

Attività formativa: Tesina

Progetto di un sistema di navigazione pedonale al coperto

Laureando Giorgio Sartor

Relatore Michele Moro

Corso di laurea in Ingegneria dell'Informazione

18 Febbraio 2010

Anno Accademico 2009/2010

Indice

1	Introduzione	4
1.1	Sistemi di navigazione	4
1.2	Filtro di Kalman	6
1.3	Applicazioni del filtro di Kalman	8
1.4	Descrizione del problema	10
2	INS - Inertial Navigation System	11
2.1	Descrizione	11
2.2	Configurazioni di un INS	12
2.2.1	Sistema a piattaforma stabilizzata	12
2.2.2	Sistemi Strapdown	14
2.3	Giroscopi	14
2.3.1	Giroscopio meccanico	15
2.3.2	Giroscopio ottico	15
2.3.3	Giroscopio MEMS	16
2.3.4	Errori nel giroscopio MEMS	18
2.4	Accelerometri	20
2.4.1	Accelerometro meccanico	20
2.4.2	Accelerometro MEMS	20
2.4.3	Errori nell'accelerometro MEMS	22
2.5	Problema della deriva	23
2.6	Risoluzione del problema	26
3	MMINS- Map Matching and Inertial Navigation System	28
3.1	Progetto	28
3.1.1	Descrizione	28
3.1.2	Calcolo del percorso	31

3.1.3	Metodi di assegnazione	32
3.1.4	Spostamento tra piani	34
3.1.5	Combinazione tra INS e Map Matching	35
3.2	Eventuali applicazioni	36
4	Conclusioni	37

1 Introduzione

1.1 Sistemi di navigazione

Negli ultimi anni l'utilizzo dei sistemi di navigazione è cresciuto a dismisura e oramai quasi nessuno è sprovvisto di un navigatore GPS che sia esso presente come strumento a sé nell'auto o nel telefono. Quello che una volta era riservato solamente a navi od aerei ed a uso militare in pochi anni è divenuto commerciale.

Il sistema che sta alla base di un GPS(Global Positioning System) si può spiegare, in modo del tutto sbrigativo, sapendo che attraverso le coordinate di 3 punti di riferimento nello spazio e la loro distanza da una quarto punto si possono calcolare le coordinate di quest'ultimo; un ricevitore satellitare infatti, in presenza di segnale, è in grado di sapere la posizione e la distanza di alcuni satelliti e dedurre da queste informazioni la sua posizione.

Quello che solitamente si trova invece nei telefoni prende il nome di A-GPS(Assisted-GPS); un ricevitore GPS impiega molto tempo e molte risorse a fare il primo fixing dei satelliti, ovvero a cercare i satelliti in vista, a stabilire con essi una connessione e a calcolare la distanza da essi nonché la loro esatta posizione, così l'A-GPS prevede che le effemeridi dei satelliti(tabelle contenenti le informazione sulla loro posizione) gli vengano inviate attraverso connessione internet dalla cella di trasmissione a terra più vicina, abbattendo i tempi del così detto cold-start(avviamento a freddo).

Altri sistemi, da tempo usati dalle compagnie telefoniche e dalla Forze dell'Ordine, prevedono la triangolazione della posizione esclusivamente tramite le celle di terra del segnale di telefonia mobile; quest'ultimo sistema ha una precisione molto inferiore al classico GPS.

Dalla breve descrizione di questi sistemi risulta evidente che in mancanza di

segnale nessuno dei tre è in grado di funzionare.

Esistono altri sistemi di navigazione che non necessitano di alcun segnale esterno e che sono in grado di calcolare la posizione dell'oggetto a cui sono solidali rispetto a un punto di partenza; risulta ovvio però che essi non siano in grado di fornire una posizione a livello globale. Si parla generalmente in questi casi di INS(Inertial Navigation System) per descrivere un sistema che, attraverso opportuni sensori, riesce a determinare la traiettoria dell'oggetto a cui sono fissati.

Esistono sistemi basati anche sulla visione computazionale di cui però non ci occuperemo in questo contesto.

Questi due tipi di sistemi, quelli che necessitano di segnale esterno e quelli a cui invece non serve, differiscono anche per altri aspetti.

Nel primo caso la determinazione della posizione avviene ad intervalli molto distanti tra loro che si aggirano nell'ordine di qualche secondo mentre nel secondo caso la frequenza di aggiornamento della posizione può raggiungere anche valori di svariati KHz.

Nel caso di dispositivi che utilizzino la triangolazione di segnali esterni l'errore generato può variare da qualche decina di metri per apparecchi meno sofisticati fino anche a un singolo metro per quelli più precisi e può raggiungere anche qualche centimetro con il GPS differenziale(sfrutta la posizione di alcune postazioni a terra calcolata con estrema precisione in precedenza e corregge quella inviata dai satelliti).

Per quanto riguarda i sistemi di navigazione inerziale, gli errori che essi generano dipendono da un numero infinito di fattori e il tentativo di cancellazione o della loro attenuazione è proprio alla base dello scopo di questo articolo. Il problema più grosso da risolvere è il così detto problema della deriva(drift), quello per cui l'errore nel calcolo della posizione aumenta molto rapidamente

all'aumentare del tempo trascorso dalla partenza.

Esistono e sono alla studio molte soluzioni per risolvere questo problema ma una di essa richiede una attenzione particolare: l'utilizzo del filtro di Kalman.

1.2 Filtro di Kalman

Il filtro di Kalman prende il nome da Rudolf Emil Kalman, un ingegnere statunitense di origini ungheresi, che nel 1960 pubblicò uno dei primi articoli che lo riguardavano. Il filtro di Kalman è un insieme di equazioni matematiche che forniscono una stima dello stato futuro in base alla stima e alla misurazione degli stati precedenti. Seguirà una breve introduzione che cercherà di mostrare le caratteristiche principali del filtro nel caso discreto. L'equazione di evoluzione di stato di un processo è definita da:

$$x_{k+1} = F_k x_k + G_k u_k + w_k \quad (1)$$

mentre le misurazioni da:

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

dove le variabili w_k e v_k rappresentano rispettivamente il rumore di processo e di misurazione.

Si definisce invece \bar{x}_k' la stima dello stato eseguita a priori (in base alle condizioni precedenti del sistema) mentre si definisce \bar{x}_k quella eseguita a posteriori (in base anche all'ultima misurazione z_k).

Possiamo allora definire gli errori di stima a priori e a posteriori nel modo seguente:

$$e_k' = x_k - \bar{x}_k'$$

$$e_k = x_k - \bar{x}_k$$

e di conseguenza anche la loro covarianza:

$$P_k' = E[e_k' e_k'^T]$$

$$P_k = E[e_k e_k^T] \quad (3)$$

A questo punto il filtro di Kalman procede alla stima dello stato a posteriori \bar{x}_k come combinazione lineare tra la stima calcolata a priori \bar{x}_k' e una differenza pesata tra la misurazione z_k e la previsione di misurazione $H_k \bar{x}_k'$:

$$\bar{x}_k = \bar{x}_k' + K(z_k - H_k \bar{x}_k') \quad (4)$$

dove la matrice K viene detta Guadagno di Kalman e si determina in modo da minimizzare la covarianza dell'errore a posteriori (3), mentre la differenza $(z_k - H_k \bar{x}_k')$ è detta innovazione di misurazione o residuo.

Una possibile forma di K che minimizza (3) è data da:

$$K_k = P_k' H_k^T (H_k P_k' H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

Si può notare osservando (5) che al tendere a zero della covarianza dell'errore di misurazione R_k , il guadagno $K \rightarrow H_k^{-1}$ e quindi pesa il residuo in maniera più ingente. Invece al tendere a zero della covarianza dell'errore di stima a priori P_k' si ha che $K \rightarrow 0$ e quindi si annulla l'apporto del residuo.

