

Stima dell'orientamento tramite sensori inerziali

Report applicazioni biomediche per la salute e il benessere

Davide D'Angelo

Anno accademico 2020/2021

1 Abstract

Lo scopo del seguente report consiste nel dare descrizione dei principali metodi e delle relative problematiche circa la stima dell'orientamento di un oggetto (o individuo) attraverso l'utilizzo di sensori inerziali. Nella prima parte viene fatta una breve introduzione ai sistemi di misura inerziali (IMU). La trattazione prosegue prima descrivendo uno dei metodi più semplici per la stima dell'orientamento e, dopo, viene applicato su una scheda Arduino con giroscopio e accelerometro.

Nella parte finale si pone l'attenzione su una possibile applicazione nell'ambito della rilevazione di cadute, sulla base di un approccio applicato su un dispositivo prodotto in collaborazione con un compagno di corso.

2 Introduzione ai sensori inerziali

L'utilizzo di sensori inerziali, anche detti IMU (dall'inglese Inertial Measurement Unit), ha coinvolto settori disparati: se prima venivano utilizzati esclusivamente per il controllo di aerei, mezzi aerospaziali e satelliti, al giorno d'oggi sono di comune impiego nell'ambito civile. Gli smartphone, i contapassi, gli smartwatch sono solo alcuni dei dispositivi che predispongono di IMU e che ne fanno largo utilizzo.

Di seguito vengono trattati nel dettaglio i singoli componenti di un IMU.

Accelerometro

Un accelerometro è un sensore che effettua misure di accelerazione lineare in $[g]$. Il principio di funzionamento è il seguente: a seguito di accelerazione, una piccola massa al suo interno si sposta comprimendo delle piccole molle.

Lo spostamento che si verifica causa variazioni di una o più proprietà elettriche come, ad esempio, la capacità (accelerometri capacitivi) o la resistenza (accelerometri piezoresistivi). I sensori inerziali più comuni presentano un totale di tre accelerometri, ciascuno dei quali fornisce la misurazione dell'accelerazione lungo gli assi x , y e z . Tra le misure è sempre presente l'accelerazione di gravità che, in lettura, avrà un valore in modulo pari a $1g$ ($\simeq 9,81m/s^2$).

I tre accelerometri vengono in realtà uniti in uno solo chip che prende il nome di "accelerometro a tre assi" (dall'inglese "3-axis accelerometer").

Il segnale grezzo fornito da un accelerometro a tre assi è tutt'altro che esente da rumore. Le principali cause legate alla presenza di rumore sono:

- Rumore elettronico bianco;
- Rumore meccanico dovuto al movimento dei substrati presenti all'interno dell'accelerometro;

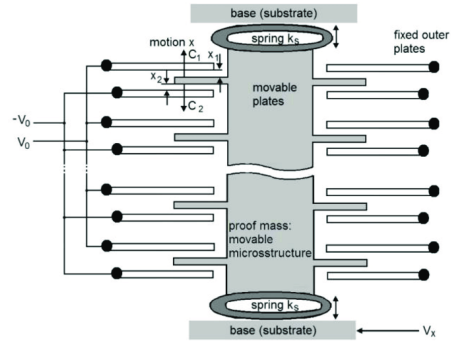
La presenza di rumore, come si può immaginare, influenza fortemente la misura.

Il modello del segnale fornito da un accelerometro, può essere descritto come la seguente composizione:

$$\vec{a} = \vec{a}_l + \vec{a}_g + \vec{\eta} \quad (1)$$

dove:

- \vec{a}_l rappresenta il vettore di accelerazione lineare provocata dalle forze esterne (es. movimento);
- \vec{a}_g rappresenta il vettore dell'accelerazione di gravità;

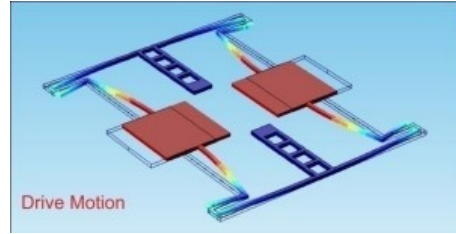


- $\vec{\eta}$ rappresenta il vettore della componente di rumore;

Giroscopio

Il giroscopio è un sensore in grado di misurare velocità angolari inerziali, spesso espresse in rad/s oppure in $^{\circ}/s$, sfruttando il principio di Coriolis. La struttura interna di un giroscopio MEMS è costituita da due masse che vengono fatte oscillare alla frequenza di risonanza. L'applicazione di una certa velocità angolare provoca una variazione nelle oscillazioni permettendo così di misurare intensità e direzione di tale velocità.

