



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

**ANALISI E IMPLEMENTAZIONE DI PROCEDURE DI CALIBRAZIONE DI
SENSORI INERZIALI PER APPLICAZIONI NELL'AMBITO
DELL'ANALISI DEL MOVIMENTO UMANO.**

Analysis and implementation of inertial sensor calibration procedures for human motion analysis applications.

Relatore:

Prof.ssa Federica Verdini

Correlatori:

Prof. Alessandro Mengarelli

Dott. Andrea Tigrini

Tesi di Laurea di:

Alessia Santoni

A.A. 2023/2024

INDICE

ABSTRACT.....	I
1. INTRODUZIONE ALL'ANALISI DEL MOVIMENTO UMANO	1
1.1 Sistemi stereofotogrammetrici	2
2. SENSORI DI MISURA INERZIALI	3
2.1 Analisi del passo.....	5
2.2 Wearable Technology.....	9
2.3 Componenti e caratteristiche di un sensore di misura inerziale	11
3. CALIBRAZIONE DEI SENSORI INERZIALI	20
3.1 Procedura sperimentale di calibrazione.....	21
3.2 Acquisizione dei dati	25
3.3 Calcolo dei parametri	35
4. RISULTATI.....	42
4.1. Sensore <i>Ngimu</i>	42
4.2. Sensori <i>Pivot</i>	45
4.3. Sensore <i>Xsens</i>	49
4.4. Sensori a confronto.....	52
CONCLUSIONI.....	56
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	57
APPENDICE.....	59

ABSTRACT

Il seguente lavoro di tesi presenta cosa sono e come sono impiegati, ad oggi, i sensori di misura inerziali (IMU). Sono presentate le componenti di un sensore inerziale: accelerometri, giroscopi e magnetometri, i quali permettono di rilevare dati di accelerazione, velocità angolare e orientamento. Questi ultimi rendono possibile il monitoraggio del movimento nello spazio della IMU stessa, che, se resa solidale ad un segmento corporeo, restituisce i dati relativi al segmento in questione.

Grazie alle dimensioni molto ridotte dei sensori inerziali, infatti, si possono realizzare dei device che li contengono e che sono indossabili, in modo tale da analizzare il movimento dei segmenti del corpo umano. Questa tipologia di dispositivi rientra nella sensoristica indossabile, che include smartwatch, bracciali elettronici, fasce elastiche e molti altri dispositivi, tutti accomunati dall'aver un accelerometro, un giroscopio e un magnetometro triassiali incorporati.

Le applicazioni della sensoristica indossabile sono numerose e spaziano dall'ambito clinico e di diagnosi, fino a quello sportivo; di fatti, l'analisi del movimento con i sensori inerziali gode del vantaggio di poter essere effettuata sia dentro che fuori da laboratori specializzati e anche in modo continuativo per tempi prolungati. Dunque, rende possibile il monitoraggio da remoto, rivolto a soggetti come anziani o patologici che ne necessitano; inoltre, permette di effettuare test sportivi direttamente sul campo, durante lo svolgimento delle prestazioni.

Esistono anche sistemi per l'analisi del movimento molto precisi e accurati, che costituiscono il gold standard nel campo: i sistemi optoelettronici. I dati catturati dalle fotocamere di questi sistemi sono molto precisi e garantiscono un'analisi accurata, da cui si traggono conclusioni e diagnosi di una netta rilevanza. D'altro canto, richiedono l'impiego di grandi spazi, oltre che di personale tecnico competente; a questo proposito, la sensoristica indossabile e le analisi effettuate tramite i sensori inerziali costituiscono una valida alternativa, maggiormente portatile e pratica, garantendo la possibilità di analizzare molti parametri in modo più pratico e in qualsiasi spazio e momento.

I sensori inerziali sono, però, caratterizzati da errori di diversa natura, legati al rumore bianco, al disallineamento degli assi, agli effetti della temperatura e ad altri parametri; sono queste le cause per cui i dati restituiti non vantano della stessa precisione degli stessi dati monitorati con sistemi optoelettronici. A questo proposito, al fine di correggere parzialmente gli errori e pulire il più possibile il segnale dal rumore, sono effettuate procedure di calibrazione delle IMU, periodicamente prima del loro utilizzo.

Nella tesi sperimentale presentata si illustra la procedura di calibrazione per sensori inerziali che è stata analizzata e implementata dalla sottoscritta, durante il periodo di tirocinio svolto presso il Laboratorio di Analisi del Movimento dell'Università Politecnica delle Marche (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione). Il lavoro ha previsto la calibrazione di tre tipologie di IMU differenti: Ngimu, Xsens e Pivot, per un totale di ventisette unità. Il lavoro è stato svolto con l'obiettivo di valutare le prestazioni delle unità di misura inerziali, dopo aver calcolato una serie di parametri ed errori, i quali possono essere utilizzati per correggere i dati ottenuti in output dalle IMU stesse.

Nel presente elaborato viene illustrata e descritta la procedura implementata, considerando le conseguenti valutazioni effettuate sulla base dei valori ottenuti.

1. INTRODUZIONE ALL'ANALISI DEL MOVIMENTO UMANO

L'osservazione del movimento umano fornisce informazioni sul funzionamento dei sistemi locomotori e sulle strategie con cui viene eseguito un atto motorio. La comprensione di queste funzioni e strategie può essere raggiunta mediante misure ottenute con tecniche di analisi del movimento.

L'analisi del movimento umano è di fondamentale interesse in ambito medico, in quanto fornisce informazioni sulla biomeccanica di un gesto motorio analizzandone la cinematica e la dinamica, con lo scopo di dare contributi conoscitivi e metodologici volti alla soluzione dei problemi connessi al sistema motorio di un soggetto. [1]

Si tratta di un approccio solitamente non invasivo, che sfrutta una gamma di strumenti molto varia, in relazione alla varietà di segnali biomeccanici misurabili, che includono segnali di movimento, di spostamento, di forza o pressione. Un protocollo di analisi del movimento è costituito da una sequenza ordinata di operazioni che permettono di costituire un modello dell'atto motorio. Si basa, innanzi tutto, sullo svolgimento di un compito da parte del soggetto di interesse e sulla registrazione dei dati. Successivamente, tali dati vengono organizzati in modo da favorirne l'interpretazione e il confronto con casi di normalità, per poterne eventualmente trarre conclusioni di tipo diagnostico. In questo contesto risulta fondamentale la valutazione dell'orientamento 3D dei segmenti corporei rispetto ad un sistema di riferimento, non solo per valutare le funzionalità dell'apparato locomotore, ma anche, ad esempio, quando si monitorano le attività della vita quotidiana nelle persone anziane per la valutazione dell'instabilità della deambulazione e del rischio di caduta.

È importante valutare la validità e l'affidabilità dell'approccio con cui si vuole raggiungere questi obiettivi, nonché la sua efficacia in termini di costi. Sono disponibili, infatti, diverse tecnologie per la *motion capture* e la stima dell'orientamento 3D di un corpo rigido, basate su sensori elettronici, ottici, acustici, meccanici o magnetici e inerziali. In generale, si considera che il gold standard in questo ambito sia costituito dai sistemi stereofotogrammetrici; tuttavia, stanno prendendo piede anche sistemi di dimensioni decisamente inferiori, dotati di maggiore portabilità e applicabilità, ovvero i sensori di misura inerziali (IMU). [2, 11]

1.1 Sistemi stereofotogrammetrici

I sistemi stereofotogrammetrici optoelettronici di *motion capture* sono altamente accurati e costituiscono la tecnica più utilizzata per valutare la cinematica degli atti motori.

Si basano sull'utilizzo di *marker* retroriflettenti, i quali vengono adeguatamente posizionati su determinati punti di repere anatomici dei segmenti corporei di un soggetto, al quale è richiesto di svolgere una prova statica o di movimento, seguendo un protocollo preciso e precedentemente stabilito. I marcatori sono ripresi da più telecamere infrarossi posizionate all'interno di un laboratorio e collegate a sistemi in grado di elaborare e restituire le traiettorie tridimensionali dei sensori, da cui ricostruire i segmenti corporei e i loro movimenti, per ottenere stime della cinematica articolare. Inoltre, solitamente vengono impiegate piattaforme di forza che permettono di misurare lo scambio di forze e i relativi momenti durante il movimento, restituendo il vettore della forza risultante, dei momenti e delle potenze di ciascuna articolazione. Spesso, congiuntamente ai marcatori, sul soggetto sono posizionati dispositivi elettromiografici, i quali restituiscono le informazioni relative ai segnali generati dai muscoli durante lo svolgimento della prova a cui si sottopone il paziente. [2, 16]

Mediante l'elaborazione dei dati catturati è possibile effettuare analisi di interesse clinico come l'analisi del passo, posturale, di tipo elettromiografico, nonché la loro valutazione rispetto a condizioni di normalità, al fine di diagnosticare patologie o prescrivere trattamenti personalizzati.

Indubbiamente, i sistemi stereofotogrammetrici vantano la massima accuratezza nella cattura dei dati, tuttavia, presentano alcuni limiti. Innanzi tutto, oltre ad avere un costo notevole, richiedono uno spazio ampio per il posizionamento delle telecamere e delle piattaforme di forza, questo rende la loro applicazione limitata a laboratori di analisi del movimento e di difficile realizzazione all'interno di studi clinici. In aggiunta, per ottenere risultati accurati e affidabili, è necessario che sia presente del personale tecnico o medico, in grado di utilizzare l'apparecchiatura e di piazzare adeguatamente i marcatori sul paziente. Le analisi effettuate richiedono, infatti, che quest'ultimo indossi numerosi marcatori ed elettrodi per l'acquisizione dei dati, il che può condurre il soggetto ad essere condizionato durante lo svolgimento della prova. [13, 16]

Dunque, pur fornendo misure altamente precise, è nato il bisogno di sviluppare tecnologie di maggiore praticità, con dimensioni ridotte e più indipendenti: a tal proposito, si è sviluppata notevolmente, ed è tutt'ora in evoluzione, la tecnologia legata all'impiego dei sensori inerziali per l'analisi del movimento umano.

2. SENSORI DI MISURA INERZIALI

I sensori di misura inerziali, noti con la sigla IMU (*inertial measurement units*), sono dispositivi che restituiscono misure di accelerazione e velocità angolare. Per ottenere questi valori, una singola IMU è solitamente dotata di un accelerometro e di un giroscopio triassiali, dunque in grado di misurare accelerazione e velocità angolare, ciascuna lungo uno dei tre assi ortogonali che costituiscono il sistema di riferimento del sensore. Spesso l'unità include anche un magnetometro triassiale, che fornisce l'orientamento del dispositivo rispetto al campo magnetico terrestre; in questo caso si parla di MIMU (*magnetic and inertial measurement unit*).