In altre parole al tendere a zero della covarianza dell'errore di misurazione R_k la misurazione z_k diviene più 'esatta' mentre la previsione della misurazione sempre meno. Al contrario, quando la covarianza dell'errore di stima a priori P_k' tende a zero, la misurazione z_k diviene meno corretta, mentre la previsione della misurazione si avvicina sempre di più al valore reale. Si può quindi concludere che tanto maggiore è l'errore di stima del passo precedente e tanto maggiore è la correzione della stima attuale indotta dal filtraggio mentre tanto meno sono corrette le misurazioni, tanto più sarà possibile ottenere stime precise.

Possiamo descrivere il funzionamento del filtro in questo modo: viene eseguita una stima dello stato a priori (Time Update) e successivamente viene eseguito

il calcolo del residuo con la nuova misurazione necessario a perfezionare la stima a priori per ottenere quella a posteriori (Measurement Update). In seguito, la stima a posteriori appena calcolata verrà utilizzata come input per il calcolo della stima a priori del passo successivo.

Il filtro di Kalman, quindi, condiziona ricorsivamente la stima corrente a tutte le stime passate rendendo l'implementazione molto più agevole del caso in cui, per esempio, ad ogni stima si debba lavorare su tutte quella precedenti.

1.3 Applicazioni del filtro di Kalman

Il filtro di Kalman viene associato generalmente ad applicazioni che necessitano della stima di una posizione e quindi all'utilizzo in sistemi come il GPS o l'INS (che verrà trattato in seguito). Esistono anche altri sistemi che sfruttano la stima della posizione calcolata attraverso il filtro di Kalman come per esempio l'autopilota di un aereo o lo stazionamento dinamico che permette ad una nave, per esempio, di mantenere la posizione in mare aperto nel caso in cui non sia possibile l'ancoraggio a causa della eccessiva profondità del fondale.

Esistono tuttavia applicazioni che differiscono in modo sostanziale da quelle presentate in precedenza. Questo è dovuto al fatto che il filtro di Kalman, nel senso più generale possibile, permette di ottenere, attraverso delle misure ottenute in un dato istante ed ad un modello degli stati precedenti, una stima del futuro. Queste caratteristiche permettono il suo utilizzo praticamente in qualsiasi ambito in cui si possano ottenere delle misure nel presente e si conosca un modello del passato. Presentiamo di seguito tre esempi della sua applicazione in ambiti particolari.

Time series

I Time series sono sequenze di dati calcolati ad intervalli di tempo regolari. Fanno parte dei Time series, per esempio, il valore di un titolo in borsa oppure la quantità di pioggia caduta in un ora. Tutti e due gli esempi infatti contribuiscono a creare nel tempo una sequenza di valori ottenuti ad intervalli predefiniti. Non è difficile intuire che in tutti e due i casi, come in tutti gli altri Time series, è possibile applicare il filtro di Kalman. Nel caso del titolo in borsa, infatti, possiamo avere a disposizione un valore presente e avere un modello basato sulle stime precedenti e su considerazioni secondarie riguardanti per esempio le possibili influenze esterne sull'andamento del titolo. Per quanto riguarda invece la quantità di pioggia caduta, abbiamo di nuovo a disposizione un misura del presente e un modello basato sulle misure precedenti che in questo caso, per esempio, tiene conto anche delle condizioni atmosferiche. Si può notare come in tutti e due i casi si abbia una misura presente e un modello del passato e quindi si possa applicare il filtro di Kalman per ottenere una stima dello stato futuro. Quanto applicato a questi due esempi è estendibile e applicabile a tutti i Time series.

Weather forecasting

Le previsioni del tempo sono un altro esempio di applicazione del filtro di Kalman. Questo forse è uno dei casi più complessi di utilizzo del filtro di Kalman in quanto le variabili in gioco sono molte. In questo campo si prendono in considerazione misure di pressione atmosferica, temperatura, umidità, velocità e direzione del vento sulla superficie terrestre nonché di temperatura, umidità, velocità e direzione del vento ad alte quote fornite dalle radiosonde lanciate in aria attraverso palloni aerostatici. A tutto questo vanno ag-

giunti i dati provenienti dalle immagini satellitari semplici ed ad infrarossi che permettono di determinare rispettivamente il movimento delle nuvole e la loro temperatura. Tutte queste informazioni possono essere fuse con un complicato modello matematico basato sui dati e sulle previsioni ottenute in precedenza attraverso il filtro di kalman per ottenere i dati relativi alle condizioni meteo future.

BCI (Brain – Computer Interface)

Sono attualmente allo studio molte soluzioni che permetterebbero di far recuperare ad una persona delle facoltà eventualmente perdute come la possibilità di parlare, di muoversi o di vedere. Anche in questo caso sembrerebbe strano un possibile impiego del filtro di Kalman. Tuttavia questi sistemi si avvalgono di sensori in grado di percepire i segnali neuronali che non sono sempre così nitidi e univoci. Il filtro di kalman quindi, accompagnato come al solito da un modello matematico appropriato, ha il compito di fondere le informazioni ricevute dai sensori con il modello per fornire una stima quanto più precisa di quello effettivamente "pensato" dal cervello. In questo modo si è in grado di muovere, per esempio, un braccio robotico solo pensandolo. Imparando a capire come esso reagisce con i loro pensieri, le scimmie di alcuni laboratori sono riuscite a muoverlo per prendere del cibo e portarselo alla bocca.

1.4 Descrizione del problema

Appare molto chiaro dalla descrizione del funzionamento del filtro di Kalman che esso necessita ad ogni passo di una corretta misurazione dello stato per procedere alla stima di quello successivo. Generalmente questa "corretta" misurazione viene data da sistemi come il GPS. Il nostro scopo é invece

quello di poter fornire delle misurazioni dello stato che siano sufficientemente precise senza l'ausilio di sistemi o apparecchiature esterne. Cerchiamo prima però di analizzare il sistema di navigazione inerziale e il suo problema della deriva.

2 INS - Inertial Navigation System

2.1 Descrizione

Il sistema di navigazione inerziale (INS) è un ausilio alla navigazione che permette, tramite alcuni sensori come accelerometri e giroscopi, di calcolare velocità, direzione e verso dell'oggetto a cui viene fissato senza l'utilizzo di nessun riferimento esterno.

Fu utilizzato per la prima volta nei missili e subito dopo nelle prime missioni spaziali. E' composto essenzialmente da un insieme di sensori che inviano i loro dati a un calcolatore il quale, dopo averli elaborati, è in grado di fornire la posizione dell'oggetto rispetto al punto di partenza . Esso infatti ne conosce, ad ogni istante, la velocità e l'orientamento e in base ad essi e alla posizione che aveva calcolato in precedenza è in grado di identificare quella successiva. Vengono spesso utilizzati per la costruzione degli INS sensori di tipo MEMS.

MEMS

I MEMS(Micro Electro-Mechanical Systems) sono dei dispositivi composti da parti di grandezza compresa tra 1 e 100 micrometri e hanno solitamente una estensione che può variare da 20 micrometri fino a un massimo di un millimetro. Un MEMS è composto al suo interno da microsensori e da un microprocessore. I microsensori sono sempre di tipo analogico e solitamente restituiscono una tensione variabile in uscita che il microprocessore provve-

derà a trasformare in una sequenza digitale. Questo è dovuto al fatto che il MEMS viene sempre inserito all'interno di piccoli circuiti digitali proprio sotto forma di chip e quindi necessita di una uscita digitale.

Generalmente i MEMS sono composti da silicio e da polimeri: il primo è usato comunemente in qualsiasi microprocessore mentre il secondo permette di costruire i microsensori con le caratteristiche desiderate.

