

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

---

SCUOLA DI INGEGNERIA ED ARCHITETTURA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

SVILUPPO E VALIDAZIONE DI UN SOFTWARE PER  
IL CONTROLLO DI UN SISTEMA  
AUTOMATIZZATO PER LA CALIBRAZIONE DI  
SENSORI INERZIALI

Tesi di laurea in

Elaborazione di Dati e Segnali Biomedici M

Candidato:

DAVIDE DE TOMMASO

Relatore:

Prof. LORENZO CHIARI

Correlatori:

Ing. ELENA BORELLI

Ing. ALBERTO FERRARI

Sessione III

---

Anno Accademico 2015/2016



*Ai miei genitori,  
che mi hanno insegnato a guardare il  
cielo, con i piedi per terra.*



# Indice

Sommario.....	Pag. 7
Introduzione .....	Pag. 9
Cap.1 – Il Braccio Robotico ed I Sensori Inerziali .....	Pag. 13
1.1 Il Braccio Robotico.....	Pag. 13
1.2 Lo Stato dell’Arte.....	Pag. 15
1.4 Descrizione dell’Accelerometro .....	Pag.16
1.5 Descrizione del Giroscopio .....	Pag. 21
1.6 Modello dell’Errore di Navigazione .....	Pag. 25
1.7 Errori Deterministici dell’Accelerometro .....	Pag. 26
1.8 Errori Deterministici del Giroscopio .....	Pag. 29
Cap.2 – Controllo dei Motori .....	Pag. 33
2.1 Controllo dei Motori Mediante Motion Manager .....	Pag. 33
2.2 Macchina a stati per l’orientazione del sensore .....	Pag. 37
2.3 Comandi per gli Azionamenti X ed Y con Motion Manager .....	Pag. 39
2.4 Controllo dei Motori Mediante LabView .....	Pag. 41
2.4.1 Ambiente di Sviluppo LabView .....	Pag. 41
2.4.2 Macchina a stati in LabView .....	Pag. 43
2.4.3 Virtual Instruments realizzati in LabView .....	Pag. 46

Cap.3 – Calibrazione dei Sensori .....	Pag. 59
3.1 Sensori Impiegati .....	Pag. 59
3.1.1 Sensore Cometa WaveTrack .....	Pag. 59
3.1.2 Sensore EXLs3 .....	Pag. 61
3.1.2.1 MEMS a 9 Assi MPU – 9150 .....	Pag. 62
3.1.2.2 Microprocessore Cortex – M3 .....	Pag. 64
3.1.3 Smartphone Samsung S4 mini .....	Pag. 65
3.2 Test Condotti sui Sensori .....	Pag. 66
Cap. 4 - Risultati.....	Pag. 67
4.1 Risultati Ottenuti .....	Pag. 67
4.1.1 Risultati Sensori Cometa .....	Pag. 68
4.1.2 Risultati Sensori Cometa – Misure di Ripetibilità .....	Pag. 74
4.1.3 Risultati Sensori EXLs3 .....	Pag. 81
4.1.4 Risultati Smartphone Samsung S4 mini .....	Pag. 90
4.1.5 Risultati dei Confronti tra i Tre Sensori .....	Pag. 101
Conclusioni e Sviluppi Futuri .....	Pag. 103
Bibliografia .....	Pag. 105

# Sommario

Lo sviluppo tecnologico di sistemi micro-elettro-meccanici (MEMS) ha rivoluzionato l'industria della sensoristica inerziale, rendendo possibile la produzione di grandi quantità ad un costo contenuto e consentendo l'impiego di unità di misurazione inerziali (IMU) per il mercato di massa. Attualmente però questi dispositivi non raggiungono un livello di accuratezza nella misurazione comparabile con quelli di alta gamma; necessitano infatti di una minuziosa procedura di calibrazione per poter ottenere prestazioni migliori.

L'obiettivo di questa tesi è stato sviluppare un software per comandare un braccio robotico che consente e rende automatico il processo di calibrazione degli accelerometri e giroscopi di unità di misurazione inerziali (IMU). Sono stati inoltre sviluppati ed ottimizzati opportuni algoritmi di calibrazione che consentono di calcolare le relative matrici di calibrazione ed i vettori degli offset.

In *LabView*<sup>®</sup>, è stata implementata una macchina a stati che consente di disporre il sensore nelle posizioni facenti parte del 'Test Statico delle Sei Facce'. Con tale metodo, di volta in volta, viene allineato ciascun asse sensibile dell'IMU al vettore gravità e vengono acquisiti i segnali per un paio di minuti. Una volta acquisiti i dati l'algoritmo processa le informazioni e ricava la matrice di calibrazione per il fondoscala impostato.

Basandosi su queste misurazioni, i parametri ottimali per la caratterizzazione del modello d'errore del sensore sono stati calcolati utilizzando la stima ai minimi quadrati. La procedura è stata validata calibrando diverse tipologie di sensori e valutandone le prestazioni pre-calibrazioni e post-calibrazioni.

Il sistema presentato è stato impiegato, infatti, per la calibrazione di due famiglie di sensori, rispettivamente *Cometa Wavetrack* di *Cometa Systems*<sup>®</sup> ed *EXLs3* di *EXEL Microelectronics*<sup>®</sup> ed i sensori inerziali di cui è dotato lo smartphone *Samsung Galaxy S4 Mini*. Questo sistema, a seguito della realizzazione di una specifica maschera che consente di allocare correttamente il sensore inerziale sul braccio robotico, è quindi in grado di effettuare la calibrazione di diverse tipologie di IMU.



# Introduzione

Un'unità di misurazione inerziale (*IMU*) consiste in un insieme di sensori, tra i quali accelerometri e giroscopi che vengono impiegati per determinare il comportamento di un corpo. Molti sistemi fanno affidamento sulle IMU per la loro navigazione. Il termine navigazione è solitamente utilizzato per indicare l'insieme dei metodi e delle tecniche che consentono di determinare la traiettoria di un oggetto in moto in un sistema di riferimento predeterminato. In particolare, nella pratica comune, una IMU comprende un accelerometro un giroscopio ed un magnetometro triassiali affinché le velocità angolari e le accelerazioni lungo le tre le direzioni del sistema di riferimento possano essere misurate. L'impiego di queste tipologie di sensori nelle applicazioni civili è in gran parte dovuto allo sviluppo nei primi anni Novanta della tecnologia di costruzione delle fibre ottiche, che ha portato un miglioramento di circa un ordine di grandezza dell'accuratezza dei giroscopi ottici e dei sensori elettromeccanici MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*). Sfruttando le eccellenti proprietà fisiche del silicio è possibile infatti realizzare micro-sensori per la rilevazione di grandezze meccaniche che possono essere anche molto economici se prodotti su larga scala. A causa degli elevati errori sistematici ed accidentali, i sensori inerziali di tipo MEMS erano destinati inizialmente ad applicazioni di tipo mass-market, caratterizzate in genere da scarse precisioni. Tuttavia, solo nell'ultimo decennio, le accuratezze ottenibili con sensori di questo tipo hanno avuto un miglioramento di 3-4 ordini di grandezza grazie agli studi sugli effetti della geometria della struttura, della sua dimensione come pure a quelli sull'elettronica e l'assemblaggio. Lo sviluppo negli ultimi vent'anni di sensori di questo tipo ha permesso di superare molti aspetti che in passato avevano precluso l'utilizzo dei sensori inerziali in diverse applicazioni, riducendone sensibilmente la dimensione, i costi ed i consumi, ed aprendo un nuovo mercato di sviluppo.

Un sistema di navigazione inerziale integra dunque le misure di accelerazione e di velocità angolare per fornire una soluzione di navigazione. Errori sistematici residui, anche di piccola entità, comportano quindi errori nella stima degli stati di navigazione che aumentano con il trascorrere del tempo. A causa di questi errori, i sistemi inerziali, nelle versioni diffuse ed accessibili anche per l'utenza civile, non consentono ad oggi di ottenere una soluzione di navigazione autonoma per lunghi periodi di tempo, e per questo devono essere associati a strumenti di natura diversa che "assistano" la navigazione.

Un'unità di misura inerziale, come visto in precedenza, è composta da un insieme di sensori tali da consentire la stima di tutti gli stati della navigazione ad una elevata frequenza temporale. Trattandosi di sensori di natura elettro-meccanica, le misure effettuate risultano affette da errori di tipo accidentale e di tipo sistematico come bias di misura, fattori di scala o non ortogonalità delle terne di sensori.

I primi possono essere ridotti ripetendo più volte la misura ed in ogni caso sottoponendo i dati ad appositi algoritmi di filtraggio del segnale. Gli altri al contrario sono compensabili attraverso opportune procedure di calibrazione. Inoltre, il segnale in uscita da tali sensori è fortemente disturbato dalla presenza di un rumore ad altissima frequenza, che rende molto complesso il trattamento delle osservazioni grezze. In aggiunta, tali sensori sono nella maggior parte dei casi soggetti anche ad una incertezza *run-to-run*, in base alla quale alcuni errori di natura sistematica possono variare ad ogni accensione dello strumento, con un'incertezza che può essere fino a 10 volte maggiore rispetto all'entità del rumore di misura. Per sfruttare appieno le potenzialità di tali tipologie di sensori, è pertanto necessario valutare accuratamente il modello dell'errore per ciascun sensore e attuare le opportune procedure di calibrazione che consentano di compensare al meglio gli errori sistematici.

Lo scopo principale della calibrazione è quello di determinare i principali fattori che incidono sulla misura, in maniera da poter prevedere in maniera sufficientemente accurata il comportamento del sensore inerziale e di conseguenza le accuratezze raggiungibili durante l'utilizzo. Una volta determinati, questi errori possono essere parzialmente compensati in maniera da accrescere le prestazioni del sensore stesso. Per quanto concerne i sensori inerziali di medio-alto costo, tutte le procedure di calibrazione sono definite e normate dall'*Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* con una serie di documenti pubblicati nel corso degli anni. Non volendo ricorrere a tali procedure di calibrazione, complesse e costose, è possibile ricorrere a test molto più semplici, che non richiedono strumentazioni od ambienti appositi ma che consentono comunque di verificare la conformità del sensore alle accuratezze finali richieste, determinando i valori approssimati dei più importanti fattori incidenti. Questo gruppo di prove è costituito da test statici e test dinamici, che sfruttano la risposta che il sensore ha rispetto a grandezze fisiche note, come ad esempio l'accelerazione gravitazionale e la velocità di rotazione della Terra. A tale scopo, alcuni dei sensori inerziali di basso costo maggiormente diffusi sul mercato sono stati sottoposti alla procedura di calibrazione del "*test statico delle sei facce*" (*six position calibration test*) con l'obiettivo di ottenere una stima dei principali errori residui (bias, fattori di scala e di non ortogonalità degli

accelerometri e dei giroscopi). Tale test consiste nell' allineare di volta in volta ciascun asse del sensore inerziale al vettore gravità, acquisendo i dati per un paio di minuti.

L'obiettivo di questa tesi è sviluppare un software per semplificare e velocizzare il processo di calibrazione di sensori inerziali utilizzando un braccio robotico. L'obiettivo principale è riuscire a calibrare completamente la IMU senza nessuna manipolazione intermedia da parte dell'utente e dunque senza la necessità di dover riposizionare l'IMU durante il processo di calibrazione. Il sistema verrà poi validato calibrando diverse tipologie di sensori e confrontando le prestazioni pre-calibrazione e post-calibrazione.

Nel Capitolo 1 viene descritto il braccio robotico, con le sue tecnologie costruttive. Si passa poi alla trattazione dello stato dell'arte delle metodologie finora impiegate in questo ambito. Infine, viene brevemente descritto il principio di funzionamento dei sensori inerziali, in particolare l'accelerometro ed il giroscopio con i relativi modelli d'errore.

Nel Capitolo 2 viene esposta la parte relativa al controllo dei motori per la movimentazione del braccio robotico, sia graficamente con lo schema della macchina a stati realizzata, che in termini di software, con i codici sviluppati sia con *Motion Manager*<sup>®</sup> che con *LabView*<sup>®</sup>.

Nel Capitolo 3 vengono presentati i sensori utilizzati in questa tesi e le relative procedure di calibrazione che sono state condotte.

Nel Capitolo 4 vengono infine discussi i risultati ottenuti, sia mediante l'uso di tabelle che con grafici che mostrano il confronto tra la pre-calibrazione e la post-calibrazione ed una valutazione in termini di ripetibilità delle prestazioni del braccio robotico.

L'elaborato si conclude con le Conclusioni e gli Sviluppi Futuri.



# Capitolo 1

## Il Braccio Robotico ed I Sensori Inerziali

### 1.1 Il braccio robotico

Il sistema di calibrazione impiegato in questa tesi è stato sviluppato dall'*Personal Health System Laboratory* dell'Università di Bologna, in collaborazione con il Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale CIRI Scienze della Vita e Tecnologie della Salute (*CIRI SDV*). Questo dispositivo, è si basa su un sistema di *gimbal* motorizzati, con 3 gradi di libertà, uno per ogni asse. Su ogni *gimbal* è stato alloggiato un motore brushless DC con controllo motori integrato dell'azienda *Faulhaber*<sup>®</sup> ; in particolare si sono impiegati un motore 3268-BX4 per l'asse Z e due motori 2232-BX4 per gli assi X ed Y. Inoltre, su ogni asse, sono presenti dei riduttori per diminuire la velocità di rotazione al fine di renderla adatta all'applicazione. I riduttori impiegati hanno due differenti rapporti di riduzione, 161:1 per quelli fissati a valle dei motori X ed Y, e 14:1 per il riduttore montato in cascata al motore Z. Infine, su ogni asse è montato un inclinometro che viene utilizzato sul *gimbal* più interno per raggiungere accuratamente l'angolazione prevista, mentre sul *gimbal* esterno svolge la funzione di controllare che l'intero sistema sia allineato alla gravità. Il sistema realizzato è in grado di calibrare completamente una IMU senza ulteriori manipolazioni da parte dell'utente, ad esempio non vi è la necessità di riposizionare l'IMU manualmente durante il processo di calibrazione. Sul *gimbal* più interno è ospitata una maschera per l'alloggiamento del sensore da calibrare. I due *gimbal* più interni sono comandati da due azionamenti controllati in posizione e questo consente di allineare in modo accurato ciascun asse sensibile del sensore al vettore gravità che viene assunto come '*Gold standard*' per la calibrazione dell'accelerometro. Il loro range di movimento è di  $[-90^\circ ; +90^\circ]$  per l'asse X e  $[-90^\circ ; +180^\circ]$  per l'asse Y. Per quel che riguarda invece il *gimbal* più esterno è comandato da un azionamento controllato in velocità e consente di compiere infiniti giri attorno all'asse di rotazione. Questo consente di imporre una velocità di rotazione costante che verrà assunta come '*Gold Standard*' per la calibrazione del giroscopio.



Fig. 1.1 - Braccio Robotico impiegato in questa attività di tesi. Si possono scorgere i motori brushless, che comandano indipendentemente ciascun gimbal e la maschera per l'alloggiamento dei sensori inerziali.

## 1.2 Stato dell'arte

I dispositivi inerziali miniaturizzati che integrano accelerometri e giroscopi vengono sempre più utilizzati nelle scienze del movimento in cui le informazioni lineari ed angolari vengono ricavate da acquisizioni in grandi spazi ed in ambienti in cui risulta difficile l'installazione e la calibrazione di un sistema optoelettronico. Questi sensori elettronici sono stati sviluppati proprio per applicazioni "outdoor" e sono stati utilizzati per misure 3D del tronco, degli arti inferiori e superiori, per lo studio della postura, del cammino, sia per condizioni fisiche normali sia per diverse patologie (Chiari, 2005 ; Pfau, 2005 ; Boonstra, 2006 ; Plamondona, 2007 ; Coley, 2007 ; Veltink, 2007 ; Lau, 2008 ; Zijlstra, 2008). Alcuni ricercatori (Mayagoitia, 2002) hanno comparato i segnali cinematici estratti da questi dispositivi, per prove di cammino, con quelli acquisiti con sistemi optoelettronici. Gli errori riportati sono inferiori al 7% ed i coefficienti di correlazione multipla (CMC) (Kabada, 1989 ; Steinwender, 2000) sono molto alti (>0.98).

Per garantire che le misure siano sufficientemente accurate è opportuno calibrare periodicamente i sensori. Attualmente sono presenti sul mercato sistemi di calibrazione molto complessi e costosi indicati per dispositivi di altissima gamma utilizzati per lo più per la navigazione inerziale. Per quanto riguarda invece la calibrazione dei sensori MEMS non ci sono ancora soluzioni disponibili con ingombri e costi contenuti [1]. Sviluppi recenti hanno portato all'impiego di una piattaforma per telecamera pan-tilt nella ricerca di un possibile nuovo metodo per la calibrazione (Madgwick, 2011) [2]. Altri esempi di studio e concezione di piattaforme per il monitoraggio dell'attività di un corpo sono riscontrabili presso il *Virginia Tech Carpal Wrist*, il quale impiega il GPS per migliorarne il controllo [3]. Un vantaggio di queste piattaforme è la capacità di riprodurre un movimento lineare. Perciò, i risultati riscontrati fanno pensare alla possibilità di generare accelerazioni che arrivino anche a valori superiori ad 1g, che altrimenti potrebbero ottenersi solamente con sistemi che sfruttano accelerazioni centripete. Le piattaforme di calibrazione moderne usano attuatori lineari che non sono molto comuni, molte piattaforme sfruttano un sistema di *gimbal* basato su attuatori rotanti oppure basati su pannelli rotanti (Siegwart, 2013). In questi casi, il numero di gradi di libertà del sistema varia da uno a tre. Queste piattaforme sfruttano la gravità per calibrare gli accelerometri, pertanto si avvicinano alla tecnica impiegata in questo lavoro, se non che, rispetto al caso riportato in questo elaborato, non vi è la possibilità di calibrare IMU di dimensioni differenti sfruttando la duttilità della piattaforma. Un approccio totalmente differente è quello di non utilizzare una piattaforma meccanica, ma l'IMU è mossa manualmente, ad esempio sfruttando un

poliedro geometrico (Nillson, 2014) [4]. I movimenti vengono tracciati mediante un sistema di telecamere con l'aiuto di alcuni LED posizionati sulla IMU. Ottenute le informazioni riguardanti la cinematica e le equazioni del modello d'errore, i parametri di calibrazione sono calcolati utilizzando un algoritmo non lineare per la stima ai minimi quadrati [5].

## 1.4 Descrizione dell'accelerometro

Il principio di funzionamento dell'**accelerometro** si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione. La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un sensore di posizione ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa, che è dotata di una propria inerzia, si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile dai sistemi di misura. A riposo, con un asse sensibile rivolto verso il basso, sulla superficie terrestre un accelerometro misura circa 1 g, a causa dell'accelerazione gravitazionale data dalla massa della Terra. Di questa bisogna necessariamente tenere conto durante le misure. Esistono diversi tipi di accelerometri in commercio, piezoelettrici, piezoresistivi, per convezione di calore, ecc.. Tra le diverse tecnologie, stanno avendo un buon successo gli accelerometri MEMS di tipo capacitivo, realizzati in Silicio tramite microlavorazione. Gli accelerometri permettono di misurare l'accelerazione del segmento o della zona corporea cui sono connessi. Essi sono utilizzati per monitorare un range di movimenti differenti (cammino, spostamenti sit-to-stand, oscillazioni posturali, ecc.), per misurare livelli di attività fisica, per determinare il consumo energetico connesso al movimento, per identificare e classificare i movimenti compiuti dai soggetti. Entrando nel dettaglio, il dispositivo utilizzato sulla IMU impiegata in questo lavoro, è un accelerometro triassiale, schematizzato come in figura.

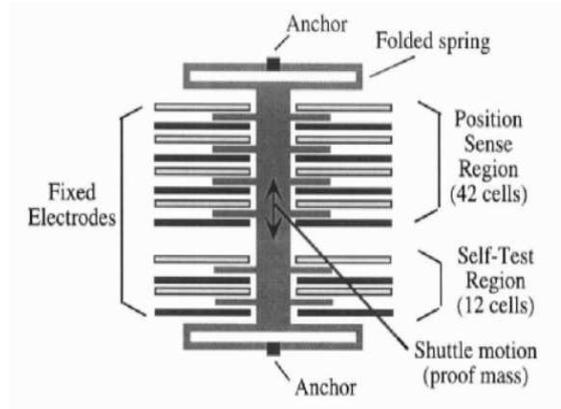


Fig. 1.2 – Schematizzazione della geometria interna di un accelerometro triassiale.

I tre assi sensibili sono tutti perpendicolari tra loro e, l'asse  $z$  è rivolto verso l'alto in modo da misurare  $1g$  in posizione stazionaria e perpendicolare al piano di terra. E' possibile utilizzare l'accelerometro con due modalità principali: misura dell'accelerazione inerziale (in caso  $\mathbf{a} \gg \mathbf{g}$ ) o misura dell'inclinazione del corpo (casi quasi-statici,  $\mathbf{a} \ll \mathbf{g}$ ). Nel primo caso avremo un'accelerazione che sarà sempre da sommare al vettore di gravità  $g$ .

Nella figura sottostante possiamo vedere il caso.

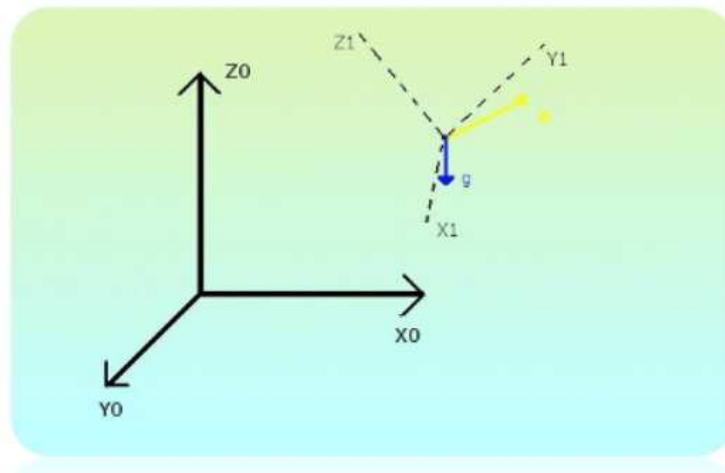


Fig. 1.3 - Sistemi di riferimento, assoluto e relativo, per il calcolo matematico dell'accelerazione subita da un sensore accelerometrico .

Con  $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0\mathbf{z}_0$  indichiamo il riferimento assoluto, mentre  $\mathbf{x}_1\mathbf{y}_1\mathbf{z}_1$  indica quello relativo al corpo. Il vettore di accelerazione inerziale  $\mathbf{a}$  viene sommato a  $\mathbf{g}$ . Stabilendo il verso di  $\mathbf{z}_0$  come positivo  $g$  risulterà negativo, portando quindi ad un'accelerazione totale di  $\mathbf{a} - \mathbf{g}$ . Per un accelerometro monoassiale questo equivale a misurare:

$$V = S \cdot \hat{\mathbf{n}}_1^T \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{g})_1 + O$$

Dove  $\mathbf{S}$  è la sensibilità dell'accelerometro,  $\mathbf{O}$  il valore di offset ed  $\mathbf{n}_1^T$  il versore che indica l'asse sensibile dell'accelerometro nel riferimento inerziale.

Passando al riferimento assoluto invece, dovremo considerare la rotazione effettuata per passare da un riferimento all'altro. Utilizzando le matrici di rotazione moltiplichiamo il vettore di accelerazione inerziale per la matrice di rotazione  ${}^1\mathbf{R}_0$  ovvero quella matrice che consente di allineare il sistema di riferimento assoluto a quello relativo:

$$V = S \cdot \hat{\mathbf{n}}_1^T \cdot {}^1\mathbf{R}_0 \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{g})_0 + O$$

A questo punto possiamo vedere come cambiano le equazioni per un accelerometro triassiale:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_i \\ V_j \\ V_k \end{pmatrix}_{(3 \times 1)} &= \begin{pmatrix} S_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T \\ S_j \cdot \hat{\mathbf{n}}_j^T \\ S_k \cdot \hat{\mathbf{n}}_k^T \end{pmatrix}_{(3 \times 3)} \cdot {}^1\mathbf{R}_{0(3 \times 3)} \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{g})_{0(3 \times 1)} + \begin{pmatrix} O_i \\ O_j \\ O_k \end{pmatrix}_{(3 \times 1)} \\ &= \begin{bmatrix} S_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T & O_i \\ S_j \cdot \hat{\mathbf{n}}_j^T & O_j \\ S_k \cdot \hat{\mathbf{n}}_k^T & O_k \end{bmatrix}_{(3 \times 4)} \cdot \begin{bmatrix} {}^1\mathbf{R}_0 \cdot (\mathbf{a} - \mathbf{g})_0 \\ 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 1)} \end{aligned}$$

Ovviamente il discorso può estendersi ad un qualunque numero di accelerometri, per ognuno avremo un'equazione da aggiungere al sistema. I versori  $\mathbf{n}$  contengono le direzioni degli assi sensibili nel riferimento relativo, che, se sono orientati come  $\mathbf{x}_0\mathbf{y}_0\mathbf{z}_0$  corrispondono a quelli del riferimento assoluto:

$$\begin{aligned} n_i = n_x &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ n_j = n_y &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ n_k = n_z &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Questo ci permette di scrivere:

$$\begin{pmatrix} V_i \\ V_j \\ V_k \end{pmatrix}_{(3 \times 1)} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & O_x \\ 0 & S_y & 0 & O_y \\ 0 & 0 & S_z & O_z \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} {}^1\alpha_x \\ {}^1\alpha_y \\ {}^1\alpha_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_x \cdot {}^1\alpha_x + O_x \\ S_y \cdot {}^1\alpha_y + O_y \\ S_z \cdot {}^1\alpha_z + O_z \end{bmatrix}$$

Dove  ${}^1\alpha_x$ ,  ${}^1\alpha_y$  e  ${}^1\alpha_z$  sono rispettivamente le componenti dell'accelerazione totale (composizione dei vettori  $\mathbf{a}$  e  $\mathbf{g}$ ) nel riferimento inerziale. Nel caso quasi-statico l'accelerometro può essere impiegato come inclinometro. Come detto, affinché sia valido questo procedimento, il vettore di accelerazione inerziale  $\mathbf{a}$  deve essere trascurabile rispetto a quello di gravità  $\mathbf{g}$ . Conoscendo il valore dell'accelerazione a cui è sottoposto il sensore, possiamo risalire alla matrice di rotazione  ${}^1\mathbf{R}_0$ . Per un singolo asse l'accelerometro è in grado di misurare l'accelerazione lungo il suo asse sensibile S, permettendo di conoscere l'angolo di inclinazione rispetto all'asse di riferimento, mediante la conoscenza di  $\mathbf{g}$ . Con questo sistema, con un accelerometro triassiale, è facile conoscere le rotazioni rispetto all'asse x e y, mentre risulta impossibile, pur utilizzando un più alto numero di accelerometri, conoscere la rotazione attorno a z: Questo si comprende anche intuitivamente pensando al fatto che ruotando l'accelerometro perpendicolarmente rispetto all'accelerazione, la proiezione di questa sull'asse sensibile rimane comunque costante. Può essere dimostrato anche matematicamente: Applichiamo due rotazioni, una attorno all'asse x e una attorno a y. Questo corrisponde ad una matrice di rotazione composta moltiplicando le due matrici di rotazione:

$$\begin{aligned} {}^1\mathbf{R}_0 &= \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{pmatrix} \\ {}^2\mathbf{R}_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \\ {}^2\mathbf{R}_0 = {}^2\mathbf{R}_1 {}^1\mathbf{R}_0 &= \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ -\sin\varphi\sin\theta & \cos\theta & \cos\varphi\sin\theta \\ -\sin\varphi\cos\theta & -\sin\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

E moltiplicando quest'ultima matrice per il vettore  $\mathbf{g}$  si ottiene:

$$\mathbf{g}_2 = {}^2\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{g} = \begin{pmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ -\sin\varphi\sin\theta & \cos\theta & \cos\varphi\sin\theta \\ -\sin\varphi\cos\theta & -\sin\theta & \cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -g\sin\varphi \\ -g\cos\varphi\sin\theta \\ -g\cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix}$$

Se i tre assi sensibili sono congruenti alla terna iniziale possiamo ottenere una misura di questo vettore:

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & O_x \\ 0 & S_y & 0 & O_y \\ 0 & 0 & S_z & O_z \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x \cdot (-g\sin\varphi) + O_x \\ S_y \cdot (-g\cos\varphi\sin\theta) + O_y \\ S_z \cdot (-g\cos\varphi\cos\theta) + O_z \end{pmatrix}$$

Ed infine ottenere gli angoli di rotazione:

$$\varphi = \arcsin\left(-\frac{\alpha_x}{g}\right) = \arcsin\left(\frac{O_x - V_x}{g \cdot S_x}\right)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\alpha_y}{\alpha_z}\right) = \arctan\left(\frac{S_z(V_y - O_y)}{S_y(V_z - O_z)}\right)$$

Dove  $\varphi$  e  $\theta$  sono rispettivamente gli angoli di rotazione attorno ad x ed y.