Come nel caso degli accelerometri, i sistemi inerziali moderni presentano un totale di tre giroscopi, ciascuno in grado di misurare la velocità angolare lungo i tre assi ortogonali x, y e z , formando così un "giroscopio a tre assi" (dall'inglese "3-axis gyroscope"). Il segnale fornito da un giroscopio può essere modellizzato come segue:



$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_v + \vec{b} + \vec{\eta} \quad (2)$$

dove:

- $\vec{\omega}_v$ rappresenta la velocità angolare;
- \vec{b} rappresenta un bias, o offset, temperatura-dipendente. Il bias spesso non è noto, ma è possibile farne una stima per compensarlo;
- $\vec{\eta}$ rappresenta il vettore della componente di rumore, tipicamente proveniente dall'azione delle masse che vibrano. Spesso viene applicato un filtro passa basso per attenuare le tali componenti di rumore.;

Magnetometro

I magnetometri sono sensori che consentono di effettuare misurazioni dell'intensità e della direzione del campo magnetico circostante, espresso in μT . L'impiego di magnetometri negli IMU è fondamentale per costruire un sistema di coordinate che si basa sull'orientamento del dispositivo in relazione al sistema di riferimento terrestre. A causa della natura geodica del globo terrestre, la misura del suo campo magnetico dipende fortemente dalla latitudine e dalla longitudine del dispositivo. Esistono diverse tipologie di magnetometri, molti dei quali sfruttano le leggi dell'induzione magnetica per misurare una differenza di potenziale e ricavarne indirettamente l'intensità del campo magnetico per effetto di Lenz/Faraday. Anche in questo caso, nei sistemi IMU sono presenti tre magnetometri, in un singolo chip, in grado di misurare l'intensità del campo magnetico lungo i tre assi ortogonali x, y , e z .

Il segnale fornito da un magnetometro può essere modellizzato come segue:

$$\vec{B} = \vec{B}_t + \vec{\eta}_B \quad (3)$$

dove:

- \vec{B}_t rappresenta il campo magnetico misurato;
- $\vec{\eta}_B$ rappresenta le componenti di rumore;

Le sorgenti di rumore in un magnetometro possono essere suddivise in due categorie:

- Errori strumentali intrinseci, come ad esempio un disallineamento degli assi ortogonali, o presenza di diversi fattori di guadagno sui singoli assi a causa di una scarsa calibrazione;
- Distorsioni dovute alla presenza di materiali ferromagnetici nelle immediate vicinanze o, nel caso peggiore, direttamente nella struttura che contiene il magnetometro. A seconda della tipologia di materiale, si generano degli effetti chiamati, hard-iron o soft-iron, che interferiscono con il segnale;

3 Stima dell'orientamento

Sistema di coordinate

Per effettuare la stima dell'orientamento attraverso i sistemi IMU è necessario innanzitutto stabilire un sistema di coordinate opportuno. L'orientamento di un oggetto, infatti, consiste nella sua rotazione rispetto ad un sistema di riferimento fisso. Tali rotazioni possono essere espresse in diversi modi tra cui angoli di Eulero (pitch, roll e yaw), quaternioni o DCM (Direction Cosine Matrix). Nonostante le varie differenze, tutti questi metodi rappresentano una rotazione tridimensionale tra due sistemi di coordinate.