La facilità con cui si gestisce soprattutto il silicio a queste grandezze è merito dell'evoluzione dei microprocessori utilizzati nei computer e questo ha permesso, negli ultimi anni, una notevole diffusione dei MEMS.

Attualmente esistono sia accelerometri sia giroscopi di tipo MEMS nonché altri vari tipi di sensori.

2.2 Configurazioni di un INS

Esistono essenzialmente due configurazioni differenti per i sistemi di navigazione inerziale. La differenza sostanziale tra di essi è il sistema di riferimento in cui operano i giroscopi e gli accelerometri. Definiamo quindi *body frame* il sistema di riferimento del sistema inerziale mentre *global frame* quello in cui stiamo "navigando" (figura 1).

2.2.1 Sistema a piattaforma stabilizzata

In questo sistema i sensori del sistema inerziale sono montati in una piattaforma isolata dalle possibili rotazioni esterne. In altre parole la piattaforma mantiene l'allineamento con il *global frame*.

Per ottenere questo risultato la piattaforma viene montata in una sospensione cardanica che permette il movimento di rotazione nei tre assi. I giroscopi montati nella piattaforma determinano la rotazione che viene eliminata agendo sui cardini in modo da mantenere l'allineamento con il *global frame*

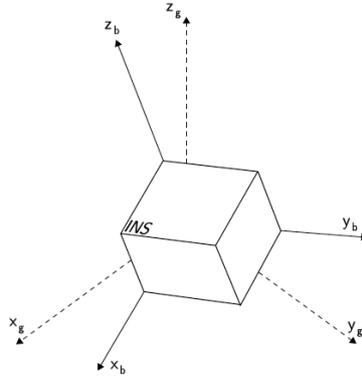


Figura 1: Il *body frame* e il *global frame*

(figura 2). L'angolo di rotazione viene quindi misurato direttamente in base alla rotazione del singolo cardine. La posizione viene invece calcolata normalmente, integrando due volte l'accelerazione misurata dagli accelerometri (figura 3).

Si nota che, nel caso si disponga di accelerometri che risentono anche della gravità, sia necessario sottrarla nella misura dell'asse in cui è presente.

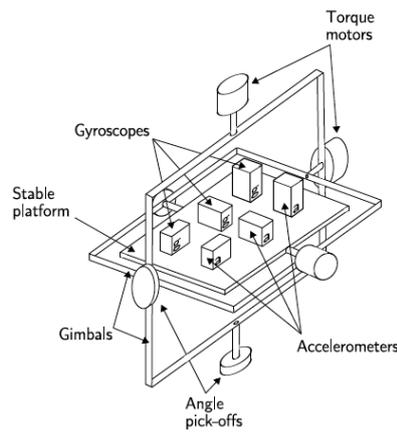


Figura 2: Sistema a piattaforma stabilizzata

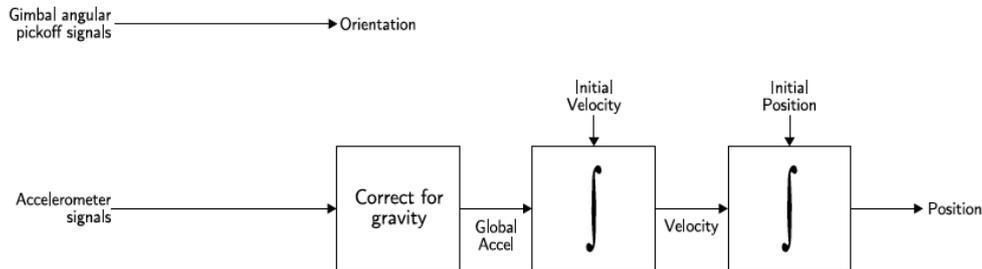


Figura 3: Algoritmo del sistema a piattaforma stabilizzata

2.2.2 Sistemi Strapdown

In questo tipo di sistemi, invece, i sensori vengono fissati rigidamente all'oggetto e quindi la misura ottenuta sarà calcolata nel *body frame* piuttosto che nel *global frame*. Per tenere traccia dell'orientamento in questo caso, la misura di velocità angolare pervenuta dal giroscopio deve essere integrata. Per quanto riguarda la posizione invece, si procede come nel caso precedente (figura 4).

I due sistemi si basano essenzialmente sugli stessi principi. Quello strapdown risulta avere una complessità meccanica minore rispetto a quello a piattaforma stabile pagando però una maggiore complessità a livello di computazione che con le tecnologie moderne è diventata praticamente trascurabile.

2.3 Giroscopi

In questa sezione verranno analizzati alcuni differenti modelli di giroscopi allo scopo di fornire una descrizione del funzionamento nonché dei pregi e difetti di ognuno di essi per avere una panoramica generale su questo strumento.

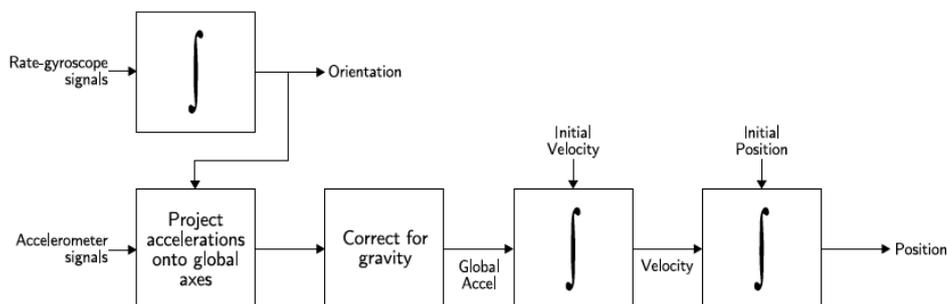


Figura 4: Algoritmo del sistema strapdown

2.3.1 Giroscopio meccanico

Questo è il modello di giroscopio convenzionale, costituito da una ruota in rotazione sospesa con una sospensione cardanica che permette il movimento nei tre assi (Figura 5) . In seguito ad una rotazione, a causa del fatto che la ruota gira velocemente, essa tenderà a mantenere il suo orientamento iniziale causando una sfasamento dell'angolo di uno dei cardini della sospensione.

Si nota come questo caso ci fornisca come output l'angolo di rotazione mentre nei giroscopi più moderni(trattati in seguito) viene misurata solitamente la velocità angolare.

Il difetto di questi giroscopi è il fatto di avere una grande grande quantità di parti in movimento. Inoltre, per avere uno strumento molto sensibile, sono necessarie parti meccaniche estremamente precise e di conseguenza molto costose. Solitamente è anche necessario aspettare un breve tempo di riscaldamento.

2.3.2 Giroscopio ottico

I giroscopi ottici misurano la velocità angolare sfruttando l'effetto Sagnac.

Nei giroscopi a fibra ottica (FOG - Fibre Optic Gyroscope) due raggi di luce

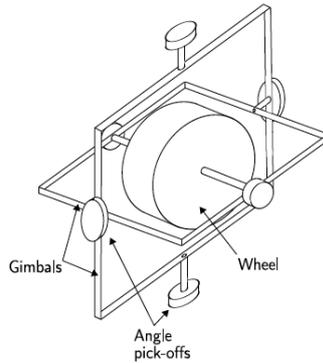


Figura 5: Giroscopio meccanico

vengono inviati all'interno di una spira di fibra ottica in direzione opposta (Figura 6) . Se il sensore è sottoposto ad una rotazione, il raggio che viaggia nella direzione della rotazione farà un percorso maggiore rispetto a quello che viaggia in senso opposto alla rotazione (Effetto Sagnac). Una volta compiuto il giro della fibra ottica, i raggi di luce fuoriescono e si fondono insieme.

Una rotazione del sensore provocherà una sfasamento nella combinazione dei due raggi causando una interferenza. Questa interferenza viene misurata e da essa si ricava la velocità angolare della rotazione.