Vediamo cosa succede applicando una rotazione lungo l'asse z. Il vettore  $\mathbf{g}$  diventa:

$$\mathbf{g}_3 = {}^3\mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{g}_2 = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -g\sin\varphi \\ -g\cos\varphi\sin\theta \\ -g\cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -g\sin\varphi\cos\gamma - g\cos\varphi\sin\theta\sin\gamma \\ g\sin\varphi\sin\gamma - g\cos\varphi\sin\theta\cos\gamma \\ -g\cos\varphi\cos\theta \end{pmatrix}$$

Il sistema è però indeterminato e non permette quindi di calcolare l'angolo  $\gamma$ .

Non è quindi possibile trovare i 6 gradi di libertà richiesti per la descrizione del moto del corpo rigido con l'acquisizione del solo accelerometro, ma è fondamentale l'impiego del giroscopio. Risulta pertanto fondamentale la *sensor fusion*, ossia la combinazione di più sensori che portano ad un'acquisizione completa e validante del sistema che si intende analizzare.

## 1.5 Descrizione del giroscopio

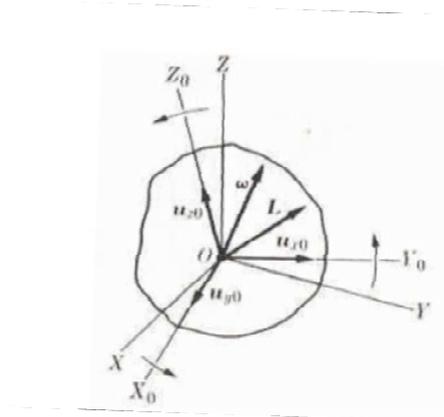
Il **giroscopio** in generale è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa. Il momento angolare totale è la somma dei singoli momenti angolari che, di norma, non sono paralleli all'asse di rotazione: Di conseguenza in generale anche il momento angolare totale non è parallelo all'asse di rotazione. Qualsiasi sia la forma del corpo è possibile trovare minimo tre direzioni fra di loro perpendicolari tali che, se il corpo ruota attorno a quell'asse, il momento angolare totale risulti parallelo all'asse di rotazione. Essi sono chiamati assi principali di inerzia ed i corrispondenti momenti di inerzia sono detti momenti principali di inerzia. Gli assi principali di inerzia costituiscono un sistema di riferimento solidale col corpo ed, in generale, ruotano rispetto all'osservatore. Quando il corpo ha un qualche tipo di simmetria, gli assi principali di inerzia coincidono con questi assi di simmetria. Quando un corpo ruota attorno ad un asse principale di inerzia, il momento angolare totale è parallelo alla velocità angolare e si può scrivere la relazione vettoriale:

$$\mathbf{L} = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$$

Nel caso più generale di rotazione del corpo rigido attorno ad un asse qualsiasi, il momento angolare totale può essere espresso rispetto agli assi principali di inerzia come:

$$\mathbf{L} = I_1\omega_{x0}\mathbf{u}_{x0} + I_2\omega_{y0}\mathbf{u}_{y0} + I_3\omega_{z0}\mathbf{u}_{z0}$$

Dove  $\mathbf{u}_{x0}$ ,  $\mathbf{u}_{y0}$  e  $\mathbf{u}_{z0}$  sono i tre versori degli assi principali d'inerzia e  $\omega_{x0}$ ,  $\omega_{y0}$  e  $\omega_{z0}$  sono le corrispondenti componenti della velocità angolare.  $\mathbf{L}$  e  $\boldsymbol{\omega}$  hanno direzioni diverse, ma usando questa espressione,  $I_1$ ,  $I_2$  ed  $I_3$  sono quantità fisse (essendo riferite agli assi principali d'inerzia) che possono essere valutate per ogni corpo. I versori  $\mathbf{u}_{x0}$ ,  $\mathbf{u}_{y0}$  e  $\mathbf{u}_{z0}$  non sono fissi nello spazio, ma ruotano con il corpo stesso, essendo ad esso solidali. Come esempio si osserva il caso in figura e si nota come abbia luogo il vettore momento angolare: il corpo ruota attorno all'asse di rotazione con velocità angolare  $\omega$ , scomponibile rispetto alle tre direzioni  $\mathbf{u}_{x0}$ ,  $\mathbf{u}_{y0}$  e  $\mathbf{u}_{z0}$  che caratterizzano gli assi principali d'inerzia.



Il vettore momento angolare nasce dalla somma vettoriale delle tre componenti  $\mathbf{I}_1\omega_{x0}\mathbf{u}_{x0} + \mathbf{I}_2\omega_{y0}\mathbf{u}_{y0} + \mathbf{I}_3\omega_{z0}\mathbf{u}_{z0}$ , non coincide con il vettore  $\boldsymbol{\omega}$  e varia come direzione nello spazio durante la rotazione del corpo, non essendo i tre versori degli assi principali d'inerzia fissi nello spazio. Se il modulo del momento angolare rimane costante, si ha comunque una variazione del momento angolare, riconducibile all'azione di un momento della forza, legata alla variazione della direzione del momento angolare stesso.

Entrando nello specifico nella pratica è importante conoscere a cosa corrisponde il segnale rilevato dal sensore. Il giroscopio rileva in generale una tensione secondo l'equazione:

$$V = S \cdot (\hat{\mathbf{n}}^T \boldsymbol{\omega}) + O$$

Dove  $S$  è la sensibilità del giroscopio,  $O$  il valore di offset,  $\mathbf{n}^T$  il versore che ne individua l'asse sensibile e  $\boldsymbol{\omega}$  il vettore delle rotazioni attorno ai tre assi  $\mathbf{x}_0$ ,  $\mathbf{y}_0$  e  $\mathbf{z}_0$  del riferimento assoluto.

Definendo  $z$  l'asse sensibile di rotazione:

$$V = S \cdot (n_x \quad n_y \quad n_z) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{pmatrix} + O = S \cdot n_z \cdot \omega_z + O$$

La tensione, se l'asse del giroscopio è allineato con l'asse  $\mathbf{z}_0$ , si riduce a:

$$V = S \cdot \omega_z + O$$

Conoscendo il segnale misurato dal giroscopio è a questo punto possibile calcolare l'angolo integrando la velocità angolare:

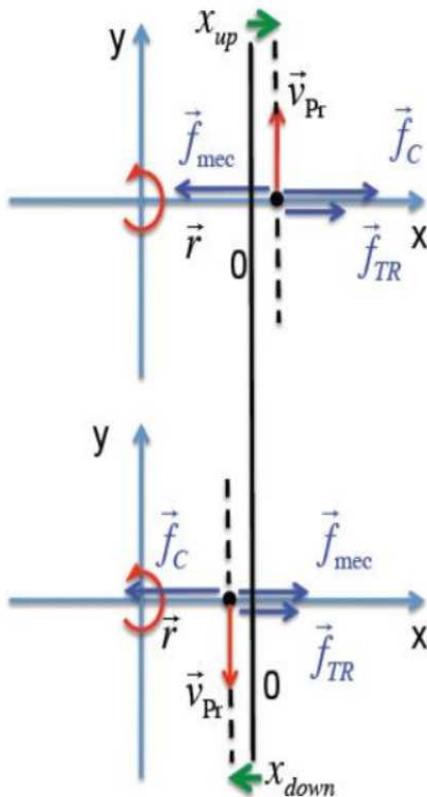
$$\theta_z = \int_{t_1}^{t_2} \omega_z dt$$

Con  $t_1$  e  $t_2$  gli istanti di inizio e fine acquisizione. Sostituendo, quest'ultima diviene:

$$\theta_z = \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{V - O}{S} \right) dt = \frac{1}{S} \int_{t_1}^{t_2} (V - O) dt$$

Un'osservazione da fare è che questo procedimento, a causa della presenza di un'integrazione, è soggetto al fenomeno della deriva. La presenza di rumore od altre interferenze (ad esempio la stessa presenza della vibrazione primaria) comporta l'integrazione del rumore stesso. Il valore dell'integrale e quindi dell'angolo stimato, risulterà incorretto. E' possibile applicare un filtro al fine di evitare parte di questo problema, che però non è totalmente eliminabile e richiede pertanto ulteriori algoritmi di correzione, ad esempio l'uso di un accelerometro come inclinometro che corregga in parte l'errore.

In genere, il giroscopio viene utilizzato accoppiato con gli accelerometri per determinare i pattern motori. In alcuni protocolli viene però utilizzato anche singolarmente per ricavare i diversi parametri del cammino (stride length, walking velocity, ecc.). Esistono diversi principi di funzionamento; i più comuni sono meccanici, ottici ad anello laser od elettromeccanici. Nell'ambito dell'analisi del movimento vengono generalmente sfruttati giroscopi elettromeccanici MEMS che sfruttano la legge di Coriolis, ossia l'interazione fra moti circolari e lineari. Misurando gli effetti di tale forza su un corpo in oscillazione si possono dedurre le caratteristiche di rotazione.



Idealmente il dispositivo funziona come schematizzato nella figura accanto: Nel momento in cui una rotazione viene applicata si genera una vibrazione (espressa in figura da  $V_{Pr}$ ), la quale sviluppa una forza di Coriolis, ortogonale all'asse di rotazione ed alla vibrazione principale, che sposta dal centro una massa, provocando una seconda vibrazione proporzionale alla rotazione applicata. In particolare la forza applicata segue la relazione:

$$\vec{F} = -2m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}_{pr}$$

Con  $m$  massa del sensore,  $\omega$  velocità angolare agente.

Fig. 1.4 – Schema di un giroscopio monoassiale.

Una IMU comprende un insieme di almeno tre accelerometri e tre giroscopi. Questo permette di misurare tutti e sei i gradi di libertà, tre traslazioni e tre rotazioni, di un movimento arbitrario nello spazio euclideo 3D. Tipicamente, una IMU è composta da ulteriori sensori addizionali, per migliorare l'accuratezza della misurazione attraverso la *sensor fusion*. Tali sensori possono essere di temperatura, di pressione o magnetometri. Questi ultimi, sono presenti nelle due IMU, *Cometa WaveTrack* ed *EXLs3*, e nello smartphone *Samsung S4 mini*, oggetto dell'analisi di calibrazione della tesi.

## 1.6 Modello dell'errore di navigazione

Per ricavare le evoluzioni in assetto velocità e posizione, degli errori di misura, si utilizzeranno le seguenti equazioni:

$$\begin{bmatrix} \delta f_x^b \\ \delta f_y^b \\ \delta f_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ax} \\ B_{ay} \\ B_{az} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} SF_{ax} & MIS_{axy} & MIS_{axz} \\ MIS_{ayx} & SF_{ay} & MIS_{ayz} \\ MIS_{azx} & MIS_{azy} & SF_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{ax} \\ W_{ay} \\ W_{az} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^b \\ \varepsilon_y^b \\ \varepsilon_z^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{gx} \\ B_{gy} \\ B_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} SF_{gx} & MIS_{gxy} & MIS_{gxx} \\ MIS_{gyx} & SF_{gy} & MIS_{gyz} \\ MIS_{gzx} & MIS_{gzy} & SF_{gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{i/b_x}^b \\ \omega_{i/b_y}^b \\ \omega_{i/b_z}^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{gx} \\ W_{gy} \\ W_{gz} \end{bmatrix}$$

Le equazioni precedenti, possono essere scomposte in tre termini principali lineari:

- **B** vettore delle componenti di bias di accelerometro (**B<sub>a</sub>**) e giroscopio (**B<sub>g</sub>**);
- Termine moltiplicativo composto da scale factor (**SF<sub>a</sub>** ed **SF<sub>g</sub>**) e misalignment (**MIS<sub>a</sub>** e **MIS<sub>g</sub>**);
- **W** vettore delle componenti di white noise di accelerometro (**W<sub>a</sub>**) e giroscopio (**W<sub>g</sub>**).

E' possibile quindi studiare gli effetti dei singoli elementi separatamente per poi sommarne i contributi secondo il principio di sovrapposizione degli effetti. Tutti gli errori verranno espressi dimensionalmente secondo il Sistema Internazionale (SI).

## 1.7 Errori deterministici dell'accelerometro

Il sistema di equazioni a cui si fa riferimento è il seguente:

$$\begin{cases} \delta \dot{v}_x^n = \delta F_x^n \\ \delta \dot{v}_y^n = \delta F_y^n \\ \delta \dot{v}_z^n = \delta F_z^n \end{cases}$$

Si richiama l'attenzione sul fatto che la matrice di trasformazione sia identica ed esatta.

**Bias Instability**     $\delta \mathbf{F}^b = \mathbf{B}_a$

L'equazione dell'errore risulta quindi:

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{B}_a = \mathbf{I}_3 \mathbf{B}_a$$

La corruzione sulla velocità (dimensionalmente in  $m/s$ ) deriva dall'integrale della precedente:

$$\delta \mathbf{v}^n(t) = \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = \int \mathbf{B}_a d\tau = \mathbf{B}_a t$$

Da cui si ottiene la corruzione in posizione (dimensionalmente in  $m$ ) :

$$\delta \mathbf{p}^n(t) = \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \int \mathbf{B}_a t d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{B}_a t^2$$

Nel caso di calibrazione, l'equazione rimane la medesima. Dimensionalmente il Bias si indica in  $m/s^2$ .

**Scale Factor**  $\delta \mathbf{F}^b = \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^b$

Con  $\mathbf{S} \mathbf{F}_a$  si intende:

$$\mathbf{S} \mathbf{F}_a = \begin{bmatrix} SF_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & SF_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & SF_{az} \end{bmatrix}$$

L'equazione dell'errore risulta quindi:

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = C_b^n \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^b = I_3 \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^b$$

La corruzione sulla velocità (dimensionalmente in  $m/s$ ) risulta:

$$\delta \mathbf{v}^n = \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = \int \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^n d\tau = \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^n t$$

Per la posizione (dimensionalmente in  $m$ ) si ha:

$$\delta \mathbf{p}^n = \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \int \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^n t d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{S} \mathbf{F}_a \mathbf{F}^n t^2$$

Nel caso di calibrazione:

$$\mathbf{F}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g^n \end{bmatrix}$$

Dimensionalmente, lo Scale Factor è adimensionale.

**Axis Misalignment**  $\delta \mathbf{F}^b = \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^b$

Con  $\mathbf{MIS}_a$  si intende:

$$\mathbf{MIS}_a = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{MIS}_{axy} & \mathbf{MIS}_{axz} \\ \mathbf{MIS}_{ayx} & 0 & \mathbf{MIS}_{ayz} \\ \mathbf{MIS}_{azx} & \mathbf{MIS}_{azy} & 0 \end{bmatrix}$$

L'equazione dell'errore risulta:

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^b = \mathbf{I}_3 \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^b$$

Da cui la corruzione sulla velocità (dimensionalmente in  $m/s$ ):

$$\delta \mathbf{v}^n(t) = \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = \int \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^n d\tau = \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^n t$$

La posizione (dimensionalmente in  $m$ ):

$$\delta \mathbf{p}^n(t) = \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \int \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^n t d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{MIS}_a \mathbf{F}^n t^2$$

Nel caso di calibrazione:

$$\mathbf{F}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g^n \end{bmatrix}$$

Dimensionalmente, l'Axis Misalignment è una variazione angolare misurata in radianti.

## 1.7 Errori deterministici del giroscopio

Il sistema di equazioni a cui si fa riferimento è il seguente:

$$\begin{cases} \delta \dot{v}_x^n = \ddot{X}_y^n \phi_z - \ddot{X}_z^n \phi_y + g_z^n \phi_y - \delta F_z^n \phi_y + \delta F_y^n \phi_z \\ \delta \dot{v}_y^n = -\ddot{X}_x^n \phi_z + \ddot{X}_z^n \phi_x - g_z^n \phi_x - \delta F_x^n \phi_z + \delta F_z^n \phi_x \\ \delta \dot{v}_z^n = \ddot{X}_x^n \phi_y - \ddot{X}_y^n \phi_x - \delta F_y^n \phi_x + \delta F_x^n \phi_z \\ \dot{\phi}_x = -\epsilon_x^n \\ \dot{\phi}_y = -\epsilon_y^n \\ \dot{\phi}_z = -\epsilon_z^n \end{cases}$$

**Bias Instability**  $\epsilon^b = \mathbf{B}_g$

Il vettore di assetto risulta pertanto:

$$\phi(t) = \int -\mathbf{B}_g d\tau = -\mathbf{B}_g t$$

L'equazione d'errore:

$$\delta \dot{v}^n = C_b^n \mathbf{F}^b \times \phi + \delta \mathbf{F}^n \times \phi = \begin{bmatrix} -B_z (F_y^n + \delta F_y^n) t + B_y (F_z^n + \delta F_z^n) t \\ B_z (F_x^n + \delta F_x^n) t - B_x (F_z^n + \delta F_z^n) t \\ -B_y (F_x^n + \delta F_x^n) t + B_x (F_y^n + \delta F_y^n) t \end{bmatrix}$$

Nel caso in cui il Bias sui tre giroscopi sia lo stesso, è possibile considerare questa corruzione come una grandezza scalare:

$$\delta \dot{v}^n = B_g \mathbf{F}^n t$$

Dove con  $\mathbf{F}^n$  è indicato il vettore di accelerazione derivato dal prodotto vettore:

$$\mathbf{F}^n = \begin{bmatrix} -(F_y^n + \delta F_y^n) + (F_z^n + \delta F_z^n) \\ (F_x^n + \delta F_x^n) - (F_z^n + \delta F_z^n) \\ -(F_x^n + \delta F_x^n) + (F_y^n + \delta F_y^n) \end{bmatrix}.$$

La corruzione su velocità (dimensionalmente in  $m/s$ ) e posizione (dimensionalmente in  $m$ ) risulta quindi:

$$\delta \mathbf{v}^n = \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{B}_g \mathbf{F}^n t^2$$

$$\delta \mathbf{p}^n = \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \frac{1}{6} \mathbf{B}_g \mathbf{F}^n t^3$$

Nel caso di calibrazione: 
$$\mathbf{F}^n = \begin{bmatrix} -(g^n + \delta g^n) \\ (g^n + \delta g^n) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dimensionalmente il Bias è espresso in *rad/s*.

**Scale Factor**  $\boldsymbol{\varepsilon}^b = \mathbf{S} \mathbf{F}_g \boldsymbol{\omega}_{i/b}^b$

Dove:

$$\mathbf{S} \mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} SF_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & SF_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & SF_{gz} \end{bmatrix}$$

Si ottiene:

$$\boldsymbol{\phi}(t) = \int -\mathbf{S} \mathbf{F}_g \boldsymbol{\omega}_{i/b}^b d\tau = -\mathbf{S} \mathbf{F}_g \int \boldsymbol{\omega}_{i/b}^b d\tau = -\mathbf{S} \mathbf{F}_g \delta \mathbf{H}(t)$$

Dove con  $\mathbf{S} \mathbf{F}_g$  si è indicata la matrice di Scale Factor e con  $\delta \mathbf{H}(t)$ :

$$\delta \mathbf{H}(t) = \int \boldsymbol{\omega}_{i/b}^b d\tau$$

D'ora in avanti la dipendenza dal tempo verrà omessa per semplicità di notazione.

Fisicamente questa grandezza non ha significato ma fornisce una stima della variazione di rotta che è stata effettuata. Nel caso in cui lo Scale Factor sui tre giroscopi sia lo stesso, è possibile considerare questa corruzione come una grandezza scalare:

$$\begin{aligned}
 \delta \dot{\mathbf{v}}^n &= C_b^n \mathbf{F}^b \times \boldsymbol{\phi} + \delta \mathbf{F}^n \times \boldsymbol{\phi} \\
 &= SF_g \begin{bmatrix} -\delta H_z (F_y^n + \delta F_y^n) + \delta H_y (F_z^n + \delta F_z^n) \\ \delta H_z (F_x^n + \delta F_x^n) - \delta H_x (F_z^n + \delta F_z^n) \\ -\delta H_y (F_x^n + \delta F_x^n) + \delta H_x (F_y^n + \delta F_y^n) \end{bmatrix} \\
 &= SF_g \delta \mathbf{H} \mathbf{F}^n
 \end{aligned}$$

Dove con  $\delta \mathbf{H} \mathbf{F}^n$  è indicato il vettore di accelerazione derivato dal prodotto vettore. Dall'integrale della precedente si ottiene la corruzione su velocità (dimensionalmente in m/s):

$$\delta \mathbf{v}^n = \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = SF_g \delta \mathbf{H} \mathbf{F}^n t$$

Mentre la posizione (dimensionalmente in metri):

$$\delta \mathbf{p}^n = \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \frac{1}{2} SF_g \delta \mathbf{H} \mathbf{F}^n t^2$$

E, nel caso di calibrazione si avrà:

$$\delta \mathbf{H} \mathbf{F}^n = \begin{bmatrix} -\delta H_y (g^n + \delta g^n) \\ \delta H_x (g^n + \delta g^n) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Lo Scale Factor è adimensionale.

**Axis Misalignment**  $\boldsymbol{\varepsilon}^b = \mathbf{MIS}_g \boldsymbol{\omega}^{b_i/b}$

$$\mathbf{MIS}_g = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{MIS}_{gxy} & \mathbf{MIS}_{gxz} \\ \mathbf{MIS}_{gyx} & 0 & \mathbf{MIS}_{gyz} \\ \mathbf{MIS}_{gzx} & \mathbf{MIS}_{gzy} & 0 \end{bmatrix}$$

Da cui:

$$\boldsymbol{\phi}(t) = -\mathbf{MIS}_g \delta \mathbf{H}$$

L'equazione d'errore risulta:

$$\begin{aligned} \delta \dot{\mathbf{v}}^n &= \mathbf{C}_b^n \mathbf{F}^b \times \boldsymbol{\phi} + \delta \mathbf{F}^n \times \boldsymbol{\phi} \\ &= \begin{bmatrix} -\mathbf{MIS}_{gxy} \delta H_z (F_y^n + \delta F_y^n) + \mathbf{MIS}_{gxz} \delta H_y (F_z^n + \delta F_z^n) \\ \mathbf{MIS}_{gyx} \delta H_z (F_x^n + \delta F_x^n) - \mathbf{MIS}_{gyz} \delta H_x (F_z^n + \delta F_z^n) \\ -\mathbf{MIS}_{gzx} \delta H_y (F_x^n + \delta F_x^n) + \mathbf{MIS}_{gzy} \delta H_x (F_y^n + \delta F_y^n) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

La corruzione su velocità (dimensionalmente in  $m/s$ ) e posizione (dimensionalmente in metri) risulta quindi:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{v}^n &= \int \delta \dot{\mathbf{v}}^n d\tau = \delta \dot{\mathbf{v}}^n t \\ \delta \mathbf{p}^n &= \int \delta \mathbf{v}^n d\tau = \frac{1}{2} \delta \dot{\mathbf{v}}^n t^2 \end{aligned}$$

Nel caso di calibrazione si avrà:

$$\delta \dot{\mathbf{v}}^n = \begin{bmatrix} -\mathbf{MIS}_{gxz} \delta H_y (g^n + \delta g^n) \\ \mathbf{MIS}_{gyz} \delta H_x (g^n + \delta g^n) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dimensionalmente l'Axis Misalignment è una variazione angolare misurata in radianti.

# Capitolo 2

## Controllo dei motori

### 2.1 Controllo dei motori mediante *Motion Manager™*

Il *Motion Manager™* è il software proprietario di *Faulhaber®* azienda produttrice dei motori DC brushless montati su ciascuno dei tre gimbal presenti sul braccio robotico [6].

L'interfaccia di utilizzo consiste in:

- Header con il menu **(1)** e la barra degli strumenti **(2)**
- Accesso rapido degli strumenti **(3)**
- Barra di stato **(4)**
- Footer **(5)**
- Docking Area **(6)**
- Node Explorer **(7)**
- Editor **(8)**
- Terminale **(9)**

Di questi, ci concentreremo a parlare degli ultimi tre descritti, ossia *Node Explorer*, *l'Editor* ed il *Terminale*.

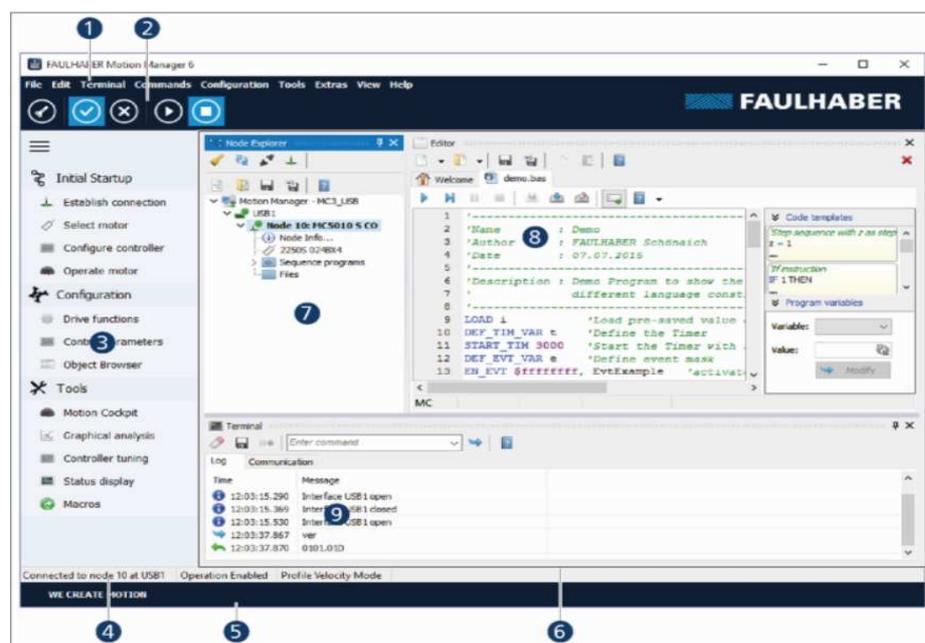


Fig. 2.1 – Schermata del software Motion Manager.

Il Node Explorer consente di mostrare tutti i dispositivi con i quali il *Motion Manager™* è in grado di stabilire una connessione. Inoltre è possibile aggiornare la connessione tra i nodi, qualora si chiuda o si apra un nuovo progetto, senza che il software venga rilanciato. Nel Node Explorer è inoltre possibile salvare gli script realizzati nella parte di Editor.

