.

Una telecamera tradizionale riprende la scena in accoppiata con altri due componenti: un sistema di proiezione ad infrarossi che emette una griglia di punti, ed una telecamera sensibile agli infrarossi che riesce a misurare la loro dispersione.



Img 24: Una griglia di punti viene proiettata nella stanza (sulla frequenza infrarossa) e tramite la misurazione della loro dimensione e deformazione è possibile calcolarne la distanza

Grazie a questi componenti il Kinect è in grado di misurare la distanza di ogni singolo punto proiettato, aggiungendo così questa informazione alla matrice di pixel ripresi dalla camera tradizionale, generando in questo modo per ognuno di essi quattro attributi: rosso, verde, blu e la distanza misurata (RGBD).

Questa informazione aggiuntiva permette di caratterizzare maggiormente la scena, rendendo queste tecniche originariamente basate su immagini molto più simili al riconoscimento matching di Point Cloud.

Pro

Le tecniche basate sul riconoscimento di immagini hanno il vantaggio di essere particolarmente economiche, necessitando solamente di fotocamere, e di non aver bisogno di alcun tipo di infrastruttura, rendendone facile l'implementazione e la scalabilità.

Contro

Basandosi sul riconoscimento di immagine campionate precedentemente, è ovviamente necessario spendere tempo nella realizzazione di questo training set di immagini; inoltre l'alta complessità computazionale legata all'analisi delle immagini stesse fa sì che il rate di aggiornamento della posizione sia mediamente più basso che in altre tecniche (si parla in alcuni casi anche di aspettare svariati secondi), svantaggiando la diffusione di questo tipo di tecnologia.

Ultimo ma non meno importante è il fatto che, basandosi su luce visibile, questa tecnica non funziona al buio.

Analisi delle immagini																		
Parametro	Valore	Note																
Precisione	1-5 metri	La precisione è legata alla definizione dell'immagine, e raggiunge il suo picco in dispositivi dotati di camere RGBD.																
Copertura	Variabile	L'area coperta è tutta quella di cui sono state realizzate immagini durante la fase offline.																
Scalabilità	Media	E' sufficiente catturare immagini della nuova area per garantire l'espansione del sistema, ma all'aumentare dei dati presenti i tempi di confronto si allungano, gravando sul rate di aggiornamento.																
Consumo	Medio/Alto	Il consumo è dovuto all'utilizzo della fotocamera e eventualmente l'upload delle immagini sul server.																
Supporto/infrastruttura	Bassa	Nessuna infrastruttura, necessita solamente di fotocamere sul client																
Usabilità/Fattore di diffusione	Media	L'utilizzo di un dispositivo client in grado di scattare foto è di per sé facile e intuitivo; purtroppo l'alto tempo di elaborazione per ottenere la localizzazione penalizza questa tecnica.																
Sicurezza	Bassa	Visto che spesso l'analisi viene fatta server-side risulta possibile conoscere centralmente la posizione di tutti gli utenti.																
Grafico																		
<p>The radar chart displays the performance of the system across seven parameters. The parameters are arranged around a central point, with five concentric rings representing a scale from 1 (innermost) to 5 (outermost). The data points are as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parametro</th> <th>Valore</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Precisione</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Copertura</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>Scalabilità</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Consumo</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Supporto</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Usabilità</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Sicurezza</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>			Parametro	Valore	Precisione	4	Copertura	5	Scalabilità	4	Consumo	3	Supporto	3	Usabilità	3	Sicurezza	2
Parametro	Valore																	
Precisione	4																	
Copertura	5																	
Scalabilità	4																	
Consumo	3																	
Supporto	3																	
Usabilità	3																	
Sicurezza	2																	

9.3. Campo Magnetico

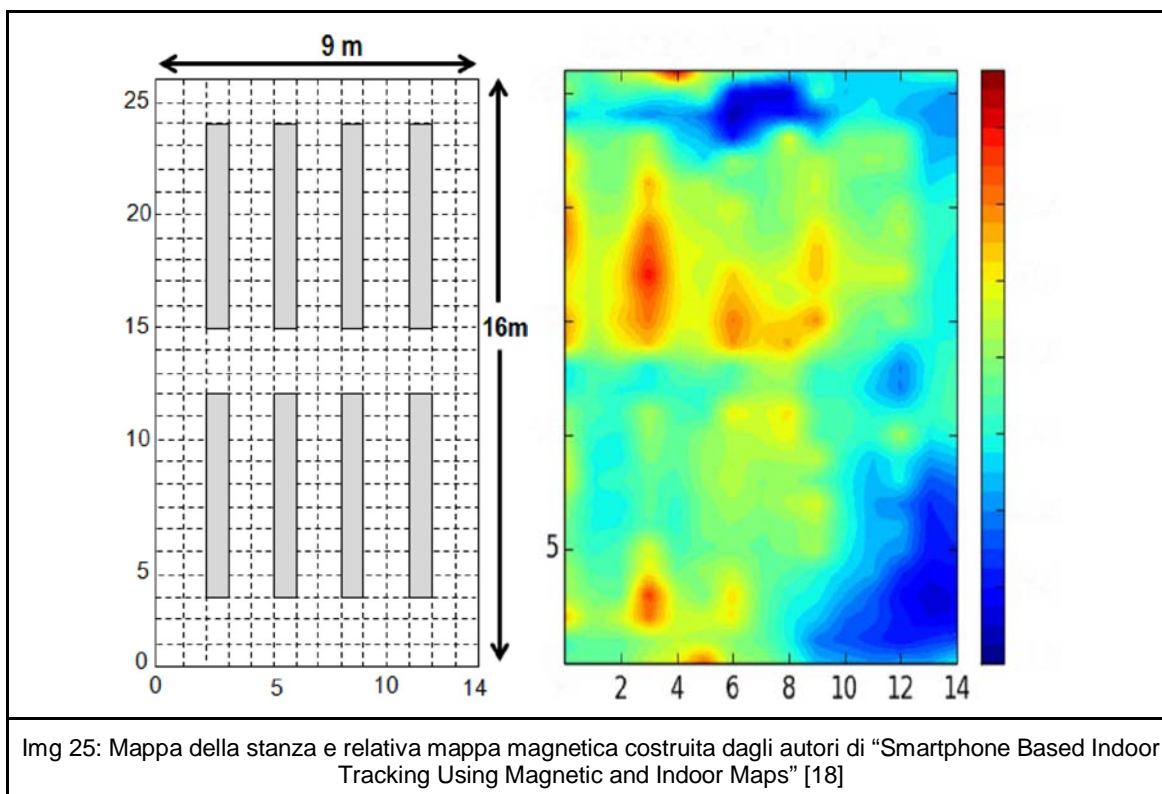
Il campo magnetico è un fenomeno che permea il pianeta ed è generato dalla rotazione, all'interno del nucleo terrestre, di nickel e ferro fusi; questo campo è stato sfruttato fin dai tempi antichi per la navigazione, tramite l'ausilio di bussole, aghi di metallo magnetizzato liberi di ruotare su di un perno, che si allineano sempre parallelamente alle linee di forza del campo.

Il campo magnetico non è però uniforme lungo tutta la superficie della terra: esso è influenzato da vari fattori sia a livello macroscopico che a livello locale, come ad esempio da depositi minerali o riserve idriche sotterranee, o dalla presenza di oggetti metallici o magnetici nelle vicinanze.

Utilizzando queste anomalie è possibile ottenere una mappa che rappresenta l'intensità del campo, che non sia uniforme, anzi notevolmente differente da punto a punto, con intensità sostanzialmente diverse anche a distanze inferiori ai 10 cm.

Sfruttare queste variazioni di intensità è l'idea alla base di questa tecnica di localizzazione, che ha il vantaggio di utilizzare hardware molto economico e di non appoggiarsi a nessuna infrastruttura, rendendola quindi una delle meno costose attualmente disponibili.

Anche in questo caso è necessario dividere il lavoro in due fasi: durante la prima fase ("offline") sarà necessario mappare l'area di interesse, misurando nel maggior numero di punti possibili l'intensità del campo magnetico tramite un magnetometro (uno strumento molto comune in tutti gli smartphone), costruendo così la mappa stessa del campo magnetico; ovviamente sarà necessario interpolare i valori per i punti di cui non si hanno misurazioni dirette.



Img 25: Mappa della stanza e relativa mappa magnetica costruita dagli autori di "Smartphone Based Indoor Tracking Using Magnetic and Indoor Maps" [18]

Esistono due varianti di magnetometri: una scalare, ovvero che fornisce una rilevazione unica, e una vettoriale, che invece misura il valore del campo lungo una o più determinate direzioni spaziali.

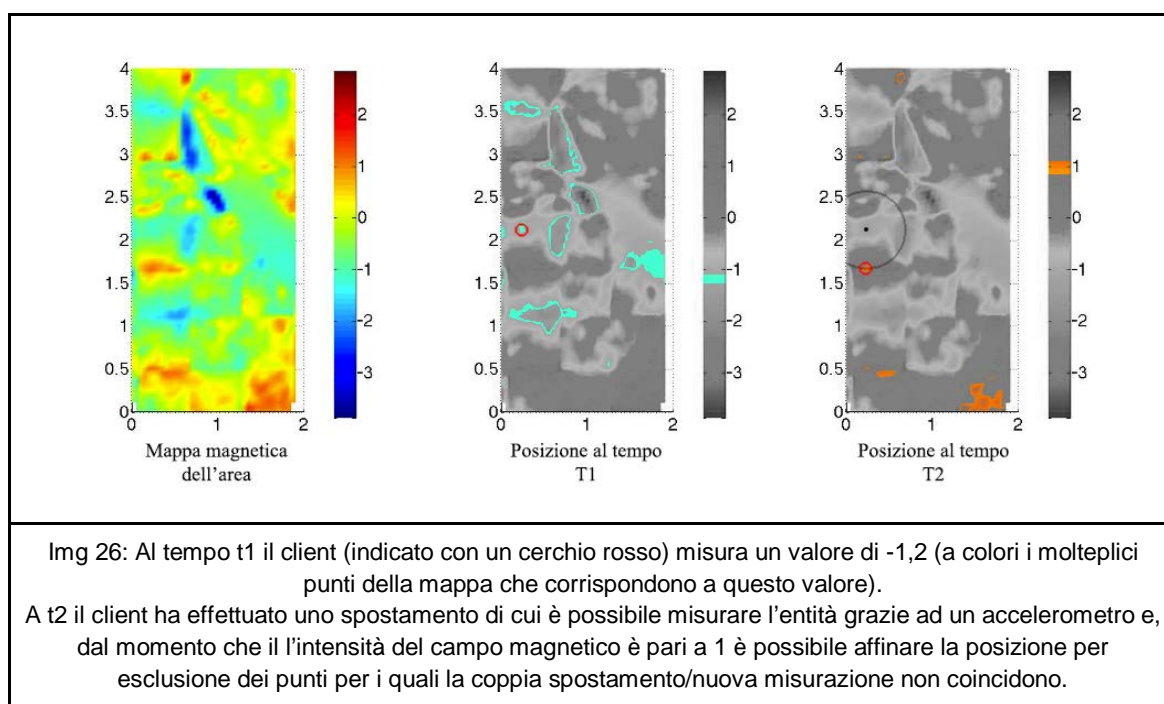
L'utilizzo della versione vettoriale, più precisa rispetto alla controparte scalare, su dispositivi piccoli e maneggevoli come gli smartphone introduce purtroppo un'incertezza sull'orientamento relativo del telefono; non è possibile fare affidamento sulla direzione del dispositivo in quanto l'utente potrebbe tenerlo in mano mentre si muove o averlo in tasca o ancora in uno zaino, e non ci sono perciò garanzie che le misurazioni lungo gli assi siano uguali a quelle rilevate durante la fase di creazione della mappa.