Questo tipo di giroscopi sono tanto più precisi e sensibili tanto più grande e lunga è la fibra ottica. Questo comporta evidenti problemi di dimensione del sensore. In compenso i FOG non presentano parti meccaniche e necessitano solo di qualche secondo per l'accensione.

2.3.3 Giroscopio MEMS

Un giroscopio MEMS fa uso dell'effetto Coriolis per il quale un massa m che si muove ad una velocità v all'interno di un sistema di riferimento inerziale

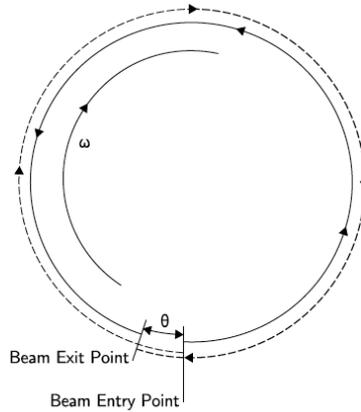


Figura 6: Giroscopio a fibra ottica

rotante a velocità angolare w è soggetto ad una forza:

$$F_c = -2m(w \times v)$$

Un giroscopio MEMS contiene un elemento vibrante che misura l'effetto Coriolis. Una massa viene costretta a vibrare lungo un asse e, in seguito ad una rotazione del sensore, viene indotta una vibrazione nell'asse secondario dovuta alla forza di Coriolis (Figura 7). Tramite la misura di questa vibrazione si riesce ad ottenere la misura della velocità angolare di rotazione.

Attualmente questo tipo di giroscopi non sono in grado di avere una sensibilità paragonabile per esempio a quella dei FOG.

Essi però hanno una lunga serie di caratteristiche interessanti che li portano ad essere i più utilizzati:

- Piccole dimensioni
- Peso ridotto
- Ridotto consumo di potenza
- Costruzione semplice

- Ridotto tempo di accensione
- Basso costo
- Nessuna manutenzione
- Possibilità di impiego in ambienti ostili

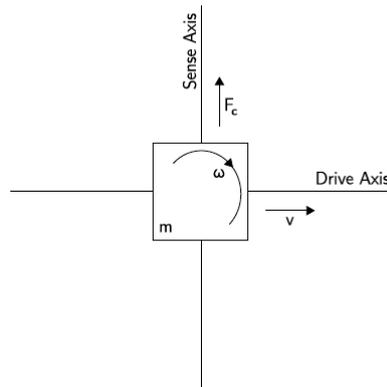


Figura 7: Giroscopio a massa vibrante

2.3.4 Errori nel giroscopio MEMS

Verranno analizzate brevemente in questa sezione le caratteristiche dell'errore di misura generato all'interno dei giroscopi di tipo MEMS.

I due tipi di errore che influenzano sensibilmente la misura del giroscopio sono un errore costante e un rumore termo-meccanico gaussiano bianco.

Errore costante

L'errore costante di un giroscopio MEMS è rappresentato dall'uscita del giroscopio quando esso non è sottoposto a rotazione. Essa dovrebbe essere nulla ma per alcuni motivi, dovuti essenzialmente alla costruzione, risulta spesso

diversa da zero. Questo tipo di errore risulta costante nel tempo e , quando integrato, causa un errore di orientamento che cresce linearmente con il tempo. Se ε è il valore dell'errore costante allora la variazione dell'angolo risulta $\theta(t) = \varepsilon \cdot t$.

L'errore costante può essere stimato misurando l'uscita per un lungo periodo di tempo senza sottoporre il giroscopio a rotazioni. Una volta ottenuta questa misura sarà sufficiente sottrarla al valore misurato dal giroscopio per ottenere quella depurata dall'errore.

Rumore termo – meccanico gaussiano bianco

L'uscita di un giroscopio MEMS è perturbata da un rumore termo-meccanico che varia evidentemente molto più velocemente del tempo di campionamento del sensore.

Come risultato si ottengono dei valori campionati disturbati da un rumore bianco che sarà rappresentato da una sequenza di variabili aleatorie incorrelate a media nulla. Ognuna di esse sarà identicamente distribuita con varianza σ^2 .

Il rumore così descritto introdurrà un errore a media nulla nel segnale integrato la cui deviazione standard è data da: $\sigma_\theta(t) = \sigma \cdot \sqrt{\delta t \cdot t}$ per un periodo di tempo $t = n \cdot \delta t$.

A questi due tipi di errori possono essere aggiunti anche errori nella calibrazione oppure effetti dovuti alla variazione della temperatura di funzionamento.

Tutte queste situazioni contribuiscono a creare il così detto errore di deriva.

2.4 Accelerometri

Seguirà una breve lista di modelli di accelerometri di cui analizzeremo caratteristiche e funzionamento. Come per i giroscopi, si intende solamente fare una panoramica su questo sensore ormai ampiamente utilizzato in quasi ogni apparecchiatura multimediale moderna.

2.4.1 Accelerometro meccanico

L'accelerometro meccanico consiste in una massa sospesa da due molle (Figura 8). In seguito ad una accelerazione, si misura lo spostamento della massa che sarà proporzionale alla forza agente su di essa. Utilizzando poi la seconda legge di Newton $F = ma$ si calcola l'accelerazione.

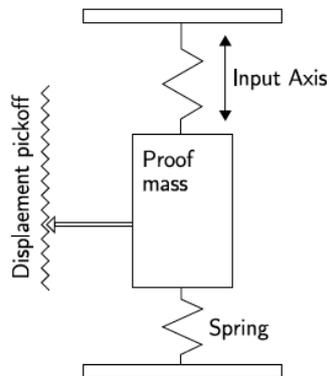


Figura 8: Accelerometro meccanico

2.4.2 Accelerometro MEMS

Come nel caso dei giroscopi MEMS, questo tipo di accelerometro si sta diffondendo molto velocemente per merito delle sue ottime caratteristiche.

Esistono essenzialmente due famiglie di accelerometri MEMS: quelli di tipo

meccanico in cui si misura lo spostamento di una massa e quelli di tipo vibrante.

Gli accelerometri a massa vibrante contengono al loro interno una massa posta in vibrazione. In seguito ad una accelerazione la frequenza con cui vibra la massa si modificherà e si potrà estrarre dalla differenza di frequenza il valore dell'accelerazione subita.

Per quanto riguarda quelli di tipo meccanico invece, i più diffusi sono due: quello *resistivo* e quello *capacitivo*.

Accelerometro resistivo

L'accelerometro di tipo resistivo o estensimetrico utilizza al suo interno una massa mobile tenuta sospesa da due lamierini (i due estensimetri) collegati tra loro a ponte di Wheatstone. I due estensimetri sono due elementi conduttivi i quali, in seguito alla modifica della loro lunghezza, modificano la loro resistenza.

Se l'accelerometro subisce una accelerazione, la massa sospesa si muoverà causando una flessione dei lamierini che di conseguenza modificheranno la loro resistenza e causeranno uno sbilanciamento del ponte di Wheatstone misurabile tramite un voltmetro. La tensione misurata sarà proporzionale alla flessione dei lamierini e quindi alla accelerazione.

Esistono alcune varianti in cui, al posto dell'estensimetro, viene utilizzata una piezoresistenza (che modifica la sua resistenza in seguito ad una sua deformazione) oppure in cui viene eliminato anche il ponte di Wheatstone utilizzando dei cristalli piezoelettrici che hanno la caratteristica di creare una differenza di potenziale a seguito di una loro compressione.

Accelerometro capacitivo

L'accelerometro capacitivo é composto al suo interno da un condensatore. Una delle due armature del condensatore è fissata mentre la seconda è sospesa da una membrana elastica dielettrica.