Button	Meaning	Description
	Node search	Searches the specified interfaces for connected drive nodes or other network nodes.
	Update active node	The active node is updated in the Node Explorer.
	Manage connections	Changing the connection settings (see chap. 6.1, p. 26).
	Close/restore connection	Existing connections are broken or re-established.
	New project	A new project is created.
	Open project	An existing project is opened.
	Save project	The current project is saved.
	Save project as	The current project is saved as a new file.

Fig. 2.2 – Pannello di controllo del Node Explorer, mediante il quale si possono configurare le connessioni con i motori Faulhaber ed impostare il protocollo di comunicazione.

Dal *Node Explorer*, tramite un doppio click su *Manage connections*, è possibile selezionare ed attivare un ‘nodo’, ossia aprire la comunicazione con l’azionamento al quale il nodo stesso fa riferimento. Il manage connection permette dunque la gestione delle connessioni di comunicazione che sono state settate in precedenza mediante il node search.

Il *Motion Manager™* è in grado di supportare diverse interfacce di comunicazione, tra cui:

- COM (interfaccia seriale RS232)
- CAN
- USB

In questo caso, si è impiegata una comunicazione che fa uso di porte COM, e dunque una comunicazione che fa uso dell’ interfaccia seriale RS232.

Le cinque porte seriali, tre dei motori sugli assi x, y e z e due relative agli inclinometri sulla base e sulla forcella del sistema di calibrazione, sono state raggruppate in un HUB seriale a 4 ingressi. L’ impiego di un HUB a 4 ingressi, ha portato alla conseguente scelta di raggruppare due seriali in un unico nodo. Si è pertanto scelto di unire assieme le seriali che comandano gli azionamenti dell’asse x e dell’asse y, ovvero i due motori comandati in posizione. Le due seriali, vengono riconosciute dal *Node Search* del Motion Manager mediante un numero posto a prefisso del codice dell’azionamento.

In particolare il prefisso **1.** è destinato alla selezione dell'asse y, mentre **2.** è destinato alla selezione dell'asse x.

Il prefisso viene utilizzato anche per la stringa della composizione di un comando. La sequenza completa della composizione è:

#### INDIRIZZO NODO – COMANDO – SEGNO – VALORE

In primo luogo, sono stati impostati i parametri che regolano le prestazioni dei motori stessi, che, una volta fissati, risultano invariati per l'applicazione. In particolare è stata impostata la modalità di comunicazione seriale, i parametri di accelerazione, decelerazione e velocità massima raggiungibile. Sono state inoltre impostate opportune soglie di limitazione di potenza.

I comandi per la movimentazione dei motori sono stati dapprima inviati da terminale, ed in seguito, una volta raggiunta una certa dimestichezza con l'uso del software, sono stati creati degli script, all'interno dell'Editor, contenenti l'intera sequenza di comandi da utilizzare per comandare un azionamento.

Siccome lo scopo finale è stato quello di riuscire a calibrare dei sensori inerziali, mediante il *six-position calibration method*, è stato necessario individuare quale fosse il valore di impulsi/giro, da inserire nella stringa del *Motion Manager™*, che corrispondesse ad un grado. Per farlo, è stata eseguita una misura di ripetibilità sia per l'asse x che per l'asse y, ossia sui due motori che vengono comandati in posizione, inviando da terminale i comandi necessari allo scopo. Inizialmente, è stata acquisita la posizione iniziale, per ciascun asse, mediante l'inclinometro posto sulla forcella del braccio robotico. Successivamente sono state compiute 10 movimentazioni con angolazioni pari a 1000 impulsi, 5000 impulsi e 10000 impulsi. Per ciascun movimento, è stata calcolata la differenza tra la posizione precedente e quella istantanea, si è diviso per il numero di impulsi, ottenendo così la misura dell'angolo, in gradi, esercitata dall'applicazione di un impulso. Calcolando poi la media ed invertendo il risultato, si è ottenuto ciò che era l'obiettivo della misura di ripetibilità, ossia ottenere il numero di impulsi necessari a far muovere l'azionamento di un grado, con la maggior precisione possibile. Con questo calcolo è stato ricavato il valore di 1357,2 impulsi a grado, Quindi la risoluzione del posizionamento del sensore è inferiore al millesimo di grado.

Siccome il "*Six Position Calibration Method*" richiede che ciascun asse venga allineato al vettore gravità con verso concorde e con verso discorde, sono stati quindi calcolati i seguenti valori di impulsi per ottenere i posizionamenti desiderati.

$$X_{\pm 90^\circ} = 1357,2 * (\pm 90^\circ) = \pm 122144 \text{ impulsi}$$

$$Y_{\pm 90^\circ} = 1357,2 * (\pm 90^\circ) = \pm 122144 \text{ impulsi}$$

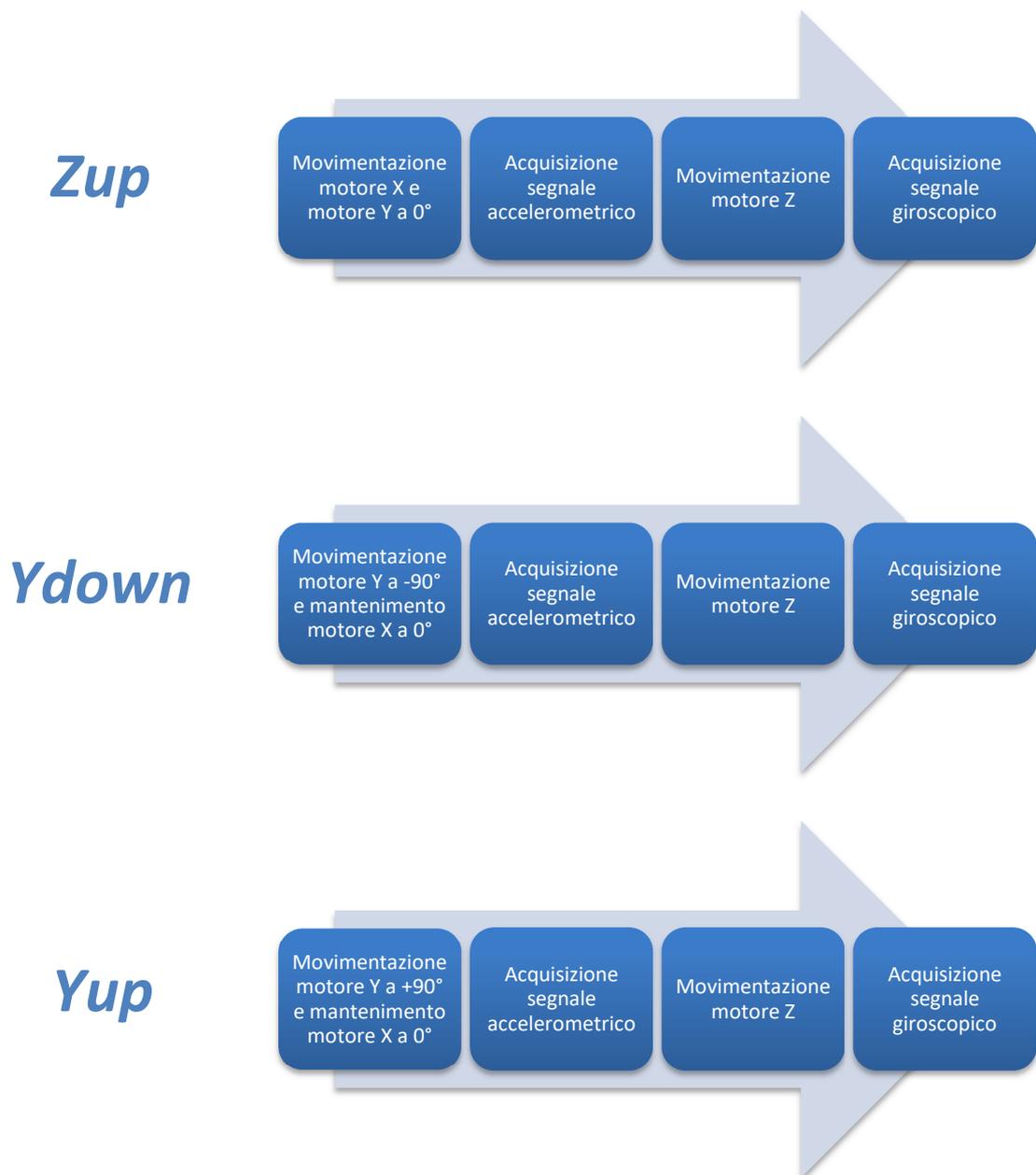
$$Y_{+180^\circ} = 1357,2 * (+180^\circ) = +244288 \text{ impulsi}$$

Risulta inoltre di facile intuizione che, a partire dal valore di impulsi da applicare per muovere il sistema di calibrazione di un grado, è possibile ricavare qualsiasi valore d'angolo in termini di gradi.

## 2.2 Macchina a stati per l'orientazione del sensore

Al fine di ottenere una perfetta calibrazione del sensore, occorre muovere i motori in modo che solamente un asse alla volta sia parallelo al vettore di gravità terrestre. E' stata pertanto realizzata una macchina a stati per l'orientamento e l'acquisizione della posizione del sensore rispetto a ciascun asse. Nelle due pagine successive sono riportate le sequenze da compiere per conseguire i segnali, accelerometrici e giroscopici, secondo la tecnica del "Six Position Calibration Method".

La macchina a stati è la seguente:



*Zdown*



*Xdown*



*Xup*



Fig 2.3 - Schema della macchina a stati, implementata sia per comandare i motori con il Motion Manager che con LabView.

## 2.3 Comandi per gli azionamenti X ed Y con *Motion Manager*

Noti gli impulsi, da fornire agli azionamenti, per muovere di una determinata angolazione i motori e strutturata una macchina a stati che consenta una calibrazione ottimale, eseguita in minor tempo possibile e di conseguenza con una richiesta di un numero, per quanto possibile ridotto, di passaggi, si è passato alla scrittura degli script su *Motion Manager*<sup>™</sup>, che garantiscono una maggior celerità nell' esecuzione dei comandi rispetto al terminal, in cui, come già ricordato, viene inviato un singolo comando alla volta.

Di seguito vengono riportati due script (l'asse z è stato preso in considerazione, per comodità di programmazione, solamente in *Labview*<sup>®</sup>), indipendenti per ciascun azionamento. Questo perché non è stato possibile, all'interno del *Motion Manager*<sup>™</sup>, utilizzare la tecnica di *NetMod*, ossia l'esecuzione contemporanea di uno script unico contenente i comandi per la gestione di entrambi gli azionamenti che consentono il controllo in posizione.

AZIONAMENTO Y	AZIONAMENTO X
Posizioni di calibrazione raggiungibili: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Z+</li> <li>• Z-</li> <li>• X+</li> <li>• X-</li> </ul>	Posizioni di calibrazione raggiungibili: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Y+</li> <li>• Y-</li> </ul>
1SORO 1CONTMOD 1EN 1AC300 1DEC300 1SP200 1LR-122144 ; X- DELAY5000 1NP 1M 1LR244288 ; X+ 1M DELAY5000 1M 1LR122144 ; Z- DELAY5000 1M 1LR-122144 ; Z+ (Ritorno in home) 1M	2SORO 2CONTMOD 2EN 2AC300 2DEC300 2SP200 2LR-122144 ; Y- DELAY5000 2NP 2M 2LR244288 ; Y+ 2M DELAY5000 2M 2LR-122144 ; ( Ritorno in home) DELAY5000 2M

In cui :

- **SOR** è il comando che indica la modalità di comunicazione, a seconda di che segnale necessita il driver per pilotare l'azionamento. Nel caso in questione, in cui è stata impiegata una comunicazione seriale, il comando viene succeduto dell'argomento 0, specifico per lo standard RS232, ed i prefissi, come discusso precedentemente, fanno riferimento all'azionamento da comandare.
- **CONTMOD** è il comando che indica la modalità in cui avviene la comunicazione dati, ossia in maniera continua.
- **EN** è il comando dell'*enabling*, ossia l'abilitazione alla comunicazione dati.
- **AC** è il comando per il transitorio d'accelerazione a cui è sottoposto il motore, in questo caso, sia per l'azionamento x che per l'azionamento y, si è utilizzata una rampa di 300ms.
- **DEC** è il comando per il transitorio di decelerazione, come per AC, si è scelta, per entrambi gli azionamenti, una rampa di 300ms.
- **SP** è il comando che indica la massima velocità che viene raggiunta dagli azionamenti, una volta a regime. Sia per il motore sull'asse x, che per quello sull'asse y, la velocità massima è di 200rpm.
- **LR** è il comando che esprime la posizione relativa di cui si vuole muovere l'azionamento, differisce dalla velocità assoluta (LA) in quanto non ha come riferimento la posizione di HOME, ma cambia il suo riferimento di volta in volta, basandosi sulla posizione assunta in precedenza. Le cifre a corredo di questo comando, consentono di portare gli azionamenti ad angoli di 90° o 180°, ovvero quelli che consentono una corretta calibrazione del sensore, come già enunciato nei capitoli precedenti.
- **NP** è il comando che notifica la posizione raggiunta da un azionamento a seguito di un suo spostamento. NP restituisce, tramite terminale, una 'p' con l'angolo espresso in gradi, rispetto alla posizione di HOME, raggiunto da un motore.
- **M** è il comando per dare inizio alla movimentazione di un motore.

Si noti come, tra un comando di effettiva movimentazione e l'altro, sia interposto un tempo di attesa di 5 secondi (*DELAY5000*), questo per consentire al sistema di calibrazione di raggiungere la posizione richiesta prima che giunga, sulla porta seriale, il successivo comando di movimentazione.

## 2.4 Controllo dei motori mediante *LabView*

Per eseguire una calibrazione più raffinata dei sensori inerziali si è scelto di utilizzare l'ambiente di sviluppo software *LabView* (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) di *National Instrument*® [9]. Si tratta di un linguaggio grafico e, pertanto, viene anche definito Linguaggio-G. La definizione di strutture dati ed algoritmi avviene con icone ed altri oggetti grafici, ognuno dei quali incapsula funzioni diverse, uniti da linee di collegamento (wire), in modo da formare una sorta di diagramma di flusso. Tale linguaggio viene definito dataflow, in quanto la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali. Poiché i dati possono anche scorrere in parallelo attraverso blocchi e fili non consecutivi, il linguaggio realizza spontaneamente il multithreading senza bisogno di esplicita gestione da parte del programmatore. *LabView* è completamente integrato per la comunicazione con l'hardware di tipo IEEE 488, VXI, PXI, RS-232, RS-485 e dispositivi per l'acquisizione dati DAQ plug-in. I programmi *LabView* sono pienamente compatibili con tutti i modelli dei più importanti costruttori di strumenti programmabili e schede di acquisizione.

### 2.4.1 L'ambiente di sviluppo *LabView*®

Tutte le strutture che appaiono all'interno di *LabView*® vengono rappresentate sotto forma di icone controllate dai costrutti stessi. Nell'ambiente di sviluppo, il *VI*, ovvero sia il *Virtual Instrument*, può essere utilizzato sia come strumento indipendente sia come *subVI*. In questo modo è possibile costruire i vari componenti, di un complesso *VI*, in vari blocchi indipendenti l'uno dall'altro ed inserirli nel progetto completo dopo averli testati singolarmente. Si riesce, in questo modo, a definire un *VI* come una struttura gerarchica di *VI* e *SubVI*. Un altro vantaggio offerto dalla modularità è quello di poter sostituire un blocco senza dover apportare modifiche al *VI* che lo contiene. Per la sua facilità di utilizzo, il linguaggio-G di *LabView*® permette di ottenere tempi di sviluppo del software molto più brevi di quelli ottenibili mediante un classico linguaggio di programmazione che si basa sul testo. Inoltre, il linguaggio-G viene compilato e non interpretato come nella maggior parte dei linguaggi grafici. Questa caratteristica permette di ottenere tempi di esecuzione paragonabili a quelli di un comune linguaggio di programmazione compilato. Questa caratteristica è interessante in quanto solo in questo modo è possibile ottenere tempi di esecuzione soddisfacenti per controllare strumentazioni o processi industriali ove il tempo di risposta del programma è fondamentale. I *VI* sono pertanto veri e propri programmi o sottoprogrammi grafici, i quali constano di 3 componenti principali:

- Il pannello frontale o *Front Panel*
- Il diagramma a blocchi o *Block Diagram*
- Il riquadro connettori

Nel dettaglio, il **pannello frontale** è l'interfaccia utente del VI. Si realizza con controlli ed indicatori, che costituiscono, rispettivamente, i terminali interattivi d'ingresso e d'uscita. Sono ben più numerosi e complessi dei *widget* normalmente forniti dal sistema operativo. I controlli sono matrici, manopole, potenziometri, pulsanti, quadranti e molti altri; simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del VI. Gli indicatori sono grafici, tabelle, LED, termometri ed altri ancora; essi simulano i dispositivi d'uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera. Una volta posizionato l'oggetto, controllo o indicatore che sia, è possibile associare ad esso un'etichetta, ridimensionarlo, configurarne il tipo di dato come dimensione, range, valore di default. E' possibile inoltre importare disegni dall'esterno per creare nuovi oggetti. Il **diagramma a blocchi** è lo schema di flusso che rappresenta il codice sorgente in formato grafico. Gli oggetti del pannello frontale appaiono come terminali di ingresso o uscita nello schema a blocchi e comprendono funzioni, strutture, costanti, chiamate ad altri VI, detti *SubVI*, fili di collegamento e commenti testuali. Le funzioni sono chiamate esse stesse VI, anche se non hanno un loro pannello frontale ed un loro schema a blocchi. Possono avere un numero indefinito di ingressi ed uscite come ogni VI. Le strutture eseguono il controllo di flusso di base, mentre i fili di collegamento possono trasportare teoricamente dati di qualunque tipo, anche *bundle* (aggregati) definiti dal programmatore. Il colore e lo spessore dei fili cambiano di conseguenza per permetterne una facile identificazione. Ogni VI può essere a sua volta utilizzato come *subVI* e comparire all'interno dello schema a blocchi di altri VI, proprio come una qualsiasi funzione e, come tale, può avere ingressi ed uscite a cui collegare le linee di flusso. LabView integra, inoltre, strumenti per lo sviluppo il test ed il debug del software prodotto. La finestra di Help descrive ogni icona ed illustra il significato e la posizione di tutte le connessioni d'ingresso e di uscita. In una finestra di "Error" vengono indicati gli eventuali errori e la parte in oggetto viene evidenziata sul Diagramma a Blocchi. E' inoltre possibile eseguire un diagramma a blocchi passo-passo evidenziando il flusso dei dati, inserire delle finestre di visualizzazione dei dati che fluiscono per un particolare punto del programma ed inserire dei *breakpoints*, ossia punti d'arresto temporanei. Mediante questi strumenti è quindi possibile monitorare il flusso dei dati attraverso il diagramma di un VI per controllarne il corretto funzionamento. Infine, il **riquadro connettori** serve a definire qual è l'aspetto del VI quando appare come *subVI* in uno schema a blocchi, definendo la

facciata dell'icona ed in che modo vanno collegate le linee per permettere il passaggio dei dati.

## 2.4.2 La macchina a stati in *LabView*<sup>®</sup>

In *LabView*<sup>®</sup> è stata implementata la macchina a stati, già descritta nelle pagine precedenti, che consente di calibrare correttamente sia l'accelerometro che il giroscopio. E' previsto, anche se in questo elaborato è stata condotta una singola sequenza di calibrazione per ciascun sensore, un ciclo di calibrazione per ogni valore di fondoscala, sia dell'accelerometro che del giroscopio.

In particolare, per l'accelerometro, avvengono i seguenti passaggi:

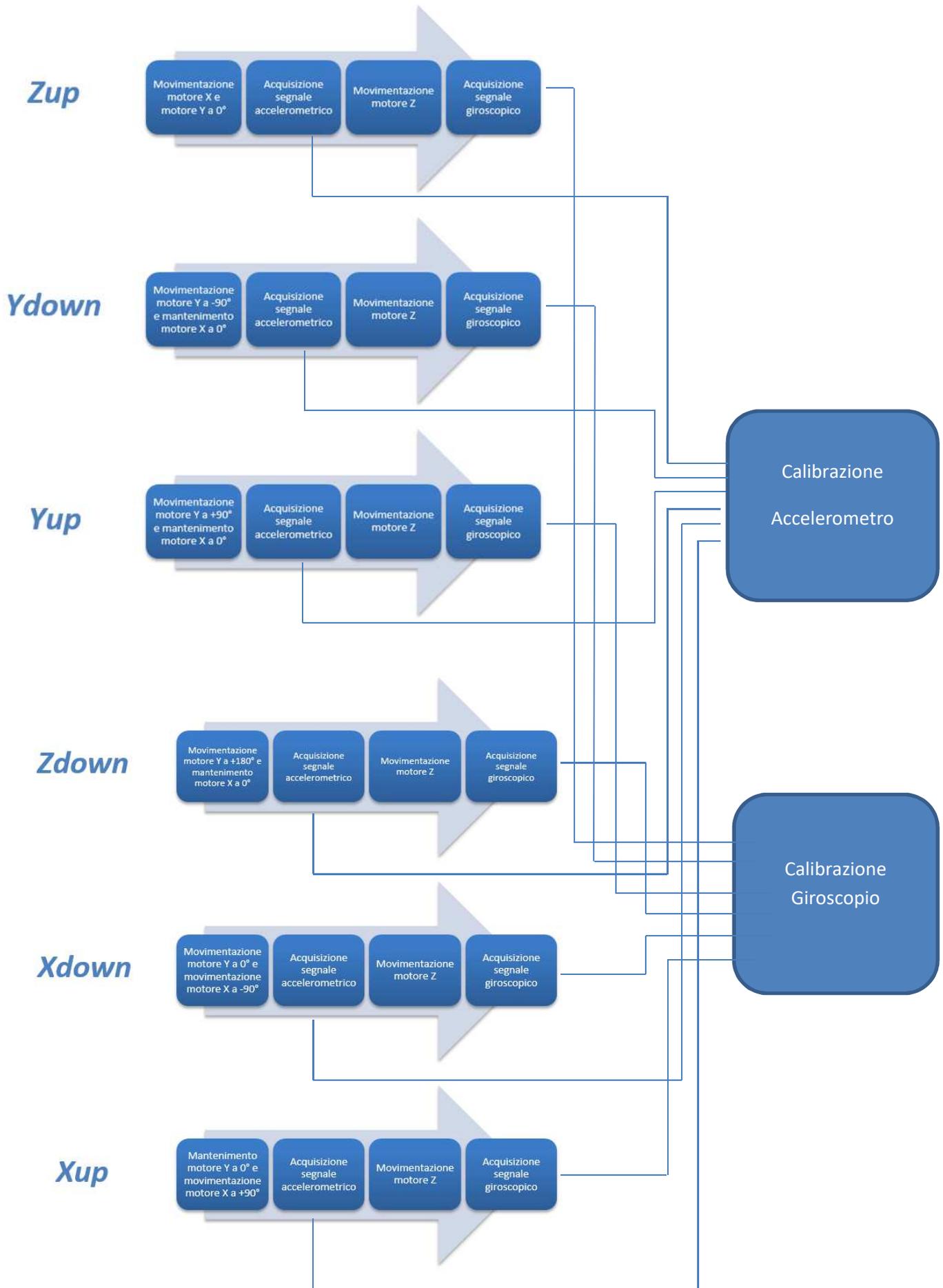
- Il sistema per la calibrazione viene posizionato nella posizione di partenza, scelta a priori ed indicata come "Posizione di Home". In questo caso la posizione di Home coincide con l'asse z del sensore posizionato in modo da avvertire  $+1g$  terrestre. Il movimento dei motori lungo gli assi x ed y, vengono calcolati in base ai dati in *real-time* forniti dall'inclinometro, al fine di garantire un posizionamento accurato con una precisione assicurata al decimo di grado.
  
- Viene acquisito il segnale dell'accelerometro, attraverso il protocollo di comunicazione specifico di ciascun sensore.

Queste operazioni vengono ripetute per ciascuna delle sei posizioni facenti parte del "*Six Position Calibration Method*". Acquisiti, per ogni posizionamento, i dati dell'accelerometro, l'algoritmo di calibrazione processa le informazioni e ricava la matrice di calibrazione dell'accelerometro per il fondoscala, dichiarato dalle specifiche del device, impostato.

Analogamente, vi sono delle procedure da seguire anche per il giroscopio:

- Per ogni posizione in cui avviene la calibrazione dell'accelerometro, viene avviata la motorizzazione, che si trova alloggiata sull'asse z del dispositivo e fatta ruotare con velocità pari al fondoscala, definito dalle specifiche del sensore inerziale. La velocità di rotazione viene controllata mediante un encoder incrementale a 4096 impulsi/giro, sufficiente per rilevare la velocità massima di 1000 gradi/sec a cui i sensori possono tendere. In prossimità della motorizzazione z, si trova un secondo inclinometro, per rilevare eventuali oscillazioni indesiderate, dovute al fatto che il dispositivo per la calibrazione non è perfettamente solidale con il terreno
- Viene acquisito il segnale del giroscopio, attraverso il protocollo di comunicazione specifico di ciascun sensore
- Le prove effettuate per la calibrazione del giroscopio vengono utilizzate per settare i parametri di scala del magnetometro.

Al termine di tutte le procedure di calibrazione, i valori calcolati vengono scritti nella memoria del sensore e viene redatto un report di calibrazione.



### 2.4.3 Virtual Instruments realizzati in *LabView*<sup>®</sup>

- **leggi\_inclinometro.vi** : E' il *virtual instrument* dedicato alla lettura, mediante trasmissione seriale, dei dati provenienti dall'inclinometro posto sulla forcella del sistema di calibrazione. Per consentire una lettura accurata, il dato viene selezionato all'interno della stringa, discriminandolo dagli elementi di spaziatura, dalla quale giunge mediante seriale. Inoltre, a causa di un'imprecisa lettura dell'angolazione da parte dell'inclinometro montato sul braccio robotico, che non ne consentiva un corretto posizionamento per certi angoli ai quali doveva poi realizzarsi la calibrazione del sensore, una parte di software è stata dedicata a rendere più efficace la lettura del dato, permettendo così, anche per questi angoli, un posizionamento accurato con uno scarto d'errore pari al decimo di grado.

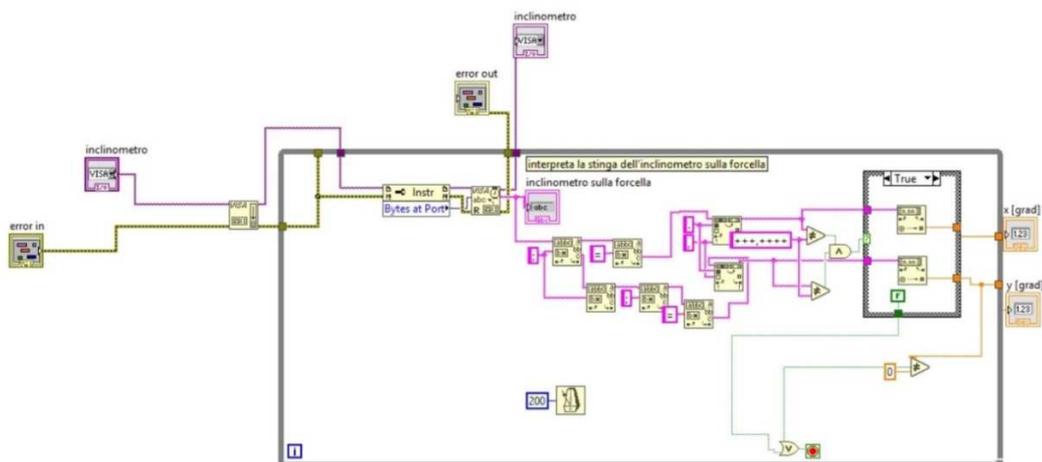


Fig. 2.4 – leggi\_inclinometro.vi

- **posiziona\_home.vi** : E' il *virtual instrument* che permette di collocare il sistema di calibrazione nella posizione definita "di partenza", ossia quella che permette di posizionare i gimbal X ed Y in modo tale che l'inclinometro, posto sulla forcella del sistema di calibrazione, rilevi 0°. *posiziona\_home.vi* è strutturato in modo da acquisire il dato dell'inclinometro in real-time, mediante *leggi\_inclinometro.vi* e, modificare la posizione dei due gimbal, separatamente (se solamente uno dei due è disallineato) o contemporaneamente, agendo sui motori a cui sono connessi. I comandi utilizzati sono quelli del protocollo di comunicazione *Faulhaber*<sup>®</sup>, descritti nel capitolo precedente.