Per ovviare a questo problema, occorre trasformare opportunamente le misurazioni vettoriali lungo gli assi in un unico valore scalare e creare la nostra mappa basandosi solamente su questo valore. Il procedimento sarà lo stesso che verrà effettuato dal dispositivo client durante la seconda fase, qualora disponesse anch'esso di un magnetometro vettoriale, in modo da poter confrontare il valore scalare appena convertito con quello della mappa.

Una volta costruita la mappa dell'intensità scalare del campo magnetico è possibile passare alla seconda fase ("online") durante la quale un client che sta attraversando l'area mappata leggerà e calcolerà costantemente il valore scalare del campo magnetico, confrontandola volta per volta con quelle presenti sulla mappa.

Ovviamente la singola rilevazione risulterà essere poco precisa, in quanto svariati punti della mappa di riferimento possono avere intensità simile, ma se abbiniamo al magnetometro l'utilizzo di un giroscopio/accelerometro (si vedano i sistemi di Dead Reckoning più avanti) grazie al quale è possibile calcolare la direzione e lo spostamento effettuati, la tecnica guadagna presto di precisione.

Potendo seguire lo spostamento dell'utente è possibile infatti confrontare una serie di letture in più punti, piuttosto che una lettura singola, affinando così la precisione fino a valori inferiori al metro.



Grazie alla facilità d'uso, questa tecnica di localizzazione è sfruttata da diversi framework e servizi, già attualmente disponibili, sia pubblici che a pagamento; ne è un esempio IndoorAtlas, il cui prodotto è appunto una infrastruttura software centralizzata che permette a privati e aziende la creazione/upload delle mappe dei propri edifici, guidandoli poi passo passo nella scansione del campo magnetico nell'area interessata; l'azienda fornisce anche l'app che può essere usata sul dispositivo client come sistema di navigazione, confrontando le letture attuali con quelle memorizzate sul server. Un approccio molto simile è stato realizzato dall'università di Cipro; tramite il loro prodotto AnyPlace, che sfrutta il campo magnetico e la navigazione inerziale, fornisce una serie di app gratuite per la creazione di mappe e per la successiva navigazione sulle stesse.

Pro:

Questa tecnologia ha ottenuto molto successo in quanto, non avendo bisogno di un'infrastruttura ed essendo utilizzabile tramite qualunque smartphone, risulta particolarmente economica e alla portata di tutti.

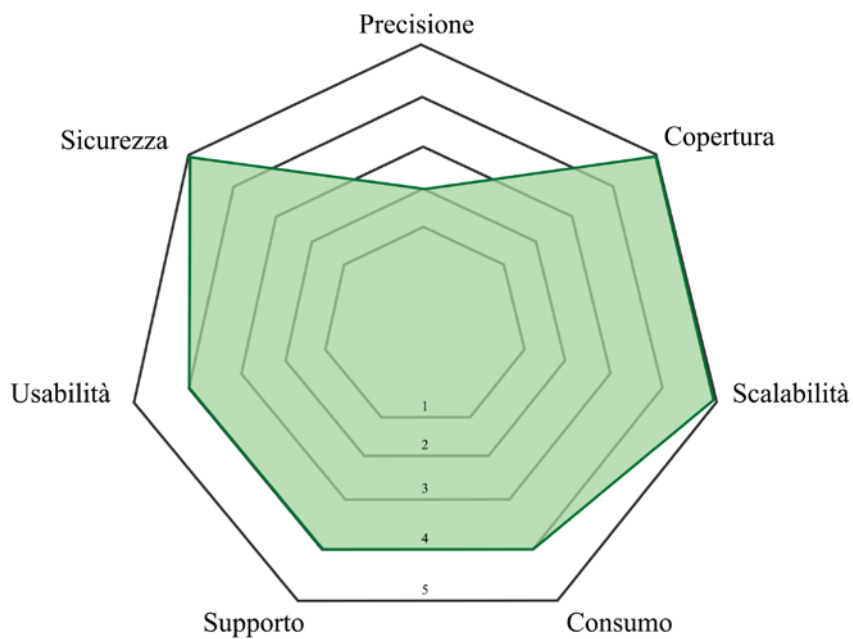
Non meno importante è il fatto che la precisione di localizzazione sia generalmente alta nonostante il basso consumo energetico del magnetometro, garantendo una lunga vita alla batteria del telefono.

Contro:

Sebbene il consumo energetico sia molto minore rispetto ad altri approcci, questa tecnica fa affidamento sulla creazione di una mappa di valori di intensità del campo magnetico, la cui creazione può impegnare anche molto tempo in aree vaste, senza considerare l'onere di aggiornarla di tanto in tanto: infatti, il campo magnetico può subire variazioni di origine naturale nel tempo, alle quali si devono sommare eventuali modifiche apportate all'ambiente, come aggiunte o rimozioni di oggetti metallici o mobili, che possono causare differenze anche significative rispetto alla mappa calcolata inizialmente.

Campo magnetico		
Parametro	Valore	Note
Precisione	10-50 cm	Più difforme è il campo magnetico più alta potrà essere la precisione
Copertura	Ovunque	Basandosi su un fenomeno planetario non ha un vero e proprio limite
Scalabilità	Alta	E' possibile estendere la copertura semplicemente mappando il nuovo ambiente
Consumo	Basso	L'unico consumo è quello, bassissimo, legato all'utilizzo del magnetometro
Supporto/infrastruttura	Bassa	E' sufficiente un magnetometro
Usabilità/Fattore di diffusione	Alta	Una volta impostato il sistema è sufficiente uno smartphone come dispositivo utente. L'update rate e la precisione sono abbastanza alti.
Sicurezza	Alta	Il client è l'unico in grado di determinare la propria posizione

Grafico



9.4. Pressione Atmosferica

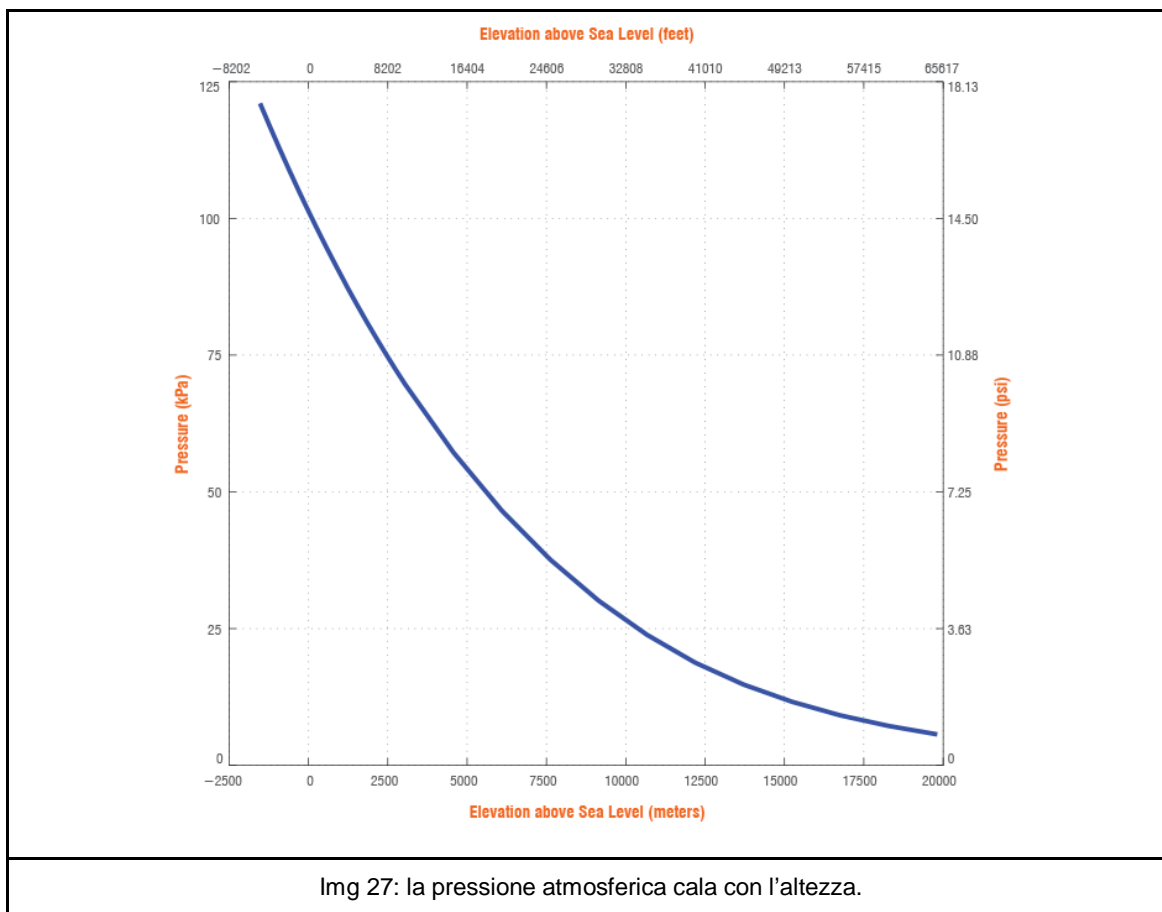
Molti approcci visti in precedenza semplificano il posizionamento riducendolo ad un problema bidimensionale, mentre questa tecnica di posizionamento è una delle poche sviluppate con l'obiettivo principale di determinare il posizionamento sull'asse verticale.

Quando si parla di altitudine in interni, generalmente l'informazione che ci interessa veramente sapere non è tanto l'altezza da un punto base di riferimento (come ad esempio dal livello del mare), quanto più il numero del piano a cui ci troviamo; questa informazione può tendenzialmente essere ricavata in base all'altitudine assoluta, in relazione con quella registrata all'ingresso dell'edificio e all'altezza del singolo piano.

Il fenomeno fisico su cui si basa questa tecnica è la pressione atmosferica; infatti il peso dell'aria nell'atmosfera grava sulle molecole di gas sottostanti, aumentandone la pressione.

Questo incremento non è uniforme, perché con il diminuire dell'altitudine il quantitativo di gas che ci sovrasta cresce, facendo sì che l'andamento della pressione non sia lineare. Si è definita come pressione di riferimento una media di quelle misurate a livello del mare il cui valore è di 1013.25 mbar o 1 atm.

E' quindi possibile, attraverso l'utilizzo di barometri (anche questi abbastanza diffusi negli smartphones), misurare la pressione atmosferica attuale e confrontarla con quella di riferimento per calcolare così la differenza di altezza dal livello del mare.