Il sensore è detto inerziale poiché le misure sono fornite rispetto al sistema di riferimento del dispositivo che lo ingloba; perciò, non necessita un sistema di riferimento fisso di laboratorio, bensì permette di ottenere i parametri di interesse ovunque. [4]

Le informazioni fornite dai tre set di sensori vengono combinate all'interno di un quadro di fusione di sensori per elaborare i dati al fine di ottenere i parametri di interesse. I due approcci di fusione principalmente applicati sono: il filtraggio stocastico, implementato sottoforma di filtro di Kalman, e il filtraggio complementare. [11]

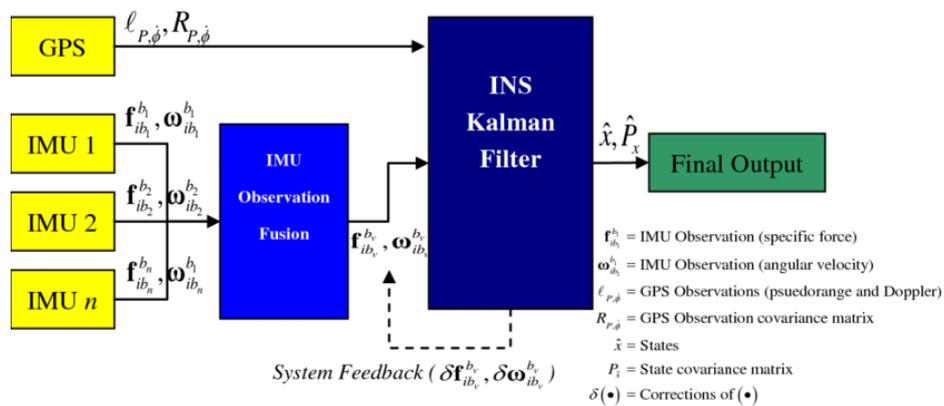


Figura 2.1 Schema di un algoritmo di sensor fusion [21].

L'elaborazione dei dati restituiti da questi sensori consente di stimare la posizione e l'orientamento del dispositivo; gli ambiti di applicazione sono molteplici, tra questi: aeronautico, automobilistico, negli smartphone e smartwatch, in ambito bioingegneristico e clinico per il monitoraggio di parametri biologici. I primi impieghi di questo tipo di unità risalgono agli anni Trenta, nella navigazione aerea; i dispositivi del tempo erano molto grandi, costosi e ad alto consumo energetico, motivi per i quali le

applicazioni erano limitate all'ambito citato. Attraverso la combinazione di componenti meccanici ed elettrici in piccole strutture su scala micrometrica, le quali integrano l'elettronica, i sensori e gli elementi meccanici su un substrato di silicio, lo sviluppo della tecnologia MEMS (*micro-electromechanical system*) ha permesso la realizzazione di accelerometri, giroscopi e magnetometri di dimensioni miniaturizzate. [3, 9]

Le IMU realizzate secondo la tecnologia MEMS vengono sempre più utilizzate e costituiscono un'opzione vantaggiosa da considerare come alternativa ai sistemi optoelettronici nell'analisi del movimento. Infatti, risultano molto funzionali in quanto, se posti solidalmente ad un segmento corporeo, si muovono insieme ad esso e ne riflettono il movimento di interesse, causando un'interferenza fisica trascurabile, essendo molto leggeri e di dimensioni ridotte. L'elaborazione dei dati ottenuti consente di avere misure di accelerazione, velocità, posizione e orientamento di segmenti corporei, nonché di valutare e monitorare atti motori, ad esempio la deambulazione.

L'impiego di questo tipo di sistemi ha dato vita alla produzione e all'applicazione in ambito ingegneristico e clinico della cosiddetta *wearable technology* (tecnologia indossabile). Con quest'espressione si fa riferimento alla realizzazione di sensori indossabili che integrano unità di misura inerziali; essi, se posizionati in opportuni punti, sono in grado di misurare segnali biologici e/o dati di movimento, che vengono elaborati e trasmessi, per poi essere analizzati garantendo affidabilità, praticità, efficienza. Il principio di funzionamento può essere paragonato a quello del sistema vestibolare, che misura i movimenti della testa senza necessità di sistemi di riferimento; allo stesso modo, il sensore indossato è in grado di restituire posizione e orientamento del segmento corporeo sul quale viene posto, a partire dai dati restituiti da accelerometri, giroscopi e magnetometri. [3]

I vantaggi che si possono avere da questi sensori, in ambito clinico, sono molteplici. Si tratta, di fatti, di una tecnologia a basso costo e a basso consumo di energia, non invasiva, applicata non solo all'interno di laboratori specializzati, ma anche *outdoor* e in qualsiasi contesto di interesse. Ciò rende possibile un monitoraggio, anche in tempo reale, per periodi di tempo molto prolungati. Tra le applicazioni, spiccano: monitoraggio di anziani o di soggetti con patologie, riabilitazione domiciliare, individuazione di disordini motori, monitoraggio di sportivi e atleti, come illustrato in seguito. Inoltre, date le loro ridotte dimensioni, trovano impiego anche in dispositivi di uso comune, quali gli smartwatch, che integrano un'unità di misura inerziale con lo scopo di monitorare alcuni parametri fisiologici del soggetto, come il numero di passi compiuti, la lunghezza del passo e altri parametri.

Sulla base di queste considerazioni, si può indubbiamente affermare che la diffusione delle IMU e della sensoristica indossabile ha rappresentato una grande opportunità per l'analisi del movimento,

costituendo un'alternativa molto valida, in grado affiancare e a volte sostituire sistemi più complessi come quelli optoelettronici, che, seppur accurati nelle misure, non sono altrettanto vantaggiosi dal punto di vista di costi, dimensioni e praticità. Tuttavia, occorre prestare attenzione alle criticità intrinseche di questi sistemi, legate ai bias di accelerometri e giroscopi, a possibili errori commessi durante la calibrazione, ma anche al fatto che per ottenere dati di posizione e orientamento occorre integrare gli output, con il rischio di generare un'amplificazione degli errori. Dunque, nel caso di applicazioni cliniche che richiedono particolare precisione, vanno effettuate le opportune valutazioni sull'accuratezza dei risultati ottenibili. [8]

2.1 Analisi del passo

Con l'espressione "unità di misura inerziali" si fa riferimento al singolo dispositivo dotato di accelerometri e giroscopi, in grado di effettuare specifiche misure e di restituirne i dati. Questi dispositivi di dimensioni ridotte, come accennato precedentemente, sono al giorno d'oggi integrate in una grande varietà di strumenti più elaborati e sono impiegati per l'analisi di diversi parametri in contesti clinici di analisi del movimento; dal loro impiego si traggono molteplici vantaggi, principalmente legati alla portabilità dei dispositivi e dunque alla possibilità di ottenere un report di dati in tempo reale, in modo facilmente gestibile da parte dell'operatore sanitario. I dati forniti da questi sensori devono, chiaramente, essere sottoposti ad opportune valutazioni che portano alla caratterizzazione del comportamento motorio del paziente e, conseguentemente, all'elaborazione e/o alla conferma di ipotesi diagnostiche.

L'analisi della deambulazione umana (*gait analysis*), cioè della maniera con cui si compie la locomozione realizzata dal movimento alterno e ritmico di propulsione dei due arti pelvici [15], costituisce un ramo di fondamentale importanza nella trattazione dei sensori inerziali e delle loro applicazioni. Di fatti, a partire dai segnali acquisiti con i sensori IMU si possono calcolare i parametri spazio-temporali del cammino, i quali vanno a costituire la base per la successiva elaborazione e caratterizzazione clinica del comportamento motorio del paziente.

Parametri spazio-temporali del cammino [12, 13, 14, 16]

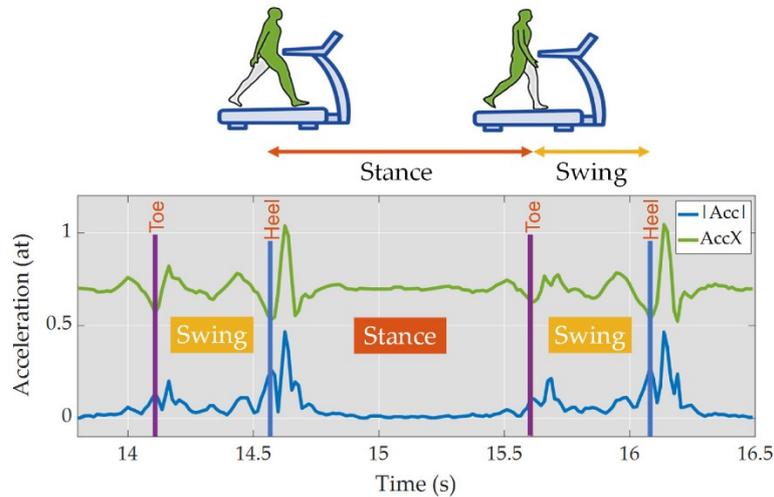


Figura 2.2 Fasi di un ciclo di passo. [16]

L'analisi del cammino si basa, innanzi tutto, sullo studio del passo, inteso come ciclo periodico costituito da varie fasi e caratterizzato da parametri spaziali e temporali.

Un ciclo di passo ha inizio con l'evento di *heel-strike* (appoggio del tallone a terra) del primo piede, seguito dal *toe-off* (sollevamento dell'alluce dello stesso piede); successivamente si ha l'appoggio del piede controlaterale e in seguito viene nuovamente poggiato il primo piede. Complessivamente, il ciclo si conclude con il secondo *heel-strike* del primo piede poggiante. La fase che intercorre tra il primo e il secondo *heel-strike* dello stesso piede è definita *stride*, mentre con *step* si intende la fase che va dall'*heel-strike* del primo piede, a quello del piede controlaterale.

Dal punto di vista temporale, l'intero ciclo di passo comprende due fasi: *stance* (appoggio) e *swing* (oscillazione). La prima, è costituita dall'intervallo temporale che intercorre tra *heel-strike* e *toe-off* dello stesso piede; invece, la fase di appoggio è il periodo che va da *toe-off* a successivo *heel-strike* dello stesso piede.