A seguito di una accelerazione, l'armatura mobile, a causa della elasticità del dielettrico, si avvicina o si allontana da quella fissa causando una variazione di capacità. Questa variazione di capacità viene registrata e risulta proporzionale alla accelerazione subita. Solitamente, il condensatore ha una capacità di qualche picoFarad e in seguito alle accelerazioni si ottengono variazioni dell'ordine dei femtoFarad.

2.4.3 Errori nell'accelerometro MEMS

Gli errori presenti negli accelerometri sono molto simili a quelli già descritti per i giroscopi MEMS. La notevole differenza si ha però nel fatto che negli accelerometri è necessaria una doppia integrazione mentre per giroscopi MEMS era sufficiente una.

Errore costante

Come per i giroscopi, è presente un errore costante nella misura di una accelerazione che corrisponde ad una misura non nulla in assenza di accelerazione. Questo errore è causato principalmente da difetti costruttivi.

L'errore ε viene integrato due volte nel calcolo della posizione e comporta quindi una sua variazione che cresce con il quadrato del tempo, in particola-

re: $s(t) = \varepsilon \cdot \frac{t^2}{2}$.

Rumore termo – meccanico gaussiano bianco

Anche per gli accelerometri è presente un errore gaussiano bianco con media nulla e varianza σ^2 . Esso può essere descritto da una variabile aleatoria a media nulla e deviazione standard data da: $\sigma_s(t) \approx \sigma \cdot t^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\delta t}{3}}$ per un periodo di tempo $t = n \cdot \delta t$.

Vanno aggiunti a questi due tipi di errori quelli dovuti alle variazioni di temperatura e alla calibrazione andando a creare anche per questo strumento il noto errore di deriva.

2.5 Problema della deriva

Il problema della deriva rappresenta forse l'unico grosso neo per i sistemi di navigazione inerziale. Abbiamo visto in precedenza come sia necessario integrare diverse volte i dati ottenuti con i sensori per avere a disposizione tutti i parametri necessari al tracciamento del moto.

Risulta evidente che anche un piccolo errore nella misura dell'accelerazione o nella velocità angolare si tramuti, a seguito delle successive integrazioni, in errori non trascurabili in orientamento, posizione e velocità.

Si può apprezzare quanto detto nell'immagine successiva: il nero, il giallo e il magenta rappresentano rispettivamente accelerazione, velocità e posizione mentre le crocette rosse rappresentano l'accelerazione perturbata e il verde e il blu le rispettive velocità e posizione. E' stata presa in considerazione come esempio una accelerazione $a(t) = \cos(t)$ nell'intervallo $[0, 2\pi]$ e si nota

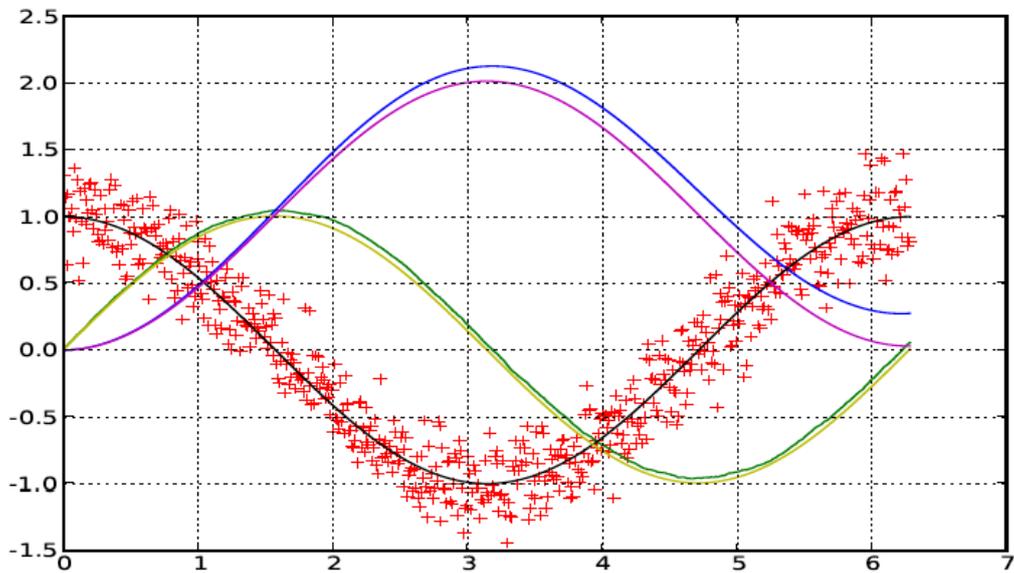


Figura 9: Deriva di velocità e posizione

come la posizione vada progressivamente "alla deriva" nel caso essa venga perturbata.

Si può avere un riscontro pratico di quanto detto guardando il seguente esempio di figura 10 in cui, utilizzando un INS, è stato compiuto un breve percorso a piedi all'interno di un edificio: è stato percorso un corridoio, sono state scese le scale e percorso il corridoio del piano inferiore in senso inverso per poi salire di nuovo le scale e tornare quindi al punto di partenza.

Si nota effettivamente come la traiettoria tracciata in rosso sia molto simile a quella seguita realmente a parte fattori di scala(dovuti alla deriva degli accelerometri) ed errori di orientamento(dovuti alla deriva del giroscopio).

Quanto detto fino a questo punto mostra come l'INS sia un ottimo sistema di navigazione a patto che si riesca in qualche modo ad eliminare il suo problema di deriva.

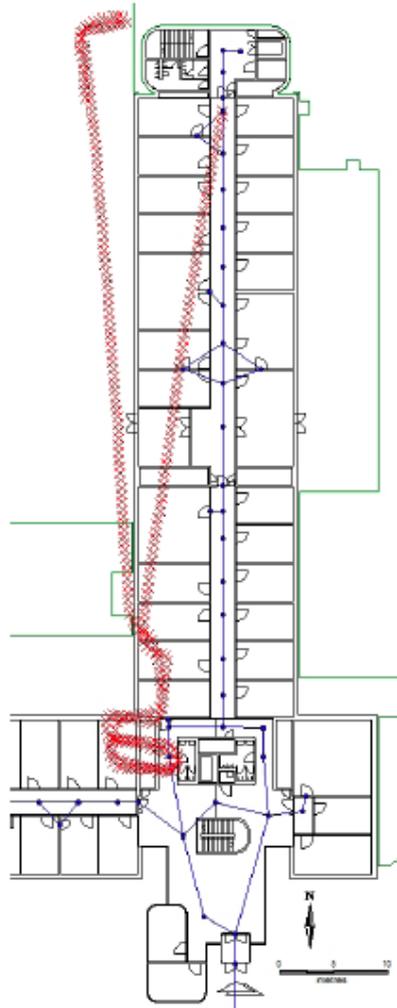


Figura 10: Deriva di orientamento e posizione

2.6 Risoluzione del problema

In questa sezione prenderemo in esame alcuni metodi per eliminare o almeno contenere la deriva. Il nostro studio vuole prendere in considerazione in particolare il caso in cui si debba tracciare il percorso di una persona a piedi all'interno di un edificio.

Navigazione inerziale con ZUPT(zero-velocity updates)

Questo sistema è stato progettato dalla ditta *Intersense* e prende il nome di *Navshoe*.

L'idea alla base di *Navshoe* è molto semplice e prevede di montare il sistema di sensori direttamente sulla scarpa della persona della quale si vuole tracciare il moto. Un particolare algoritmo riesce a calcolare il tragitto percorso basandosi sulle caratteristiche della camminata (tempo di volo del piede, tempo di appoggio, ecc.). L'algoritmo è progettato in modo che ogni volta in cui il piede è appoggiato a terra azzera la velocità calcolata in quel momento. In questo modo si riesce a eliminare quasi completamente la deriva causata dall'integrazione dell'accelerazione anche se rimarrebbe invariata quella di orientamento. Questo è uno degli esempi in cui, tramite particolari considerazioni, si riesce a cancellare una parte dell'errore di deriva.