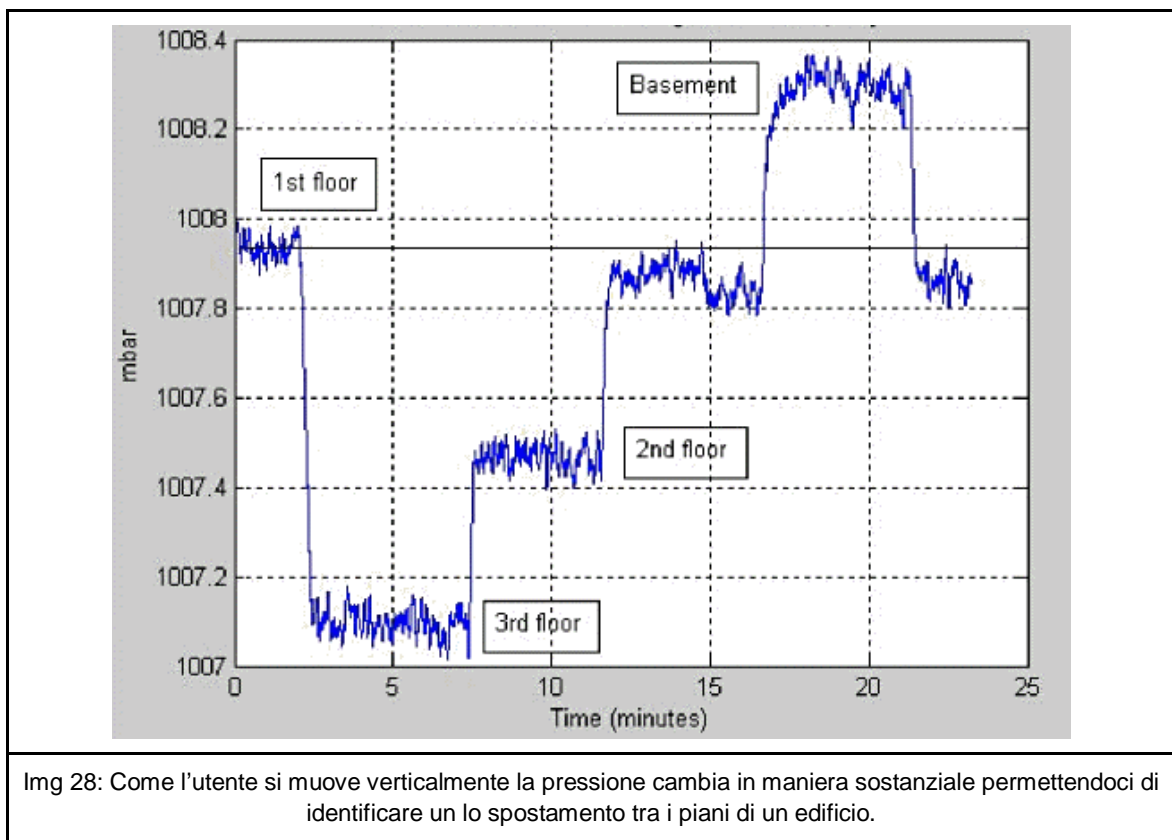


Questa rilevazione però soffre di un margine di errore notevole, causato dal fatto che la pressione atmosferica è fortemente influenzata sia dalla temperatura che da fenomeni meteorologici. Accoppiare un termometro ad un barometro riduce sensibilmente l'errore derivato dalla temperatura, ma rimane comunque una grossa incertezza perché per ottenere una misurazione precisa bisognerebbe conoscere la temperatura di ogni strato dell'atmosfera sovrastante, cosa piuttosto complicata da fare.

Per fortuna però, anche se un valore assoluto è difficile da ottenere, la differenza tra più letture dello stesso barometro sono spesso una buona rappresentazione del cambiamento di pressione (ovvero lo strumento in sé è molto preciso); perciò molti approcci utilizzano il barometro per determinare cambiamenti di altitudine piuttosto che l'altitudine assoluta.

E' possibile quindi stimare l'altitudine iniziale dell'utente (ad esempio, nella transizione tra esterno/interno, potremmo utilizzare l'ultima lettura ricevuta dal GPS prima dell'ingresso nell'edificio) e da qui monitorare i cambi di pressione per determinare il cambiamento di altitudine rispetto a questa rilevazione base.

Anche in questo caso però si va in contro a diversi problemi, perché la pressione varia fortemente con l'ora del giorno e/o perturbazioni, e risulta quindi problematico capire se la variazione misurata sia legata ad uno spostamento dell'utente o ad un temporale che si sta avvicinando.



Evoluzioni:

Varie tecniche hanno cercato di mitigare questa incertezza; è possibile, ad esempio, utilizzare un barometro locale immobile (base station) che fornisca un valore di pressione

di riferimento ad un'altezza assoluta nota a priori, oppure l'idea di monitorare altri aspetti (accelerometro e altri sensori) per capire se l'utente si stia effettivamente muovendo. Altri algoritmi ancora sfruttano l'idea che i cambiamenti di pressione naturali sono generalmente molto meno repentini di quelli dovuti all'attività dell'utente. Tenendo quindi traccia delle ultime letture effettuate è possibile analizzare il nuovo dato per capire di quanto si discosta dalle precedenti (anche in relazione alla sensibilità del barometro in uso) e permettere di compensare eventuali aumenti dovuti a causa naturali.

Pro

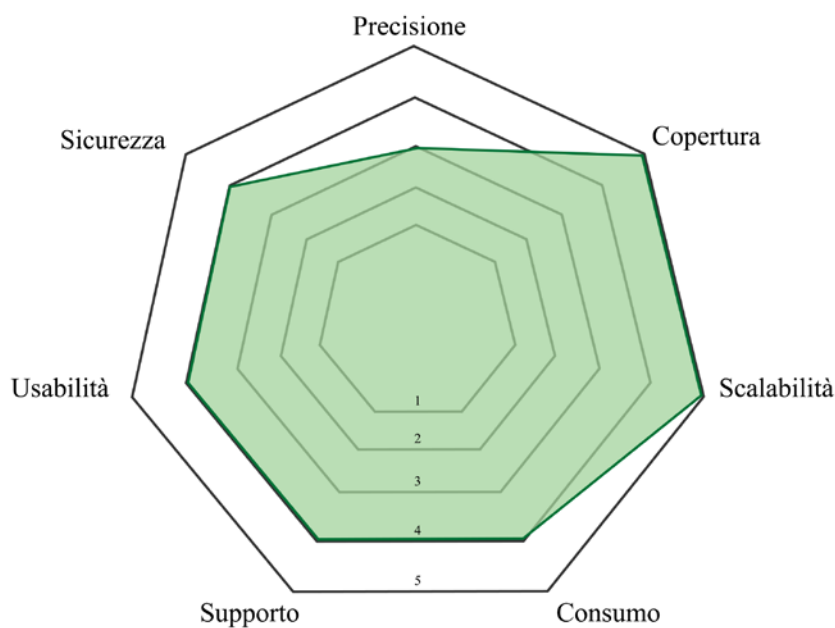
Grazie alla misurazione affidabile della differenza tra più letture, è possibile stimare con precisione inferiore al metro gli spostamenti sull'asse verticale dell'utente, bisogna però utilizzare vari stratagemmi per compensare eventuali drift della pressione dovuti a fenomeni esterni. Il consumo elettrico del barometro è forse quello più basso tra tutti i metodi presi in considerazione.

Contro

Tralasciando i problemi legati alla misurazione assoluta dell'altitudine questa tecnica, quando non abbinata ad un infrastruttura (come ad esempio uno o più barometro che fornisca una pressione di riferimento ad un certo piano), risulta piuttosto fallace nel determinare il piano a cui si trova l'utente. Molti autori prendono come riferimento la pressione della prima rilevazione (soprattutto in casi di passaggio tra esterni ed interni) per determinare il piano terra, ma questo ragionamento non sempre è applicabile, in quanto l'ingresso nell'edificio potrebbe trovarsi ad un piano diverso dal piano terra.

Pressione Atmosferica		
Parametro	Valore	Note
Precisione	30-50 cm	Solo sulla componente verticale e considerando uno strumento tarato per la temperatura dell'aria.
Copertura	Ovunque	L'unica limitazione sono gli ambienti pressurizzati o fortemente climatizzati
Scalabilità	Alta	Funziona ovunque sia presente l'atmosfera
Consumo	Basso	Il barometro è, tra tutti quelli analizzati, uno degli strumenti a più basso consumo energetico
Supporto/infrastruttura	Bassa	Necessita solamente di un barometro
Usabilità/Fattore di diffusione	Alta	Molti smartphone sono dotati di barometro.
Sicurezza	Alta	Il client è l'unico in grado di determinare la propria altitudine.

Grafico



9.5. Acoustic ultrasounds

Sono definiti ultrasuoni tutte le vibrazioni sonore la cui frequenza è superiore a 20 kHz; questi suoni non sono percepibili dall'orecchio umano e grazie a questa caratteristica vengono usati in vari settori, dall'industria medica alle telecomunicazioni.

L'utilizzo di ultrasuoni per determinare distanze, e conseguentemente la posizione, è un'idea presa in prestito dalla natura: infatti numerosi animali, come pipistrelli e cicale, utilizzano metodi di ecolocalizzazione, sono cioè in grado di emettere suoni ad alta frequenza che utilizzano come un sonar per illuminare le prede di notte o determinare la vicinanza e direzione di predatori o di loro simili.

L'utilizzo di questa tecnologia prevede la disposizione di due classi di componenti: un'infrastruttura di beacons statici disposta nell'ambiente e dispositivi clients dotati di capacità ultrasoniche la cui posizione deve essere identificata.

Si parla di sistema attivo qualora siano i client ad emettere il segnale ultrasonico e siano i beacons dell'infrastruttura a riceverlo; questa metodologia ha lo svantaggio di non essere molto scalabile in quanto all'aumentare del numero di clients, se non propriamente coordinati tra loro, si riscontra un aumento notevole del rumore causato dalla trasmissione contemporanea dei loro segnali.

L'approccio alternativo, noto come "passivo", prevede invece che siano i beacons a trasmettere, lasciando al client l'unico compito di ricevere e desumere la propria posizione.

Questa modalità risulta migliore rispetto alla precedente in quanto garantisce più privacy all'utente, dal momento che la posizione viene calcolata esclusivamente sul dispositivo client, e scala più facilmente in quanto è più facile coordinare l'emissione degli impulsi da parte dell'infrastruttura piuttosto che dai dispositivi degli utenti.

Un fattore molto importante da tenere in considerazione è che la propagazione del segnale ultrasonico è fortemente influenzata dalla temperatura dell'aria attraverso cui viaggia; per cercare di mitigare questa potenziale fonte di errori alcuni dispositivi sono accoppiati con un termometro, in modo da poter calcolare in maniera più affidabile il tempo di volo del segnale.

Questo approccio alla localizzazione in interni è uno tra i più precisi attualmente disponibili, arrivando a raffinare la posizione dell'ordine del centimetro, a discapito però dell'infrastruttura; infatti a causa dell'elevato assorbimento del suono da parte di oggetti e pareti è necessario distribuire numerosi beacons in ogni stanza dell'ambiente che si vuole mappare.

Esistono principalmente tre tecniche differenti che hanno in comune questa infrastruttura di base di beacon/receiver ma che fanno uso del segnale ultrasonico in maniera differente:

9.5.1. TOF:

Questa tecnica accoppia alla trasmissione di ultrasuoni una trasmissione radio e sfrutta la differenza delle velocità di propagazione tra i due segnali. I segnali radio nell'aria viaggiano ad una velocità vicina quella della luce, che è numerosi ordini di grandezza più veloce rispetto a quella degli ultrasuoni (che è di circa 330 m/s). Grazie a questa

differenza di velocità, i due segnali lanciati contemporaneamente da un beacon raggiungeranno in momenti differenti il client: il segnale radio arriverà praticamente subito, mentre quello ultrasonico (US) ci metterà molto di più. La differenza di tempo tra la ricezione del segnale RF e quello US permette di calcolare quindi il Time Of Flight (tempo di volo) ovvero il tempo che ha impiegato il segnale per transitare dal beacon alla ricevente.