Nella fase di *stance* è possibile individuare quattro sottofasi, come riportato in seguito.

Initial contact: fase molto breve (0-2% dell'intero ciclo) che include l'*heel-strike* del primo piede.

Loading response: fase che comprende il doppio appoggio (10% del ciclo), infatti si conclude con il sollevamento del piede controlaterale; si ha la flessione del ginocchio e una leggera flessione dorsale.

Mid-stance: fase che va circa dal 10 al 30% del ciclo ha inizio con il *toe-off* dell'altro piede e termina quando il piede di interesse è completamente supportato dal calcagno; si ha l'estensione del ginocchio e la contrazione del quadricipite, mentre la caviglia è flessa, a causa dell'azione tibiale anteriore.

Terminal stance: include il periodo di supporto di un solo arto (30-50% del ciclo) e termina quando l'arto controlaterale tocca il suolo; il corpo si sposta in avanti e il tallone si solleva dal suolo.

La successiva fase di *swing* è suddivisa in altre quattro fasi.

Pre-swing: va dall'appoggio del piede controlaterale al sollevamento (*toe-off*) di quello di interesse, occupando la fase dal 50 al 60% dell'intero ciclo; è la fase di trasferimento del peso, in cui i muscoli posteriori della gamba sono contratti e la caviglia è estesa.

Initial swing: dal 60 al 70% del ciclo si ha la fase in cui il piede di interesse è portato in avanti; l'anca e il ginocchio sono flessi.

Mid-swing: dal 70 al 90% del ciclo si ha il passaggio dell'arto di interesse da una posizione posteriore al tronco ad una posizione anteriore.

Terminal swing: ultima fase che prevede la terminazione del movimento, fino al nuovo appoggio del piede; si ha la massima flessione del ginocchio e della caviglia.

Attraverso l'analisi dell'atto di deambulazione è possibile evidenziare gli eventi principali sopra descritti e, con opportuni calcoli, si possono calcolare: lunghezza e durata di *step* e *stride*, durata di *swing* e *stance*, numero di passi compiuti al minuto (cadenza), larghezza del passo (*step width*). La valutazione di questi parametri ed il confronto con valori di riferimento permette di arrivare a conclusioni sull'eventuale presenza di disturbi della deambulazione. Nello specifico, dall'analisi dei dati si possono ottenere informazioni relative alla cinematica (angoli di flesso/estensione, ab/adduzione, rotazione interna/esterna delle articolazioni di anca, ginocchio, caviglia), alla dinamica (momenti e potenze delle articolazioni di anca, ginocchio, caviglia), all'elettromiografia (attivazione e disattivazione muscolare).

***Gait analysis con sistema stereofotogrammetrico* ([14], [16])**

Come è stato già accennato precedentemente, una tecnologia tramite la quale è possibile svolgere un'accurata analisi del passo è quella stereofotogrammetrica. Lo svolgimento dell'analisi avviene all'interno di appositi laboratori dotati della strumentazione opportuna, cioè di sistemi optoelettronici, piattaforme di forza ed elettromiografi di superficie.

La procedura prevede, in primo luogo, di porre un determinato numero di *markers* retroriflettenti su punti di reperi anatomici del soggetto esaminato, seguendo un protocollo anatomico di riferimento. In seguito, sono misurati alcuni parametri antropometrici, quali l'altezza, il peso, la larghezza delle pelvi e altri. La prima *task* eseguita è di tipo statico e prevede, infatti, che il soggetto resti in piedi per qualche secondo; successivamente, è chiamato ad effettuare una o più prove di cammino sopra la piattaforma di forza, con velocità e andature differenti in base agli obiettivi dell'esame. Ad esempio, può essere richiesto di procedere a velocità basse, normali ed elevate; oppure, si può effettuare il *Timed Up and Go test* che prevede di far alzare il paziente da una sedia e di camminare per qualche metro, per poi invertire la traiettoria e tornare seduto, o altre tipologie di test.

Software specifici vanno poi ad elaborare i dati acquisiti e ad estrarre le coordinate x, y, z di ciascun marcatore all'interno del laboratorio, al fine di avere una ricostruzione del movimento effettuato e della posizione reciproca di ciascun segmento corporeo. L'analisi dei dati cinetici, quali gli angoli di rotazione delle articolazioni, e dinamici, cioè i momenti e le potenze alle articolazioni, assieme ai dati di forza, restituiti dalla piattaforma, ed elettromiografici permette al personale medico, affiancato da quello tecnico, di giungere a conclusioni relative ad eventuali disturbi o patologie.

La *gait analysis* effettuata all'interno di questi laboratori e secondo il protocollo descritto vanta di essere accurata, non invasiva, ripetibile, di fornire dati tridimensionali.

***Gait analysis* con sensori di misura inerziale ([12], [17])**

I sensori di misura inerziale impiegati nella sensoristica indossabile costituiscono una tecnologia innovativa per l'analisi del passo, rappresentando la direzione verso cui l'ingegneria biomedica sta procedendo.

Applicando una singola IMU, oppure più di una, solidalmente ad alcuni segmenti corporei come in figura 2.3, è possibile ottenere i segnali registrati durante un ciclo di deambulazione ed analizzarli per evidenziare eventuali anomalie, le quali possono essere connesse a problemi motori o di altra natura. Generalmente, questo tipo di analisi si basa sull'identificazione dei picchi e delle soglie dei segnali, in modo tale da poter confrontare tali valori con valori e intervalli di normalità, per poi categorizzare il soggetto in sano o patologico, nei casi in cui l'attraversamento dello zero e i valori delle soglie non corrispondano ai valori di normalità.

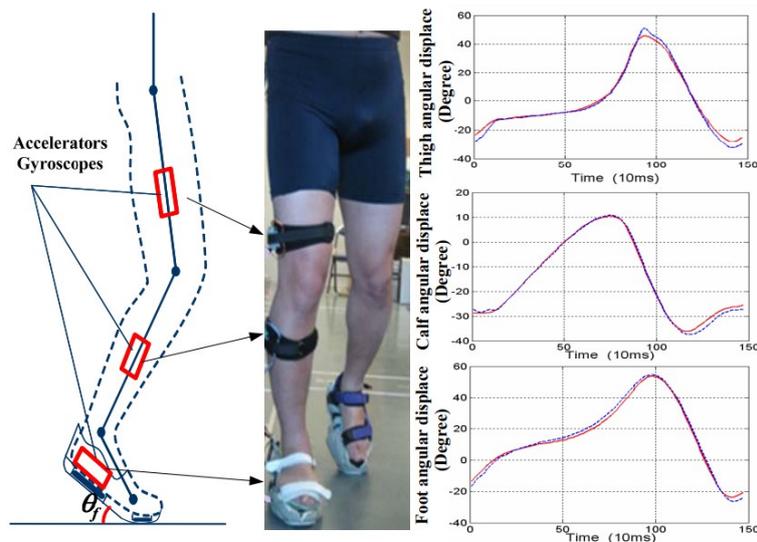


Figura 2.3 Esempio di applicazione di sensori inerziali solidalmente ai segmenti di gamba, coscia e piede per ricavare l'andamento dei rispettivi angoli articolare durante l'esecuzione di un movimento. [12]

2.2 Wearable Technology

Con lo sviluppo di questo tipo di sensori si stanno facendo largo diverse tipologie di applicazioni, che includono quella descritta al paragrafo 2.1, che vedono le IMU impiegate in tecnologie di dimensioni ridotte e dotate di particolare portabilità, al punto da essere indossabili. Questa categoria di sensori rientra nella *wearable technology* (sensoristica indossabile), caratterizzata proprio dalla possibilità di indossare sensori IMU solidalmente ai segmenti corporei, tramite l'ausilio di fasce o di altri supporti.

Tali sistemi conservano tutti i vantaggi elencati precedentemente e sono, dunque, in grado di rilevare velocità angolare, accelerazione lineare, orientamento dei segmenti. Ciò apre la strada non solo alla possibilità di monitorare ed effettuare svariate analisi outdoor in spazi diversi dai laboratori specializzati, ma anche di poter effettuare un monitoraggio a distanza di soggetti che ne necessitano. Inoltre, se integrati con sistemi di allarme, questi sistemi garantiscono la possibilità di ricevere, da remoto, notifiche di allarme nei casi in cui si registrino picchi anomali nei tracciati.

Di seguito si approfondiscono solo alcune delle possibili applicazioni della sensoristica indossabile, che costituisce sicuramente una risorsa molto importante per il futuro. [19]

Monitoraggio di anziani o soggetti patologici a distanza

I sensori inerziali, come illustrato in precedenza, trovano applicazioni in svariati ambiti. Tra questi, spicca la possibilità di monitorare a distanza soggetti che ne hanno la necessità, ad esempio anziani o soggetti con patologie croniche.

Un'opzione è quella di apporre sull'indumento del soggetto un accelerometro triassiale che, essendo dotato di algoritmi di soglia, è in grado di inviare un messaggio di allarme se riconosce una caduta. Oppure, può essere posto sulle spalle, all'altezza del centro di massa, un accelerometro triassiale con capacità di valutare cinque parametri posturali: spostamento antero-posteriore e medio-laterale del CoP (*center of pressure*), velocità, frequenza e raggio medio dei movimenti. Anche smartwatch e smartphone dotati di un accelerometro triassiale e del GPS possono fornire informazioni fondamentali nel monitoraggio, in quanto in grado di localizzare l'assistito e di inviare messaggi di allarme, se necessario.

Riabilitazione domiciliare e valutazione dell'efficacia di un trattamento

Il vantaggio nell'impiego di questo tipo di sensoristica è molto evidente se si considerano tutti i casi di riabilitazione domiciliare, ad esempio post-intervento, e i casi in cui occorre monitorare un soggetto che sta subendo un trattamento farmacologico, per valutarne l'efficacia.

Per la riabilitazione domiciliare, svolgono un ruolo importante i tessuti sensorizzati, realizzati con elastomeri conduttivi. Questi, sono in grado di stimare l'entità dei movimenti attraverso la valutazione della deformazione che il movimento stesso ha prodotto; in particolare, se applicati nella parte superiore del corpo, possono identificare la postura e il movimento del braccio, importanti da valutare ad esempio nel caso di pazienti che sono stati colpiti da ictus. Con gli stessi tessuti, ma applicati negli arti inferiori, oppure con tappeti sensorizzati GAITRite, invece, risulta possibile effettuare una valutazione complessiva della deambulazione del soggetto (*gait analysis*), basata sui parametri spazio-temporali del cammino (sottocapitolo 2.1).