Navigazione inerziale con UWB(Ultra Wide Band)

UWB è una tecnologia che funge da GPS locale. Utilizza un sistema di trasmissione che risente poco delle interferenze dovute alla riflessione del segnale stesso e non interferisce con altri segnali. Può essere utilizzato all'interno di un edificio di cui non si conosce niente (unprepared) e possiede una buona precisione. Si può pensare di posizionare delle antenne di trasmissio-

ne in luoghi predefiniti all'esterno dell'edificio e attraverso la triangolazione dei segnali ricevuti (come nel GPS) calcolare la posizione relativa. La ditta *Ubisense* che commercializza un sistema di questo tipo sostiene di poter calcolare la posizione tridimensionale di una persona all'interno dell'edificio con una precisione anche inferiore ai 30 cm.

I dati relativi alla posizione ottenuti con questa tecnologia vengono successivamente fusi con quelli derivanti dall'INS attraverso il filtro di Kalman.

Questo è uno di quei casi in cui si provvede all'utilizzo del filtro di Kalman per unire l'efficienza del tracciamento dell'INS con la precisione di un sistema di localizzazione esterno (in questo caso UWB). Quest'ultimo fornirà la misurazione che abbiamo chiamato z_k e permetterà di eliminare quasi completamente il problema della deriva. Esso, infatti, servirà per correggere in un certo passo agli errori di stima dovuti alla deriva accumulati nei passi precedenti. Il difetto di questa soluzione risulta essere il prezzo.

Navigazione inerziale e Map Matching

Consideriamo ora un caso interessante che, al contrario del caso precedente, non necessita di alcuna infrastruttura esterna. Esso prende il nome di Map Matching e consiste in una 'digitalizzazione' dell'edificio. Si cerca di creare una mappa dell'edificio e di definire al suo interno dei nodi. Questi nodi forniranno al filtro di Kalman la misurazione z_k che gli permetterà di correggere l'errore di deriva accumulato. Data la relativa semplicità di implementazione e l'assenza di infrastrutture esterne ci concentreremo su questo tipo di sistema e lo analizzeremo in dettaglio.

3 MMINs- Map Matching and Inertial Navigation System

3.1 Progetto

3.1.1 Descrizione

Come detto in precedenza il Map Matching è un metodo che può essere utilizzato a complemento del filtro di Kalman per fornire ad esso le misurazioni esterne necessarie alla correzione della deriva. Per fare questo è necessario studiare la struttura dell'edificio in cui si vuole applicare il Map Matching e individuare al suo interno i percorsi possibili, i punti di attraversamento di porte o archi, ascensori, scale, ecc... Una volta individuati occorre creare una mappa digitale.

Questa mappa sarà costituita da una serie di punti; la distanza tra i punti e il loro numero vanno calcolate in modo che essi possano portare la massima informazione senza perdita di dettaglio: se per esempio si considerassero troppi punti nella mappa essi non sarebbero di nessun aiuto perché ve ne sarà sempre uno vicino alla posizione calcolata dall'INS non consentendo di correggerla; al contrario se fossero troppo pochi non consentirebbero di tracciare un percorso adeguato.

I seguenti punti consentono di creare dei percorsi sottoposti a vincoli e saranno anche questi vincoli a consentire la correzione degli errori causati dall'INS. Un semplice esempio potrebbe essere la impossibilità di attraversare i muri di un corridoio. Con questo vincolo la traiettoria di figura 10 sarebbe stata corretta facilmente.

Costruiamo un esempio per spiegare meglio il concetto.

Supponiamo di voler tracciare il percorso di una semplice svolta a sinistra al-

l'interno di un corridoio. La figura 11 mostra una vista dall'alto del corridoio al cui interno è stata precedentemente tracciata la traiettoria blu che dovrà utilizzare il Map Matching. Supponiamo anche di aver seguito la traiettoria blu camminando e che per ipotesi (più che plausibile) l'INS abbia registrato la traiettoria rossa sfasata come al solito per un fattore di scala e uno di rotazione.

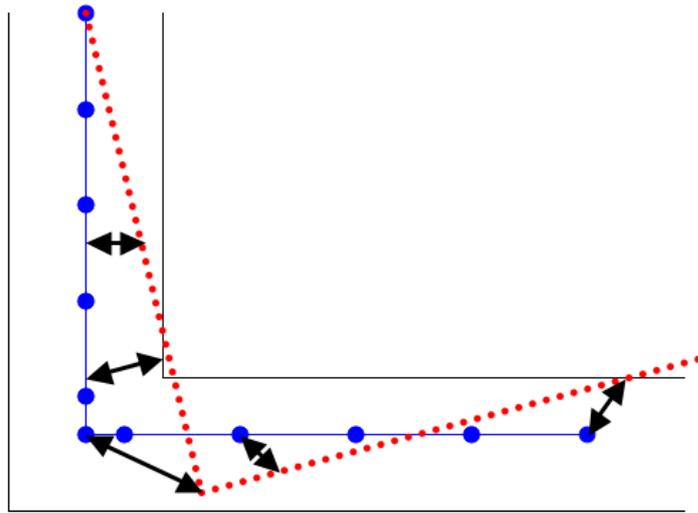


Figura 11: Esito del tracciamento dell'INS

A questo punto utilizziamo i vincoli sul non possibile attraversamento dei muri e fondiamo i risultati tra il Map Matching e l'INS con il filtro di Kalman. Quello che probabilmente otterremo sarà un percorso come quello in figura 12 che evidentemente assomiglia molto di più a quello compiuto realmente.

L'algoritmo alla base del Map Matching prevede quindi che sia stata creata una rete di percorsi formata da punti e da segmenti che collegano i punti

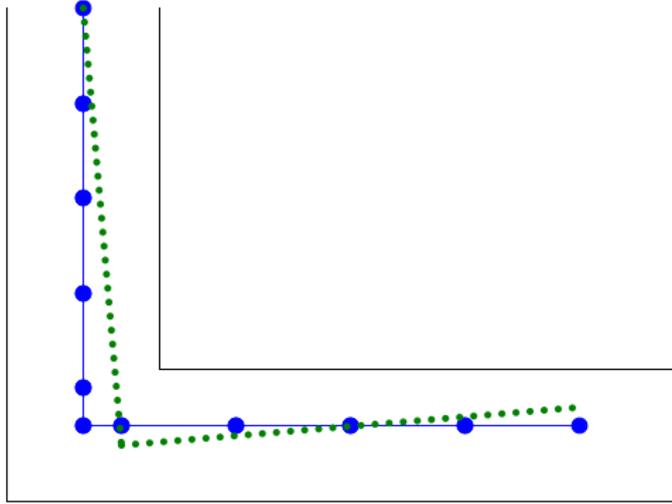


Figura 12: Stima del risultato di fusione con il filtro di Kalman

chiamati più correttamente archi. Ad ogni punto possono essere collegati anche diversi archi per poter creare percorsi anche più complessi di una semplice linea unidirezionale.

Questi percorsi dovranno concordare con i possibili percorsi che potrebbe seguire una persona all'interno dell'edificio. Per esempio sarà inutile creare diversi punti all'interno di un ascensore ma ne basterà uno solo, come sarà inutile creare diversi tracciati in un corridoio di piccole dimensioni quando sarà sicuramente sufficiente una singola linea di punti. Sarà invece utile tracciare i percorsi per esempio in una stanza seguendo quelli che, in base magari alla conformazione del mobilio, sono gli unici possibili.

L'obiettivo sarà quindi quello di avere a disposizione una serie di punti e archi che siano in grado di seguire o di indicare la strada da percorrere per raggiungere un certo punto dell'edificio, eliminando eventualmente quelli superflui, cioè tutti quei punti o quegli archi che non forniscano alcuna informazione o percorso supplementare.