Una volta calcolato questo tempo, e conoscendo la velocità di propagazione (sono stati sviluppati approcci avanzati che misurano temperatura e umidità dell'aria in modo da effettuare calcoli più precisi) è possibile calcolare la distanza.

L'utilizzo di 3 o più beacons permette di trilaterare la posizione relativa alle trasmissioni, le quali possono fornire informazioni relative alla loro posizione all'interno del messaggio RF.

L'utilizzo di più trasmissioni espone però al problema di collisione nella trasmissione dei segnali US. Per arginare il problema sono stati sviluppati vari approcci tra i quali un sistema di coordinazione centralizzata dei beacons (in modo che non trasmettano mai contemporaneamente), l'utilizzo di FSK (Frequency Shift Keying) o DSSS (direct sequence spread spectrum).

9.5.2. TDOA:

Con il Time Difference Of Arrival non è necessario aggiungere ulteriori trasmissioni oltre a quella ultrasonica purché si utilizzino beacons multipli; infatti analizzando il tempo di ricezione relativo dei segnali dei vari beacons è possibile calcolare la distanza/posizione con una tecnica nota come multilaterazione, la stessa utilizzata nel determinare la posizione a partire dai segnali ricevuti dai satelliti del GPS.

E' necessario però che siano note le coordinate delle stazioni trasmissioni per permettere la triangolazione; questa informazione può essere condivisa a priori o modulata nel segnale ultrasonico.

Questa soluzione, non aggiungendo componenti elettronici alla ricevente (legati alla trasmissione RF), ne semplifica la costruzione abbassandone il costo.

9.5.3. RSSI:

Anche in questo caso, per determinare la distanza dalla trasmittente, è stata sfruttata l'idea di misurare l'intensità del segnale ricevuto. Con gli ultrasuoni questa tecnica risulta molto più precisa rispetto alle trasmissioni radio perché la propagazione nel mondo reale è molto più simile al modello matematico, dal momento che l'alta attenuazione fa sì che il suono non viaggi troppo lontano riducendo le probabilità di multipath e diffrazione. Con questo sistema diventa però necessario codificare un identificativo o la posizione della trasmittente all'interno del segnale US, in modo da poter risalire alla posizione del trasmettitore che ha inviato il beacon.

Pro

La bassa velocità di propagazione fa sì che si possa utilizzare hardware comune per misurare la differenza dei tempi di arrivo dei segnali US. Come detto precedentemente, grazie all'elevato numero di trasmissioni la precisione di quest'approccio è la più alta disponibile al momento tra tutte le tecniche di localizzazione analizzate. In un approccio avanzato "Ultrasound Positioning Based on Time-of-flight and Signal Strength." [8] si

riesce a risalire addirittura alla velocità del client, grazie alla misurazione dello spostamento della frequenza del segnale ricevuto dovuto all'effetto Doppler.

Contro

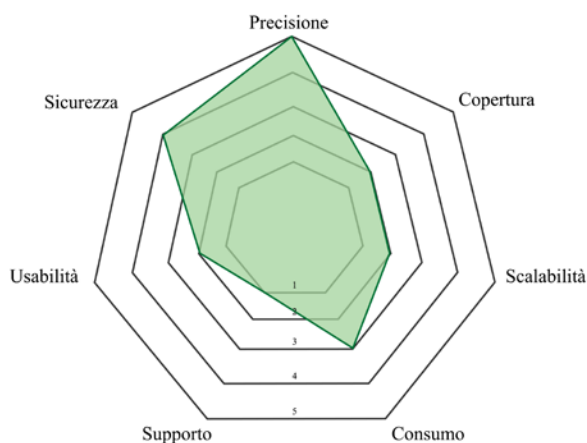
La bassa propagazione dei segnali US fa sì che l'infrastruttura debba essere composta di numerosi beacons, svariati per ogni stanza, perché basta un ostacolo, come una parete, per annullare completamente il segnale.

La trasmissione sonora è intrinsecamente molto più soggetta a rumore, rispetto a quelle a radiofrequenza, e questo ovviamente riduce l'efficacia del sistema.

Per aumentare la precisione vengono utilizzate molte trasmettenti, questo però fa sì che si incorra in problematiche di collisioni, rumore e fenomeni di eco a cui è necessario far fronte con protocolli e algoritmi più complessi.

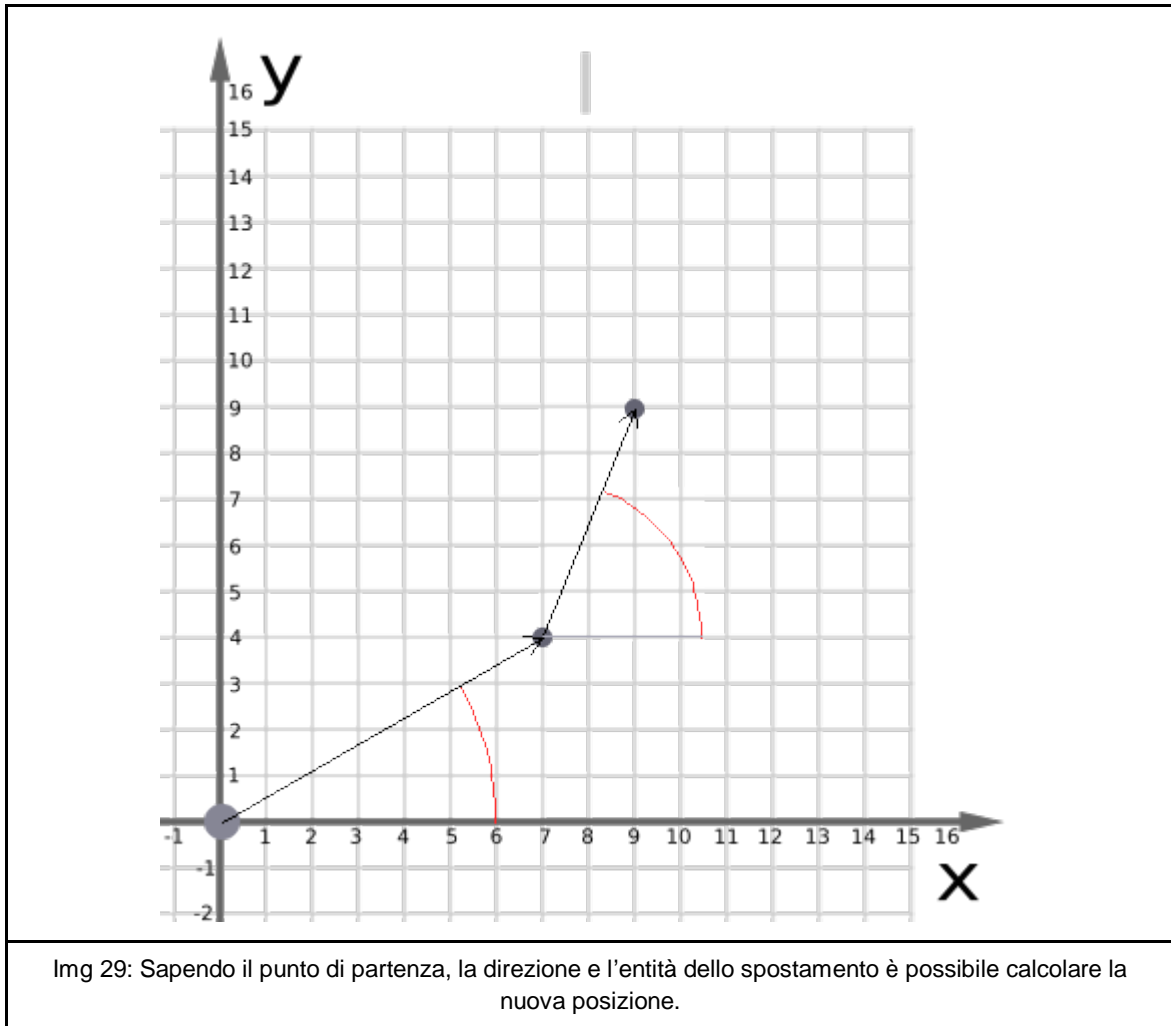
Ultrasuoni		
Parametro	Valore	Note
Precisione	1-2 cm	Questa è la tecnologia con precisione più alta.
Copertura	5-7m	Il segnale viene facilmente assorbito da oggetti
Scalabilità	Media	E' necessario il deploy e la configurazione di ulteriori beacons
Consumo	Basso	
Supporto/infrastruttura	Basso	Sono necessari molti emettitori per riuscire a garantire precisioni sub-centimetriche
Usabilità/Fattore di diffusione	Bassa	Sebbene alcuni smartphone possano determinare questo tipo di suoni, spesso si rende necessario hardware specializzato per motivi di precisione.
Sicurezza	Alta	Nella tipologia passiva, solamente il client riesce a risalire alla propria posizione.

Grafico



9.6. Dead reckoning o navigazione inerziale

Questa tecnica di posizionamento è forse la più antica e intuitiva tra tutte quelle presentate. Per calcolare la localizzazione sfrutta tre informazioni: il punto di partenza (precedentemente noto), la direzione dello spostamento e la distanza percorsa.

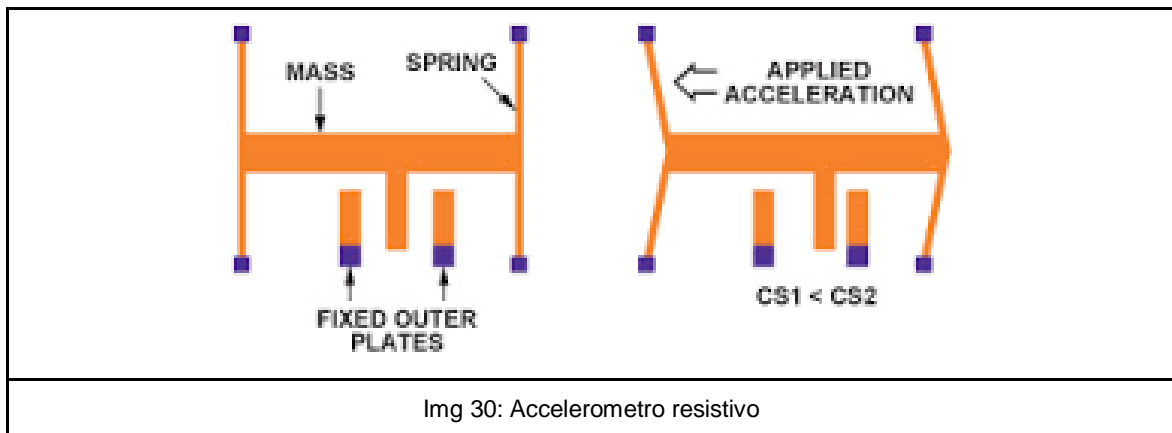


Questa tecnica, utilizzata a lungo nel corso dei secoli per orientarsi in mare aperto, può venire oggi riadattata al posizionamento in interni grazie a due tipologie di sensori elettronici, l'accelerometro e il giroscopio, entrambi ormai abbastanza economici da venir integrati in tutti gli smartphones.