I sistemi di coordinate possono essere suddivisi come segue:

- Body frame b : rappresenta il sistema di riferimento dell'IMU. Le misure inerziali operano su questo frame;
- Inertial frame I : rappresenta il sistema di riferimento estrinseco, ovvero un frame fisso e spesso corrispondente a quello terrestre. Le misure inerziali del body frame sono valutate in rapporto a questo frame;

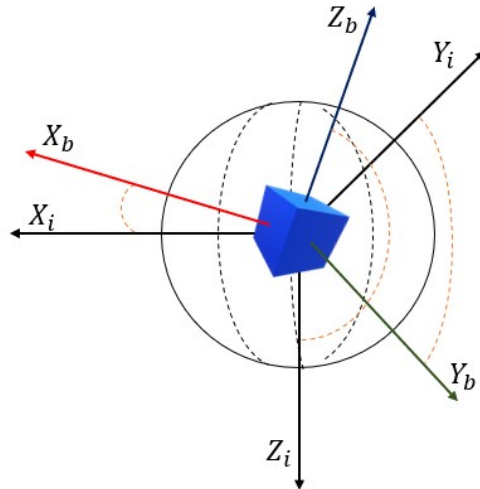


Figura 1: Illustrazione del sistema di coordinate sopra descritto. In dettaglio: body frame (in rosso, verde e blu) e inertial frame (in nero).

Dead reckoning

Quando si parla di stima dell'orientamento di un oggetto, le variabili di maggior importanza sono l'accelerazione, la velocità e la posizione. Una volta fissato il sistema di riferimento inerziale, conoscendo le variabili sopra elencate, è possibile determinare l'orientamento del dispositivo. Come già visto, i sistemi IMU comprendono sensori in grado di fornire dati relativi all'accelerazione e alla velocità angolare.

Dalle conoscenze della fisica cinematica, si conclude facilmente che l'integrazione della velocità angolare fornisce l'orientamento dell'oggetto.

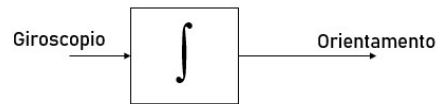


Figura 2: Illustrazione dell'algoritmo di dead reckoning

La semplice integrazione sul segnale di un giroscopio è affetta da diversi problemi: per poter determinare l'orientamento è necessaria la conoscenza della condizione iniziale, oltre che la presenza di un sistema di riferimento estrinseco (inertial frame) che non è possibile ottenere con la sola misura della velocità angolare; un'ulteriore limitazione è rappresentata proprio dall'operazione di integrazione: la presenza di bias e, in generale, di rumore, provoca una deriva della stima dell'orientamento. In figura (3) si può osservare come l'integrazione sul segnale grezzo proveniente da un giroscopio fermo porti alla deriva della stima dell'orientamento.

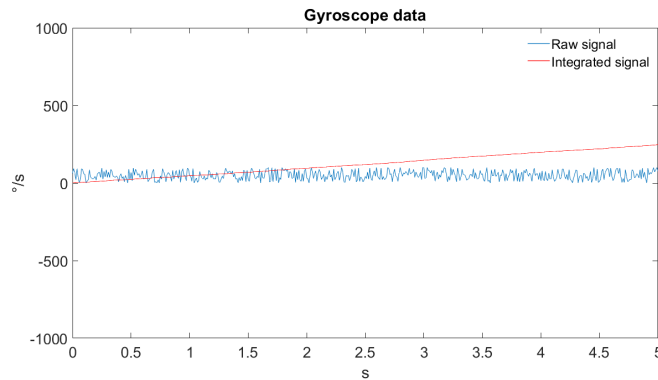


Figura 3: Fenomeno della deriva - per semplicità il dato rappresentato è solo sull'asse x. Segnale prelevato in condizioni statiche a 104 Hz

L'utilizzo del giroscopio come unica sorgente per stabilire l'orientamento non è la soluzione ottimale.