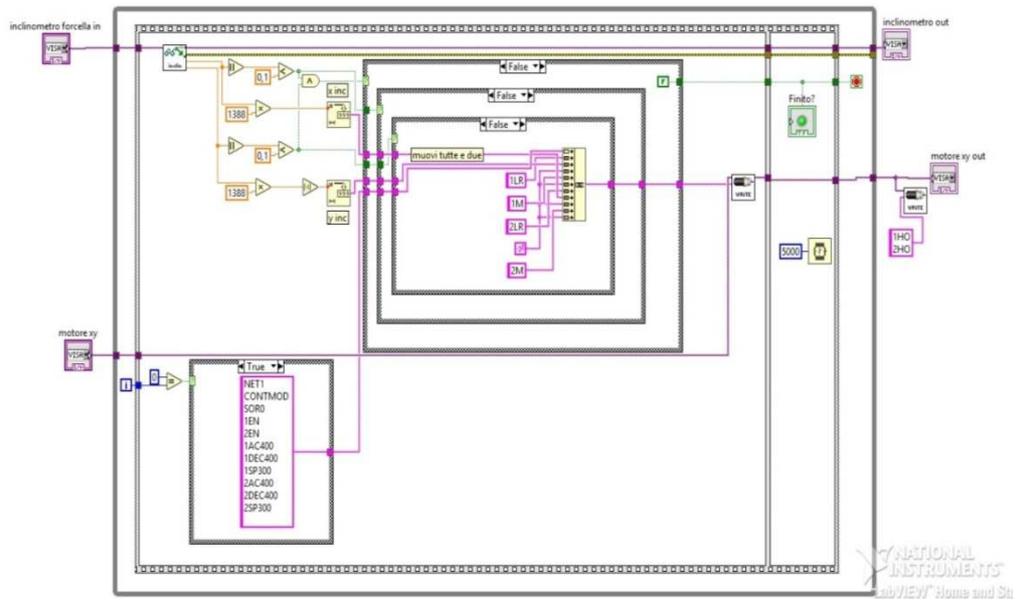


Fig. 2.5 - posiziona\_home.vi

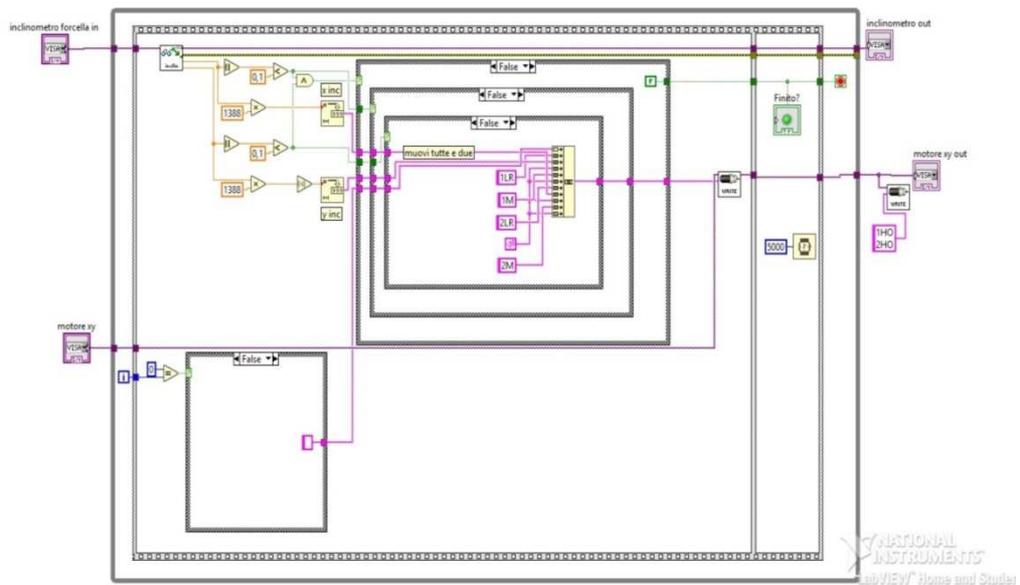


Fig. 2.6 - posiziona\_home.vi

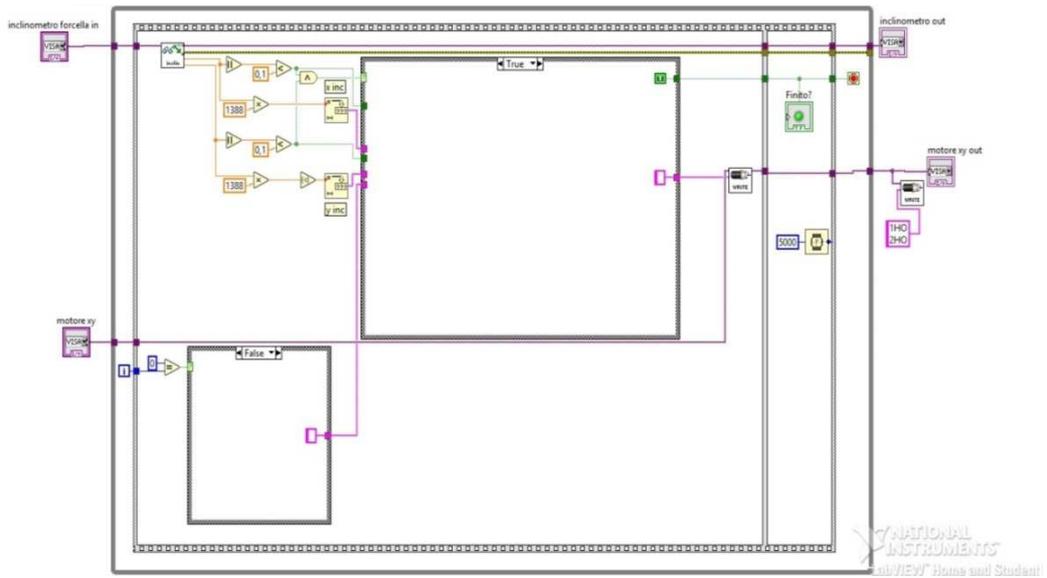


Fig. 2.7 - posiziona\_home.vi

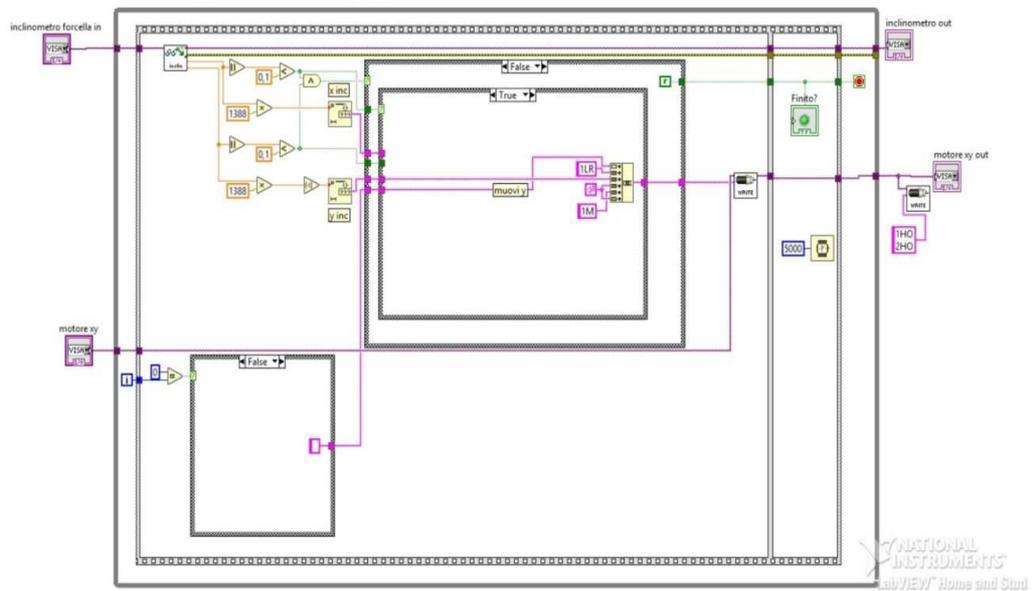


Fig. 2.8 - posiziona\_home.vi

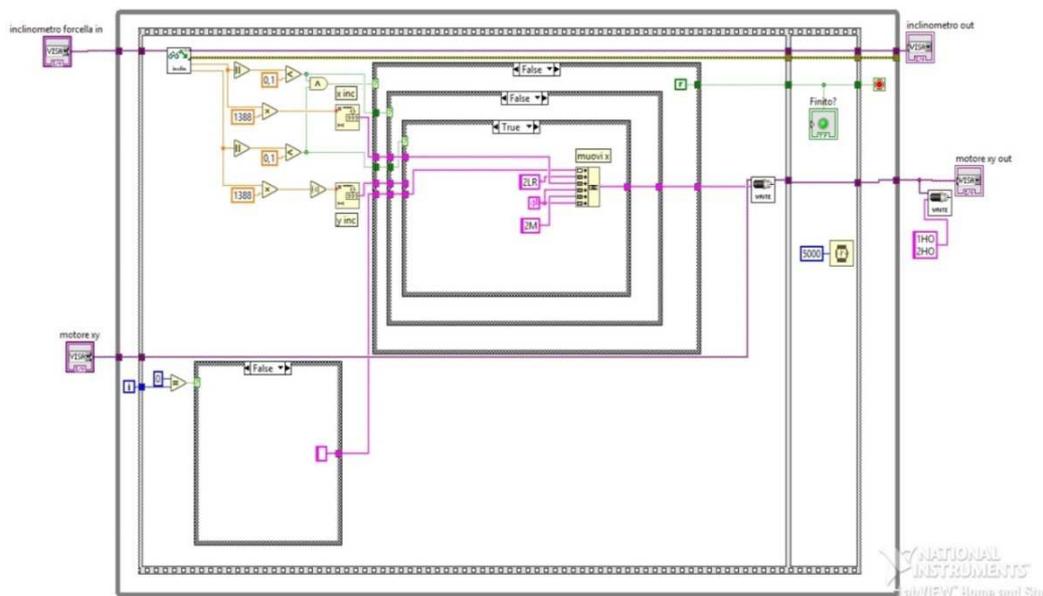


Fig. 2.9 – posiziona\_home.vi

- **posiziona\_X.vi** e **posiziona\_Y.vi** : Sono i *virtual instruments* che permettono di posizionare correttamente gli azionamenti posti sugli assi X ed Y del sistema di calibrazione, agendo sui motori dei rispettivi gimbal. Tramite *leggi\_inclinometro.vi* viene letto, in real-time, l'angolo d'inclinazione dei gimbal rispetto al riferimento assoluto, rappresentato dalla posizione di Home e corretto, mediante impulsi positivi o negativi, al fine di ottenere un posizionamento preciso per poi procedere alla calibrazione del sensore. Come anticipato nella descrizione di *leggi\_inclinometro.vi* vi sono angoli per i quali l'inclinometro non riesce a leggere il dato e, di conseguenza, inviarlo tramite comunicazione seriale. Per queste condizioni, aventi luogo per valori d'angolo superiori a 90° sia per il gimbal X che per il gimbal Y, si è ovviato al problema posizionando il motore alla corretta angolazione, mediante un comando assoluto inviato secondo il protocollo di comunicazione Faulhaber® (LA122144).

Di seguito sono riportati i VI di *posiziona\_X.vi* :

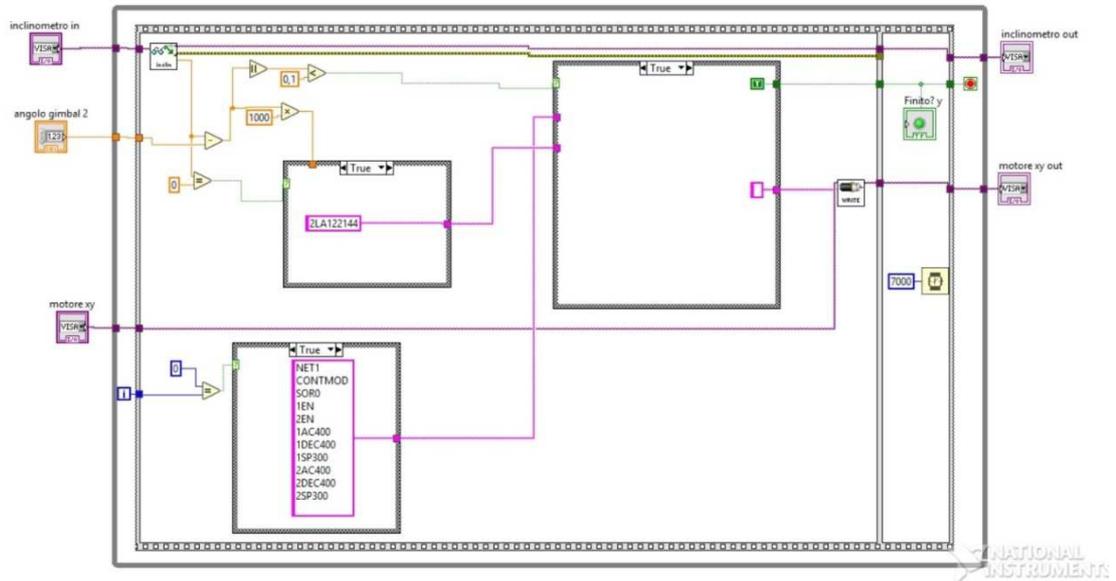


Fig. 2.10 - posiziona\_x.vi

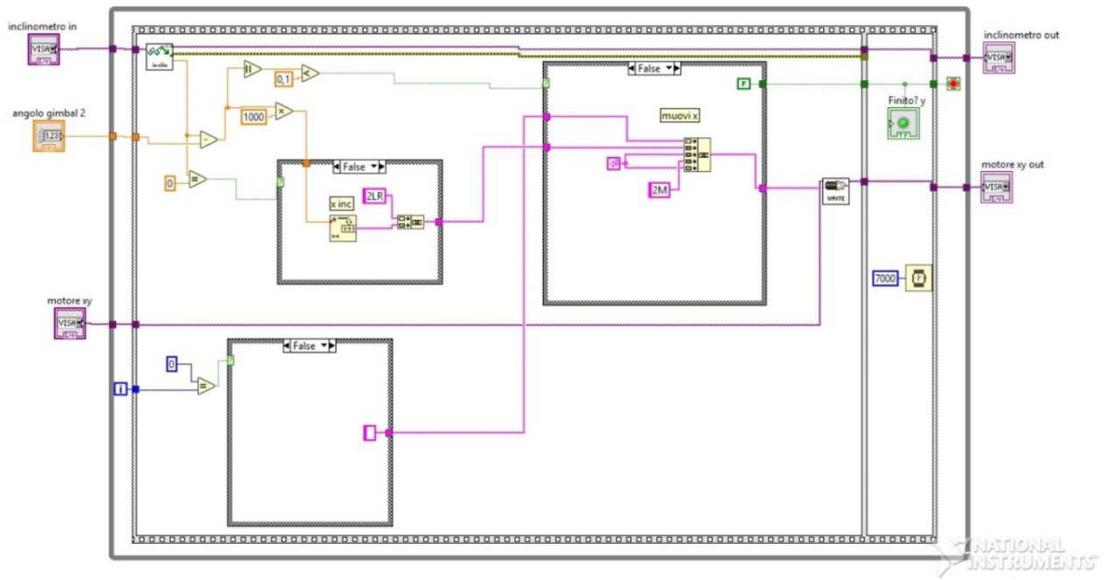


Fig. 2.11 - posiziona\_x.vi

Mentre sotto vengono riportati i VI di *posizione\_Y.vi* :

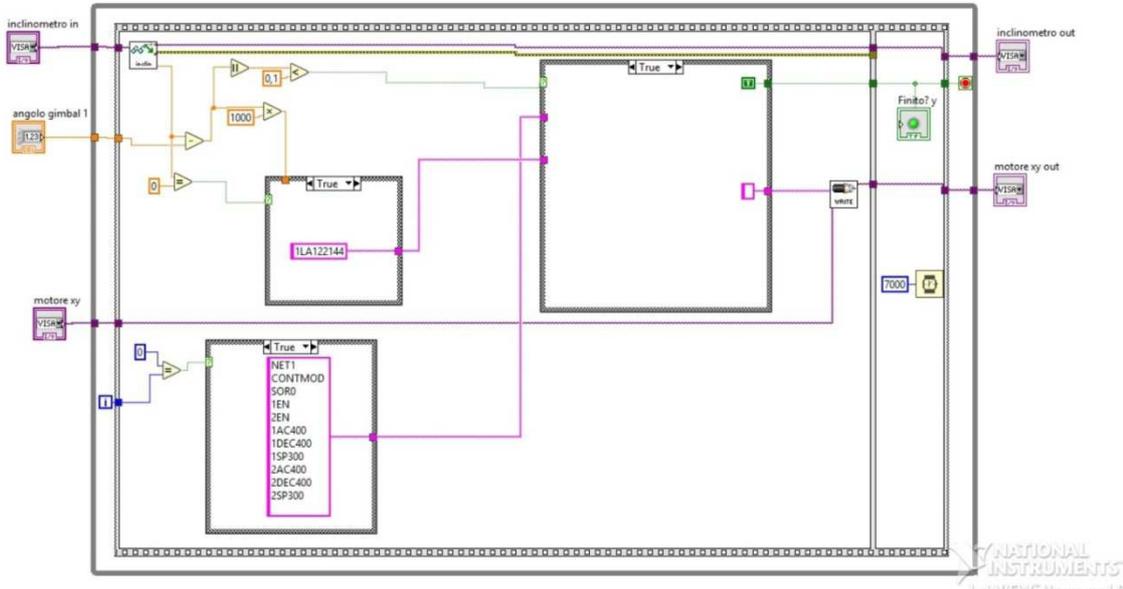


Fig. 2.12 – posizione\_y.vi

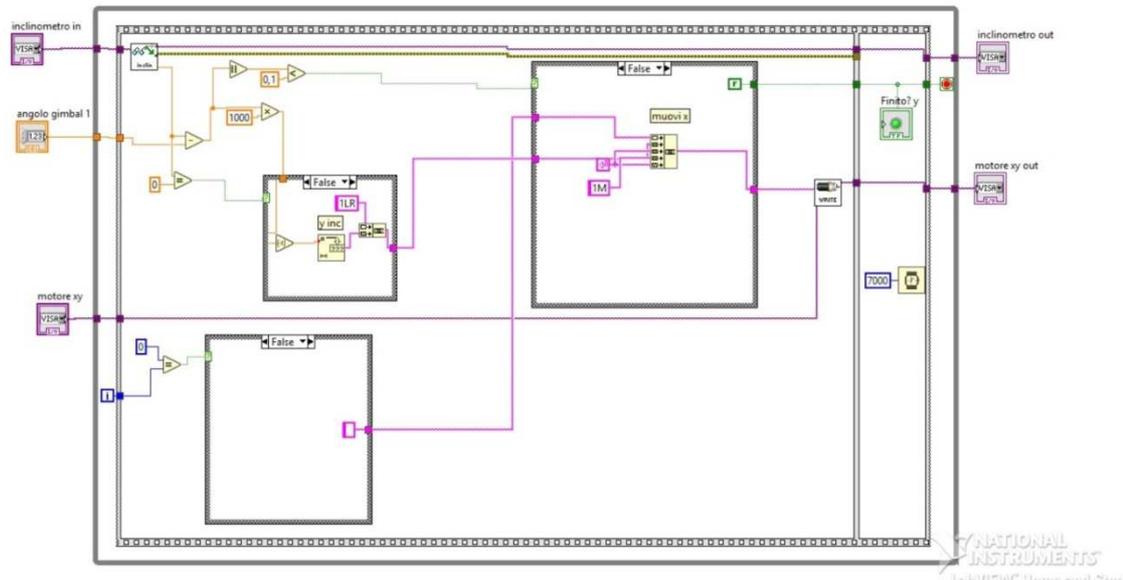


Fig. 2.13 – posizione\_y.vi

- **gira\_Z.vi** : E' il *virtual instrument* che consente la rotazione del sistema di calibrazione attorno al proprio asse Z. In questo modo è possibile, nelle posizioni facenti parte del "Six Position Calibration Method", acquisire il segnale giroscopico per poi calibrare l'IMU. La velocità di rotazione è impostata dalle specifiche tecniche, imposte della casa madre, rispetto al fondoscala del sensore inerziale utilizzato.

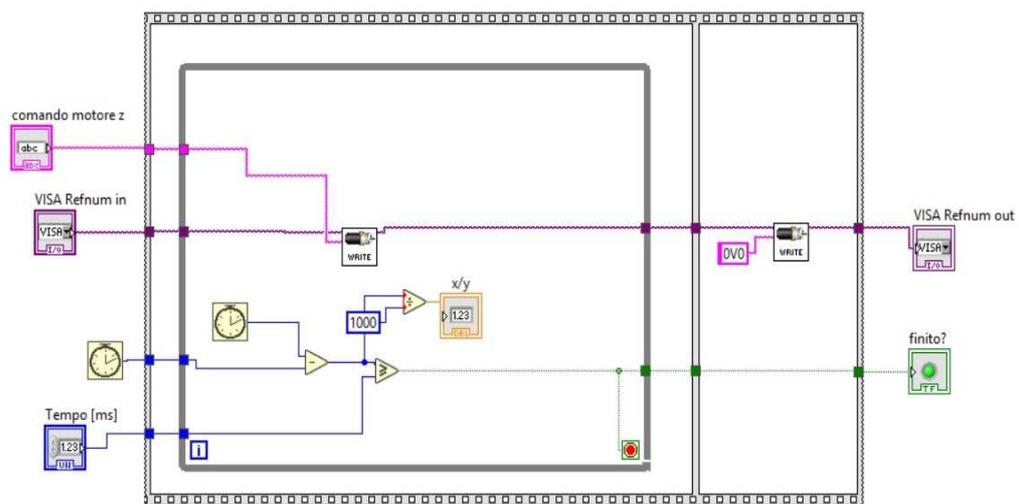


Fig. 2.14 – gira\_z.vi

- **Braccio.vi** : E' il *virtual instrument* più complesso tra tutti quelli realizzati, consente di calibrare, dopo aver posto l'IMU nell'alloggiamento montato sopra al dispositivo per la calibrazione, in maniera completamente autonoma. In termini squisitamente tecnici, si tratta di un *case selector* (switch-case dell'ambiente *LabView®*), ossia una struttura di controllo che consente la verifica del valore dell'espressione, molto utile in questo caso in cui è necessario controllare molti termini per una singola variabile, vale a dire la calibrazione del sensore. Questo VI consente, all'accensione del sistema di calibrazione, di leggere le porte seriali connesse agli azionamenti su ciascun asse ed ai due inclinometri. In tal modo è possibile rilevare la posizione iniziale del braccio robotico. Con l'impiego ausiliario del sub\_VI *posiziona\_home.vi* è possibile comandare il sistema di calibrazione in modo da fargli assumere la posizione, denominata "di Home", tale per cui l'inclinometro posto sulla forcella rilevi 0° sia per l'azionamento X che per l'azionamento Y. Un controllo più accurato dell'allineamento degli assi viene garantito mediante il sub-VI *leggi\_inclinometro.vi*, il quale termina l'esecuzione del virtual instrument *posiziona\_home.vi* una volta raggiunta un'accuratezza di posizionamento al di sotto del decimo di grado. A tal punto è possibile procedere con l'acquisizione del segnale accelerometrico e, successivamente, all'acquisizione del segnale giroscopico. Procedendo con gli stati del case selector, la dinamica risulta la medesima di quella appena descritta, salvo che il VI *posiziona\_home.vi* è sostituito dai VI *posiziona\_X.vi* e *posiziona\_Y.vi*, a seconda dell'azionamento da

muovere per portare il sensore inerziale a  $\pm 1g$  rispetto all'accelerazione di gravità terrestre.

Più dettagliatamente, la sequenza del *case selector* rispecchia la macchina a stati realizzata e descritta nel capitolo precedente ed, allo stesso modo, consente di acquisire, rispetto agli assi del sensore da calibrare, le posizioni nel seguente ordine: Z+, X+, Z-, X-, Y-, Y+. In queste sei posizioni, il sistema di calibrazione viene fatto ruotare attorno all'asse Z, con l'impiego del sub\_VI *gira\_Z.vi*, ed acquisite le velocità di rotazione, rispetto al fondo scala impostato, per la calibrazione del giroscopio. Di seguito, vengono riportati due stati del *case selector*, in particolare la prima immagine rappresenta lo stato 0, per portare, all'accensione, il sistema di calibrazione in posizione di Home mediante la lettura delle porte seriali tramite il VI *leggi\_inclinometro.vi*; mentre la seconda immagine è uno stato del *case selector*, simbolico per tutti gli stati in cui avviene la movimentazione del braccio robotico per portarlo in una delle posizioni del "Six Position Calibration Method".