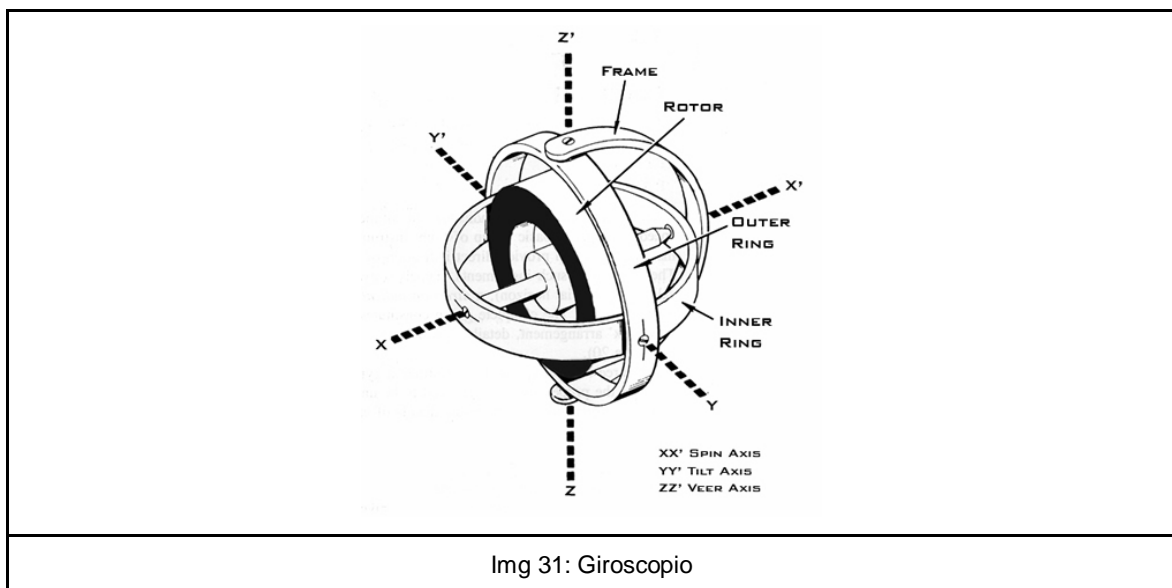
Come si evince dal nome, l'accelerometro è un sensore in grado di determinare l'accelerazione a cui è sottoposto. Ne esistono di vari tipi: in quelli elettronici, i più comunemente usati, la forza applicata determina una variazione di resistenza e quindi di voltaggio, che viene misurato e confrontato con un valore di riferimento per determinare la quantità di accelerazione in atto.

Se la precisione dello strumento è abbastanza alta, una volta nota l'accelerazione sarà possibile integrarla per il tempo per calcolare la velocità e conseguentemente lo spazio percorso.

Ogni accelerometro rileva l'accelerazione lungo un solo asse, ma grazie alla miniaturizzazione dell'elettronica è ormai prassi che vengano usati a gruppi di tre, uno per ogni asse.



Il giroscopio invece sfrutta la conservazione del momento angolare per determinare i cambiamenti di orientamento: è composto da una massa toroidale centrale, che viene mantenuta in movimento da un rotore, e che può liberamente ruotare su tutti gli assi (tre gradi di libertà)



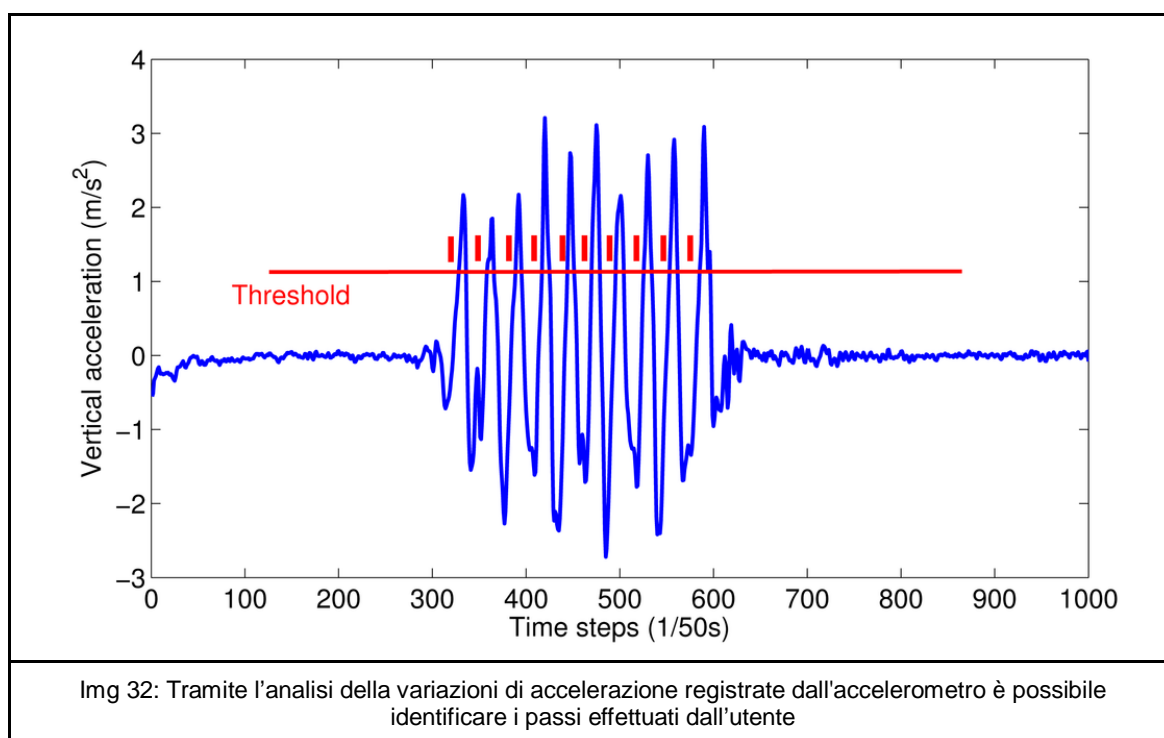
Quando il dispositivo subisce una rotazione imposta dall'esterno la massa centrale, grazie alla rotazione a cui è sottoposta e alla conservazione del momento angolare, tenderà a rimanere allineata con l'asse di rotazione precedentemente acquisita (ovvero resisterà al cambiamento di inclinazione).

E' quindi possibile misurare l'angolo di rotazione effettuato misurando la differenza tra l'asse di rotazione del rotore e l'asse esterno del dispositivo.

In assenza di un giroscopio è possibile utilizzare una bussola per calcolare la direzione durante la navigazione inerziale, questa però è tendenzialmente più soggetta ad errori dovuti a singolarità del campo magnetico.

Sebbene gli accelerometri possano raggiungere precisioni molto alte, quelli integrati negli smartphone, per motivi di prezzo e dimensioni, non sono alla stregua di quelli presenti in automobili o altri strumenti scientifici di precisione, e risulta perciò difficile risalire alla distanza percorsa integrando l'output di tali sensori.

Per ovviare al problema una tecnica molto diffusa è quella di lavorare a "step", ovvero di cercare di determinare quando un utente effettua un passo; questa informazione, facilmente individuabile tramite il cambio di accelerazioni, non fornisce informazioni sull'effettiva distanza percorsa; sebbene non sia dato sapere a priori quanto sia lungo il passo dell'utente, questa ambiguità può essere risolta tramite l'analisi della frequenza dei passi e genera un errore molto minore rispetto all'integrazione diretta dell'output del dispositivo.



La classe più precisa di accelerometri per la localizzazione pedonale è quella che prevede l'ubicazione tali strumenti nelle vicinanze dei piedi dell'utente (idealmente inseriti nelle scarpe stesse); infatti durante la camminata i piedi sono le uniche parti del corpo che sicuramente attraversano una fase a velocità uguale a zero; questo avviene nel momento in cui il piede è appoggiato a terra (per sorreggere tutto il peso del corpo) mentre l'altra gamba viene sollevata per farla avanzare.

Questo fenomeno è sfruttato tramite un algoritmo noto come ZUPT (zero-velocity update) che, tramite il riconoscimento di questa fase specifica nella quale la velocità misurata raggiunge lo 0, permette l'effettiva determinazione di un passo, limitando fortemente l'errore di misurazione. Purtroppo però, per poter utilizzare questo tipo di algoritmi è necessario un hardware dedicato montato esclusivamente sui piedi, cosa che limita molto il fattore di diffusione di questa tecnica così precisa.

Tramite l'utilizzo di accelerometri è possibile determinare alcune informazioni aggiuntive oltre alla posizione stessa; è stato dimostrato infatti che tramite le letture di questa categoria di sensori sia possibile determinare non solo il tipo di attività fisica svolta dall'utente (corsa, camminata etc..) ma addirittura desumere il tipo di mezzo di trasporto utilizzato dall'utente, come viene illustrato dagli autori di "By Train or By Car? Detecting the User's Motion Type through Smartphone Sensors Data" [4]

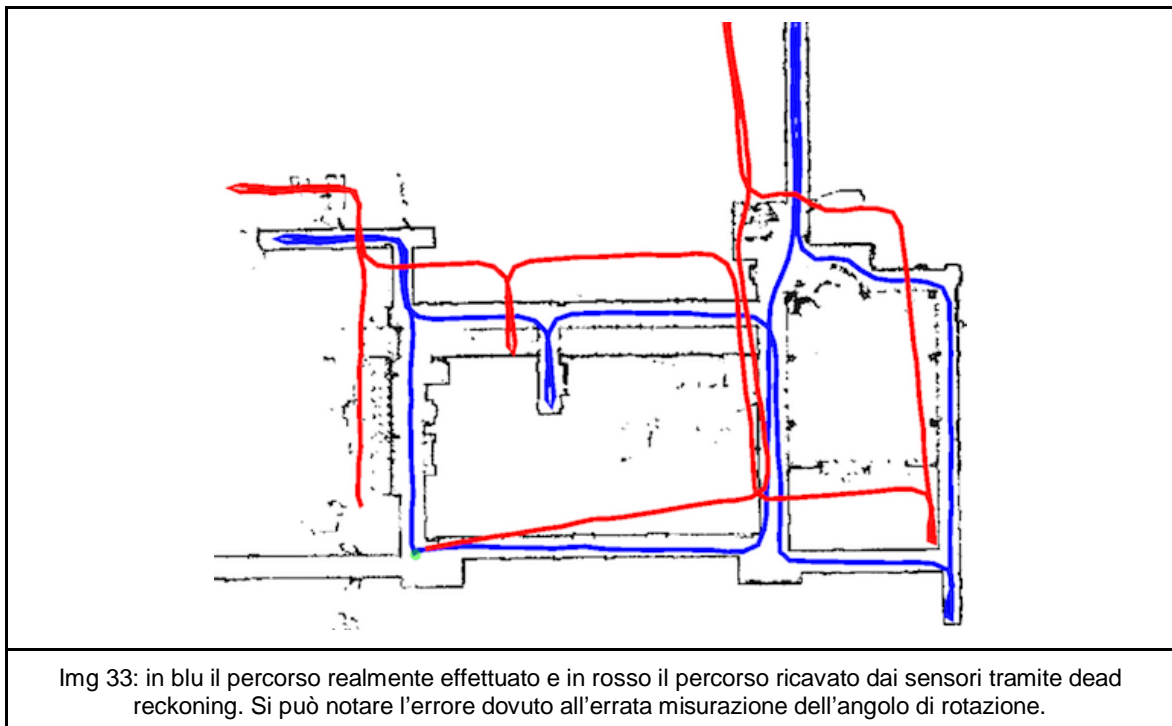
Pro

L'enorme vantaggio di questo approccio risiede nel fatto che non necessita di nessun tipo di infrastruttura, permette di determinare la posizione su tutti e tre gli assi e non è soggetta ad interferenze esterne.