Un esempio di valutazione dell'efficacia di un trattamento farmacologico riguarda i pazienti affetti da Parkinson e sottoposti a terapia farmacologica. Tramite l'applicazione di accelerometri triassiali e biassiali sulla parte superiore del corpo, si può monitorare la discinesia e si possono valutare alcuni parametri del cammino di interesse, come la cadenza e la simmetria dello *step*, i quali forniscono informazioni importanti relativamente alla condizione del patologico.

Valutazione della performance negli sportivi e negli atleti

Tramite l'implementazione di alcuni protocolli, i quali prevedono lo svolgimento di atti motori specifici da parte di sportivi o atleti che indossano sensori inerziali, è possibile ottenere parametri la cui valutazione è rilevante per la performance di questi soggetti, con il conseguente vantaggio di poter ottimizzare l'attività svolta, sulla base delle valutazioni effettuate sui parametri calcolati. Un esempio di sensore impiegato sono le fasce indossabili, le quali hanno le unità inerziali integrate.

Con il sensore *Sensorize FreePower Jump KIT*, o con dispositivi simili, svolgendo salti ripetuti di tipologie diverse (salti, squat, drop jump), si possono valutare la quota del salto, il tempo di volo, la velocità e la forza massime, il lavoro e la potenza muscolare, indici di affaticamento e reattività. Invece, le prestazioni di forza possono essere valutate, ad esempio, con il dispositivo *Sensorize FreePower Training KIT* che viene posizionato sul peso che si solleva, restituendo in tempo reale le misure di potenza e forza del gruppo muscolare coinvolto, velocità media dell'atto di spostamento del carico, carico massimale e ottimale.

2.3 Componenti e caratteristiche di un sensore di misura inerziale

2.3.1. Accelerometri

L'accelerometro restituisce la misura dell'accelerazione lineare lungo il suo asse di sensitività, tale misura viene poi convertita in un segnale elettrico. Nel caso di dispositivo triassiale gli *output* sono tre, ovvero l'accelerazione registrata lungo ciascuno degli assi di sensitività del sistema di riferimento. Ciascuna unità di misura inerziale ne ingloba uno, generalmente di tipo triassiale. Le misure che possono essere ottenute tramite accelerometri si riferiscono sia a condizioni statiche che dinamiche. In quest'ultimo caso l'accelerazione è dovuta a ogni forza eccetto la forza gravitazionale applicata al corpo, nella condizione statica l'accelerazione è dovuta alla sola componente gravitazionale. [1]

Gli accelerometri realizzati secondo la tecnologia MEMS sono caratterizzati da dimensioni dell'ordine del micrometro, dunque integrabili all'interno di una IMU di grandezza molto ridotta. Il primo accelerometro di questo tipo è stato prodotto dalla Stanford University nel 1979. L'impatto degli accelerometri MEMS a basso costo, piccoli e ad alte prestazioni non si limita solo alla riduzione di dimensioni e costi, bensì apre a nuove opportunità di mercato; di fatti, attualmente sono enormemente richiesti, in quanto applicati in contesti molto vari, tra i quali: il settore automobilistico, le applicazioni industriali, come la robotica, il monitoraggio del trasporto di attrezzature e merci, l'ambito militare, le applicazioni biomediche. [5]

Modello matematico

In prima approssimazione, un accelerometro può essere analizzato seguendo il modello matematico Massa-Molla-Smorzatore, in cui l'ingresso che si vuole misurare è l'accelerazione, mentre l'uscita restituita è lo spostamento lungo l'asse di sensibilità.

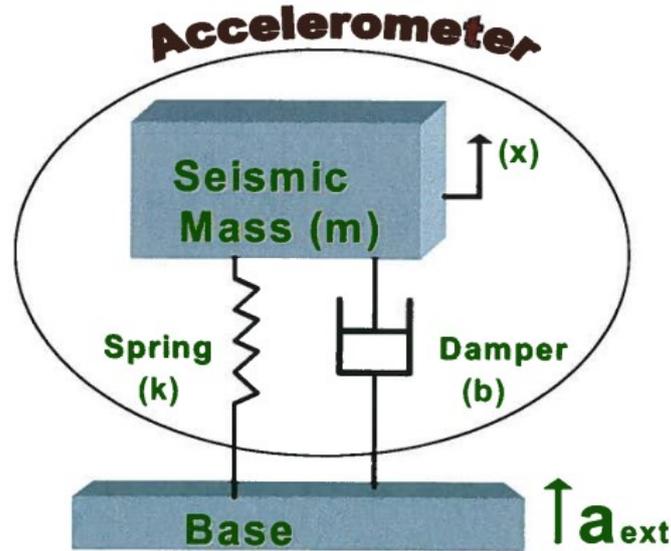


Figura 2.4 Modello matematico massa - molla - smorzatore di un accelerometro.

Come illustrato in figura, considerando tale modello, si hanno: una massa di prova M collegata ad un elemento elastico con costante di rigidezza k e ad un elemento smorzatore b . L'accelerazione esterna a_{ext} sposta il telaio di base del sistema, la conseguente sollecitazione della molla e dello smorzatore genera lo spostamento della massa di prova. Dalla misura di quest'ultimo, applicando la Seconda Legge di Newton [5, 6], risulta possibile risalire all'accelerazione esterna, come illustrato di seguito.

$$F_{inerzia} = Ma \tag{1}$$

$$F_{peso} + F_{elastica} + F_{smorzatore} = F_{inerzia} \tag{2}$$

$$M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = Ma(t) \tag{3}$$

$$\frac{M}{k} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{b}{k} \frac{dx(t)}{dt} + x(t) = \frac{M}{k} a(t) \quad (4)$$

Con: $a(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = \ddot{x}_l$ (5)

Sostituendo:

- Pulsazione naturale: $w_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$ (6)

- Costante di sensibilità statica: $K = \frac{1}{w_n^2} = \frac{M}{k}$ (7)

- Coefficiente di smorzamento: $\zeta = \frac{b}{2\sqrt{km}}$ (8)

- $D = \frac{dx}{dt}$ (9)

Si ottiene:

$$\frac{1}{w_n^2} \ddot{x}_l = \frac{D^2}{w_n^2} x_0 + 2\zeta \frac{D}{w_n} x_0 + x_0 \quad (10)$$

Sostituendo $D = iw$:

$$\frac{1}{w_n^2} \ddot{x}_l = \frac{(iw)^2}{w_n^2} x_0 + 2\zeta \frac{iw}{w_n} x_0 + x_0 \quad (11)$$

$$\frac{1}{w_n^2} \ddot{x}_l = -\frac{w^2}{w_n^2} x_0 + 2\zeta \frac{iw}{w_n} x_0 + x_0 \quad (12)$$

$$\frac{x_0}{\ddot{x}_i} = \frac{\frac{1}{\omega_n^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + 2\zeta i \frac{\omega}{\omega_n}}$$

(13)

Con l'espressione ottenuta è evidente la relazione tra accelerazione in ingresso (x_i) e spostamento della massa misurato in uscita (x_0). In base al tipo di sensore, tale spostamento viene misurato con modalità differenti; nel caso degli accelerometri capacitivi si rileva la variazione di capacità corrispondente ad uno spostamento delle piastre di un condensatore, com'è spiegato di seguito.

Accelerometri capacitivi

Esistono diverse tipologie di accelerometri: capacitivi, piezoelettrici, piezoresistivi, LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), estensimetrici, laser, gravimetri.

Gli accelerometri impiegati nella realizzazione di sensori inerziali sono generalmente di tipo capacitivo, in quanto ottenuti secondo tecnologie di microfabbricazione.

Ulteriori vantaggi derivano dall'impiego di questo tipo di accelerometri ([5], [8]), quali: elevata sensibilità, ripetibilità delle misure, stabilità alle variazioni di temperatura, struttura semplice, costi e consumo di energia bassi.

Questa categoria di accelerometri sfrutta le variazioni di capacità dovute allo spostamento di una massa. Il principio di funzionamento si basa su una massa mobile posizionata, insieme ad una molla meccanica, tra due substrati di silicio. Il movimento della massa (moto lungo x) è relativo ai due substrati ($d1$ e $d2$) e provoca una variazione delle due capacità ($C1$ e $C2$), come illustrato in figura 2.5. Calcolando la differenza tra le due capacità, è possibile ricavare lo spostamento della massa nella direzione x , causato dall'accelerazione. Dunque, per ciascuno spostamento dell'ordine dei micrometri, è indotta una piccola variazione di capacità. Collegando più substrati in parallelo, la configurazione permette di ottenere una maggiore variazione, rilevabile in modo più accurato e preciso. [9]

$$C = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r \times \frac{A}{d}$$

(14)

ε_0 = permittività elettrica del vuoto

ε_r = permittività del materiale

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \varepsilon_r$$

d = distanza tra i due piatti

A = area delle due facce

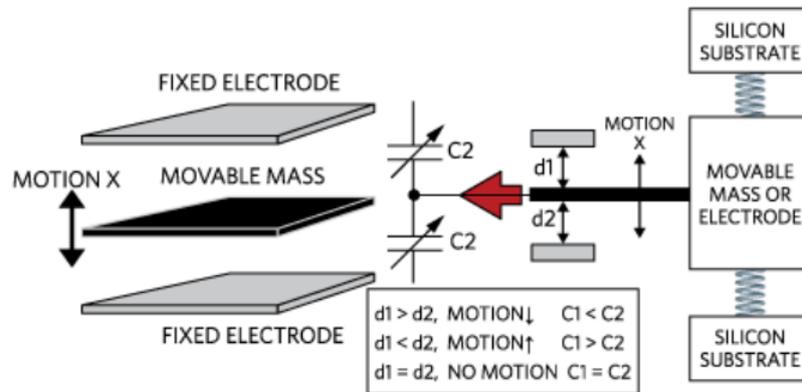


Figura 2.5 Schema di un accelerometro capacitivo

Considerando uno spostamento della massa verso C_1 :

$$C_0 = \varepsilon \times \frac{A}{d} \tag{15}$$

$$C_1 = C_0 - \Delta C = \varepsilon \times \frac{A}{d+x} \tag{16}$$

$$C_2 = C_0 + \Delta C = \varepsilon \times \frac{A}{d-x} \tag{17}$$

$$C_2 - C_1 = 2 \times \Delta C = \varepsilon A \times \left(\frac{1}{d-x} - \frac{1}{d+x} \right) = 2\varepsilon A \times \frac{x}{d^2 - x^2} \tag{18}$$

$$\Delta C = \varepsilon A \times \frac{x}{d^2 - x^2} \tag{19}$$

Risolvendo l'equazione e trascurando il termine $\Delta C = x^2$ (piccoli spostamenti), si ottiene:

$$\Delta C(d^2 - x^2) = \varepsilon A \times x \quad (20)$$

$$x \approx \frac{\Delta C d^2}{\varepsilon A} = d \frac{\Delta C}{C_0} \quad (21)$$

Quindi, lo spostamento è direttamente proporzionale alla variazione di capacità. Tramite un ulteriore opportuno circuito, questa variazione di capacità viene trasdotta in variazione di tensione.