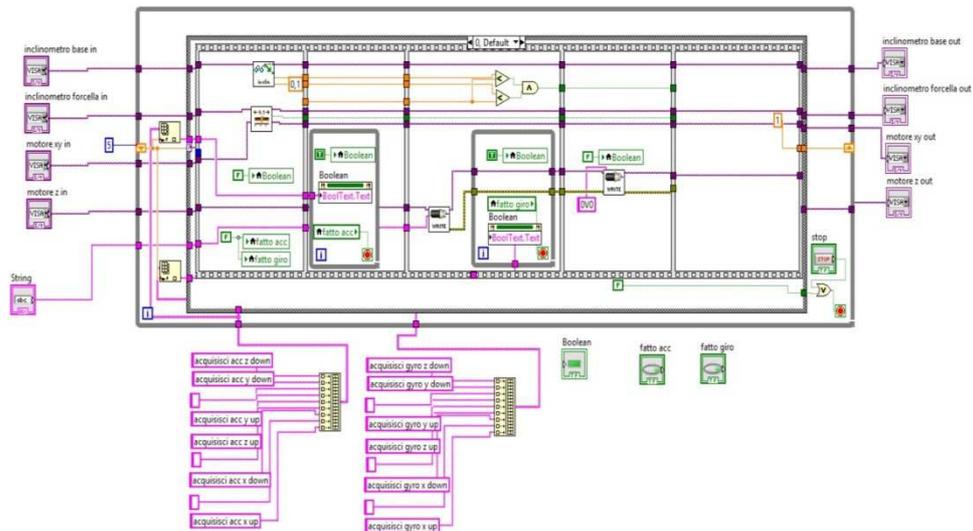


Fig. 2.15 – braccio.vi

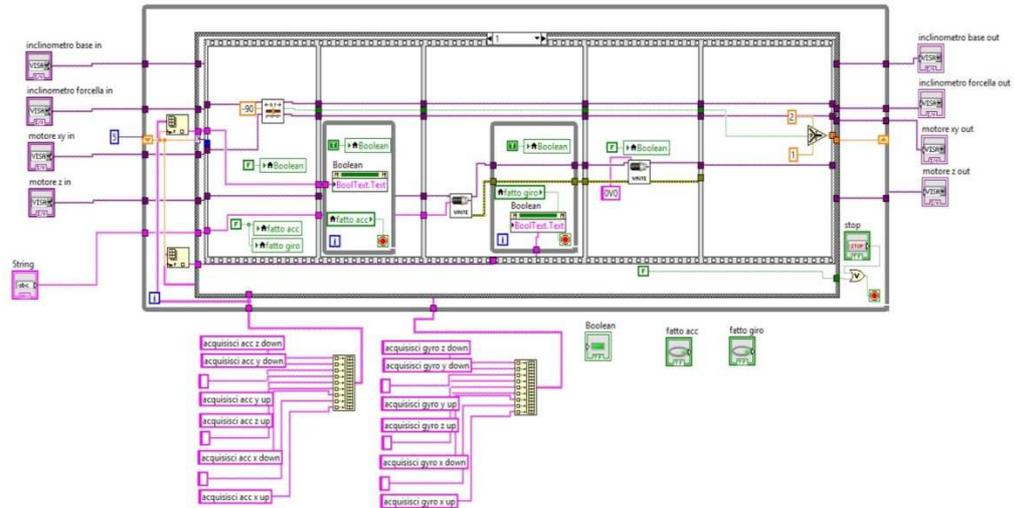


Fig. 2.16 – braccio.vi

In particolare, la gerarchia dei *virtual instruments* all'interno di *braccio.vi* risulta essere quella riportata nel seguente schema:

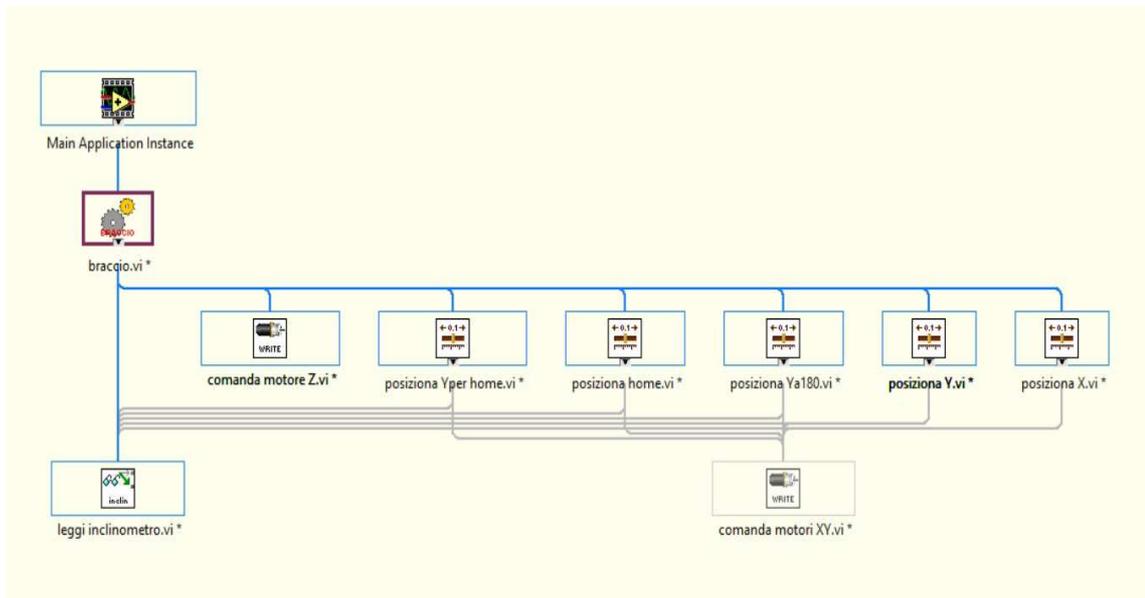


Fig 2.17 - Schema gerarchico di Braccio.vi . In evidenza i sub\_VI descritti in questo capitolo.

- **leggi\_file.vi** : Con questo *virtual instrument* è possibile, una volta calibrata un'IMU, aprire in lettura, a seguito di una conversione per renderli testuali (ASCII file), i file relativi all'avvenuta calibrazione. Ciascun file ASCII si presenterà in forma tabellare, in cui in ogni colonna è raccolto il record di dati per ciascun sensore interno all'IMU che si è acquisito. In questo modo è possibile selezionare i dati riferiti all'accelerometro, al giroscopio ed al magnetometro o altro sensore



Il Front Panel dei due VI, appare come presentato nelle seguenti immagini, rispettivamente di *calibra\_accelerometro.vi* e *calibra\_giroscopio.vi* :

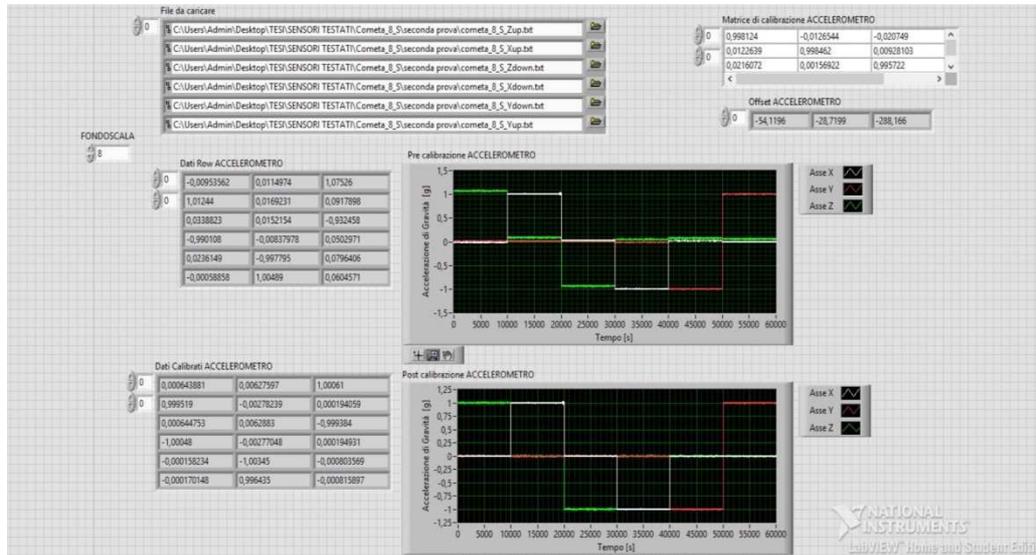


Fig. 2.19 – *calibra\_accelerometro.vi*

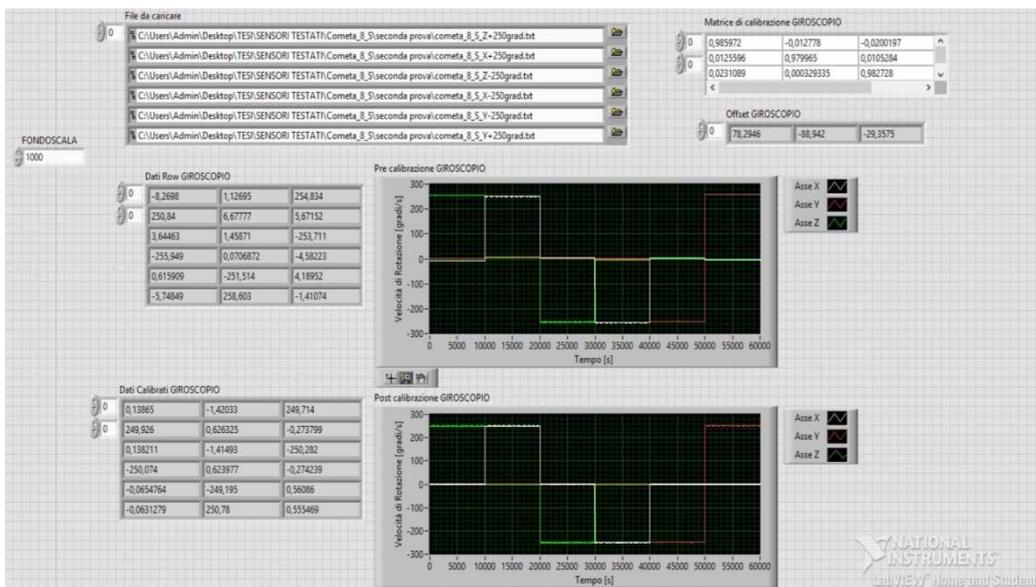


Fig. 2.20 – *calibra\_giroscopio.vi*

## Capitolo 3

# Calibrazione dei sensori

### 3.1 Sensori impiegati

Nel seguente paragrafo, vengono illustrati i due sensori, *Cometa WaveTrack* ed *EXLs3*, oggetto di misure di calibrazione con il software *LabView*<sup>®</sup> mostrato nel capitolo precedente.

#### 3.1.1 Sensore Cometa WaveTrack

L'unità di misurazione inerziale Cometa sono dispositivi elettronici prodotti da *Cometa System s.r.l.* [8]. E' composto da un set completo di sensori MEMS, quali, un accelerometro tri-assiale, un giroscopio tri-assiale ed un magnetometro tri-assiale. L'IMU può essere impiegata per rilevare movimenti del corpo umano, in tempo reale, con estrema precisione, pertanto le caratteristiche intrinseche la rendono adatta sia per il monitoraggio di attività in ambito sportivo che per analisi biomeccaniche, in particolare in persone affette da malattie neuro-degenerative, quali il morbo di Parkinson.



Fig. 3.1 – Sensori Cometa Wavetrack IMU di Cometa System

L'acquisizione dei dati, avviene con una frequenza di campionamento fissa per entrambi i sensori, ed è impostata dal costruttore a 143Hz. La conversione dei dati, sia per l'accelerometro che per il giroscopio, avviene mediante 3 Analog-to-Digital converter (ADC) a 10-bit di risoluzione. Inoltre, entrambi i sensori interni all'IMU presentano una gamma di fondo scala configurabili, nel caso particolare dell'accelerometro di  $\pm 2g$ ,  $\pm 6g$  e  $\pm 8g$ , mentre, per il giroscopio di  $\pm 250^\circ/s$ ,  $\pm 500^\circ/s$  e  $\pm 2000^\circ/s$ .

La trasmissione dei dati acquisiti avviene per mezzo di un'antenna Wi-Fi integrata nell'IMU, la quale comunica con un router embedded, consentendo così al soggetto che indossa il sensore ampia libertà di movimento, garantendo così misurazioni precise ed accurate ed una alta velocità di trasmissione durante la fase di acquisizione.

Infine, la ricarica del sensore avviene per via induttiva, posizionando l'IMU all'interno di uno slot della docking station dedicata. A carica completata, il sensore garantisce un'autonomia di 10 ore di utilizzo.



Fig. 3.2 – Router dedicato per la comunicazione wireless dei sensori Cometa

### 3.1.2 Sensore EXLs3

L'Exls3 è un dispositivo elettronico, prodotto da *EXEL microelectronics*, che integra la funzione di unità di misurazione inerziale (IMU) con acquisizione dei dati in tempo reale [9].

E' composto da un set completo di sensori MEMS, nella fattispecie un accelerometro tri-assiale, un giroscopio tri-assiale ed un magnetometro tri-assiale; un microprocessore Cortex-M3 a 32 bit per l'elaborazione dei dati ed un antenna Bluetooth per la trasmissione dei pacchetti di dati in real-time.

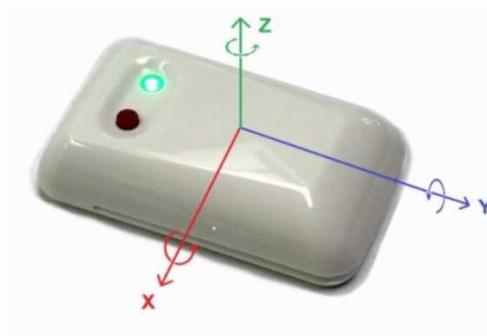


Fig. 3.3 – Sensore EXLs3 di EXEL Microelectronics

L'IMU può essere impiegata per rilevare movimenti del corpo umano, indossando il dispositivo Exsl3, in tempo reale ed utilizzare i dati acquisiti in campo clinico. In particolare può essere adoperata per analisi biomeccaniche, quali la valutazione della postura, riabilitazione, monitoraggio della camminata, analisi funzionale delle articolazioni ed osservare costantemente l'attività di un soggetto di cui si vogliono conoscere particolari parametri fisiologici. Il dispositivo implementa un trasmettitore Bluetooth consentendo un rapido interfacciamento con una vasta gamma di dispositivi (PCs, Tablets, Smartphones) senza la necessità di dover utilizzare hardware aggiuntivo e, consentendo, come di consueto nello standard Bluetooth, una trasmissione dati, in tempo reale, in maniera wireless, con un raggio d'azione fino a 10 metri.

Il dispositivo è, inoltre, equipaggiato di una memoria flash NAND integrata da 1Gb, che permette il salvataggio dei dati acquisiti dai sensori per trasferirli in un secondo momento tramite USB 2.0. La batteria al litio ricaricabile, fornisce un'autonomia in streaming dati fino a 3 ore consecutive. La docking station dedicata, per la ricarica del dispositivo, consente in aggiunta di interfacciarsi con il PC mediante cavo USB ed accedere alla

memoria flash interna per catalogare i dati acquisiti. Come si può vedere dallo schema a blocchi, il sensore acquisisce l'accelerazione lineare e la velocità angolare contemporaneamente all'intensità di campo magnetico per ciascuno dei tre assi. Dopo una prima compensazione dei dati per correggere, ad esempio, l'offset e l'errore di guadagno, viene eseguita una stima dell'orientamento grazie agli algoritmi del filtro di Kalman. I dati così raccolti ed elaborati vengono organizzati grazie al protocollo di trasmissione adottato, per poi essere sia salvati sulla memoria flash che trasmessi attraverso lo standard Bluetooth.

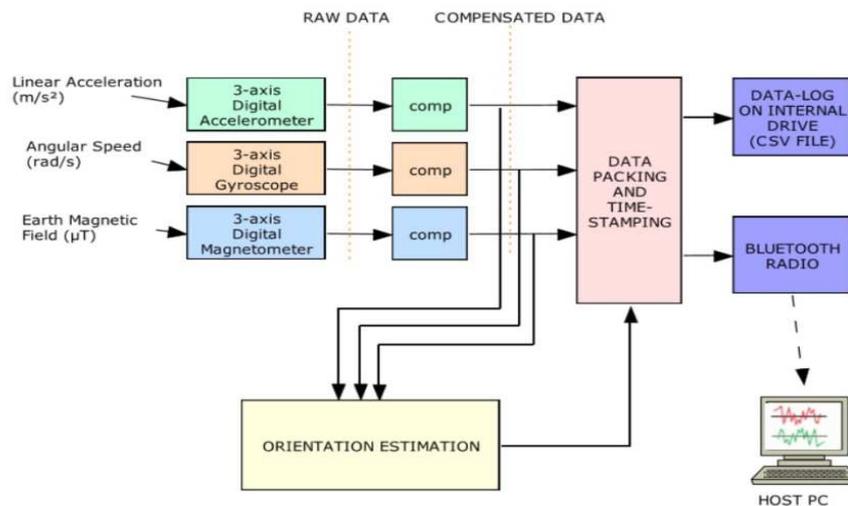


Fig. 3.4 – Schema dell'acquisizione e della stima dei parametri da parte dell'EXLs3

Nei paragrafi che seguono, vengono approfonditi due dei componenti principali del sensore EXLs3: il MEMS a 9 assi MPU-9150 ed il microprocessore Cortex-M3.

### 3.1.2.1 MEMS a 9 assi MPU-9150

Il sensore EXLs3 è dotato di un micro electro-mechanical system (MEMS) modello MPU-9150 prodotto dalla *InvenSense*<sup>®</sup>. L'MPU-9150 è stato il primo dispositivo di MotionTracking a 9 assi che combina un giroscopio MEMS a 3 assi, un accelerometro a 3 assi MEMS ed un magnetometro a 3 assi MEMS ed un Digital Motion Processor (DMP). E' stato sviluppato come soluzione in ambiente mobile e per altri dispositivi di fascia consumer. La tecnologia MotionProcessing sviluppata per questo dispositivo permette un maggiore livello d'integrazione rispetto ai MEMS discreti raggiungendo il package alle dimensioni di 4x4x1mm (solo LGA). L'MPU-9150 è dotato di una porta ausiliaria con

protocollo I<sup>2</sup>C per l'interfacciamento con altri tipi di sensori, ad esempio non inerziali, di pressione ed altri ancora. La conversione dei dati analogico/digitale viene eseguita attraverso 3 analog-to-digital converter (ADC) a 16-bit sia per l'accelerometro che per il giroscopio, mentre, per il magnetometro viene utilizzato un ADC a 13-bit di risoluzione. Grazie al giroscopio ed all'accelerometro con range programmabile, l'MPU-9150 è adatto sia per applicazioni ad alta che a bassa frequenza. I range, vanno da  $\pm 250^\circ/\text{sec}$  a  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$  per il giroscopio e da  $\pm 2g$  a  $\pm 16g$  per l'accelerometro.

Il magnetometro, invece, mantiene un range fisso di  $\pm 1200\mu\text{T}$ . La comunicazione tra tutti i registri del dispositivo è regolata dal protocollo I<sup>2</sup>C a 400KHz.

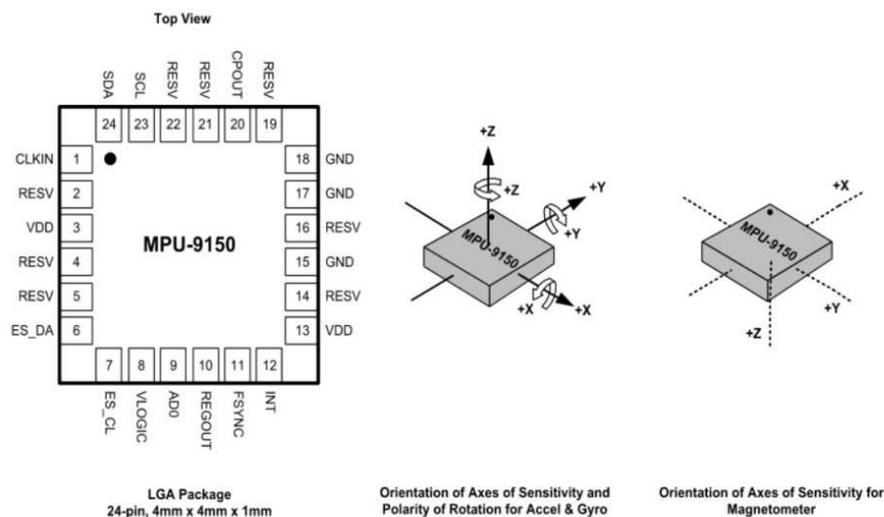


Fig. 3.5 – Packaging e pin-out del sensore elettro-meccanico MPU-9150 della InvenSense

### 3.1.2.2 Microprocessore Cortex-M3

Il Cortex-M3, sviluppato dalla ARM Holdings, è un microcontrollore a 32-bit con una frequenza di lavoro nominale a 72Mhz. Si tratta di un microprocessore sviluppato per soluzioni low-power, economiche e per applicazioni in-real-time data. La memoria si basa sull'architettura Harvard (control unit collegata con bus indipendenti per ALU, Instruction memory, Data memory ed I/O), mentre quella ARM proprietaria è identificata dalla versione ARMv7E.

In generale, i produttori di dispositivi integrati, ricevono lo schematico di processori ARM in Register Transfer Level (RTL). Grazie a ciò, i produttori sono in grado di ottimizzare ed espandere questi microprocessori a livello di architettura. Ciò che caratterizza maggiormente la famiglia Cortex-Mx sono, la presenza di un timer SysTick (Timer a 24-bit per la gestione di interrupt di vario tipo), Bit-banding (fornisce la possibilità di mappare un'intera word di memoria in un singolo bit nella regione bit-band) e di Memory Protection Unit (fornisce un livello di protezione aggiuntivo per l'accesso a regioni di memoria prioritarie).

### 3.1.3 Lo Smartphone Samsung S4 Mini

Il *Samsung*<sup>®</sup> S4 mini è uno smartphone che adotta un sistema operativo *Android*<sup>®</sup> di fascia media con buone prestazioni. Le funzioni offerte sono in linea con quelle presenti su tutti i dispositivi più avanzati, a partire dalla connettività Wi-Fi e dal GPS. Il trasferimento dati e la navigazione internet sono al top di gamma per gli standard attuali grazie al modulo LTE 4G. Il display è touchscreen da 4.3" con risoluzione 960x540 pixel. Dispone dei sensori, tra gli altri integrati, richiesti per lo scopo di questa tesi, ossia accelerometro e giroscopio [10].



Fig. 3.6 – Frontale del Samsung S4 mini

## 3.2 Test condotti sui sensori

Le IMU *Cometa* ed *EXLs3*, presentate nel paragrafo precedente, e lo smartphone *Samsung S4 mini*, sono stati sottoposti alla procedura di calibrazione e ne è stata quindi valutata la ripertibilità e sono state confrontate le prestazioni dei sensori prima e dopo la procedura di calibrazione.

Si sono condotti test diversificati per ogni sensore, in particolare:

- I sensori **Cometa**, calibrati con il “*Six position calibration method*”, sono stati oggetto di misure di ripertibilità, tre prove consecutive per tre sensori inerziali, per verificare quanto il posizionamento del sensore, la movimentazione del braccio e l’algoritmo di calibrazione siano ripetibili.
- I sensori **EXLs3** sono stati calibrati con il “*Six position calibration method*” e con una procedura che è stata definita “*Eleven position Calibration Method*” che prevede la calibrazione della IMU, utilizzando non solo i dati acquisiti nelle sei posizioni canoniche del “*Six position calibration method*”, ma in ulteriori cinque posizioni in cui il sensore si trova inclinato di 45°. Questo al fine di verificare se, acquisendo più posizioni del segnale accelerometrico, è possibile ottenere una calibrazione più accurata.

I test per la calibrazione del giroscopio, su entrambi i sensori, sono stati svolti ad una velocità di rotazione di 583rpm, corrispondenti a 250°/s.

Per ciò che riguarda lo smartphone utilizzato:

- Il **Samsung S4 mini** è stato calibrato con le due tecniche presentate per i sensori EXLs3, ossia “*Six position calibration method*” ed “*Eleven position Calibration Method*” e, per ciò che riguarda il giroscopio, si sono svolte due calibrazioni, a velocità di rotazioni differenti, di 583rpm ed 1166rpm, corrispondenti a 250°/s e 500°/s.

# Capitolo 4

## Risultati

### 4.1 Risultati Ottenuti

Nei paragrafi di questo capitolo vengono presentati i risultati di calibrazione ottenuti, per i sensori *Cometa* ed *EXLs3* e per lo smartphone *Samsung S4 mini*. In particolare, per i sensori *Cometa* vengono presentati i dati di calibrazione, comprensivi di matrice di calibrazione e vettore degli offset ed, in seguito, i test di ripetibilità condotti. Per ciò che riguarda le IMU *EXLs3*, vengono riportate le tabelle, comprensive di matrice di calibrazione e del vettore degli offset, per le due tecniche di calibrazione dell'accelerometro a cui sono stati sottoposti i sensori. Per entrambi i sensori vengono poi riportate, nella forma medesima dell'accelerometro, i dati di calibrazione del giroscopio. Infine, dello smartphone *Samsung S4 mini*, vengono riportati i dati per i due metodi di calibrazione dell'accelerometro e per le due velocità di calibrazione del giroscopio.

Ai risultati tabellari vengono affiancati dei grafici di *Errorbar* e delle tabelle che riportano l'errore percentuale. Nelle *Errorbar* vengono evidenziate la media e la deviazione standard ottenute dai vari test eseguiti, sia tra sensori della stessa famiglia che tra sensori diversi.

Medie, deviazione standard ed errori sono stati ricavati a partire dai dati grezzi (RAW) successivamente mediati, per avere un solo numero per ciascun insieme di dati. Per ottenere gli errori percentuali, è stata calcolata la differenza tra i dati RAW mediati e la matrice ideale di riferimento e moltiplicato la matrice risultante per 100.