Contro

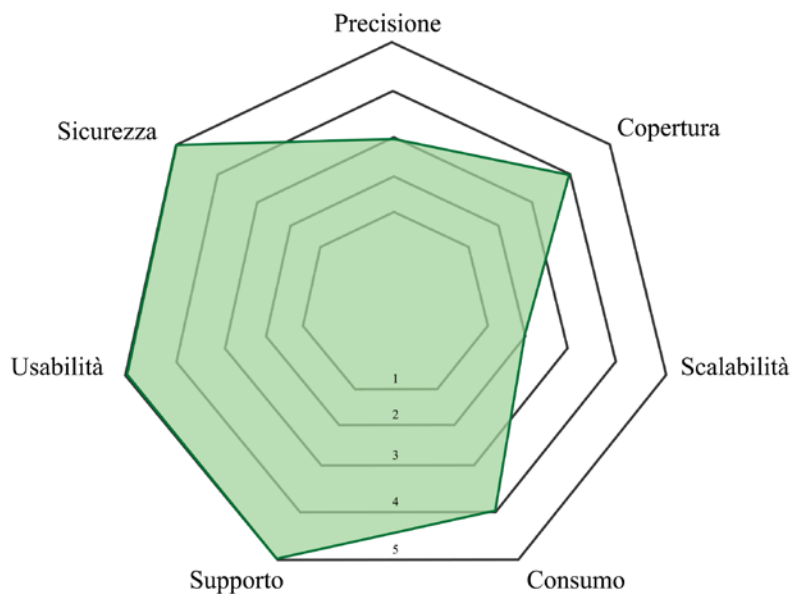
Come detto in precedenza, oltre alla direzione e allo spostamento, questa tecnica richiede un punto di partenza e purtroppo, non avendo relazioni con il mondo esterno, questo punto iniziale deve essere ricavato attraverso qualche altra tecnologia/sistema (o può essere richiesto all'utente).

Una volta determinati il punto di partenza si procede per iterazioni, calcolando di volta in volta la nuova posizione e utilizzandola come riferimento per lo spostamento successivo. Questo porta necessariamente ad un errore additivo nella misurazione (legato alla precisione del sensore). Un errore anche minimo nella direzione determinata dal giroscopio porterà a lungo termine a scarti anche notevoli tra la posizione calcolata e quella reale, un fenomeno noto come drift error.



Dead Reckoning		
Parametro	Valore	Note
Precisione	1 - 3m	La precisione è degenerata continuamente a causa di un errore additivo.
Copertura	N/A	La posizione attuale è iterata dall'informazione del punto di partenza precedente.
Scalabilità	Media	Sebbene non abbia limiti di utilizzo, più misurazioni vengono fatte più la posizione misurata si discorderà da quella vera.
Consumo	Basso	
Supporto/infrastruttura	Alta	E' possibile utilizzare i sensori di un comune smartphone.
Usabilità/Fattore di diffusione	Alta	Per tecniche con precisione elevata è necessario hardware specifico, ma è stato possibile determinare una precisione accettabile con semplici smartphones.
Sicurezza	Alta	E' il client a calcolare internamente la propria posizione.

Grafico



10. Tecniche di miglioramento a posteriori

Oltre alle migliori tecniche introdotte grazie a sensori hardware più precisi o alla combinazione di più tipologie di sensori, gli algoritmi di posizionamento analizzati fanno uso, per migliorare la precisione della posizione rilevata, di alcune tecniche a posteriori non strettamente legate al valore fisico misurato ma che permettono di far convergere più rapidamente la posizione o ottenerla con una precisione maggiore.

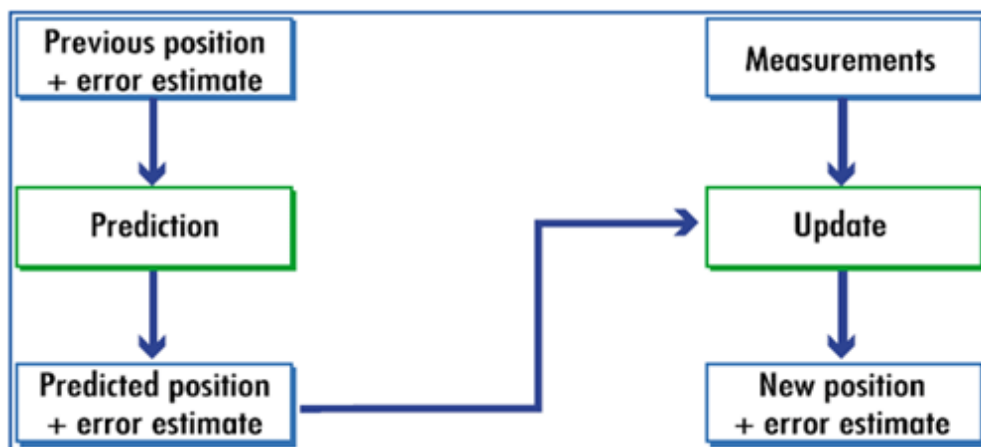
10.1. Kalman filters

Questo algoritmo è spesso usato in congiunzione con serie temporali soggette a perturbazioni dovute a rumore statistico, come ad esempio valori fluttuanti legati al mondo all'economia o, come nel nostro caso, alla lettura di dati da sensori con una precisione limitata.

Grazie a queste equazioni è possibile infatti far convergere, in successive iterazioni, il valore letto al valore reale molto velocemente, conoscendo solamente il tasso di errore legato alla lettura dell'input.

L'esecuzione prevede l'iterazione continua di due fasi durante le quali vengono modificati i valori delle 4 principali variabili:

- Valore precedente
- Valore della lettura attuale
- Errore sulla stima
- Errore sulla lettura attuale



Durante la prima fase, detta di "ipotesi" o "predizione", si prende in input il dato calcolato durante l'iterazione precedente e lo si elabora calcolando il nuovo valore atteso (in base ai pesi assegnati dall'errore sulla stima e quello sul valore letto).

Seguirà quindi una fase di "update" o "correzione" durante la quale verrà letto un nuovo valore in input dalla nostra serie "rumorosa", ovvero il nostro sensore hardware. In base a quanto la nostra stima si discorda da esso, verranno ri-distribuiti i pesi tra le due variabili di errore e per finire, proprio grazie alla media pesata delle due letture, quella stimata e quella in input, si fornirà un valore in output (che sarà utilizzato come base per la prossima iterazione).

Questo algoritmo permette di ottenere una lettura abbastanza robusta a fluttuazioni e che converga ad un valore preciso partendo da incertezze anche molto ampie.

10.2. Particles filter

Questo algoritmo statistico di analisi, noto anche come Sequential Monte Carlo, è molto utilizzato in robotica e si presta perfettamente quando vogliamo analizzare un'informazione che, con il variare del tempo, contiene un'incertezza o un errore intrinseco.

L'idea è quella di creare delle particelle "virtuali", che rappresentano le nostre ipotesi sul valore effettivo del dato; l'insieme dei valori di tutte queste particelle rappresentano quindi la distribuzione di probabilità discretizzata del valore analizzato (nel nostro caso la posizione).

Non avendo informazioni a priori, si comincia con una distribuzione uniforme, e grazie ad essa si generano N particelle: più il numero di queste particelle sarà elevato maggiore sarà la precisione, ma crescerà anche il consumo di potenza di calcolo, visto che l'algoritmo prevede una computazione separata per ogni singola particella nel sistema.

Immaginiamo ad esempio di voler determinare la nostra posizione all'interno di un edificio di cui abbiamo la mappa: le particelle generate secondo la distribuzione uniforme saranno distribuite in tutte le stanze come nell'immagine seguente



A questo punto procediamo con la prima rilevazione dell'informazione misurata, nel nostro caso di esempio supponiamo essere la distanza dall'ostacolo/parete più vicina a noi.

Ad ognuna delle particelle generate in precedenza assegniamo quindi un peso in base alla probabilità che la misurazione effettuata sia compatibile con la posizione di quella particella.

Ad esempio supponiamo che dalla nostra misurazione ottenessimo che l'ostacolo più vicino sia a 50cm. L'algoritmo procederà quindi ad esaminare ogni singola particella e calcolerà per essa la distanza dall'ostacolo più vicino secondo la mappa: più questa distanza sarà simile a 50 cm più alto sarà il peso (valore di verità) assegnato a quella particella.

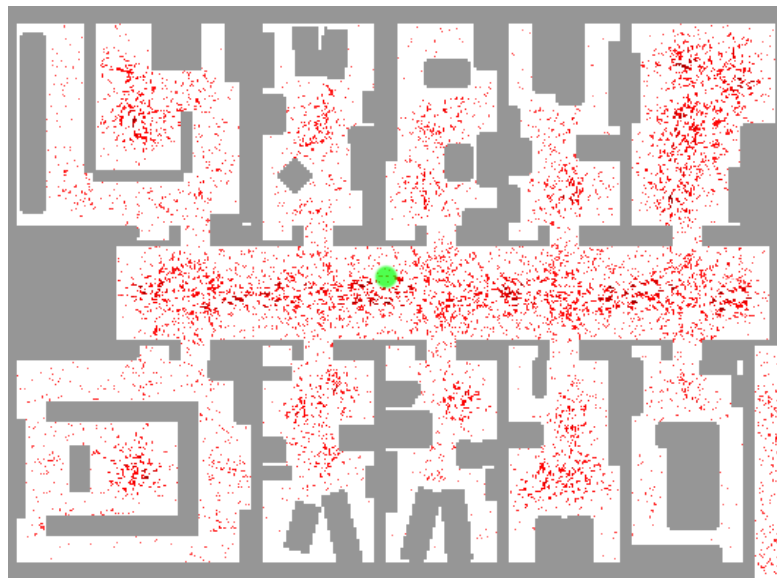
Le posizioni che secondo la mappa hanno un ostacolo più vicino o lontano di quanto ottenuto dalla nostra lettura avranno un peso più basso che rappresenta la minore probabilità di queste ipotesi, perché in conflitto con l'osservazione attuale.

Facciamo quindi seguire una fase detta di "resampling" durante la quale si genera un nuovo set N particelle, che sostituirà il precedente, ma stavolta non si userà una distribuzione uniforme, bensì la distribuzione ricavata dai pesi assegnati alle particelle precedenti.

Questo fa sì che le nuove particelle siano più dense in quelle posizioni che sembravano più in sintonia con la nostra lettura di distanza dall'ostacolo più vicino, ovvero quelle che rappresentano le ipotesi più probabili.

Questa fase ha il compito di scremare le ipotesi meno probabili, concentrando l'attenzione su quelle più attendibili. È però possibile che per qualche motivo (ad esempio per un errore di misurazione del sensore) l'algoritmo arrivi a scartare tutte le particelle che rappresentano la posizione reale. In questo caso la fase di resampling potrebbe sembrare controproducente perché porterebbe alla rimozione di tutte le particelle che rappresentano la posizione corretta ma, dal momento che stiamo usando una distribuzione di probabilità, è comunque possibile (anche se meno probabile) che vengano generate particelle in qualsiasi punto della mappa, compresi punti scartati in precedenza, garantendo così una tolleranza a rilevazioni errate.