Altri metodi per la determinazione dell'orientamento sfruttano solo l'accelerometro e il magnetometro. L'idea di base consiste nel determinare l'inertial frame combinando le misure dei sensori e, con l'accelerometro, tracciare la variazione del vettore gravità sul riferimento inerziale in modo da ottenere la rappresentazione angolare. Chiamando \vec{B}_s la misura del campo magnetico lungo l'asse \vec{Z}_b del body frame e \vec{g} il vettore gravità possiamo ricavare l'inertial frame sfruttando i seguenti prodotti vettoriali:

$$\vec{Z}_i = -\vec{g} \quad (4)$$

$$\vec{Y}_i = \vec{Z}_i \times \vec{B}_s \quad (5)$$

$$\vec{X}_i = \vec{Y}_i \times \vec{Z}_i \quad (6)$$

A questo punto l'orientamento sarà determinato in base alla rotazione (spesso descritta tramite angoli di Eulero) del body frame rispetto al inertial frame. Le limitazioni dell'accelerometro e le varie interferenze presenti sul magnetometro non rendono sufficientemente affidabile questo metodo: sebbene nel lungo periodo l'accelerometro sia molto affidabile, nel breve periodo il vettore gravità può essere molto rumoroso e, quindi, determinare un inertial frame non corretto in fase di calibrazione. Come risultato finale si otterrebbe una buona stima dell'orientamento ma riferita a un inertial frame che non rispecchia la realtà.

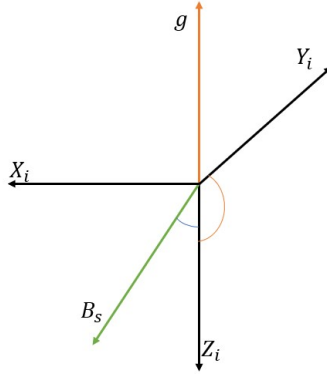


Figura 4: Determinazione inertial frame

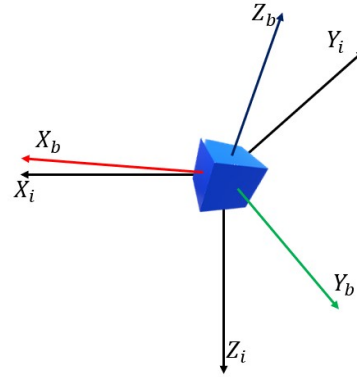


Figura 5: Rotazione del body frame rispetto all'inertial frame

4 Sensor fusion

Le metodologie fin'ora illustrate presentano problematiche troppo rilevanti per essere utilizzate. Tuttavia, è possibile limitare l'effetto delle limitazioni di ciascun sensore, combinandoli attraverso la tecnica della "sensor fusion". Con il termine "sensor fusion" si indica l'abilità di combinare i segnali provenienti da diversi sensori per formare un singolo modello in grado di compensare le limitazioni viste precedentemente.

Nell'ambito della sensor fusion esistono diversi approcci al problema della stima dell'orientamento. Tra questi, due sono i più utilizzati: il filtro complementare e il filtro di Kalman. In seguito, verrà trattato esclusivamente il primo metodo poiché il filtro di Kalman risulta molto complesso e richiederebbe un'introduzione algebrica e matematica ulteriore.

Filtro complementare

Il filtro complementare consiste nell'utilizzo di filtri passa basso e passa alto complementariamente. L'idea alla base è quella di combinare la stabilità dell'accelerometro nel lungo periodo e quella del giroscopio nel breve periodo: il segnale dell'accelerometro è filtrato con un filtro passa basso per limitare gli effetti delle vibrazioni; viceversa, il segnale del giroscopio, dopo essere stato integrato, viene filtrato con un passa alto per ridurre l'effetto di deriva nel lungo termine. I filtri qui presentati sono tutti del primo ordine, sebbene sia possibile utilizzare filtri di ordini superiori.

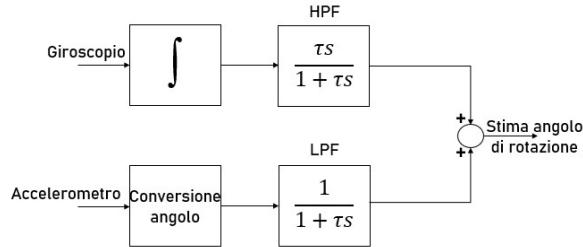


Figura 6: Schema generale del filtro complementare

Prima di poter procedere con l'algoritmo, è necessario effettuare una calibrazione per identificare il bias di accelerometro e giroscopio. Nella maggior parte dei casi questa calibrazione è effettuata mantenendo immobile il sensore per un breve periodo di tempo. I campioni raccolti vengono mediati e poi utilizzati per compensare l'effetto del bias. Una volta fatto questo, il segnale dell'accelerometro viene convertito in componenti angolari, roll (ϕ) e pitch θ , rispetto agli assi x e y dell'inertial frame.

$$\phi = \arctan\left(\frac{a_y}{\sqrt{a_x^2 + a_z^2}}\right) \quad (7)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{-a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}}\right) \quad (8)$$

Il solo accelerometro non è in grado di determinare la terza componente angolare $\psi(yaw)$. Per farlo si utilizza il dato proveniente dal giroscopio.