3.1.2 Calcolo del percorso

A questo punto sarà possibile anche calcolare il percorso minimo o più adeguato per raggiungere un determinato punto dell'edificio.

Per fare questo sarà sufficiente assegnare ad ogni arco un peso; avremo quindi a disposizione un grafo pesato sul quale si potrà applicare un algoritmo per il calcolo del percorso minimo come per esempio Dijkstra. Attraverso uno di questi algoritmi saremmo quindi anche in grado di fornire una navigazione assistita identica a quella a cui si è abituati utilizzando l'automobile. Come nei navigatori per automobili è previsto che la macchina non possa viaggiare fuori strada, nel nostro caso è previsto che una persona non possa attraversare i muri e, come il classico navigatore ci dà le indicazioni di svolta in prossimità di un incrocio, il nostro sistema ci fornirà le indicazioni in presenza di una porta, di un ascensore, ecc...

In quest'ultimo caso è evidente che sarà necessario assegnare ai nodi che rappresentano l'attraversamento di una porta o un ascensore un valore particolare che il software di navigazione sia in grado di riconoscere.

Affinché tutto questo sia possibile è necessario però che l'algoritmo di Map Matching sia in grado di assegnare ad intervalli regolari una posizione nella mappa digitale (creata con i criteri definiti in precedenza) rispetto alla posizione attuale fornita dall'INS. Questa tecnica viene definita appunto "matching" (da cui deriva il nome Map Matching).

3.1.3 Metodi di assegnazione

Cerchiamo allora di analizzare il metodo di decisione che deve adottare l'algoritmo per scegliere il punto a cui associare la misurazione. Esistono almeno due metodi possibili per fare quanto richiesto: Closest Node oppure Closest Link.

Il metodo del *Closest Node* (CN) prevede di assegnare alla posizione pervenuta dall'INS il nodo che risulta il più vicino utilizzando la distanza Euclidea, cioè la formula:

$$d_{CN} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (6)$$

dove (x_1, y_1) e (x_2, y_2) sono le coordinate dei nodi per i quali si vuole calcolare la distanza.

Per trovare il nodo più vicino si procede nel seguente modo: si ottengono le coordinate pervenute dall'INS riguardo alla posizione attuale e si confrontano con le coordinate del nodo che era stato assegnato in precedenza (nodo Z) ottenendo la distanza d_z ; si procede a questo punto con il calcolare la distanza della posizione pervenuta dall'INS con tutti gli altri nodi che sono connessi da un arco al nodo Z. Quest'ultimo vincolo è necessario ad evitare che un nodo non corretto (magari presente in un'altra stanza ma più vicino di altri) venga assegnato.

In conclusione l'algoritmo assegnerà la posizione attuale al nodo che risulterà avere distanza minima tra quelle calcolate in precedenza.

In figura 13 è mostrato un esempio di assegnazione su due nodi.

Il metodo del *Closest Link* (CL) si basa invece sul calcolo della distanza tra le coordinate della posizione pervenute dall'INS e gli archi adiacenti. Per

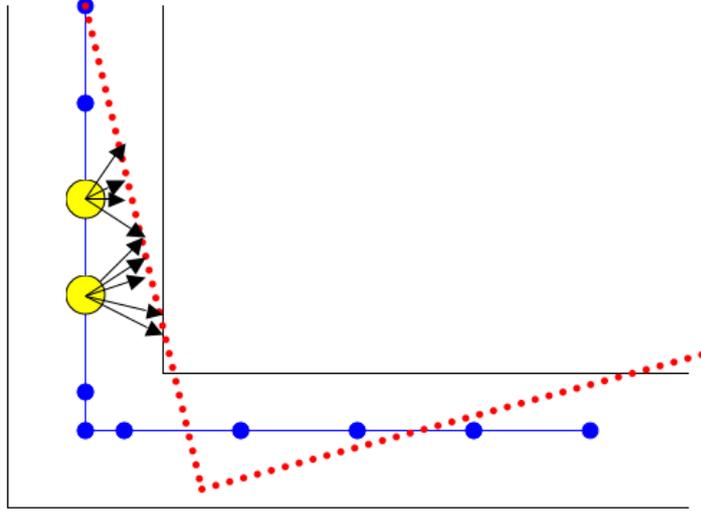


Figura 13: Metodo di assegnazione *Closest Node (CL)*

fare questi calcoli usiamo la classica equazione per calcolare la distanza di un punto da una retta passante per due punti (il nostro arco):

$$d = \sqrt{\frac{[(y_1 - y_2)x_{INS} + (x_2 - x_1)y_{INS} + (x_1y_2 - y_1x_2)]^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}} \quad (7)$$

dove x_{INS} e y_{INS} sono le coordinate fornite dall'INS e $N_1 = (x_1, y_1)$, $N_2 = (x_2, y_2)$ sono i nodi che contengono l'arco con cui fare il confronto.

La coordinata che verrà assegnata dall'algoritmo di Map Matching sarà il punto dell'arco che si trova alla minima distanza dal punto dell'INS, cioè esattamente dove cade la proiezione del punto dell'INS perpendicolarmente all'arco.

Risulta evidente anche in questo caso la necessità di porre dei vincoli per la scelta degli archi con cui fare il confronto. Si dovranno considerare i due nodi che contengono l'arco assegnato in precedenza e fare il confronto con tutti gli archi a cui è collegato ciascun nodo.

In figura 14 è mostrato un esempio di assegnazione su due archi successivi.

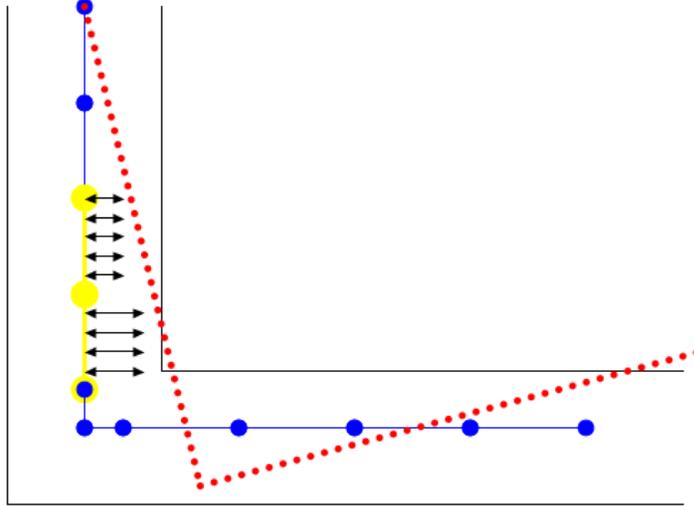


Figura 14: Metodo di assegnazione *Closest Link (CL)*

3.1.4 Spostamento tra piani

L'ultima cosa che rimane da considerare nell'assegnazione dei nodi o degli archi risulta essere il caso del cambio di piano.

Fino ad ora abbiamo infatti considerato il caso bidimensionale più semplice. Bisogna però tenere in considerazione che la struttura dell'edificio possa svilupparsi su più piani e prevedere quindi un metodo di tracciamento anche per questa situazione. Per fare questo possiamo in realtà utilizzare uno dei metodi già presentati e in particolare quello del *Closest Node*.

Si può pensare infatti di porre due nodi in prossimità di un ascensore e delle scale, uno in un piano e uno in quello successivo (supponiamo per semplicità che i piani siano due essendo di facile estensione il concetto nel caso i piani fossero di più).

L'algoritmo di Map Matching utilizzando il metodo CN assegnerà quindi la posizione al nodo del piano inferiore fino a quando, salendo, non superiamo la metà del piano; a quel punto infatti saremo più vicini al nodo del piano superiore che verrà quindi assegnato al successivo matching concludendo il passaggio di piano.