2.3.2. Giroscopi

I giroscopi sono dispositivi che restituiscono la misura di velocità angolare attorno al loro asse di sensibilità. Nel caso di giroscopi triassiali, sono restituite tre misure di velocità, attorno a tre assi mutualmente perpendicolari. Dalle misure di velocità, è possibile dedurre anche l'orientazione del dispositivo nello spazio.

Giroscopi di tipo MEMS

Esistono varie tipologie di giroscopi, tra cui i meccanici e gli ottici; tuttavia, questi non costituiscono l'alternativa migliore da applicare nell'analisi del movimento, in quanto ingombranti e costosi. Generalmente, infatti, nei sensori di misura inerziale, si opta per giroscopi a massa vibrante, realizzati attraverso la tecnologia MEMS, utilizzando tecniche di microlavorazione del silicio. Questo tipo di giroscopi sono relativamente economici da produrre, di dimensioni e peso ridotti e con un basso fabbisogno energetico, il che li rende ideali per l'analisi del movimento umano. ([4], [7])

I giroscopi MEMS si basano sull'effetto di Coriolis, che afferma che in un sistema di riferimento che ruota a velocità angolare ω , una massa m che si muove con velocità v subisce una forza:

$$F_c = -2m(\omega \times v) \quad (22)$$

All'interno del sensore, per misurare quest'effetto, sono presenti degli elementi vibranti che possono essere di geometrie diverse. La geometria più semplice è costituita da una singola massa che viene spinta a vibrare lungo un asse di azionamento (r_{act}), spesso utilizzando un elemento piezoelettrico. Mettendo in rotazione la massa con una velocità angolare perpendicolare al piano, la massa subirà una forza apparente F_C nella direzione perpendicolare alla velocità angolare e alla velocità di massa

momentanea, cioè lungo r_{cor} . Misurando questo spostamento aggiuntivo, è possibile quantificare la velocità angolare.

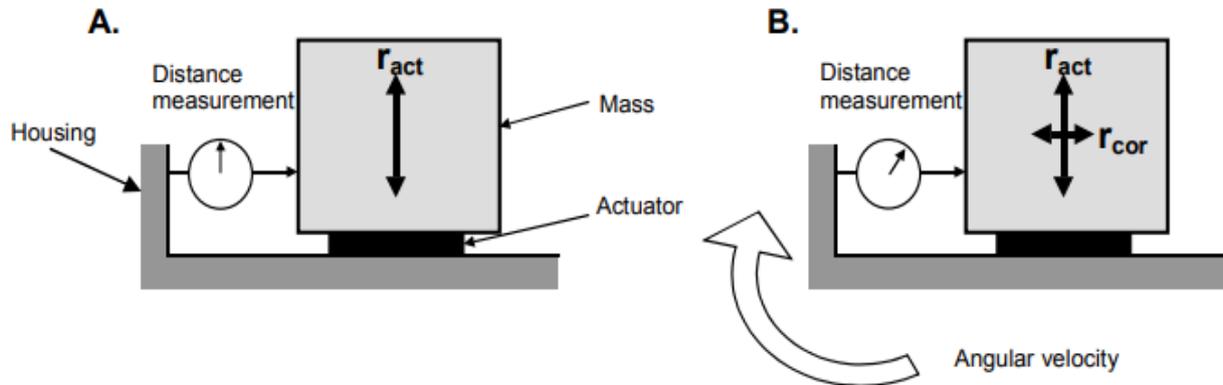


Figura 2.6 Funzionamento interno di un giroscopio. La massa M è spinta a vibrare lungo r_{act} ; se messa in rotazione con velocità angolare w , subisce uno spostamento lungo r_{cor} dovuto alla forza di Coriolis; un misuratore rileva tale spostamento. [4]

2.3.3. Magnetometri

Talvolta, i sensori inerziali integrano, oltre ai due dispositivi descritti, anche un magnetometro; in questi casi, tali unità sono definite come MIMU (*Magnetic Inertial Measurement Units*).

Un magnetometro è in grado di rilevare e misurare direzione e modulo del campo magnetico che agisce sul dispositivo e, quindi, sul segmento a cui esso è solidale. Anche i magnetometri possono essere progettati come sensori a un asse o a più assi, dove ogni asse misura una componente del campo magnetico vettoriale proiettata sul sistema di riferimento del sensore.

Come visto per giroscopi e accelerometri, nella realizzazione di sensori di misura inerziale, anche nel caso dei magnetometri si utilizzano dispositivi di tipo MEMS.

Il principio di funzionamento è, generalmente, basato sulla Forza di Lorentz, cioè la forza applicata da un campo magnetico B su una particella di massa m e carica q in movimento con velocità v . Il modulo di tale forza è espresso da:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (23)$$

Un magnetometro MEMS basato su questa forza è costituito da una struttura sospesa in cui scorre una corrente I , in direzione perpendicolare al campo magnetico da misurare. In questo modo, si genera una Forza di Lorentz in direzione perpendicolare a I e B .

Il moto indotto può essere rilevato attraverso modalità differenti, tra cui: variazione di resistenza di piezoresistori, variazione della frequenza di risonanza, oppure lettura capacitiva.

Nei sensori magnetoresistivi, si misura l'effetto magnetoresistivo, cioè la variazione della resistività di un materiale ferromagnetico che trasporta corrente risultante da un campo magnetico. Infatti, in condizioni normali si ha una corrente che scorre attraverso una piastra di antimonio di indio (InSb); applicando un flusso magnetico la forza di Lorentz proporzionale alla densità del flusso magnetico devia il percorso della corrente. Conseguentemente si ha una variazione di resistenza proporzionale all'angolo di inclinazione della corrente, in relazione alla direzione del campo magnetico. [12]

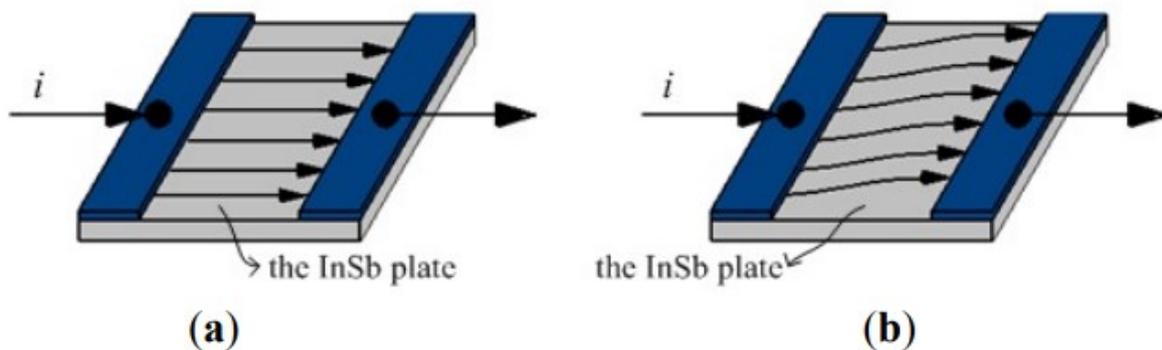


Figura 2.7 Effetto magneto-resistivo [12]

Nel caso di lettura capacitiva, la struttura sospesa è costituita da due fasci di lunghezza L , sospesi in un telaio centrale, in modo da formare due condensatori a piastre parallele di capacità $C1$ e $C2$. Facendo scorrere un corrente alternata $I(t)$, la struttura è sottoposta ad una Forza di Lorentz che genera uno spostamento, come illustrato in figura 2.8. Conseguentemente, è indotta una variazione delle capacità, in modo proporzionale agli spostamenti, come illustrato in precedenza nella descrizione degli accelerometri capacitivi (equazioni 14-21). La rilevazione di questa variazione di capacità, quindi dello spostamento, viene poi opportunamente trasdotta in tensione in uscita, tramite un ulteriore circuito. [10]

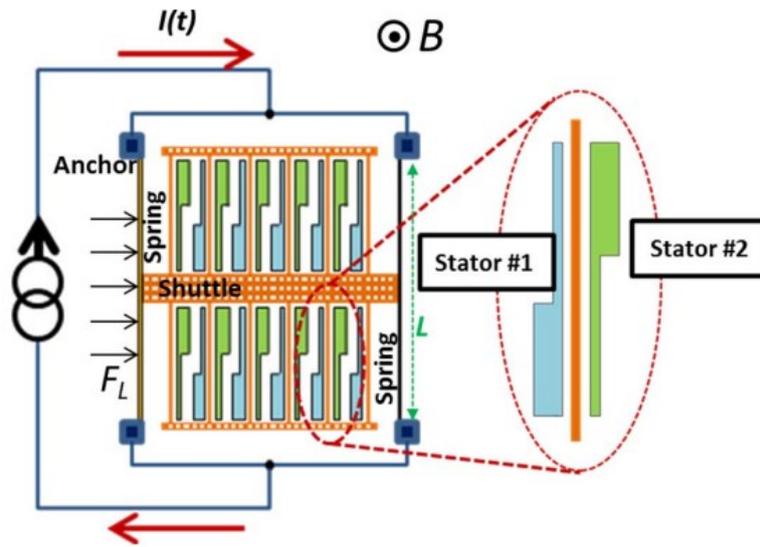


Figura 2.8 Magnetometro con lettura capacitiva.

3. CALIBRAZIONE DEI SENSORI INERZIALI

Nonostante il continuo miglioramento della tecnologia MEMS, i sensori 3D sono affetti da alcuni errori, deterministici e stocastici, tali da rendere imprecise le misure di accelerazione e velocità angolare restituite.