Il segnale proveniente dal giroscopio, invece, viene integrato in quanto, dalla fisica cinematica, la velocità angolare rappresenta la derivata dell'angolo di rotazione (in questo caso θ , ϕ e ψ). Per semplicità, considerando una sola componente rotazionale, ad esempio θ , si possono combinare gli elementi ottenendo un'unica stima, seguendo l'equazione:

$$\alpha = \lambda \cdot (\alpha_{prev} + \omega_{gyro} \cdot \Delta t) + (1 - \lambda) \cdot \theta_{acc} \quad (9)$$

dove:

- α è l'angolo risultante all'istante t ;
- α_{prev} è l'angolo risultante all'istante $t-1$;
- ω_{gyro} il segnale proveniente dal giroscopio
- Δt è il periodo di campionamento;
- θ_{acc} è l'angolo determinato dall'accelerometro (equazioni 7 e 8);
- λ è una variabile che dipende dalla costante di tempo τ del filtro secondo la relazione:

$$\lambda = \frac{\tau}{\tau + \Delta t} \quad (10)$$

Normalmente λ è pari a 0.98;

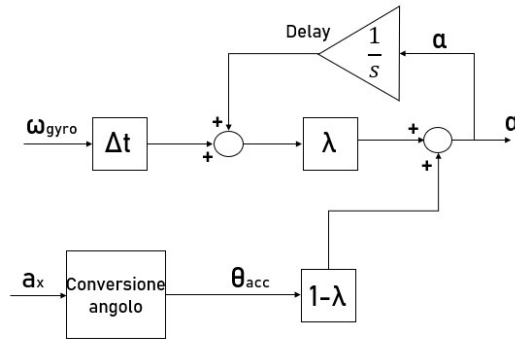


Figura 7: Schema dettagliato del filtro complementare

5 Implementazione su hardware

Per testare il funzionamento del filtro complementare è stato sviluppato un piccolo programma in grado di fornire dati sull'orientamento e rappresentarli graficamente su un box virtuale. Il modulo MPU-6050, con giroscopio e accelerometro, è montato su una breadboard e collegato opportunamente ad un Arduino Uno.

Lo script di Arduino gestisce la comunicazione con il modulo MPU-6050 tramite interfaccia I2C e gestisce la fase di elaborazione. Per prima cosa viene fatta un'operazione di calibrazione per rimuovere l'offset presente sul giroscopio. Successivamente, viene applicato il filtro complementare sul segnale ottenuto, ricavando gli angoli *roll*, *pitch* e *yaw*. Tali angoli vengono inviati via interfaccia seriale al PC. La frequenza di campionamento selezionata è 1kHz, la minima disponibile per il modulo in uso: non è necessario utilizzare frequenze più elevate in quanto richiedono capacità computazionali maggiori e si possono ottenere buoni risultati anche con frequenze minori.

Lo script di JavaScript, basato sulla libreria grafica p5.js, si occupa di rappresentare l'orientamento stimato in base ai dati ricevuti da Arduino. Una volta stabilita la comunicazione seriale via USB, viene disegnato un piccolo box che rappresenta l'orientamento della breadboard su cui è stato montato il modulo MPU-6050.