## 4.1.1 Risultati Sensori Cometa

### *Cometa Wavetrack IMU 1*

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,997621</b>	-0,000366042	-0,00110608
0,00123065	<b>0,997497</b>	-0,00281155
0,00343807	0,0134181	<b>1,00077</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,000994	-0,001582	-0,011036
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,00705</b>	-0,00147682	-0,00412874
0,00112402	<b>1,00957</b>	-0,00052058
0,000534557	0,0116648	<b>1,00704</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

0,002126	0,005952	-0,002528
----------	----------	-----------

### *Cometa Wavetrack IMU 2*

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998016</b>	-0,00601072	-0,0101925
0,00715418	<b>0,997036</b>	-0,00407781
0,00691601	0,00950233	<b>0,995691</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,002052	-0,002238	-0,004779
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,987059</b>	-0,00654728	-0,0125483
0,0056526	<b>0,990692</b>	-0,00370418
0,00535962	0,0113674	<b>0,982809</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

-0,000093	0,001373	-0,002961
-----------	----------	-----------

### ***Cometa Wavetrack IMU 3***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998307</b>	-0,00367916	-0,0138712
0,00233663	<b>0,997338</b>	-0,0131209
0,0143039	0,0188416	<b>0,997673</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001574	-0,002253	-0,008078
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,995628</b>	0,00265049	-0,0126987
-0,00284229	<b>0,984252</b>	-0,0138322
0,0127029	0,0231535	<b>0,98434</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

0,000597	0,002441	-0,002171
----------	----------	-----------

### ***Cometa Wavetrack IMU 4***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,06929</b>	0,053191	0,0479933
0,00341406	<b>0,994649</b>	-0,0168521
0,0109995	0,0162844	<b>0,993444</b>

Accelerometro (OFFSET):

0,002312	0,00064	-0,007465
----------	---------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,97616</b>	-0,0221214	-0,027794
0,0128764	<b>0,995842</b>	-0,0090100
0,00897173	0,0179394	<b>0,988434</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

-0,000028	-0,000306	-0,002347
-----------	-----------	-----------

### ***Cometa Wavetrack IMU 5***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,999236</b>	-0,00120938	0,00118085
-0,000771287	<b>0,997901</b>	-0,00950972
0,021584	0,0166897	<b>0,993933</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001483	-0,002478	-0,007762
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,984728</b>	-0,00189893	0,00901319
0,00120574	<b>0,982646</b>	-0,0119171
0,0195393	0,0188045	<b>0,983174</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

-0,001528	0,00041	-0,005461
-----------	---------	-----------

### **Cometa Wavetrack IMU 6**

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998915</b>	-0,010149	-0,0222355
0,0096068	<b>0,997748</b>	-0,0168707
0,023993	0,0228304	<b>0,998298</b>

Accelerometro (OFFSET):

0,000894	0,001255	-0,011454
----------	----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,987578</b>	-0,0130012	-0,0210202
0,00960347	<b>0,984383</b>	-0,0115555
0,0230276	0,0228284	<b>0,984009</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

0,001071	-0,00089	-0,001553
----------	----------	-----------

### **Cometa Wavetrack IMU 7**

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998063</b>	-0,0111565	-0,00689525
0,0125923	<b>0,998788</b>	0,00696601
0,00620728	0,00284253	<b>0,99595</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001204	-0,001025	-0,008581
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,989495</b>	-0,0109902	-0,00813051
0,0115526	<b>0,984758</b>	0,00630151
0,00564805	0,00019480	<b>0,985166</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

0,000161	-0,000262	-0,001325
----------	-----------	-----------

***Cometa Wavetrack IMU 8***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998955</b>	-0,0182725	-0,00971107
0,0197842	<b>0,99859</b>	0,00507763
0,0158103	0,000323066	<b>0,996363</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001263	-0,000745	-0,007472
-----------	-----------	-----------

Giroscopio 250°/s (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,985972</b>	-0,0109902	-0,0200197
0,0125596	<b>0,979965</b>	0,0105284
0,0231089	0,000329335	<b>0,982728</b>

Giroscopio 250°/s (OFFSET):

0,002389	-0,002713	-0,000896
----------	-----------	-----------

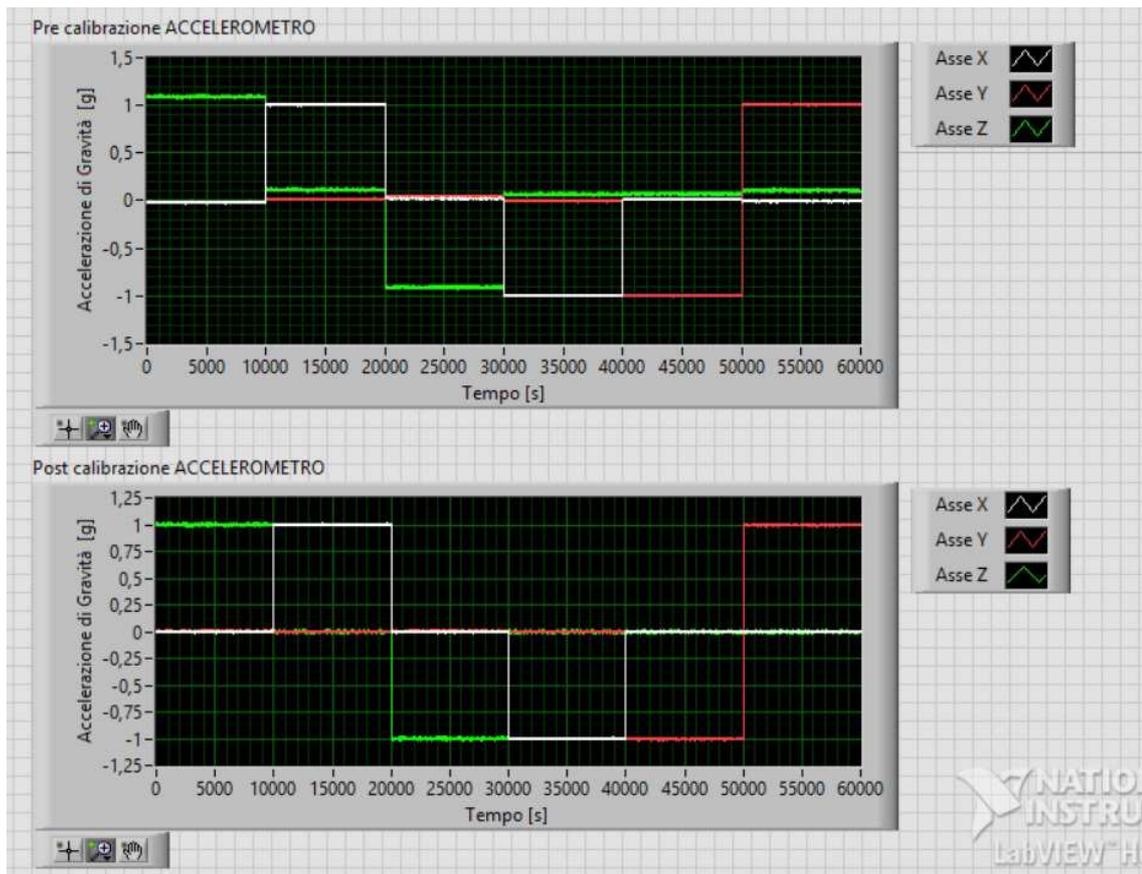


Fig. 4.1 – Grafici con il confronto tra i dati prima della calibrazione e dopo la calibrazione, in questo caso riferiti all'accelerometro, per il sensore Cometa 6.

## 4.1.2 Risultati Sensori Cometa – Misure di ripetibilità

### *Cometa Wavetrack IMU 6*

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,99884</b>	-0,00997466	-0,0227883
0,00990347	<b>0,998745</b>	-0,0167069
0,0227185	0,0174794	<b>0,997879</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,00012216	0,000600359	0,000480594
0,000428411	0,00162358	0,000310469
0,00121271	0,0146935	0,000867351

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (OFFSET):

MEDIA:

-0,000902	-0,000911	-0,011403
-----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000140	0,000874	0,000046
----------	----------	----------

## **Cometa Wavetrack IMU 6**

Confronto tra le 3 prove - Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,987342</b>	-0,0121321	-0,0211941
0,0096607	<b>0,983567</b>	-0,0134641
0,0226453	0,0171363	<b>0,983438</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000211365	0,000922113	0,000568777
0,000005255	0,000731844	0,00206445
0,000543807	0,0148718	0,000520843

Confronto tra le 3 prove - Giroscopio (OFFSET):

MEDIA:

0,001021	-0,001243	-0,001474
----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000225	0,001085	0,000068
----------	----------	----------

## **Cometa Wavetrack IMU 7**

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,998175</b>	-0,0111967	-0,00765335
0,0115539	<b>0,998653</b>	-0,00696116
0,00831939	-0,00190722	<b>0,99757</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000009734	0,000198696	0,000665491
0,00141645	0,000132733	0,000213858
0,00185874	0,00133359	0,000362214

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (OFFSET):

MEDIA:

-0,001392	-0,001083	-0,008671
-----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000162	0,000049	0,000112
----------	----------	----------

### **Cometa Wavetrack IMU 7**

Confronto tra le 3 prove - Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,98483</b>	-0,0113492	-0,00885513
0,011533	<b>0,984399</b>	0,00634615
0,00693332	0,0000551195	<b>0,984806</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000111045	0,000459573	0,000877217
0,000001796	0,000424702	0,000858615
0,0011417	0,000432113	0,000388636

Confronto tra le 3 prove sensore Cometa\_7 Giroscopio (OFFSET):

MEDIA:

0,000264	-0,000039	-0,001195
----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000093	0,000257	0,000112
----------	----------	----------

### **Cometa Wavetrack IMU 8**

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,998457</b>	-0,0148584	-0,0102653
0,0147468	<b>0,998487</b>	0,00743892
0,0191135	-0,000136327	<b>0,996032</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000435648	0,00299813	0,0173071
0,00436262	0,00000938	0,00214926
0,00298199	0,00153481	0,000320985

Confronto tra le 3 prove - Accelerometro (OFFSET):

MEDIA:

-0,001497	-0,000783	-0,008372
-----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000206	0,000080	0,000779
----------	----------	----------

## **Cometa Wavetrack IMU 8**

Confronto tra le 3 prove - Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

MEDIA:

<b>0,98608</b>	-0,0150807	-0,0188782
0,014248	<b>0,979981</b>	0,00906048
0,0203983	-0,000529137	<b>0,982806</b>

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000116155	0,00231012	0,00125785
0,00297229	0,00030861	0,00209947
0,00316901	0,000820888	0,000166531

Confronto tra le 3 prove - Giroscopio (OFFSET):

MEDIA:

0,002345	-0,002882	-0,000982
----------	-----------	-----------

DEVIAZIONE STANDARD:

0,000309	0,000171	0,0000907
----------	----------	-----------

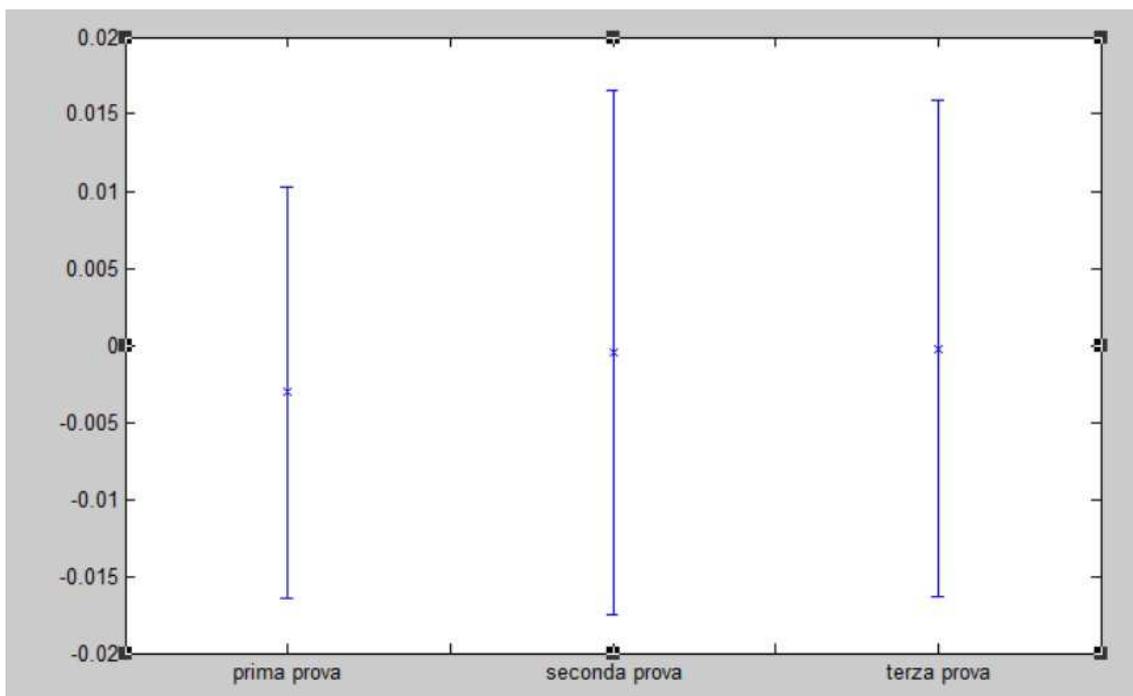


Fig. 4.2 - Errorbar con media e deviazione standard dell'errore percentuale delle prove di ripetibilità del sensore *Cometa 6* per l'accelerometro.

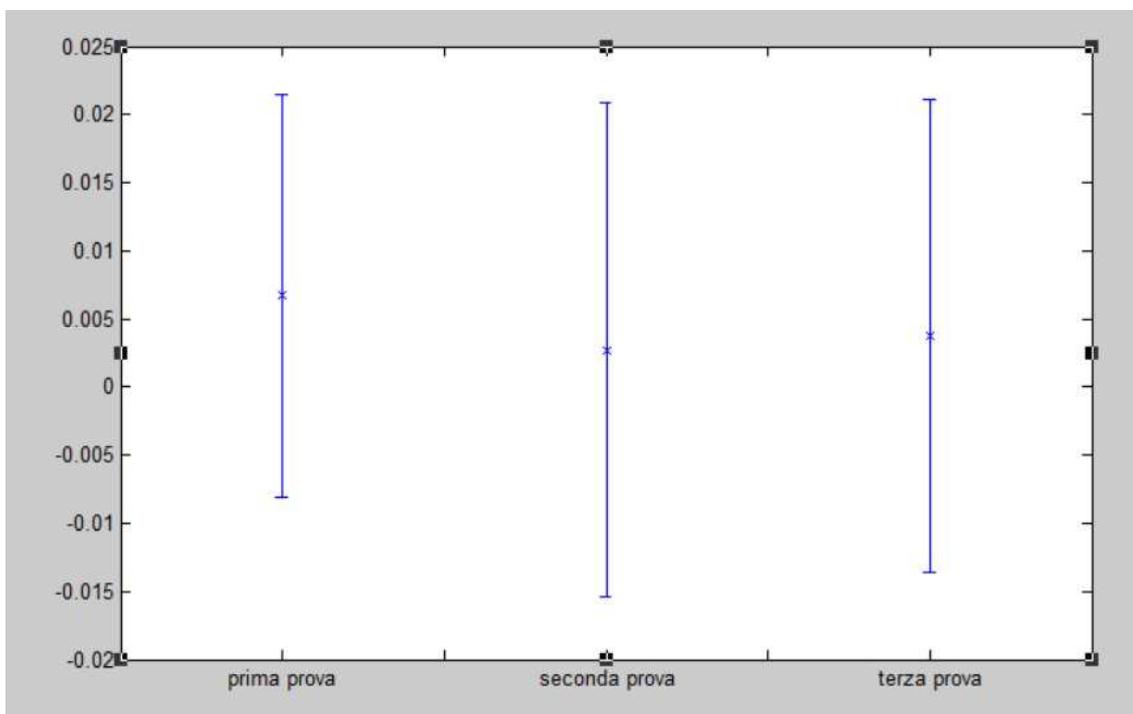


Fig. 4.3 - Errorbar con media e deviazione standard dell'errore percentuale delle prove di ripetibilità del sensore *Cometa 6* per il giroscopio.

### 4.1.3 Risultati Sensori EXLs3

#### ***EXLs3 - 0070 calibrazione accelerometro - Six Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,00515</b>	0,00691469	0,00421064
-0,00742647	<b>1,00072</b>	0,00080973
-0,00425486	-0,0215535	<b>1,00355</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,005383	-0,002542	0,001773
-----------	-----------	----------

#### ***EXLs3 - 0070 calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,990833</b>	-0,00670394	0,0143585
-0,0323533	<b>0,992829</b>	-0,000415977
0,00818567	-0,0102712	<b>0,982759</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,0540793	0,0227861	0,010117
-----------	-----------	----------

***EXLs3 - 0070 calibrazione accelerometro - Eleven Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,997898</b>	-0,00007784	-0,011389
0,0010814	<b>0,998624</b>	-0,023450
-0,043327	-0,00256279	<b>1,00297</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,003241	-0,000003	-0,004678
-----------	-----------	-----------

***EXLs3 - 0070 calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,00332</b>	-0,00670394	0,0143585
-0,0323533	<b>0,997402</b>	-0,000415977
0,00818567	-0,0102712	<b>0,998276</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,0547931	0,0287261	0,015211
-----------	-----------	----------

***EXLs3 - 0072 calibrazione accelerometro - Six Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,00523</b>	0,00686793	0,0045163
-0,00731826	<b>1,00244</b>	0,0511864
-0,00435307	-0,0212043	<b>1,00075</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,005296	-0,002871	-0,006662
-----------	-----------	-----------

***EXLs3 - 0072 calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,981485</b>	-0,0319572	0,00719016
-0,0320424	<b>0,992008</b>	-0,00017846
-0,00808679	-0,0104835	<b>0,98269</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,0340284	0,0119764	0,000369509
-----------	-----------	-------------

***EXLs3 - 0072 calibrazione accelerometro - Eleven Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998998</b>	-0,000075784	-0,0166848
0-0,0026449	<b>0,998713</b>	-0,030465
-0,0301984	-0,0139524	<b>1,00027</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,003216	-0,0000305	-0,004871
-----------	------------	-----------

***EXLs3 - 0072 calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,982443</b>	-0,0319572	0,00719016
-0,0320424	<b>0,989052</b>	-0,00017846
-0,00808679	-0,0104835	<b>0,987176</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,0440385	0,0219671	0,000340886
-----------	-----------	-------------

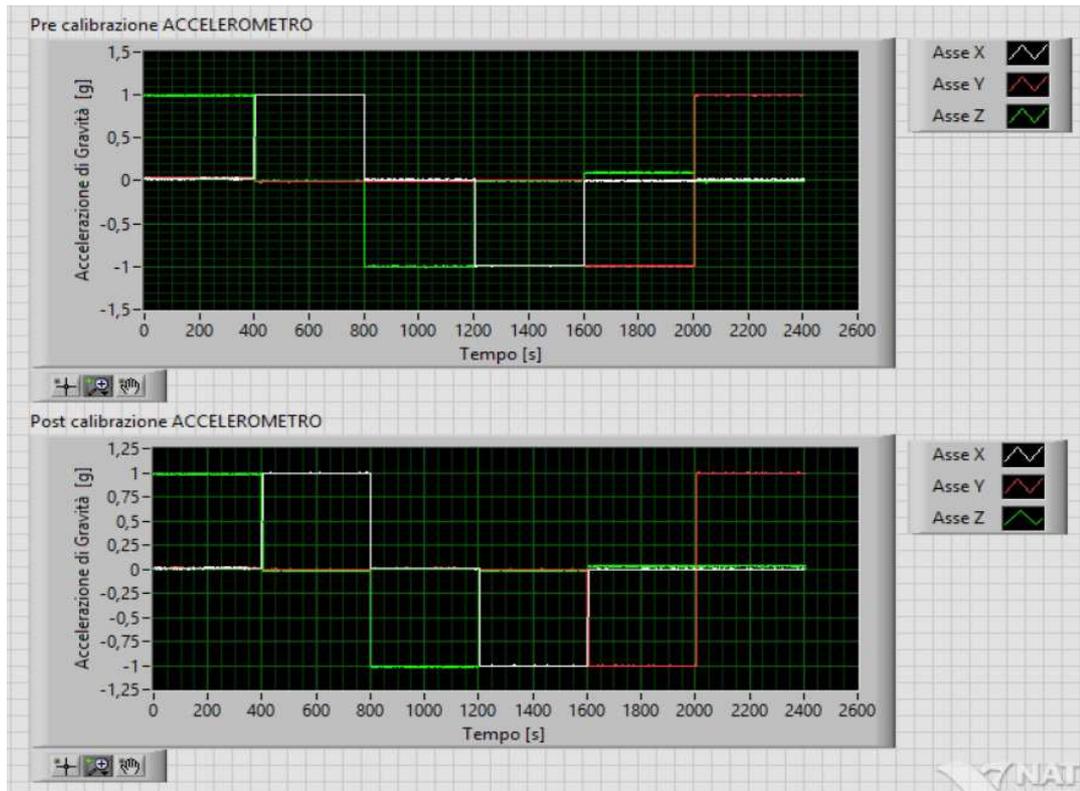


Fig. 4.4 – Grafici con il confronto tra i dati prima della calibrazione e dopo la calibrazione, in questo caso riferiti all’accelerometro, per il sensore EXLs3 - 0070.

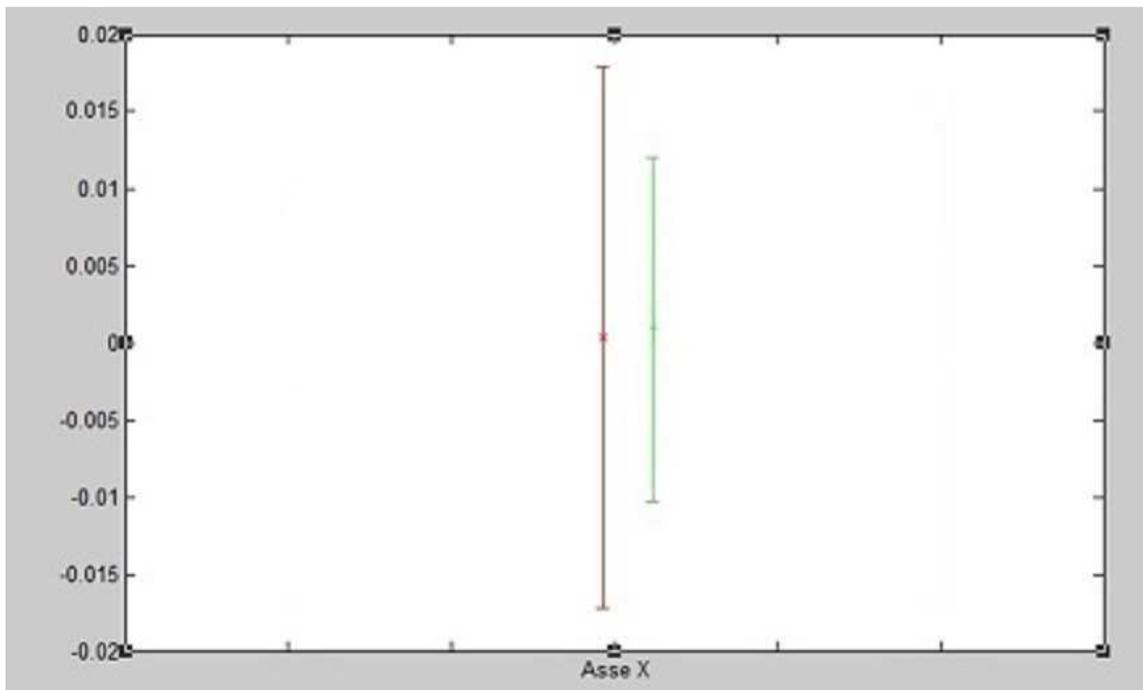


Fig. 4.5 – Errorbar dell’asse X del sensore EXLs3 - 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “Six Position Calibration Method”.

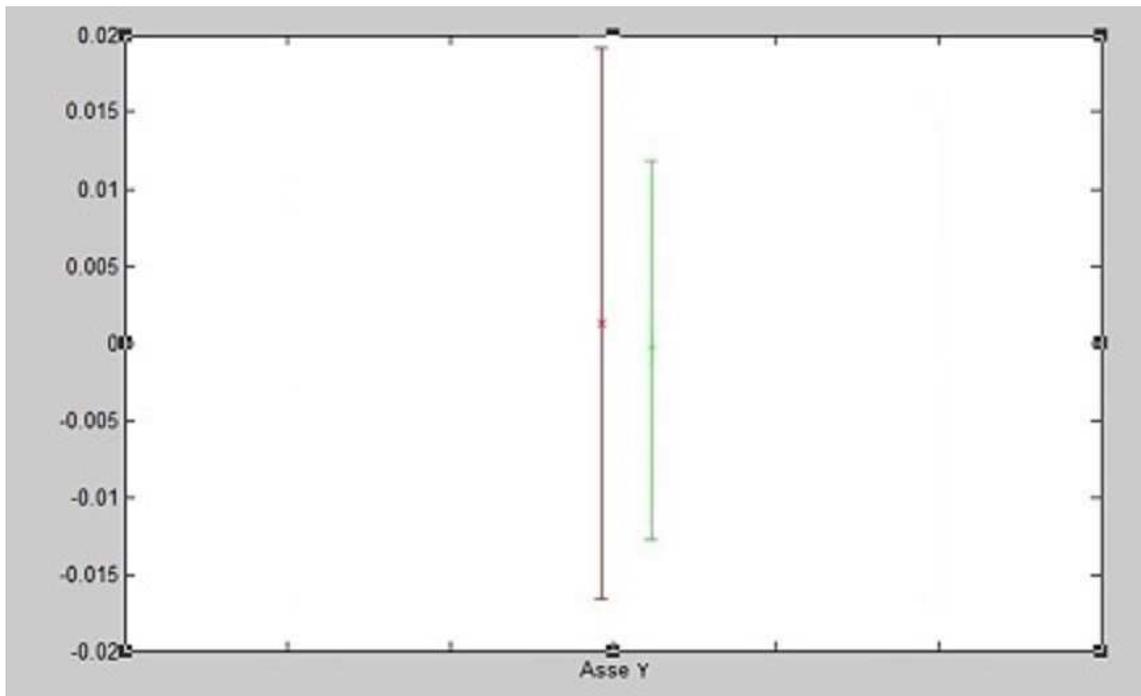


Fig. 4.6 – Errorbar dell’asse Y del sensore EXLs3 – 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “Six Position Calibration Method”.

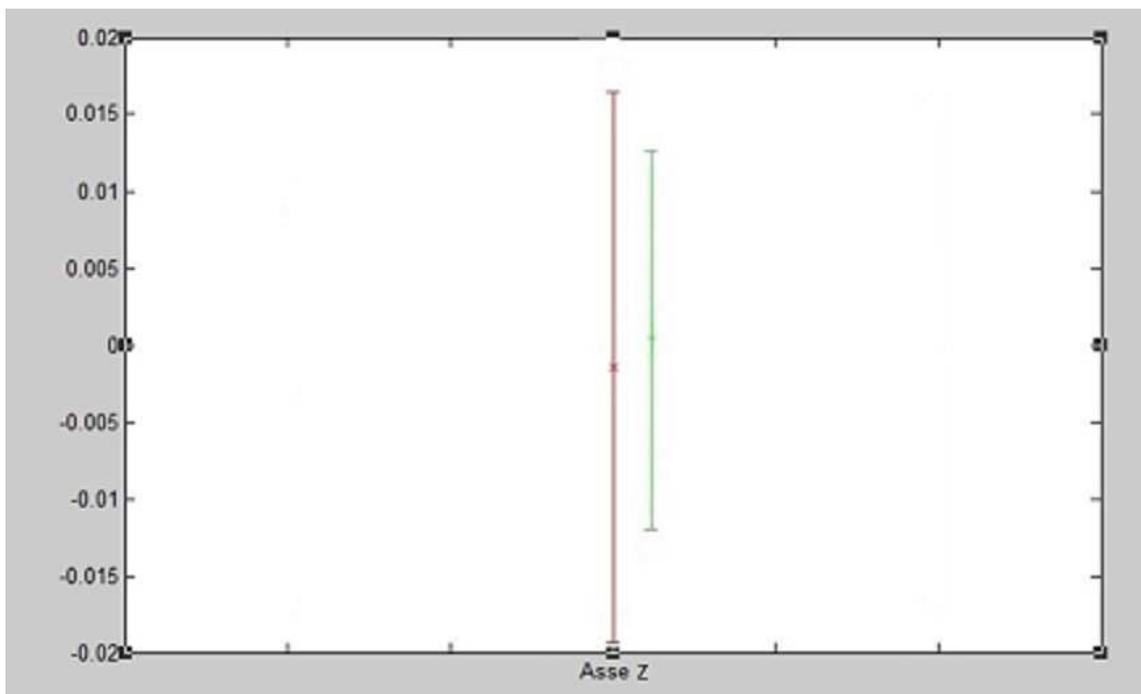


Fig. 4.7 – Errorbar dell’asse Z del sensore EXLs3 – 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “Six Position Calibration Method”.