Queste imprecisioni costituiscono un problema, poiché i dati di velocità angolare e accelerazione lineare restituiti dai sensori di misura inerziale vengono opportunamente elaborati per ricavare, nell'ambito medico e in quello biomeccanico, parametri di interesse legati al movimento umano e alla condizione fisica del paziente, come il valore degli angoli articolari, delle forze e dei momenti. Se i dati sottoposti a questi calcoli risultano affetti da errori, questi ultimi si propagano quando si effettuano le doppie integrazioni per calcolare posizione e orientamento dei segmenti corporei; conseguentemente, i parametri di interesse non risultano accurati e non possono essere utilizzati né per fini diagnostici, né ai fini di ricerca.

Gli errori a cui sono sottoposte le unità inerziali sono suddivisi in deterministici e stocastici. [20]

Gli errori deterministici sono:

- *bias* costante: l'*offset* del sensore, cioè le uscite restituite dal giroscopio quando non sta subendo alcuna rotazione e dall'accelerometro quando è fermo.
- errori di misura dovuti ai fattori di scala, al disallineamento degli assi del sensore rispetto al sistema di riferimento, la non-ortogonalità degli assi.

Tra gli errori stocastici figurano:

- le fluttuazioni casuali del *bias*, causate dal rumore dell'elettronica; si tratta di un rumore i cui effetti sono evidenti alle basse frequenze.
- rumore bianco termomeccanico a frequenze molto maggiori rispetto a quella di campionamento; i campioni risultano perturbati da una sequenza di variabili con valor medio nullo.
- fluttuazioni dovute alle variazioni di temperatura, che vanno ad incidere sul valore del *bias* del sensore; spesso i sensori inerziali sono dotati di sensori di temperatura interni, che permettono di eliminare automaticamente i *bias* dovuti a questo effetto.

Come approfondito in precedenza, i dati di accelerazione lineare e di velocità angolare vengono opportunamente integrati per ottenere parametri di interesse; ne consegue che gli errori illustrati siano sottoposti ad una propagazione tale da rendere imprecisi i risultati delle operazioni di integrazione.

Negli ambiti di applicazione dei sensori inerziali, dalla doppia integrazione dell'accelerazione si vorrebbe calcolare la posizione dei segmenti corporei, mentre dall'integrazione della velocità angolare l'orientamento di essi. Successivamente, queste informazioni verrebbero elaborate, anche a scopo di diagnosi; dunque, per poter raggiungere questi scopi è fondamentale che le misure siano caratterizzate da affidabilità e precisione.

Per mitigare l'effetto degli errori e cercare di avere misure il più accurate possibile, vengono effettuate procedure di calibrazione opportune dei dispositivi, tramite cui si stimano le misure degli errori sopra illustrati, al fine di correggere successivamente gli output ottenuti e ricavare i valori reali. Questi ultimi, essendo corretti, possono essere impiegati in sistemi di *sensor fusion* per il calcolo dei parametri desiderati (esempio in figura 2.1).

Risulta fondamentale che tali algoritmi vengano messi in pratica prima dell'utilizzo di un sensore inerziale, ed è opportuno ripetere queste procedure in tutti quei casi in cui variano le condizioni ambientali, come la temperatura; è, inoltre, consigliabile ripeterle nel tempo, per prendere nota dello stato in cui si trova il sensore e del degrado eventualmente subito con il passare del tempo e in modo tale che i software che sfruttano le misure delle IMU per l'estrazione dei parametri possano beneficiare di dati accurati.

3.1 Procedura sperimentale di calibrazione

Sono stati presentati diversi metodi di calibrazione per sensori inerziali, in questo lavoro di tesi si illustra il metodo presentato da Ferraris et al. in "Procedure of effortless in-field calibration of three-axis rate gyros and accelerometers" per giroscopi e accelerometri, che è stato applicato direttamente nella procedura sperimentale di calibrazione dei sensori, implementata personalmente nel Laboratorio di Analisi del Movimento del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università Politecnica delle Marche. In particolare, si sono calibrati gli accelerometri e i giroscopi triassiali di ciascuna unità.

La prima fase della procedura prevede l'acquisizione dei dati secondo un protocollo ben definito, elaborato in base a quanto illustrato negli articoli [8] e [18]. Successivamente, gli output di giroscopio e accelerometro vengono modellati attraverso una relazione lineare che include le varie metriche di errore che affliggono ciascun dispositivo. Dunque, la procedura presentata prevede che sia verificata la linearità nella risposta dei sensori calibrati; nell'appendice A dell'articolo [18] è illustrata la procedura da applicare nel caso in cui non sia verificata la proprietà in questione. Sulla base di tali

considerazioni, sono stati calcolati i parametri statici e dinamici per ciascuna unità, implementando un programma sulla piattaforma MATLAB.

Materiali

La calibrazione è stata implementata per tre tipologie di sensori differenti, ognuna caratterizzata da un numero di unità specifico: *Ngimu*, *Pivot*, *Xsens*. Inoltre, è stata utilizzata una cassa di plastica trasparente, utile per poggiare adeguatamente il sensore su un piano orizzontale nelle varie orientazioni previste (figura 3.1).



Figura 3.1 Cassa di plastica trasparente usata per effettuare la calibrazione.

Sensore Ngimu:

Un'unica unità, sviluppata da *X-io Technologies*. Una volta connessa al computer, si apre una finestra in cui è possibile visualizzare il posizionamento del sensore nello spazio e il suo sistema di riferimento.

I dati acquisiti vengono organizzati in file “.csv”, distinti in dati di accelerometro, giroscopio e magnetometro, insieme al vettore dei tempi. Gli output dell'accelerometro sono restituiti in multipli di g, mentre i dati del giroscopio in gradi al secondo ($^{\circ}/s$).

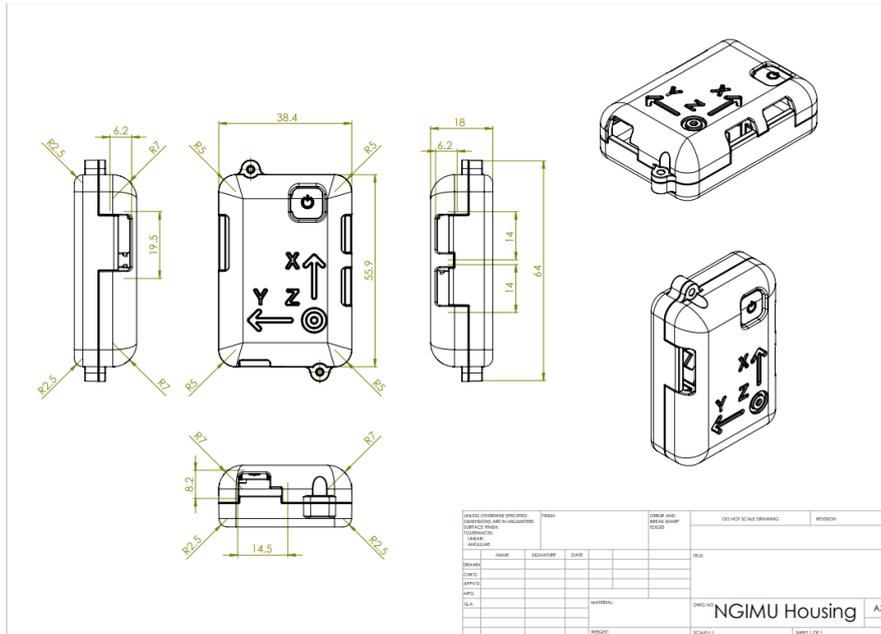


Figura 3.2 Rappresentazione dell'unità Ngimu. [22]

Sensori Pivot

L'azienda *TuringSens* ha progettato otto unità distinte e un sensore aggiuntivo che permette la connessione degli altri. Durante l'acquisizione è possibile visualizzare l'andamento dei segnali accelerometrici e giroscopici attraverso un'interfaccia a finestra, in cui si può anche settare la frequenza di campionamento ed altri parametri.

Successivamente, i dati ottenuti vengono salvati in file ".txt"; i dati dell'accelerometro sono salvati in 2048*g, mentre i dati del giroscopio sono salvati in 16.4*(°/s).



Figura 3.3 Sensori Pivot.

Sensori Xsens

I sensori inerziali *Xsens*, proposti dall'azienda Movella, sono un gruppo di diciotto unità, di cui diciassette sono caratterizzate da un nome che fa riferimento al segmento anatomico su cui posizionarle, la diciottesima è invece una sonda ausiliaria, denominata "Prop". Nello specifico, le IMU sono: "Head", "Right Shoulder", "Left Shoulder", "Right Upper Arm", "Left Upper Arm", "Right Forearm", "Left Forearm", "Stern", "Right Hand", "Left Hand", "Pelvis", "Right Upper Leg", "Left Upper Leg", "Right Lower Leg", "Left Lower Leg", "Right Foot", "Left Foot". Esse vengono opportunamente posizionate sui segmenti anatomici e i dati acquisiti vengono salvati in file ".csv", distinti in dati dell'accelerometro in multipli di g e dati del giroscopio in gradi al secondo ($^{\circ}/s$). L'acquisizione può avere inizio dopo aver connesso ciascuna unità al computer tramite un dispositivo apposito; dopodiché, attraverso un'interfaccia è possibile visualizzare l'andamento dei segnali e settare alcuni parametri.



Figura 3.4 Sensori Xsens. [23]



Figura 3.5 Applicazione dei sensori inerziali Xsens solidalmente ai segmenti anatomici (avanbraccio, spalla, coscia, piede). [23]

3.2 Acquisizione dei dati

La procedura di calibrazione effettuata ha previsto, innanzi tutto, una serie di acquisizioni in determinate condizioni. Dai dati ottenuti è stato possibile estrarre i parametri elencati di seguito, in modo tale da poter correggere i valori di accelerazione e velocità angolare ottenuti in output, per eliminare gli errori dovute alle problematiche sopra descritte.

Il protocollo implementato ha previsto che il sensore venisse posizionato usando nastro adesivo all'interno della cassa di plastica a forma di parallelepipedo, realizzata in modo tale da garantire l'ortogonalità dei tre assi. Sarebbe stato possibile avvalersi di un ulteriore blocco di riferimento, posizionando la cassa sopra una superficie piana, affinché la struttura aderisse al secondo blocco, come illustrato in figura 3.7.