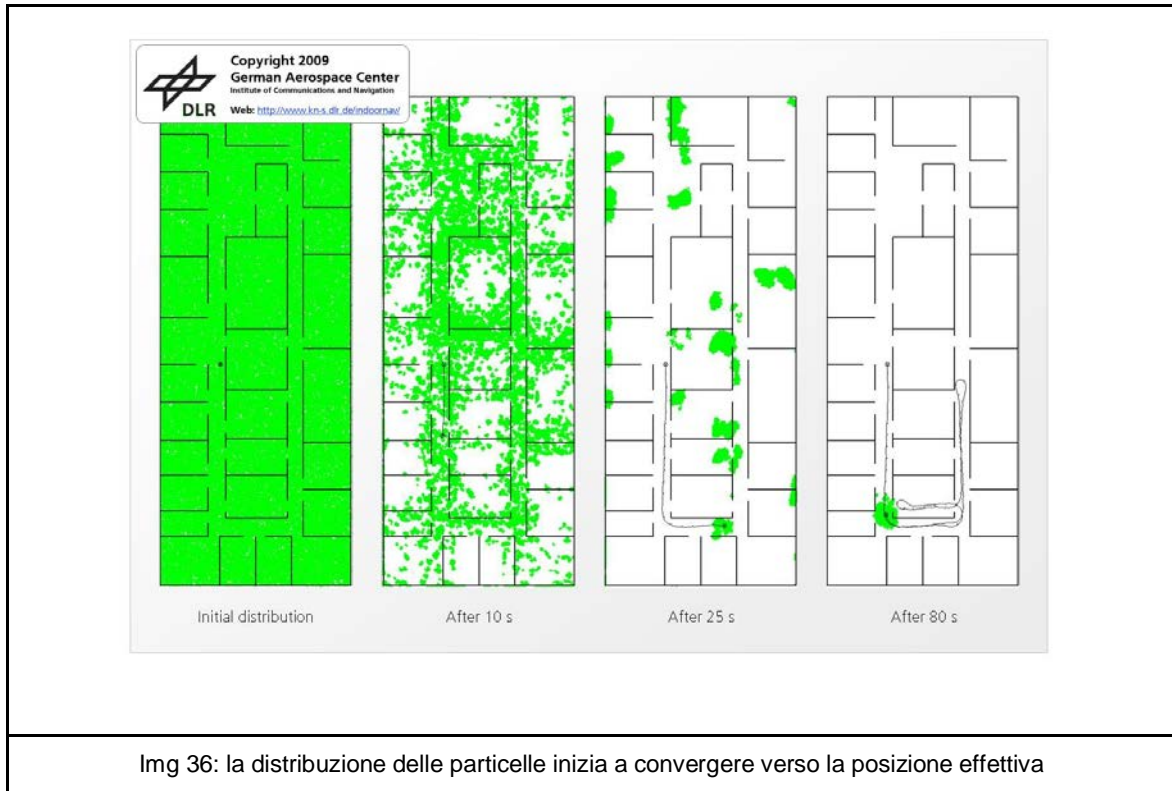
Dopo ogni iterazione l'algoritmo fornirà in output una posizione singola che sarà calcolata tramite la media della posizione di tutte le particelle presenti: in questo modo, più concentrate in un punto saranno le particelle, più quella posizione influenzerà il valore della media.



Img 35: Le particelle vengono generate secondo le ipotesi più probabili. In verde l'output dell'algoritmo, ovvero la media della posizione di tutte le particelle.

A questo punto normalmente si procede a muoversi fisicamente nell'ambiente, dopodichè si itera il processo da capo, eseguendo una nuova rilevazione, ri-assegnando un peso ad ogni particella e quindi procedendo con il resample.

Se durante questo tempo viene effettuato uno spostamento è necessario correggere la distribuzione delle particelle in relazione alla distanza e direzione del moto: in questo modo la distribuzione di probabilità rimarrà aggiornata in relazione alla mappa.



Img 36: la distribuzione delle particelle inizia a convergere verso la posizione effettiva

10.3. Map matching filter

La posizione è un'informazione utile ma, se il nostro scopo è la navigazione, oltre ad essa abbiamo bisogno di una mappa, ovvero una rappresentazione dell'ambiente attraverso il quale ci stiamo muovendo. Questa informazione non è sempre disponibile o spesso è difficile da ottenere ma nel caso in cui lo sia, questo algoritmo (spesso usato in sinergia con quello di particle filters) può migliorare sensibilmente la precisione della posizione.

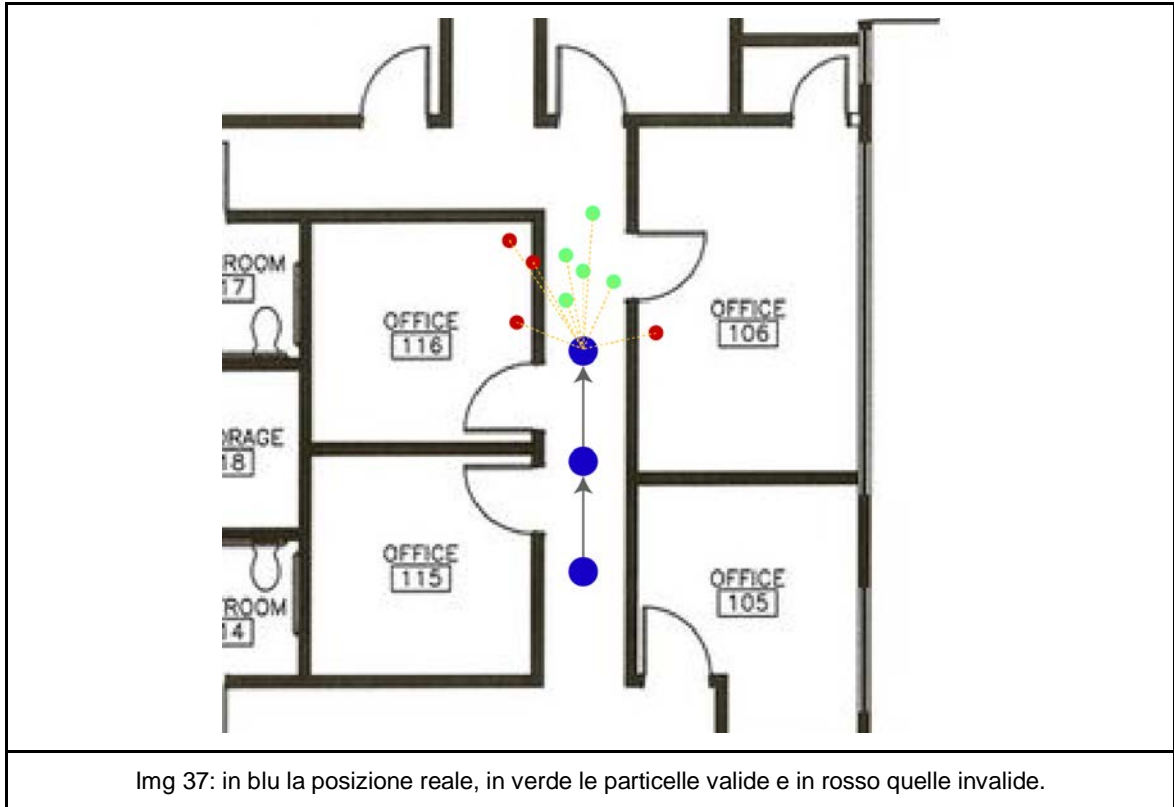
L'idea alla base è quella di controllare se gli spostamenti della posizione (rilevati da sensori e/o algoritmi precedentemente visti) siano possibili o meno, e conseguentemente scartare o correggere quelli che non lo sono.

La mappa dell'ambiente deve rappresentare tre tipologie di area:

zone liberamente attraversabili (come ad esempio spazi aperti, corridoi, stanze etc), quelle inattraversabili (pareti, muri divisorii, arredamento e ostacoli di vario tipo) e zone che, seppur libere, sono state segnate come interdette per altri motivi (ad esempio stanze o edifici a cui non si ha accesso).

Ad ogni istante l'algoritmo tiene traccia della posizione precedente e di quella attuale, e calcola il percorso tra le due confrontandolo con la mappa. Nel caso il collegamento tra i due punti attraversi una zona non transitabile l'algoritmo ritorna l'informazione che il percorso analizzato non è corretto.

Questa informazione è particolarmente utile se abbinata al particle filter: infatti risulta possibile (anche se oneroso) calcolare lo spostamento di tutte le particelle e, valutando quali spostamenti siano effettivamente realizzabili e quali no, identificare le particelle frutto di errori di lettura o approssimazioni e scartarle, garantendo così una veloce convergenza dell'algoritmo alla posizione reale.



11. Conclusioni

Le tecnologie di posizionamento analizzate garantiscono risultati molto diversi tra loro: alcune di esse valorizzano di più l'importanza della precisione a scapito di consumi energetici o costi implementativi, altre viceversa sono nate con l'obiettivo dell'usabilità, per poter essere alla portata di tutti, ma a discapito spesso della precisione.

Da questo confronto appare quindi chiaro che non esiste una tecnologia superiore alle altre, in quanto ognuna di esse risulta migliore in certi aspetti e peggiore sotto altri; E' importante quindi conoscere tutti i punti di vista di questi sistemi in modo da poter comprendere quale sia il più applicabile in ogni situazione specifica, in relazione alla precisione desiderata, al budget e ai compromessi di usabilità che si è disposti a tollerare.

Combinando insieme alcune di esse è possibile raggiungere prestazioni migliori della somma delle parti, creare così dei sistemi di posizionamento in interni abbastanza robusti e precisi da risultare facilmente adottabili.

Questo accade perché diversi approcci sono infatti complementari, limitando a vicenda problemi e errori legati alla struttura stessa alla singola implementazione .

Un esempio classico è l'utilizzo di tecnologie che garantiscano l'azzeramento del "drift error" o errore additivo, legato alle tecnologie di dead reckoning (altrimenti molto precise sul breve periodo), tramite un riposizionamento periodico garantito da un'altra tecnologia. Ad esempio, come suggerito da Judd et al. in "Use of a New Pedometric Dead Reckoning Module in GPS Denied Environments." [10], è possibile utilizzare un sistema di dead reckoning assieme ad una mappa magnetica in modo da poter determinare un nuovo punto di partenza effettivo, azzerando così il fenomeno del drift error.

Un altro esempio di abbinamento che permette di aumentare la precisione è quello che combina l'utilizzo del barometro associato ad un accelerometro; grazie a quest'ultimo è infatti possibile determinare se una variazione di pressione misurata sia dovuta effettivamente al movimento verticale del dispositivo client oppure se sia frutto del cambiamento delle condizioni climatiche. In questo secondo caso oltretutto è possibile utilizzare la lettura appena effettuata come nuova rilevazione base da confrontare con quella di un ipotetico futuro spostamento.

Questi approcci combinati sono tra quelli più promettenti per quanto riguarda eventuali sistemi commercializzati, in quanto riescono a superare i limiti intrinseci della singola tecnica garantendo la creazione di un sistema più robusto, preciso e utilizzabile.