Affinché il metodo possa venire utilizzato sarà necessario collegare i due nodi dei due piani da un arco. In questo modo sarà inoltre possibile avere una navigazione assistita anche attraverso diversi piani.

In figura 15 è mostrato un esempio in cui una persona (evidentemente schematizzata con un cerchio) sale le scale per accedere al piano successivo. Per motivi di chiarezza nel disegno è stato volontariamente ommesso l'arco che dovrebbe collegare i due nodi nei differenti piani.

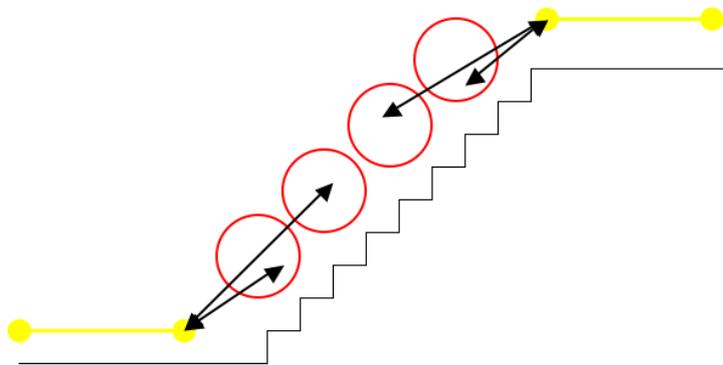


Figura 15: Metodo di assegnazione nello spostamento tra piani

3.1.5 Combinazione tra INS e Map Matching

Nei paragrafi precedenti è stata descritta nei particolari la procedura utilizzata dal Map Matching per assegnare le coordinate provenienti dall'INS ai

punti della mappa digitale, nonché le caratteristiche principali che essa deve avere e le condizioni che deve rispettare. Tutto questo però non servirebbe a niente senza l'ausilio del filtro di Kalman. Esso infatti è lo strumento alla base di tutto che ci permette di fondere le misurazioni ottenute con l'INS e i punti assegnati dall'algoritmo di Map Matching.

Tramite questa fusione esso è in grado di correggere in modo adeguato il problema della deriva causato dal solo INS rendendo possibile e attendibile la navigazione assistita anche per modesti periodi di tempo.

3.2 Eventuali applicazioni

Il Map Matching è un metodo utilizzato per sostituire il GPS. Questo tipo di sistemi può essere quindi implementato ogni qual volta si necessita di avere una navigazione assistita in luoghi in cui non sia possibile ricevere il segnale GPS. L'unico punto a sfavore del Map Matching è la necessità di rendere *prepared* il posto in cui lo si voglia utilizzare in quanto, come già ampiamente spiegato, necessita della digitalizzazione della mappa nonché del tracciamento dei nodi e degli archi. Non sarà quindi possibile utilizzare questo tipo di software in situazioni qualsiasi. E' per esempio argomento di studio parallelo a questo la ricerca della possibilità di seguire il percorso di una persona(per esempio un Vigile del fuoco) all'interno di un edificio ma risulta essere molto più complesso e articolato in quanto non si conosce niente del posto in cui si andrà a capitare. In queste situazioni è impossibile l'uso del Map Matching e il solo tracciamento dell'INS abbiamo visto essere insufficiente.

Una possibile applicazione di questo metodo potrebbe essere come esempio la navigazione in un museo. All'interno di un museo è fornita spesso una audioguida con un numero da schiacciare per ottenere la spiegazione dell'oggetto

che abbiamo di fronte a cui è associato quel numero. Attraverso un software come quello che si è analizzato in queste pagine si potrebbe pensare di rendere interattiva la visita. Tenendo per esempio in mano un palmare(al posto di una audioguida) potremmo avere a disposizione la pianta dell'edificio, essere guidati solo nei punti di nostro interesse e ricevere le informazioni relative ad un oggetto semplicemente posizionandosi davanti. Questo era solo uno degli innumerevoli utilizzi che può avere la navigazione assistita in mancanza di segnale GPS.

4 Conclusioni

I sistemi di navigazione sono nati da ormai qualche decennio nel campo militare e solo negli ultimi anni si sono trasferiti al settore commerciale. Sono stati inventati sistemi di navigazione prima per aerei e navi e poi per auto, fino ad arrivare a quelli pedonali. Nel corso degli anni sono state sempre create nuove strategie per cercare di eliminare il problema della deriva causato dagli INS, come quella presa in considerazione in queste pagine, ma c'è sempre stato qualcosa che ha fatto da "padrone" in ogni applicazione: il filtro di Kalman.

E' stato utilizzato per la prima volta nel programma Apollo per guidare l'Apollo 11 sulla Luna. Molte persone credono che senza di esso l'uomo non avrebbe mai messo piede sul nostro satellite o almeno non lo avrebbe fatto in quel periodo.

In queste pagine è stato presentato un nuovo utilizzo del suddetto filtro, le cui possibili applicazioni sono sicuramente meno ambiziose di guidare una navicella spaziale sulla Luna ma non per questo meno interessanti.

Nella concezione attuale che abbiamo di navigatore è sempre compresa la

presenza del GPS. Sia nel cellulare che in quello della macchina viene utilizzata una antenna GPS che riceve il segnale dai satelliti; segnale che tuttavia non può essere raggiunto sempre, come, per esempio, all'interno di una galleria. Lo scopo di quanto scritto in questo articolo è di creare i concetti per la costruzione di un software che sia in grado di fornire una navigazione assistita in situazioni (come ad esempio l'interno di un edificio) in cui non sia presente il segnale GPS e soprattutto che sia applicabile all'ambito pedonale (estendibile senza troppa difficoltà ad altri ambiti).

Il punto di partenza è stato quello di capire come tenere traccia del percorso fatto dalla persona all'interno dell'edificio. Per fare questo abbiamo preso in considerazione un sistema denominato INS (Inertial Navigation System). Questo sistema, tramite l'utilizzo di accelerometri e giroscopi, è in grado di fornire come output le coordinate relative a un determinato punto di partenza. Intuitivamente questo sarebbe sufficiente per asservire a quanto chiesto se non fosse per il così detto problema della deriva. Gli accelerometri e i giroscopi, soprattutto se di tipo MEMS come quelli utilizzati nel nostro caso, sono affetti da un errore che viene chiamato di deriva e che aumenta purtroppo molto rapidamente al passare del tempo trascorso in moto.

Per ovviare a questo problema si è reso necessario l'utilizzo di un secondo sistema di posizionamento chiamato Map Matching. Questo metodo consiste nel creare una mappa digitale dell'edificio in cui si desidera utilizzare il navigatore e costruire al suo interno un percorso formato da nodi e archi che collegano i vari nodi. Successivamente, il software del Map Matching associa, durante la navigazione, un punto ricevuto dall'INS con un punto sul percorso della mappa digitale tramite particolari algoritmi.

A questo punto diventa indispensabile l'utilizzo del filtro di Kalman che riceve le coordinate fornite dall'INS e dal Map Matching e le "fonde" assieme per

creare una stima dello stato successivo e correggere l'errore generato dalla deriva degli strumenti dell'INS.

Questo sistema, insieme a particolari accorgimenti e all'aggiunta di opportuni vincoli come l'impossibilità di oltrepassare i muri, consente al navigatore di avere una traccia del percorso fatto con una modesta precisione e di poter quindi gestire una navigazione assistita.

Quanto fatto in questo articolo non vuole essere la creazione del software o la sua sperimentazione ma un progetto sufficientemente dettagliato e articolato da permettere una sua possibile costruzione e implementazione.

Ringrazio la mia famiglia per avermi sostenuto in questi anni di studio e
ringrazio Elena, che mi è sempre stata vicino anche nei momenti più
difficili. Ringrazio inoltre il prof. Michele Moro per la sua disponibilità.