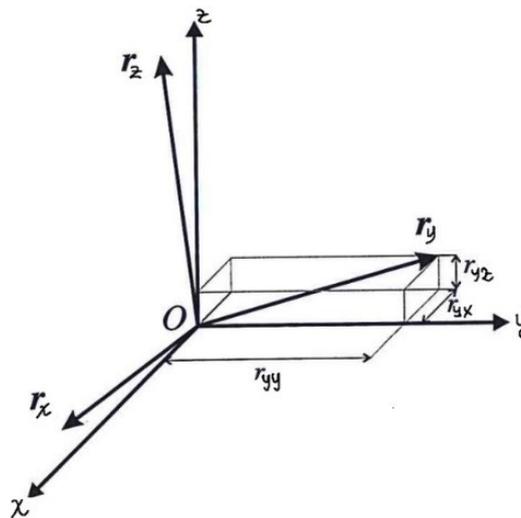


Figura 3.6 Sistema di riferimento x, y, z e vettori degli assi del sensore r_x, r_y, r_z .

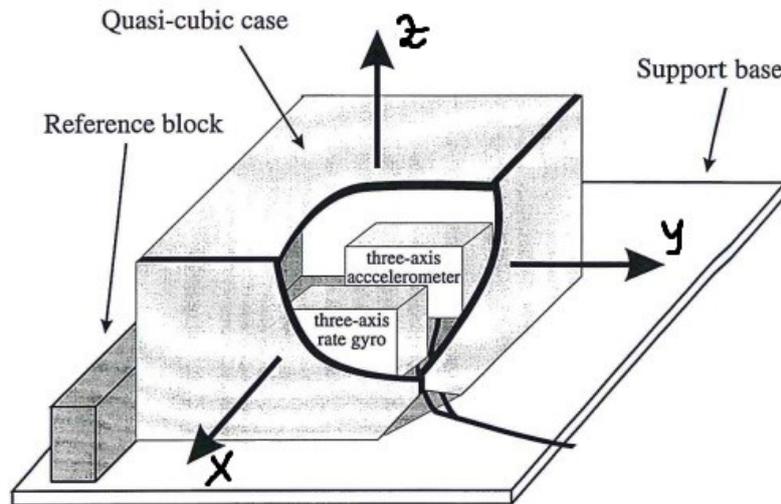


Figura 3.7 Rappresentazione della cassa contenente il sensore, posizionata sul piano orizzontale, con il blocco di riferimento.

L'acquisizione dei dati è stata basata su quanto viene illustrato negli articoli [8] e [18], e si è suddivisa in due fasi: una fase di acquisizioni statiche e un test di allineamento; queste, sono state effettuate considerando l'accelerazione gravitazionale diretta verso l'alto, lungo l'asse verticale.

Ogni sequenza è stata acquisita con frequenza di campionamento di 100 Hz per tutti i sensori, che sono stati posizionati sempre sullo stesso piano, in modo da poter garantire la confrontabilità dei dati ottenuti.

Acquisizioni statiche

Dopo aver attaccato adeguatamente l'unità all'interno della cassa, si procede effettuando tre acquisizioni differenti, ciascuna della durata di circa 60 secondi. La cassa contenente i sensori è, di volta in volta, orientata in modo tale che rispettivamente gli assi x, y, z siano allineati con l'asse verticale, lungo il quale si considera la direzione del vettore di accelerazione gravitazionale \vec{g} .

Innanzitutto, si posiziona la cassa su un piano considerato orizzontale, con l'asse x orientato in verticale; dopodiché si acquisisce per una durata di circa 70 secondi, mantenendo il sensore in condizioni statiche e, dunque, evitando ogni movimento di esso e del piano d'appoggio. Successivamente, una volta fermata la prima acquisizione e salvati adeguatamente i dati, si procede ruotando la cassa e posizionando l'asse y in verticale, per poi attivare la seconda acquisizione all'incirca della medesima durata della precedente. Lo stesso procedimento è ripetuto orientando il terzo asse allo stesso modo.

Trattandosi di tre acquisizioni differenti, si ottengono tre file separati in uscita, ciascuno relativo alla prova rispettiva.

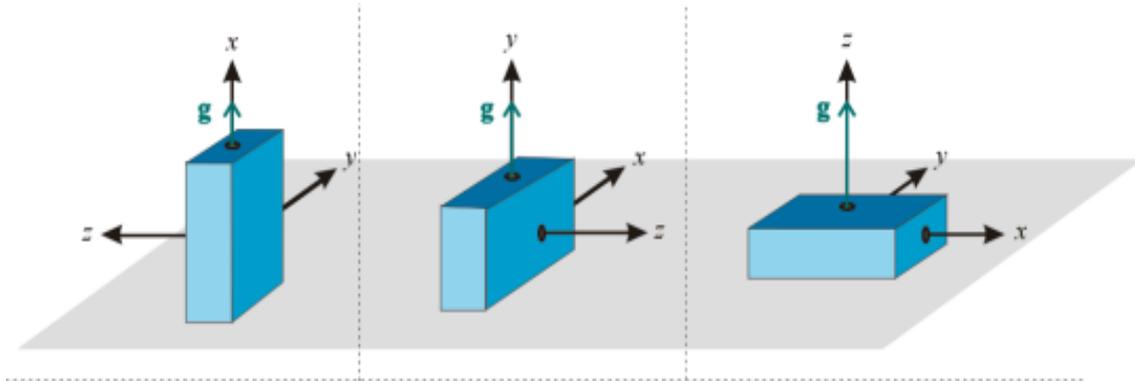


Figura 3.8 Posizioni statiche assunte dalla cassa trasparente nelle tre diverse acquisizioni. [8]

Acquisizione dinamica

La seconda parte prevede che la cassa sia fatta ruotare opportunamente. La singola acquisizione, della durata approssimativa di 9 minuti, è composta da sei frames, ottenuti ruotando la cassa nel seguente modo:

1. inizialmente la si posiziona con l'asse x orientato lungo la verticale, verso l'alto, e si acquisisce per circa 90 secondi;
2. in seguito, senza bloccare l'acquisizione, si ruota manualmente la cassa di 180° , al fine di posizionare nuovamente l'asse x lungo la verticale, ma diretto verso il basso, e si raccolgono i dati per ulteriori 90 secondi;
3. al termine di questi, la cassa viene ruotata in modo tale da posizionare l'asse y come descritto al punto 1 e poi al punto 2 per l'asse x, per poi procedere analogamente con l'asse z.

Complessivamente si ottiene un unico file contenente i dati raccolti in modo continuativo nei 9 minuti.

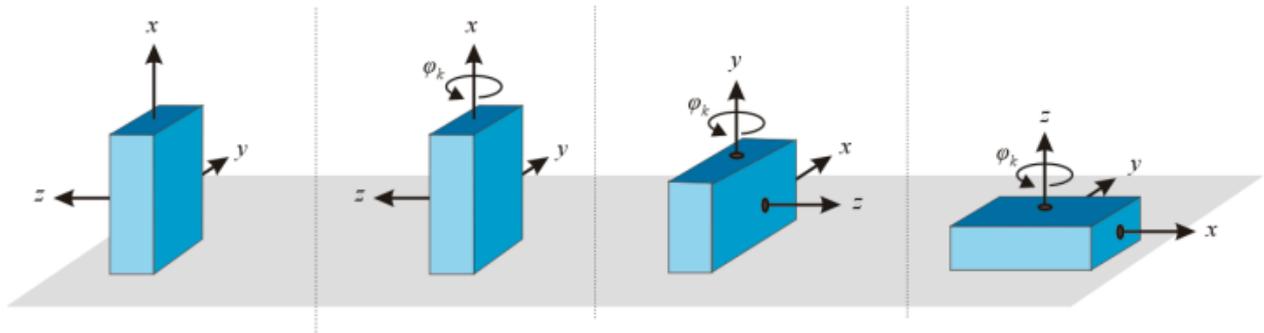


Figura 3.9 Sequenza di rotazioni seguita durante il test di allineamento, per gli assi positivi. La stessa sequenza è stata applicata allineando verso l'alto gli assi x , y , z negativi. [8]

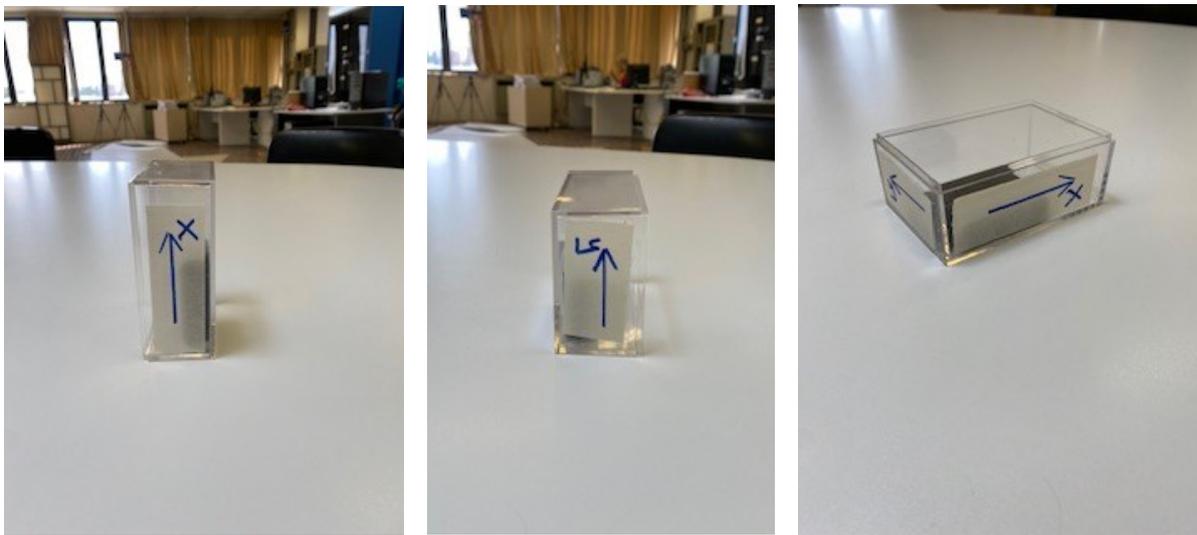


Figura 3.10 Foto scattate durante le acquisizioni statiche effettuate in laboratorio secondo il protocollo descritto.

I dati così acquisiti sono stati salvati e restituiti dai software specifici di ciascun sensore in file che sono stati importati su MATLAB ed organizzati in una cella per ogni unità, definita opportunamente nel file “Calibrazione.m”.