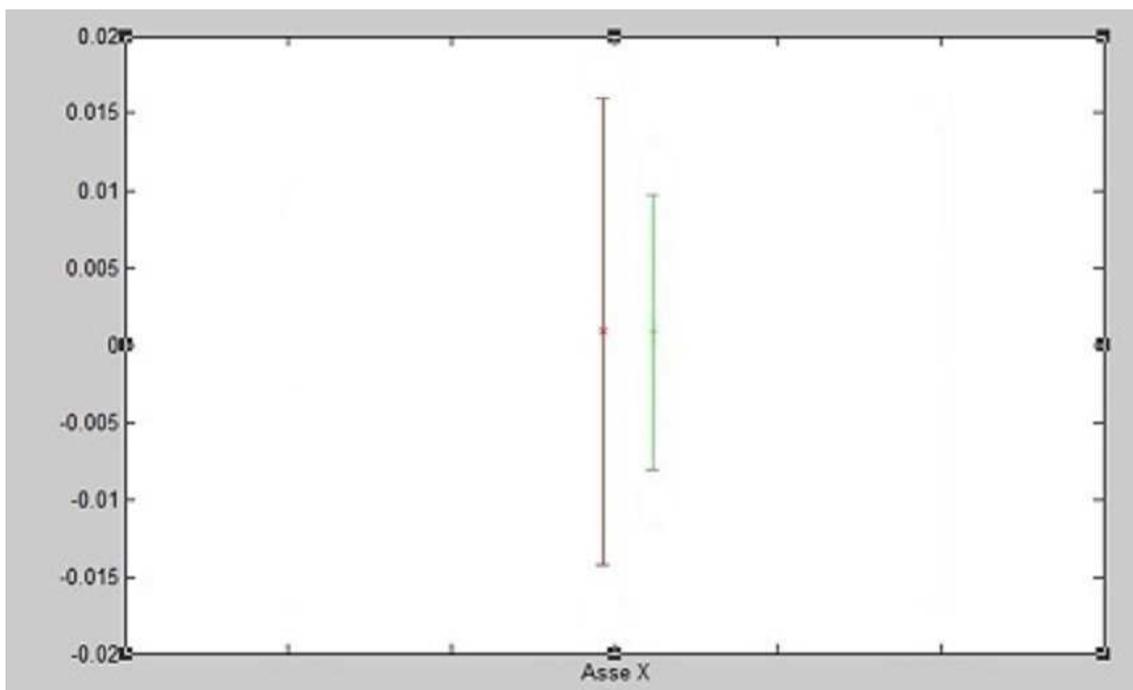


Fig. 4.8 – Errorbar dell’asse X del sensore EXLs3 – 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

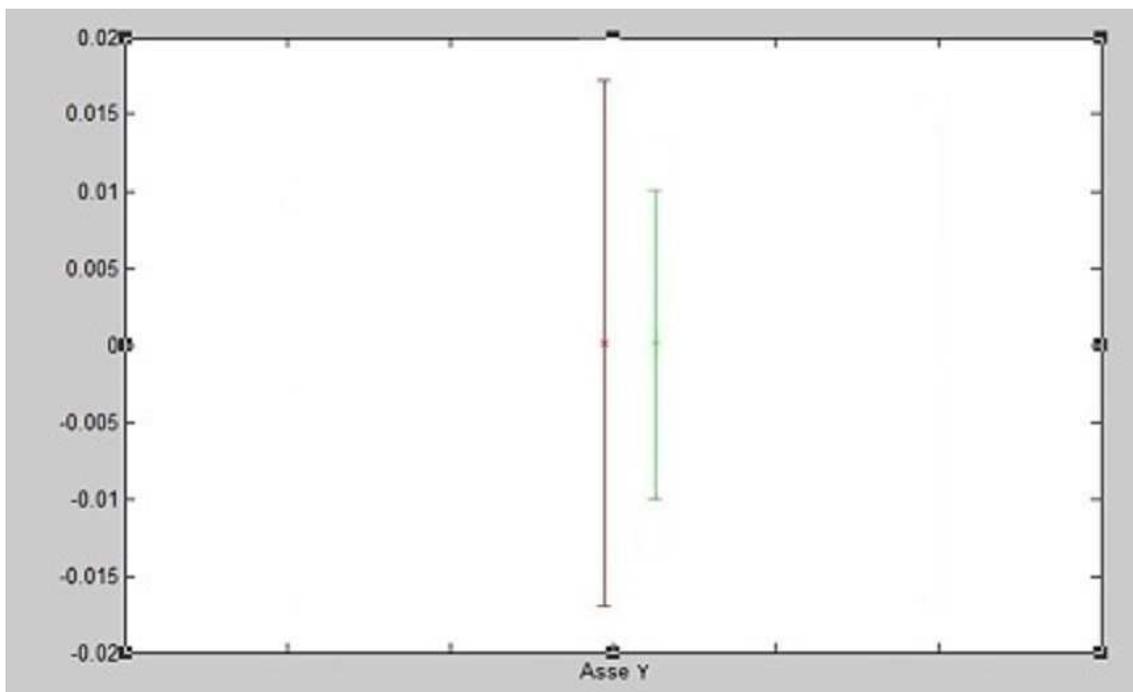


Fig. 4.9 – Errorbar dell’asse Y del sensore EXLs3 – 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

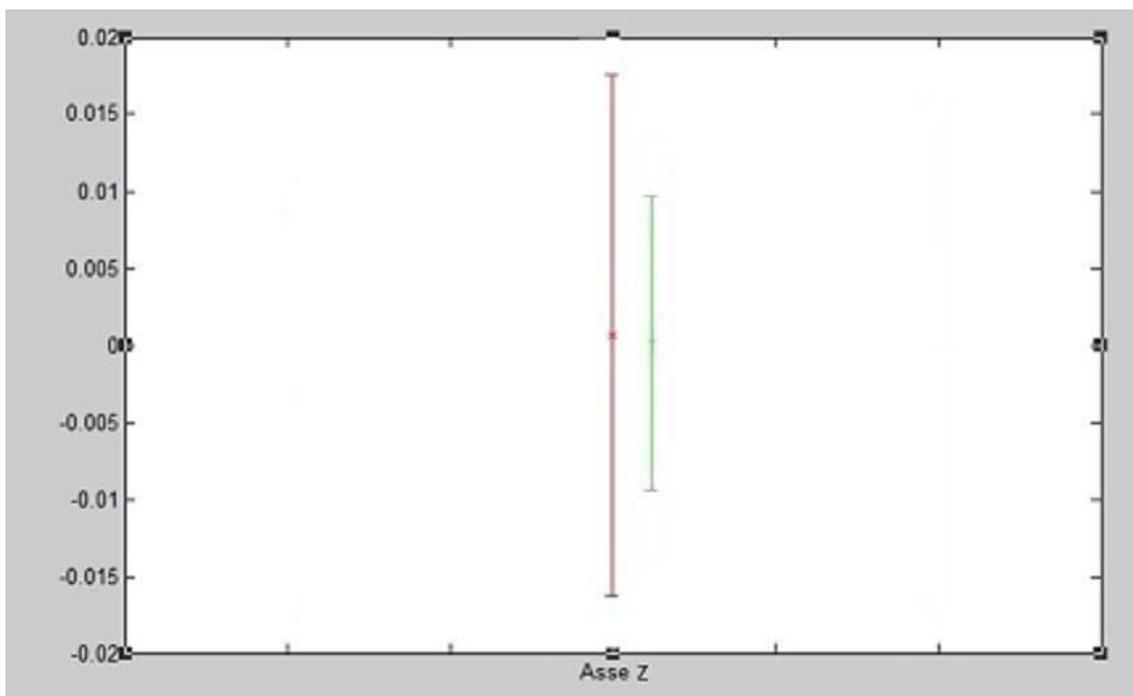


Fig. 4.10 – Errorbar dell’asse Z del sensore EXLs3 – 0070 in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

Di seguito vengono riportate le tabelle con il confronto degli errori percentuali tra la pre-calibrazione e la post-calibrazione dell’accelerometro, calcolati sul sensore EXLs3 - 0070, ottenuti con il metodo del “*Six Position Calibration Method*” e dell’ “*Eleven Position Calibration Method*”.

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
2,17792	1,88473	1,95433	1,57447	0,78446	0,40985
0,86444	0,59357	1,57994	1,41671	1,66737	1,20199
2,60901	1,85465	1,87809	1,55267	1,00804	0,64385
0,82466	0,61343	1,79844	1,34061	0,83067	0,57013
0,91522	0,71714	0,44566	0,17801	5,24766	4,45052
0,83133	0,69218	0,49922	0,12796	5,29788	4,40398

Tab. 4.1 – Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore EXLs3 - 0070 dell’accelerometro, stimato con il “*Six Position Calibration Method*”

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
3,00181	1,98855	3,08923	2,39834	0,41668	0,12276
0,96988	0,63687	0,48772	0,24894	1,77296	1,11342
0,12775	0,03607	1,26224	0,91204	1,51942	0,86165
0,84326	0,44899	0,87597	0,48908	0,44887	0,20849
2,65808	1,75002	1,01187	0,73291	0,37905	0,15056
0,15698	0,04854	2,34706	1,68133	0,51533	0,18666
1,74783	1,23446	1,33872	0,83726	0,60172	0,23801
1,01578	0,75038	2,27311	1,58049	2,75603	2,06741
0,03612	0,00174	1,18876	0,62713	3,28441	2,69074
0,95981	0,75523	0,59737	0,22846	4,12401	2,77665
0,85116	0,70029	0,48922	0,10015	4,26098	2,71785

Tab. 4.2 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore *EXLs3 - 0070* dell'accelerometro, stimato con il "*Eleven Position Calibration Method*".

#### 4.1.4 Risultati Smartphone Samsung S4 mini

##### ***S4 mini calibrazione accelerometro - Six Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,999282</b>	-0,00567121	-0,00496859
0,00707382	<b>0,998548</b>	0,0031691
0,0250744	-0,00404582	<b>1,00203</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001633	0,012222	-0,024992
-----------	----------	-----------

##### ***S4 mini calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,998145</b>	-0,0319572	0,00719016
-0,0320424	<b>0,999108</b>	-0,00017846
-0,00808679	-0,0104835	<b>0,999599</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,048826	-0,094771	-0,000309
----------	-----------	-----------

***S4 mini calibrazione accelerometro - Eleven Position Calibration Method***

Accelerometro (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,993972</b>	-0,00567121	-0,00496859
0,00707382	<b>0,995045</b>	0,0031691
0,0250744	-0,00404582	<b>0,995549</b>

Accelerometro (OFFSET):

-0,001683	0,013437	-0,024959
-----------	----------	-----------

***S4mini calibrazione GIROSCOPIO a 250°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>0,984469</b>	-0,00700855	0,0029405
0,00724077	<b>0,989953</b>	0,00520039
0,0163152	-0,00393299	<b>0,981537</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,034232	-0,076377	-0,002216
----------	-----------	-----------

***S4mini calibrazione GIROSCOPIO a 500°/s***

Giroscopio (MATRICE DI CALIBRAZIONE):

<b>1,08263</b>	-0,00671319	-0,000513501
0,00604004	<b>1,00469</b>	0,00102399
-0,0397186	-0,00417019	<b>0,932087</b>

Giroscopio (OFFSET):

0,254748	-0,087628	0,204212
----------	-----------	----------

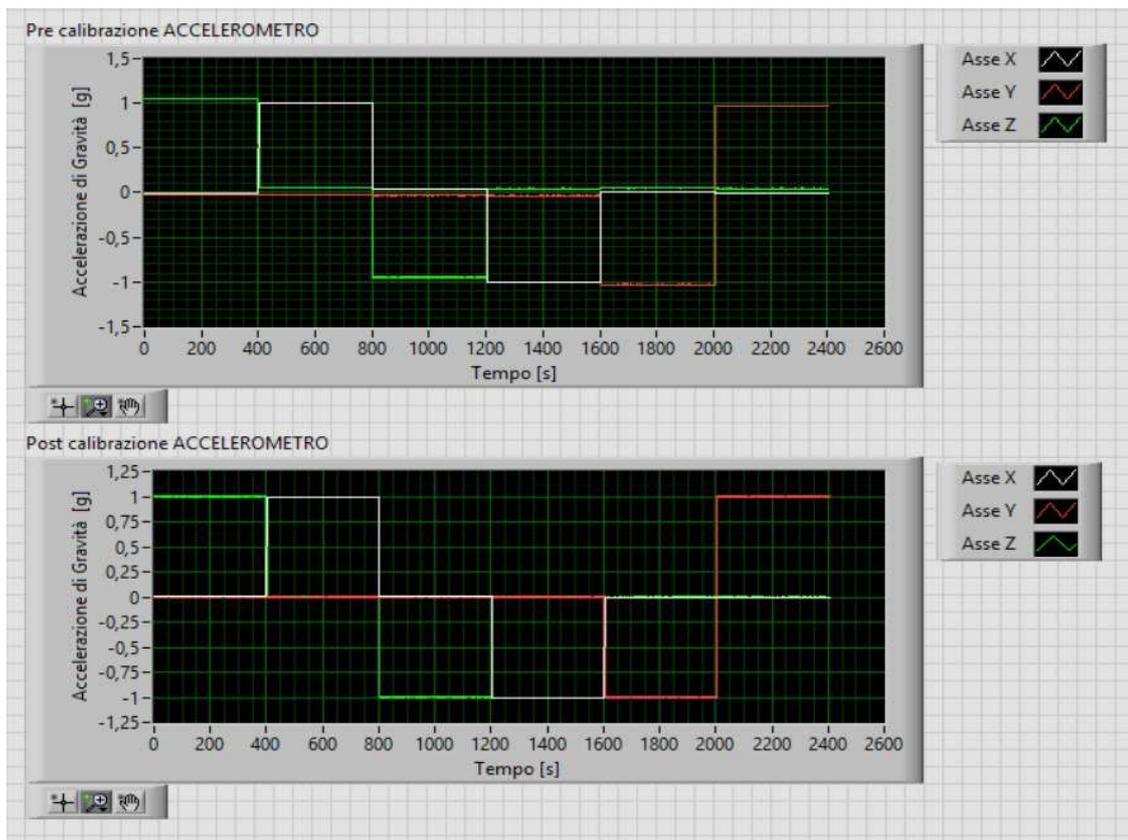


Fig. 4.11 – Grafici con il confronto tra i dati prima della calibrazione e dopo la calibrazione, in questo caso riferiti all'accelerometro, per lo smartphone *Samsung S4 mini*.

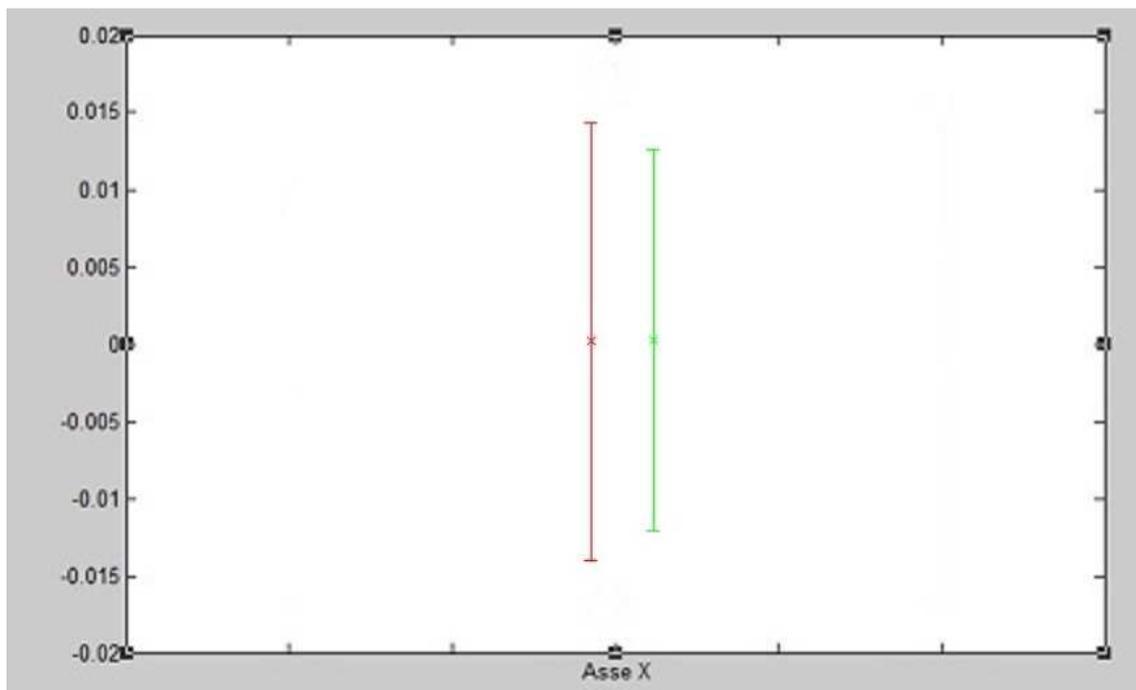


Fig. 4.12 – Errorbar dell’asse X del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Six Position Calibration Method*”.

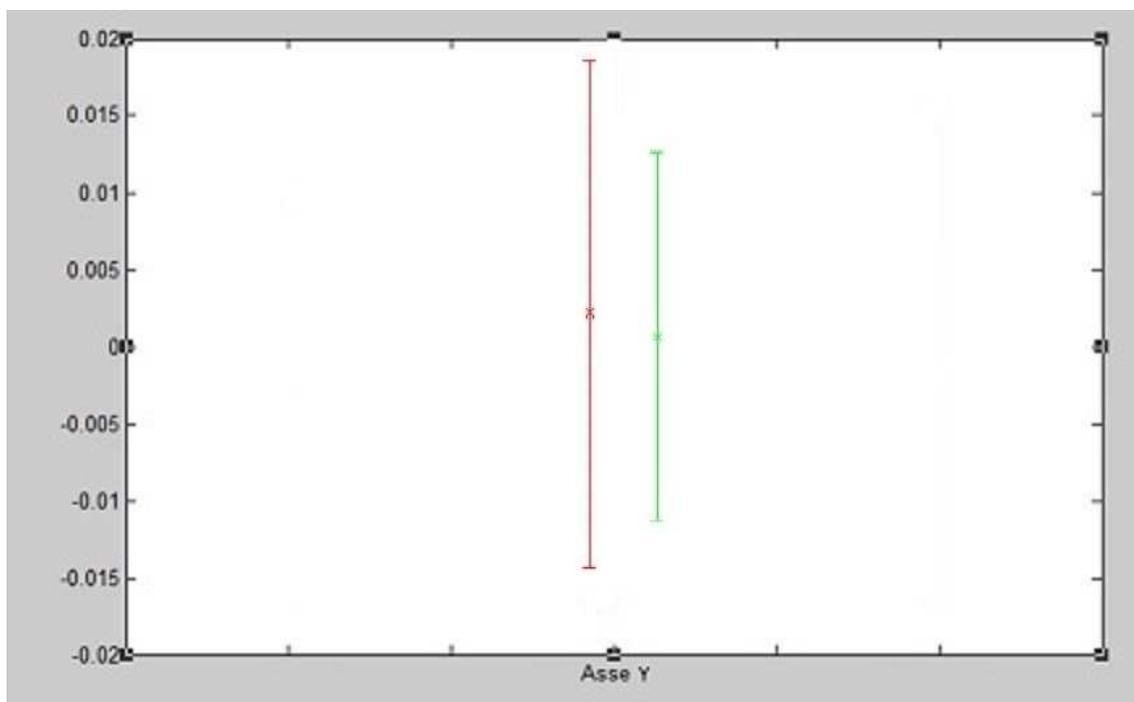


Fig. 4.13 – Errorbar dell’asse Y del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Six Position Calibration Method*”.

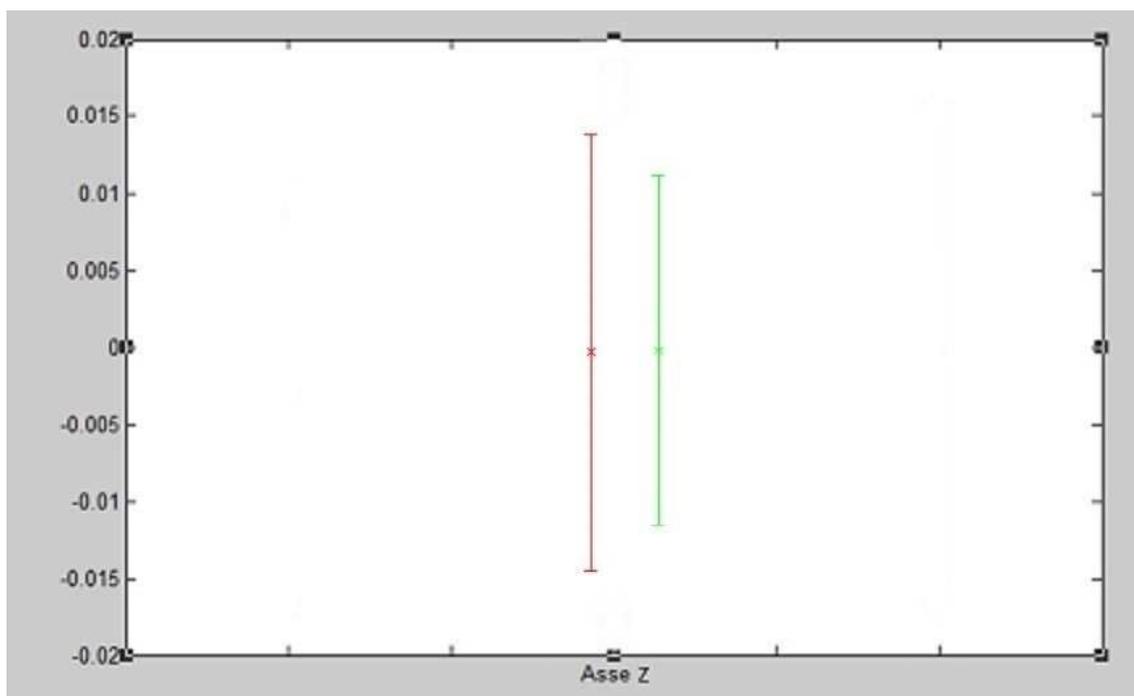


Fig. 4.14 – Errorbar dell’asse Z del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Six Position Calibration Method*”.

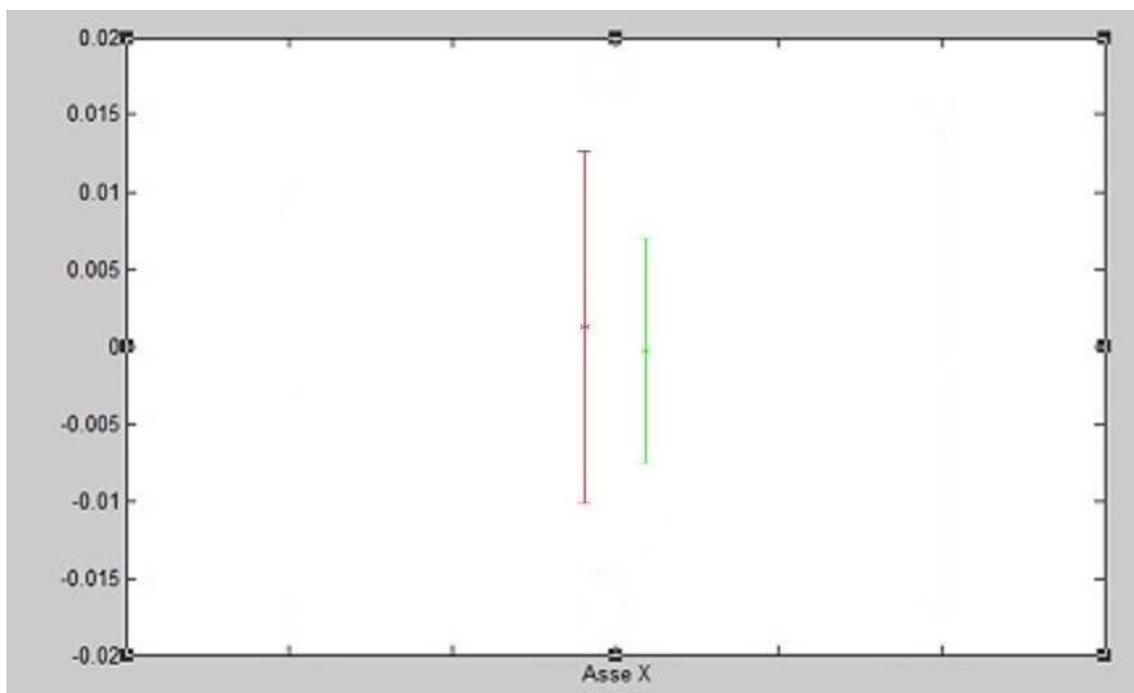


Fig. 4.15 – Errorbar dell’asse X del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

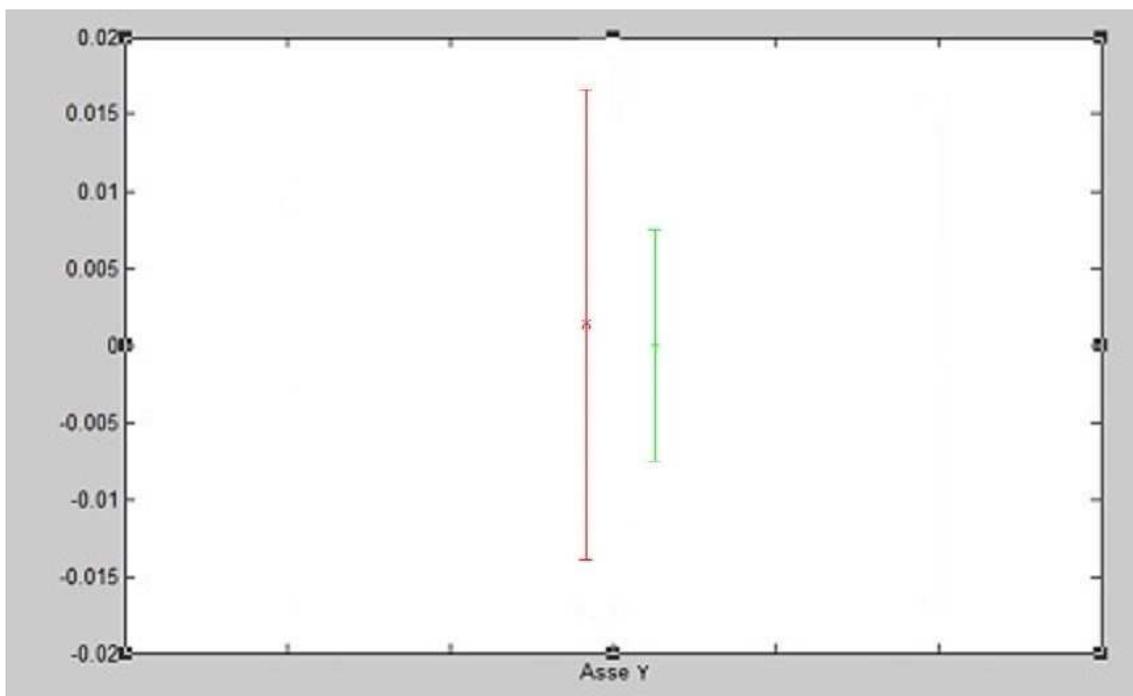


Fig. 4.16 – Errorbar dell’asse Y del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

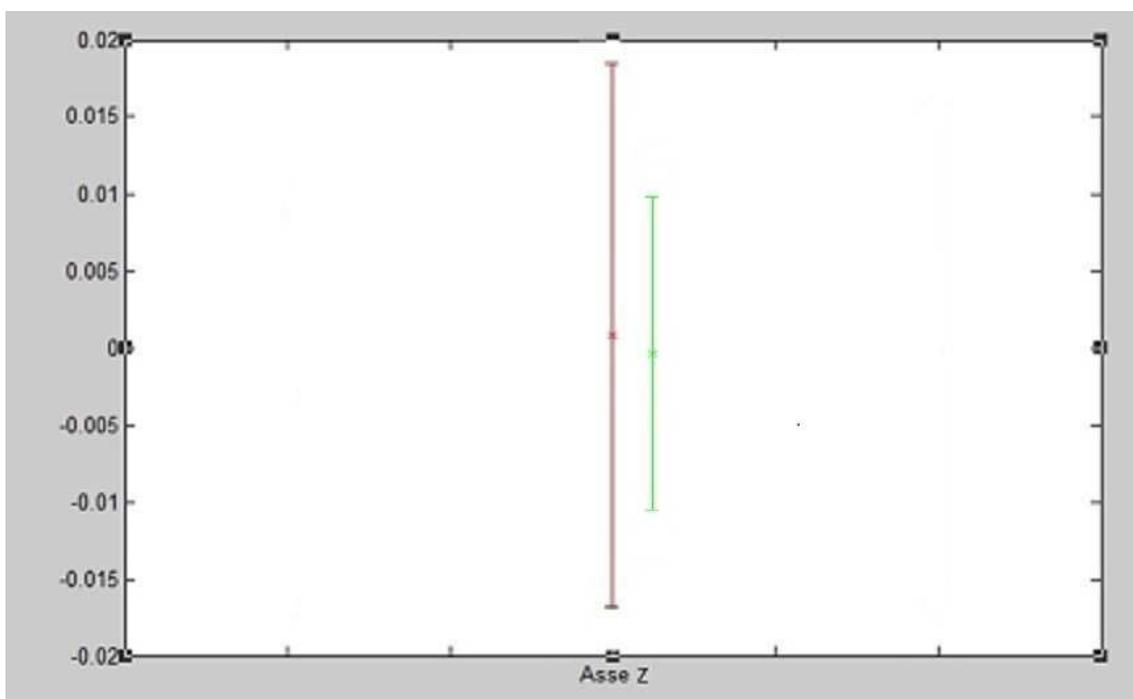


Fig. 4.17 – Errorbar dell’asse Z del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l’errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione dell’accelerometro, stimato con il “*Eleven Position Calibration Method*”.