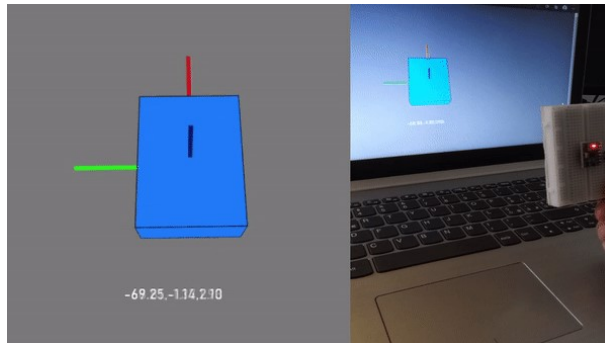


Figura 8: Immagine del risultato finale ottenuto

Nonostante la semplicità dell'approccio con filtro complementare, il risultato ottenuto è molto buono. Il box è responsivo e rispecchia fedelmente il reale orientamento della breadboard. La leggerezza del codice consente di poterlo utilizzare su dispositivi a microcontrollori che non offrono una capacità computazionale elevata.

La mancanza del magnetometro, però, determina dei problemi sulle rotazioni lungo l'asse z (*yaw*): non essendo possibile determinare un inertial frame, il box non ha dei riferimenti fissi su cui calcolare gli angoli di rotazione. Aggiungendo il magnetometro ed utilizzando lo stesso approccio, è possibile visualizzare correttamente anche le rotazioni sull'asse z .

6 Applicazione alla rilevazione di cadute

Nel corso dell'anno accademico, in gruppo con un collega del corso di laurea, è stato prodotto un dispositivo indossabile in grado di rilevare delle cadute attraverso una rete neurale implementata su SensorTile.Box, una scheda microcontrollore di STMicroelectronics.

La peculiarità di questo dispositivo sta nella semplicità di utilizzo: indipendentemente dall'orientamento esso è in grado di rilevare una caduta grazie all'estrazione di features opportune provenienti dai sensori inerziali. Sebbene i risultati ottenuti dalla valutazione del modello di intelligenza artificiale progettato siano molto buoni, in fase di test sono state notate delle fragilità.

Durante movimenti più o meno bruschi, come una discesa frettolosa dalle scale, il dispositivo spesso rileva una caduta, generando così un falso positivo. Questa condizione è pericolosa: nell'ottica di utilizzarlo per comunicare la caduta di un individuo a parenti e operatori sanitari, un falso positivo potrebbe allarmare molti laddove non c'è la reale necessità.

Per questo motivo, ai fini di garantire maggiore sicurezza e solidità, il dispositivo ha la necessità di avere un sistema di stima dell'orientamento che affianchi l'algoritmo di intelligenza artificiale.



L'idea alla base consiste nel confrontare in tempo reale gli output dell'algoritmo AI con la stima dell'orientamento, sfruttando un algoritmo di voting. Nel momento in cui viene rilevata una caduta ma l'individuo risulta essere "in piedi", è molto probabile che la caduta non sia realmente avvenuta e l'output verrebbe scartato. Viceversa, in seguito alla rilevazione di una caduta, se l'orientamento rilevato è assimilabile ad una posizione prona, supina o seduta, è plausibile pensare che la rilevazione sia corretta.

Non solo: attraverso il costante monitoraggio dell'orientamento è possibile controllare gli sviluppi della caduta e fornire un'immagine d'insieme dell'accaduto.

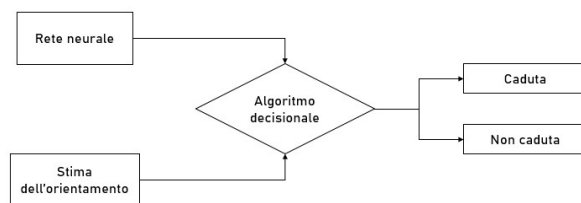


Figura 9: Diagramma di flusso del possibile sistema per la fall detection

7 Riferimenti

Di seguito è elencata la bibliografia utilizzata:

- [MIT Lecture on Orientation Estimation](#)
- [Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation](#)

Il codice sorgente è stato inserito nella seguente pagina [GitHub](#). Inizialmente si era pensato di utilizzare il `SensorTile.Box`, in quanto contiene anche il magnetometro, ma a causa della rottura della porta USB non è più stato possibile programmarlo. Per questo motivo, il sistema di riferimento su cui si basa è quello impostato nel canvas di JavaScript. Di conseguenza, le rotazioni sull'asse z non rispecchiano correttamente l'orientamento del dispositivo. Rimane possibile abilitarle togliendo il commento sulla linea specifica