12. Bibliografia

- [1] Luca Bedogni, Fabio Franzosi, Luciano Bononi. "**A Self-Adapting Algorithm base on Atmospheric Pressure to Localize Indoor Devices.**"
- [2] Berkovich, Gennady. "**Accurate and Reliable Real-time Indoor Positioning on Commercial Smartphones.**" *2014 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (2014). Print.
- [3] Bojja, Jayaprasad, Jussi Collin, Simo Sarkka, and Jarmo Takala. "**Pedestrian Localization in Moving Platforms Using Dead Reckoning, Particle Filtering and Map Matching.**" *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (2015). Print.
- [4] Luca Bedogni, Marco Di Felice, Luciano Bononi. "**By Train or By Car? Detecting the User's Motion Type through Smartphone Sensors Data**"
- [5] Dortz, Nicolas Le, Florian Gain, and Per Zetterberg. "**WiFi Fingerprint Indoor Positioning System Using Probability Distribution Comparison.**" *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (2012). Print.
- [6] Dousse, Olivier, Julien Eberle, and Matthias Mertens. "**Place Learning via Direct WiFi Fingerprint Clustering.**" *2012 IEEE 13th International Conference on Mobile Data Management* (2012). Print.
- [7] Hauschildt, Daniel, and Nicolaj Kirchhof. "**Improving Indoor Position Estimation by Combining Active TDOA Ultrasound and Passive Thermal Infrared Localization.**" *2011 8th Workshop on Positioning, Navigation and Communication* (2011). Print.
- [8] Holm, Sverre. "**Ultrasound Positioning Based on Time-of-flight and Signal Strength.**" *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (2012). Print.
- [9] Ichikari, Ryosuke, Luis Carlos Manrique Ruiz, Masakatsu Kourogi, Takeshi Kurata, Tomoaki Kitagawa, and Sota Yoshii. "**Indoor Floor-level Detection by Collectively Decomposing Factors of Atmospheric Pressure.**" *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* (2015). Print.
- [10] Judd, Tom, and Toan Vu. "**Use of a New Pedometric Dead Reckoning Module in GPS Denied Environments.**" *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* (2008). Print.
- [11] Kang, Wonho, and Younghan Han. "**SmartPDR: Smartphone-Based Pedestrian Dead Reckoning for Indoor Localization.**" *IEEE Sensors Journal* 15.5 (2015): 2906-916. Print.
- [12] Komeda, Keisuke, Masahiro Mochizuki, and Nobuhiko Nishiko. "**User Activity Recognition Method Based on Atmospheric Pressure Sensing.**" *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing Adjunct Publication - UbiComp '14 Adjunct* (2014). Print.
- [13] Li, Chao, Jinjun Zheng, Zhuqing Jiang, Xinmeng Liu, Yuying Yang, and Beihang Zhang. "**A Novel Fuzzy Pedestrian Dead Reckoning System for Indoor Positioning Using Smartphone.**" *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)* (2015). Print.
- [14] Liu, Hongbo, Yu Gan, Jie Yang, Simon Sidhom, Yan Wang, Yingying Chen, and Fan Ye. "**Push the Limit of WiFi Based Localization for Smartphones.**" *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking - Mobicom '12* (2012). Print.
- [15] Niu, Jianwei, Bower Wang, Long Cheng, and Joel J. P. C. Rodrigues. "**WicLoc: An Indoor Localization System Based on WiFi Fingerprints and Crowdsourcing.**" *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (2015). Print.
- [16] Niu, Jianwei, Banghui Lu, Long Cheng, Yu Gu, and Lei Shu. "**ZiLoc: Energy Efficient WiFi Fingerprint-based Localization with Low-power Radio.**" *2013 IEEE Wireless Communications and*

Networking Conference (WCNC) (2013). Print.

[17] Priyantha, Nissanka B., Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. "**The Cricket Location-support System.**" *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking - MobiCom '00 (2000). Print.*

[18] Putta, Ramakanth, Manoj Misra, and Divye Kapoor. "**Smartphone Based Indoor Tracking Using Magnetic and Indoor Maps.**" *2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP) (2015). Print.*

[19] Ting, S.I., S.k. Kwok, Albert H.c., and George T.s. "**The Study on Using Passive RFID Tags for Indoor Positioning.**" *Int. J. Eng. Bus. Manag. International Journal of Engineering Business Management (2011): 1. Print.*

[20] RAINER, MAUTZ. "**INDOOR POSITIONING TECHNOLOGIES.**" S.I.: SUDWESTDEUTSCHER VERLAG F, 2012. Print.

[21] Thrun, Sebastian, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. **Probabilistic Robotics.** Cambridge, Mass.: MIT, 2010. Print.

[22] Huang, Chang-Jung, Yu-Lin Wei, Chiao Fu, Wen-Hsuan Shen, Hsin-Mu Tsai, and Ching-Ju Kate Lin. "**LiBeamScanner.**" *Proceedings of the 2nd International Workshop on Visible Light Communications Systems - VLCS '15 (2015). Print.*

[23] Werner, Martin, Moritz Kessel, and Chadly Marouane. "**Indoor Positioning Using Smartphone Camera.**" *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (2011). Print.*

[24] Elias, Rimon, and Amal Elnahas. "**Fast Localization in Indoor Environments.**" *2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (2009). Print.*

[25] Liang, Jason Zhi, Nicholas Corso, Eric Turner, and Avidesh Zakhor. "**Image Based Localization in Indoor Environments.**" *2013 Fourth International Conference on Computing for Geospatial Research and Application (2013). Print.*

[26] Naguib, Ayman, Payam Pakzad, Ravi Palanki, Sameera Poduri, and Yin Chen. "**Scalable and Accurate Indoor Positioning on Mobile Devices.**" *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (2013). Print.*

[27] Sun, Zheng, Aveek Purohit, Shijia Pan, Frank Mokaya, Raja Bose, and Pei Zhang. "**Polaris.**" *Proceedings of the Twelfth Workshop on Mobile Computing Systems & Applications - HotMobile '12 (2012). Print.*

[28] Atia, M. M., M. J. Korenberg, and A. Noureldin. "**Particle-Filter-Based WiFi-Aided Reduced Inertial Sensors Navigation System for Indoor and GPS-Denied Environments.**" *International Journal of Navigation and Observation 2012 (2012): 1-12. Print.*

[29] Martin, Eladio, Oriol Vinyals, Gerald Friedland, and Ruzena Bajcsy. "**Precise Indoor Localization Using Smart Phones.**" *Proceedings of the International Conference on Multimedia - MM '10 (2010). Print.*

[30] Singh, Gurjap, Sanjeev Sharma, and Prabir K. Pal. "**Mobile Robot Localization with Kinect RGB-D Sensor.**" *Proceedings of Conference on Advances In Robotics - AIR '13 (2013). Print.*

[31] Wang, Han, Wei Mou, Hendra Suratno, Gerald Seet, Maohai Li, M.w.s. Lau, and Danwei Wang. "**Visual Odometry Using RGB-D Camera on Ceiling Vision.**" *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) (2012). Print.*

[32] Mirowski, Piotr, Ravishankar Palaniappan, and Tin Kam Ho. "**Depth Camera SLAM on a Low-cost WiFi Mapping Robot.**" *2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA) (2012). Print.*

[33] Al-Amr, Mai A., Suheer Alhadhrami, Abdulmalik Al-Salman, Abdulrahman Alarifi, Hend S. Al-Khalifa, Ahmad Alnafessah, and Mansour Alsaleh. "**Comparative Survey of Indoor Positioning**

Technologies, Techniques, and Algorithms." *2014 International Conference on Cyberworlds* (2014). Print.

[34] **Anyplace.** "AnyPlace | Indoor Information Service." (<https://anyplace.cs.ucy.ac.cy/>), Web. 26 June 2017.

[35] **IndoorAtlas.** "Making Indoor Worlds Discoverable." (<http://www.indooratlas.com/>), Web. 26 June 2017.

[36] Chen, Zhenghua, Han Zou, Hao Jiang, Qingchang Zhu, Yeng Soh, and Lihua Xie. "**Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization.**" *Sensors* 15.1 (2015): 715-32. Print.

[37] Kwanmuang, Surat, and Edwin Olson. "**Maximum Likelihood Tracking of a Personal Dead-reckoning System.**" *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2015). Print.

13. Bibliografia Immagini

- 1: <http://www.focusjunior.it/scuola/geografia/latitudine-e-longitudine-cosa-sono>
- 2: https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global
- 3: https://www.researchgate.net/figure/291419250_fig1_The-CDF-of-position-error-with-different-fingerprints
- 4: <http://scialert.net/fulltext/?doi=rjit.2011.81.92&org=10>
- 5: <http://www.oxts.com/what-is-inertial-navigation-guide/how-can-distance-measurements-help-me-work-out-where-i-am/>
- 6: Daniele Catellani
- 7: Daniele Catellani
- 8: <https://www.emaze.com/@ALIOOTFW/Onde>
- 9: https://en.wikipedia.org/wiki/Multipath_propagation
- 10: <https://www.intechopen.com/books/factory-automation/when-the-industry-goes-wireless-drivers-requirements-technology-and-future-trends>
- 11: "Push the Limit of WiFi Based Localization for Smartphones." [14], figura 1 con modifiche
- 12: "ZiLoc: Energy Efficient WiFi Fingerprint-based Localization with Low-power Radio." [16] , figura 2
- 13: Daniele Catellani
- 14: <http://www.electronicdesign.com/communications/what-s-difference-between-measuring-location-uw-b-wi-fi-and-bluetooth>
- 15: <https://www.slideshare.net/ieeepkhi/indoor-radio-positioning-systems-1295544>
- 16: "The Study on Using Passive RFID Tags for Indoor Positioning." [19], figura 3
- 17: "The Study on Using Passive RFID Tags for Indoor Positioning." [19], figura 6
- 18: <http://www.renishaw.com/en/optical-encoders-and-lidar-scanning--39244>
- 19: https://www.researchgate.net/figure/270482870_fig3_Fig-5-The-general-ICP-concept-two-LiDAR-consecutive-scans-can-be-used-to-estimate
- 20: http://www.math.tamu.edu/~hielsber/USC/MURI_Data/data.html
- 21: <http://blog.rightbrain.co.kr/?p=4469>
- 22: "LiBeamScanner." [22], figura 4
- 23: "LiBeamScanner." [22], figura 1
- 24: <https://www.youtube.com/watch?v=pwwOvBa6u08>
- 25: "Smartphone Based Indoor Tracking Using Magnetic and Indoor Maps" [18], figura 5
- 26: "Smartphone Based Indoor Tracking Using Magnetic and Indoor Maps" [18], figura 5 con modifiche
- 27: <https://www.mide.com/pages/air-pressure-at-altitude-calculator>
- 28: <http://www.eetrend.com/technology/100029879>
- 29: Daniele Catellani
- 30: <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/mems-accelerometers-as-acoustic-pickups.html>
- 31: http://www.dutchops.com/Portfolio_Marcel/Articles/Instruments/Gyroscopic_Instruments/

Theory_Gyroscopes.htm

32: "Fusion of WiFi, Smartphone Sensors and Landmarks Using the Kalman Filter for Indoor Localization." [36], figura 1

33: Maximum Likelihood Tracking of a Personal Dead-reckoning System. [37], figura 8

34: <https://rse-lab.cs.washington.edu/projects/mcl/animations/global-floor.gif> con modifich

35: <https://rse-lab.cs.washington.edu/projects/mcl/animations/global-floor.gif> con modifich

36: http://www.dlr.de/kn/en/DesktopDefault.aspx/tabid-7492/admin-1/12663_read-31569/gallery-1/gallery_read-Image.27.20089/

37: <http://carlsbadexecutiveoffice.com/space.html> con modifich