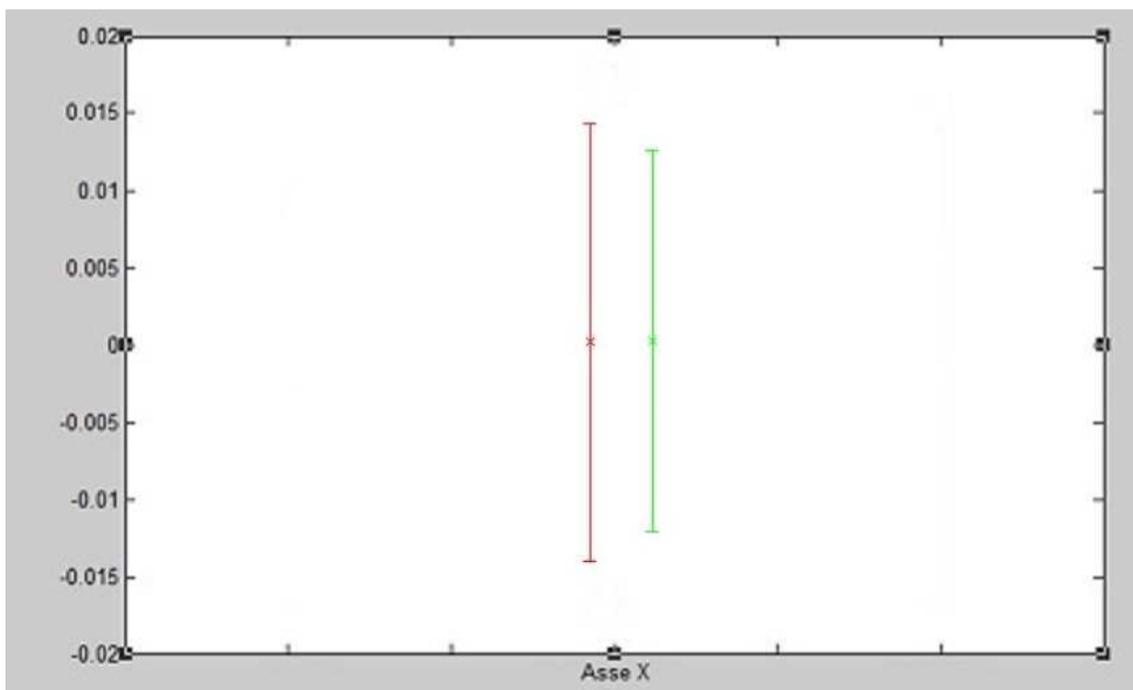


Fig. 4.18 - Errorbar dell'asse X del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $250^\circ/s$ .

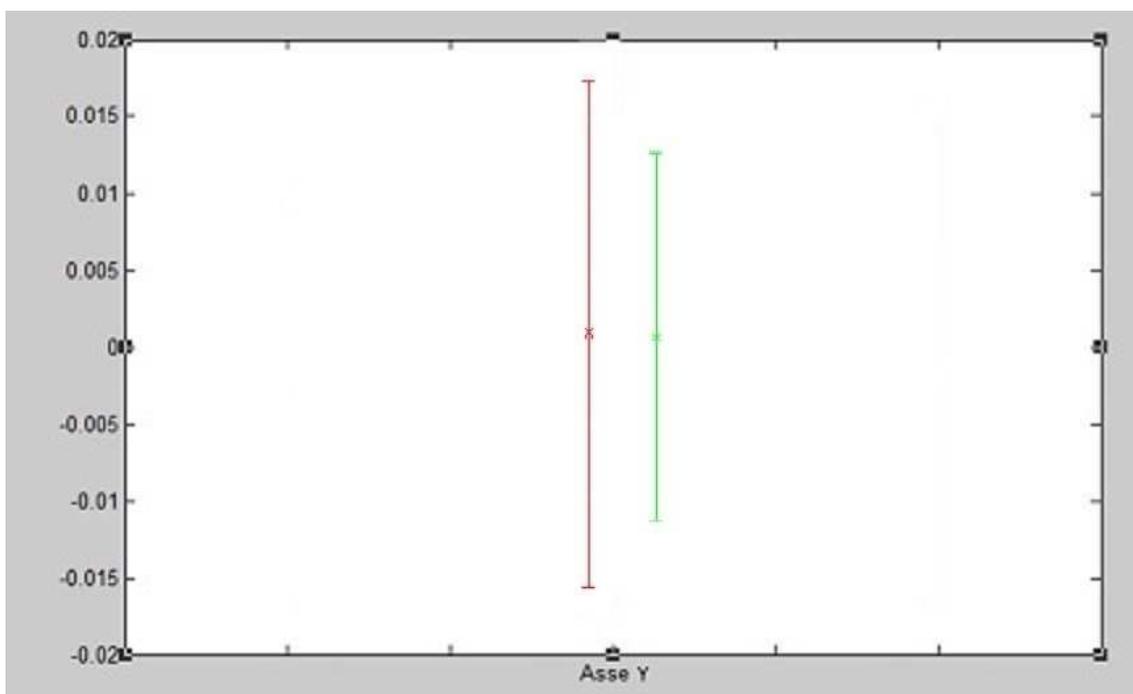


Fig. 4.19 - Errorbar dell'asse Y del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $250^\circ/s$ .

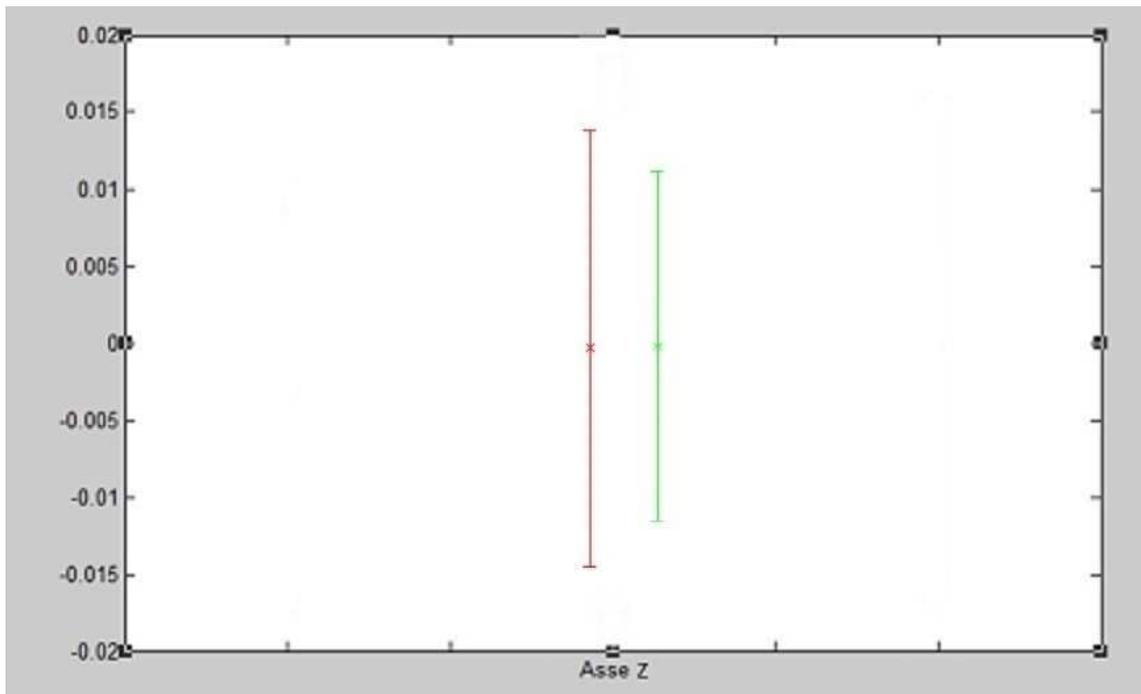


Fig. 4.20 - Errorbar dell'asse Z del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $250^\circ/s$ .

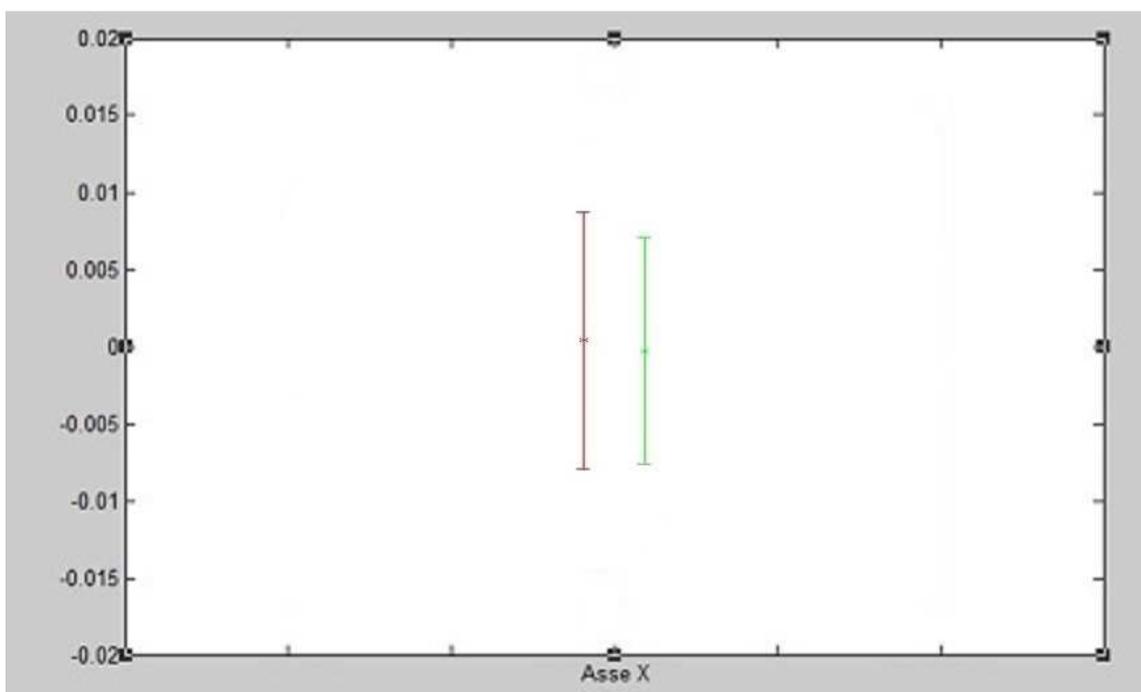


Fig. 4.21 - Errorbar dell'asse X del sensore *Samsung S4 mini* in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $500^\circ/s$ .

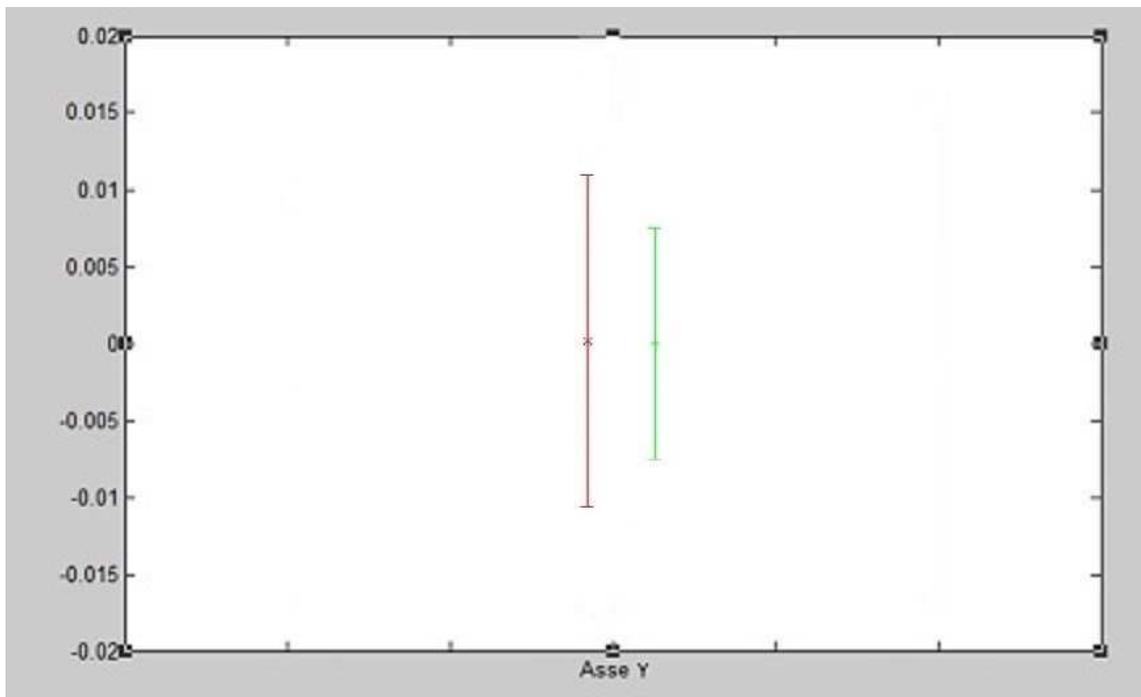


Fig. 4.22 - Errorbar dell'asse Y del sensore Samsung S4 mini in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $500^\circ/s$ .

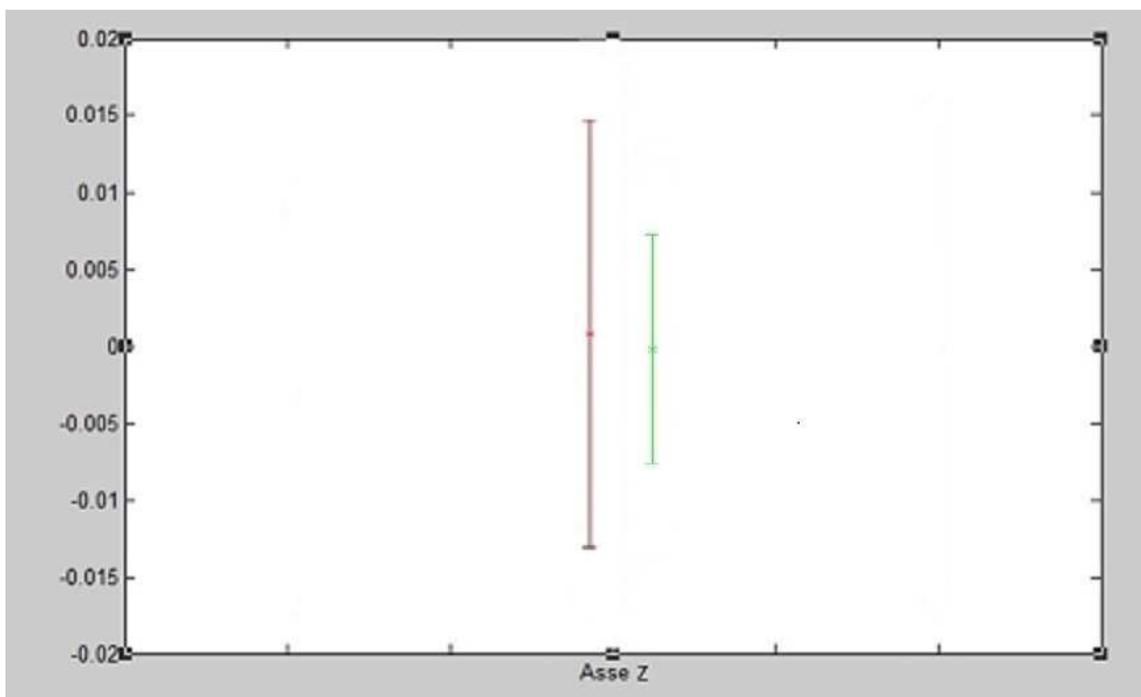


Fig. 4.23 - Errorbar dell'asse Z del sensore Samsung S4 mini in cui viene confrontato l'errore di pre (ROSSO) e post (VERDE) calibrazione del giroscopio, stimato a velocità di rotazione di  $500^\circ/s$ .

Di seguito vengono riportate le tabelle con il confronto degli errori percentuali tra la pre-calibrazione e la post-calibrazione dell'accelerometro, calcolati sullo smartphone *Samsung S4 mini*, ottenuti con il metodo del "Six Position Calibration Method" e dell' "Eleven Position Calibration Method".

Le stesse considerazioni per il giroscopio, con il confronto degli errori percentuali ottenuti a partire dalla misura stimata a velocità di rotazione di  $250^\circ/s$  e  $500^\circ/s$ .

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
1,95667	1,40504	3,17055	2,70732	5,08411	3,45787
0,24231	0,09809	4,02284	2,77831	4,95909	2,75884
1,84635	1,40881	3,98996	2,70725	4,07335	2,34591
0,28453	0,06516	3,68771	2,77739	5,22567	2,96745
0,45773	0,23545	4,00806	2,73173	4,86131	2,67993
0,58276	0,23637	4,27768	2,73178	4,86124	2,66129

Tab. 4.3 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* dell'accelerometro, stimato con il "Six Position Calibration Method"

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
1,45377	0,84116	3,56909	2,69395	4,40564	3,00672
1,56882	0,95673	3,44861	2,60148	5,15205	3,12906
1,02885	0,65635	4,28412	2,65886	4,73401	2,43552
0,86512	0,41243	3,65277	2,37322	3,69284	1,97636
2,45966	1,90764	3,95767	2,64462	5,08461	3,29957
0,49537	0,20972	3,11949	2,49801	5,71342	3,10655
0,89964	0,44537	3,76884	2,77034	4,96286	2,71233

0,76879	0,35684	4,48863	3,16198	5,30416	2,98774
0,41288	0,18348	3,86773	2,36767	4,79957	2,53668
1,01267	0,56986	2,97568	1,27071	5,22256	2,78454
0,68397	0,33342	4,00786	2,12984	4,85978	2,63108

Tab. 4.4 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* dell'accelerometro, stimato con il "Eleven Position Calibration Method".

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
4,47823	3,11872	2,88433	2,08152	2,26883	1,16723
1,96125	1,08651	3,11099	2,23262	1,16968	0,67335
0,44782	0,17496	3,52941	2,88305	1,93674	1,24386
1,98178	1,09206	2,75126	2,03344	3,12444	2,56538
5,22789	4,36753	3,32961	2,43172	1,25842	0,71167
3,68226	2,55879	3,94987	3,10286	0,19277	0,06439
1,13129	0,72853	4,07113	2,59219	0,86839	0,44559
1,97553	1,29048	2,55686	1,93828	0,76358	0,33216
1,56904	0,94821	3,87925	3,02511	1,37466	0,86947
2,38763	1,26108	3,88417	2,75807	1,95655	1,18441
1,47281	0,93437	2,92774	2,45123	0,57939	0,26288

Tab. 4.5 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* del giroscopio con velocità di rotazione a 250°/s.

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Calibrati	Raw	Calibrati
1,20784	0,56948	1,43688	0,83168	1,35771	0,91819

1,18837	0,61387	1,87912	1,50439	0,96745	0,51793
0,10982	0,07698	3,08566	2,13596	1,12379	0,62270
1,93854	1,00616	2,98964	2,03719	2,09552	1,66762
5,14679	3,90587	3,22789	2,50315	0,23174	0,09167
3,55827	2,02518	1,43728	0,92029	0,22368	0,01846
1,25056	0,76284	2,67549	2,00697	0,87451	0,42569
1,34128	0,83626	1,32177	0,62171	0,17346	0,05933
1,32159	0,65196	2,24768	1,73698	1,00647	0,78356
1,92738	1,00148	1,96783	1,55711	1,51069	1,00577
0,44821	0,14492	0,87553	0,49608	0,38964	0,15951

Tab. 4.6 – Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* del giroscopio con velocità di rotazione a 500°/s

#### 4.1.5 Risultati dei Confronti tra i Tre Sensori

Di seguito vengono riportate le tabelle con gli errori percentuali a confronto della pre-calibrazione e della post-calibrazione dell'accelerometro, calcolati sui sensori *Cometa* ed *EXLs3* e sullo smartphone *Samsung S4 mini*, ottenuti dalla stima della misura con il "Six Position Calibration Method". Inoltre vengono riportate le stesse tabelle d'errore percentuale per il giroscopio, ottenute stavolta dalla stima della misura a velocità di 250°/s.

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
0,44853	0,18339	1,43629	1,05634	0,52016	0,21259
0,15103	0,02768	0,95546	0,73835	0,40021	0,11981
0,45919	0,18448	1,62973	1,06322	0,52186	0,21396
0,16384	0,02656	0,95338	0,73303	0,39855	0,11867
0,42127	0,15947	0,81947	0,34178	0,21875	0,09747
0,42082	0,15415	0,77993	0,30639	0,21136	0,09059

Tab. 4.7 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore *Cometa 6* dell'accelerometro, stimato con il "Six Position Calibration Method".

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
1,25447	0,82544	1,98632	1,03244	2,76525	1,57312
0,86328	0,46569	1,32775	0,61636	2,55804	1,62569
1,10363	0,79537	1,96355	0,99784	1,99444	1,28918
0,82184	0,44587	1,28917	0,59148	2,54669	1,65576
0,75401	0,34218	0,77538	0,39555	3,89904	3,05461
0,77918	0,36706	0,80966	0,42684	4,01737	3,08916

Tab. 4.8 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore *EXLs3 - 0070* dell'accelerometro, stimato con il "Six Position Calibration Method".

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
1,98956	1,04191	0,17553	0,03164	0,36128	0,11524
0,82366	0,46122	0,18275	0,03934	0,24806	0,00977
1,98332	1,04568	0,17548	0,03171	0,38404	0,11574
0,85912	0,42829	0,19529	0,03842	0,10298	0,00601
1,08634	0,59858	0,22781	0,00723	0,27003	0,10756
1,15871	0,59951	0,25446	0,07179	0,28114	0,10763

Tab. 4.9 - Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* dell'accelerometro, stimato con il "Six Position Calibration Method".

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
1,24677	0,58888	3,27883	2,65274	0,78855	0,37395
0,45902	0,20315	2,10755	1,48937	0,49901	0,22032
1,23974	0,58439	3,25905	2,64203	0,81563	0,36881
0,48721	0,22466	2,10664	1,48757	0,50231	0,23066
1,21006	0,56062	1,68434	1,11706	1,26998	0,58574
0,26774	0,10578	1,75539	1,20188	1,29755	0,59643

Tab. 4.10 – Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore *Cometa 6* del giroscopio con velocità di rotazione a 250°/s .

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
4,47823	3,54603	1,61156	0,93844	1,20208	0,62287
2,38377	1,65582	1,73552	1,16976	0,53662	0,27069
4,44129	3,53887	1,64905	0,93711	1,19774	0,62121
2,35001	1,61144	1,77854	1,15919	0,55237	0,26354
0,28688	0,12898	0,41156	0,13356	0,40118	0,10402
0,30176	0,13923	0,44708	0,14832	0,37467	0,10538

Tab. 4.11 – Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati del sensore *EXLs3 - 0070* del giroscopio con velocità di rotazione a 250°/s .

Asse X		Asse Y		Asse Z	
Raw	Calibrati	Raw	Raw	Calibrati	Raw
4,19118	3,11768	2,89076	2,07919	1,67934	1,16749
0,43562	0,17417	3,44781	2,88072	1,88955	1,24318
4,31088	3,36649	3,10678	2,42939	1,23114	0,71235
1,28906	0,73259	3,26904	2,58986	0,89711	0,44492
1,48992	0,94924	4,07115	3,02366	1,26747	0,86879
1,47863	0,93541	3,14228	2,44913	0,43379	0,26221

Tab. 4.12 – Errori percentuali dei Dati RAW e calibrati dello smartphone *Samsung S4 mini* del giroscopio con velocità di rotazione a 250°/s .



# Conclusioni e Sviluppi Futuri

In questo elaborato di tesi è stato sviluppato un software per semplificare e velocizzare il processo di calibrazione di sensori inerziali utilizzando un braccio robotico. Il sistema sviluppato consente di calibrare completamente la IMU senza nessuna manipolazione intermedia da parte dell'utente e dunque senza la necessità di dover riposizionare il sensore durante il processo di calibrazione. Il sistema è stato poi validato calibrando diverse tipologie di sensori in diverse condizioni e confrontando le prestazioni pre-calibrazione e post-calibrazione.

In primo luogo è stata valutata la ripetibilità della procedura di calibrazione con un errore valutato su tre prove successive inferiore allo 0,5%.

Per la calibrazione dei sensori presi in esame è stato utilizzato il *"Six Position Calibration Method"*, e sono state valutate le prestazioni dei sensori pre e post calibrazione. A valle della procedura di calibrazione sono stati calcolati degli errori percentuali dimezzati rispetto a quelli stimati sul segnale non calibrato.

Per migliorare l'accuratezza del metodo utilizzato, il *"Six Position Calibration Method"*, è stato arricchito con ulteriori cinque posizioni. L'*"Eleven Position Calibration Method"* si è dimostrato più accurato e si è quindi registrato un'ulteriore miglioramento delle prestazioni.

In termini di sviluppi futuri sarebbe interessante comparare diversi metodi che prevedano un numero sempre crescente di punti di misura fino ad arrivare alla calibrazione dinamica del sensore stesso.

La calibrazione completa di un sensore ha tempistiche molto rapide. Si è stimato, infatti, che con il più completo *"Eleven Position Calibration Method"* il tempo medio impiegato per la calibrazione di un sensore è di circa quindici minuti.

In termini di sviluppi futuri si può pensare di realizzare maschere che possano ospitare più sensori, consentendo quindi di calibrare più unità inerziali contemporaneamente.

Infine il braccio robotico è stato realizzato in materiale amagnetico per consentire di mettere a punto una procedura che comprenda anche la calibrazione del magnetometro. Questo tema non è stato oggetto di questo elaborato di tesi, ma costituisce sicuramente un importante sviluppo futuro.



# Bibliografia

- [1] J.J. Hall, R.L. Williams II, and F. Grass. "*Inertial measurement unit calibration platform*". Journal of Robotic Systems, 623–632, 2000.
- [2] Sebastian O. and H. Madgwick. "*Automated calibration of accelerometers, magnetometers and gyroscopes, a feasibility study*", September 2011
- [3] I. Skog, J.-O. Nilsson, and P. Handel, "*An open-source multi inertial measurement units (MIMU) platform*" in Proc. Int. Symp. on Inertial Sensors and Systems (ISISS), Laguna Beach, CA, USA, Feb. 2014
- [4] J. Nilsson, I. Skog, P. Handel, "*Aligning the forces – Eliminating the misalignments in IMU arrays*" in IEEE Trans. Instrum. Meas., no. 99, Sept. 2014.
- [5] S. Won and F. Golnaraghi, "*A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model*" IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 59, no. 8, pp. 2144–2153, Aug. 2010.
- [6] [www.faulhaber.com](http://www.faulhaber.com)
- [7] [www.ni.com/download/labview-development-system-2016](http://www.ni.com/download/labview-development-system-2016)
- [8] [www.cometasystems.com/products/wavetrack-inertial-system](http://www.cometasystems.com/products/wavetrack-inertial-system)
- [9] [www.exelmicroel.com/elettronica\\_medicale-tecnologia-indossabile-exls3\\_module.html](http://www.exelmicroel.com/elettronica_medicale-tecnologia-indossabile-exls3_module.html)
- [10] [www.samsung.com/it/smartphones/](http://www.samsung.com/it/smartphones/)