In seguito, per ogni sensore e per ciascuna unità, è stata richiamata la funzione “calc_par”, tramite la quale si sono calcolati tutti i parametri definiti come segue. I valori di volta in volta calcolati sono stati salvati in una struttura e restituiti nel file principale, per un totale di: una struttura per l'unità Ngimu, otto strutture per i sensori Pivot, diciotto strutture per i sensori Xsens.

Si riportano di seguito alcuni dei grafici ottenuti su MATLAB, in cui sono rappresentati gli andamenti dei segnali misurati per: sensore Ngimu, sensore Pivot 2, sensore Xsens “Head”.

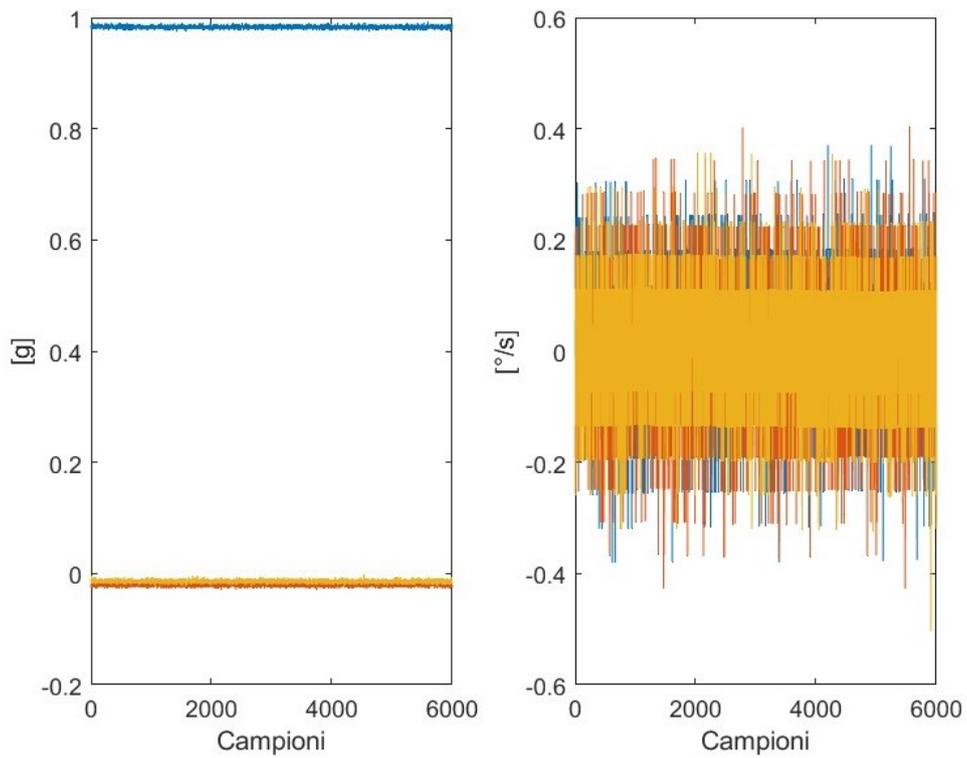


Figura 3.11 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prima prova statica (asse x allineato alla verticale) dal sensore Ngimu.

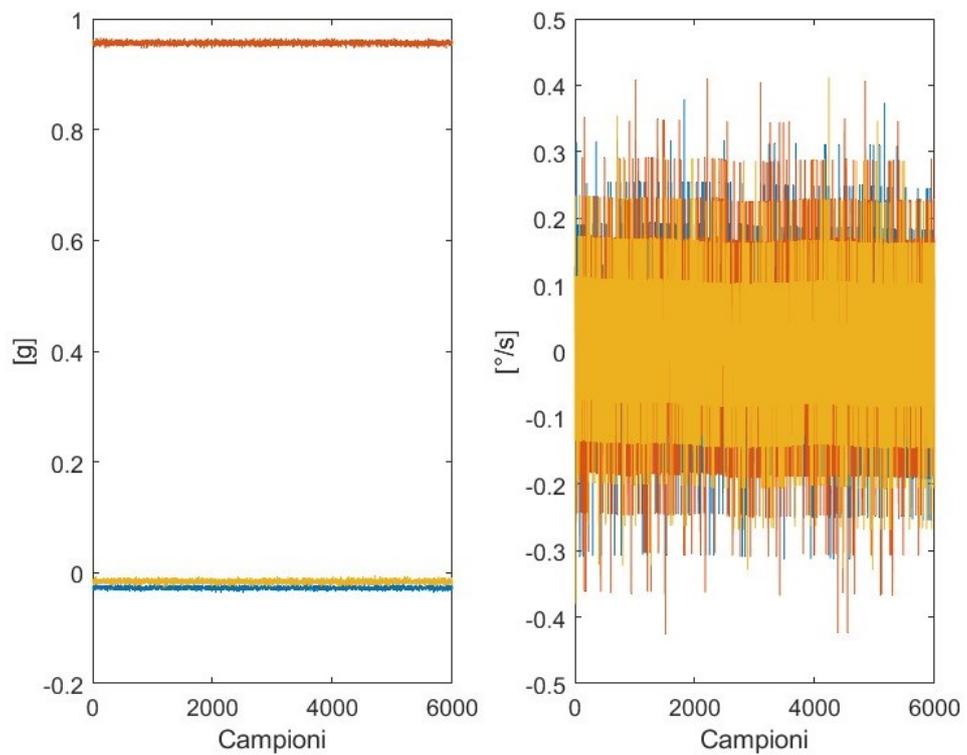


Figura 3.12 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la seconda prova statica (asse y allineato alla verticale) dal sensore Ngimu.

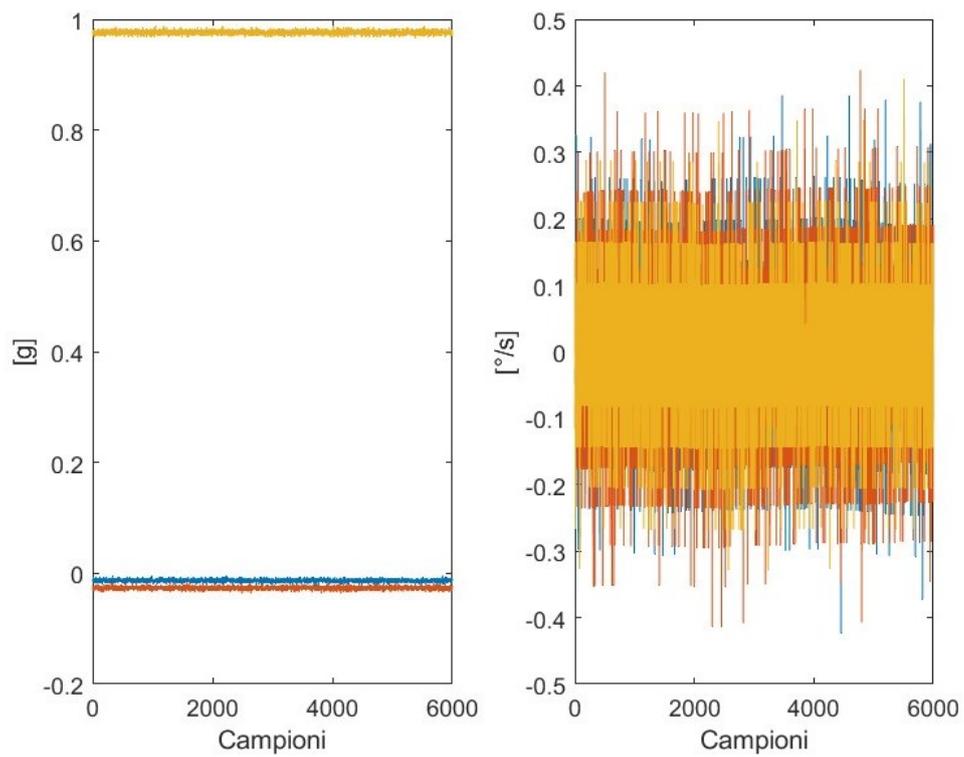


Figura 3.13 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la terza prova statica (asse z allineato alla verticale) dal sensore Ngimu.

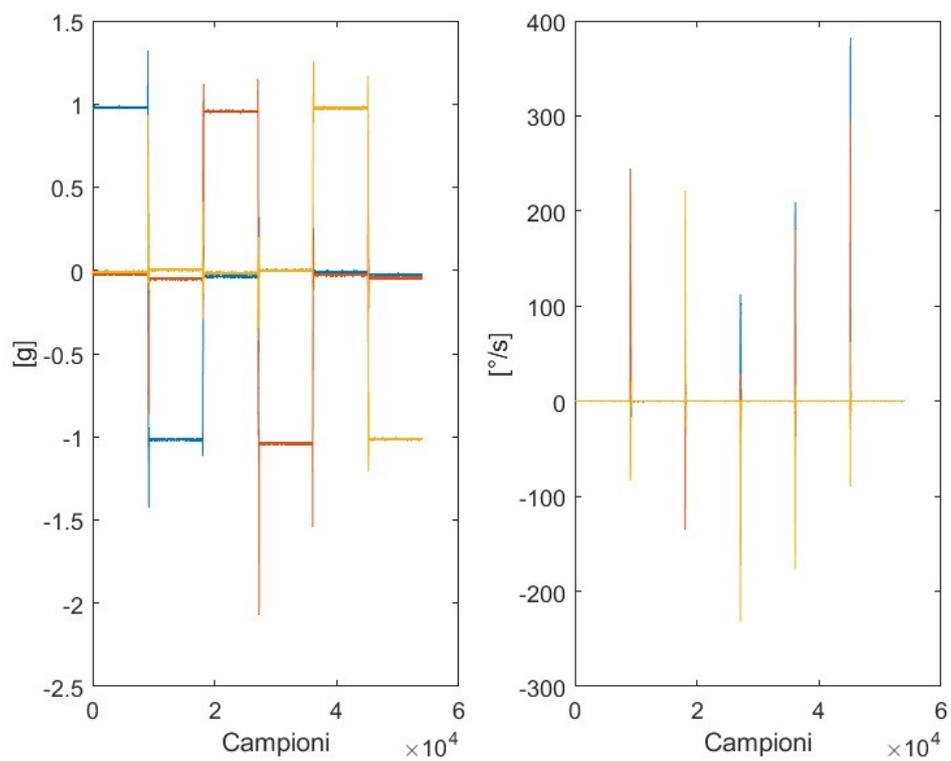


Figura 3.14 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prova di allineamento dal sensore Ngimu

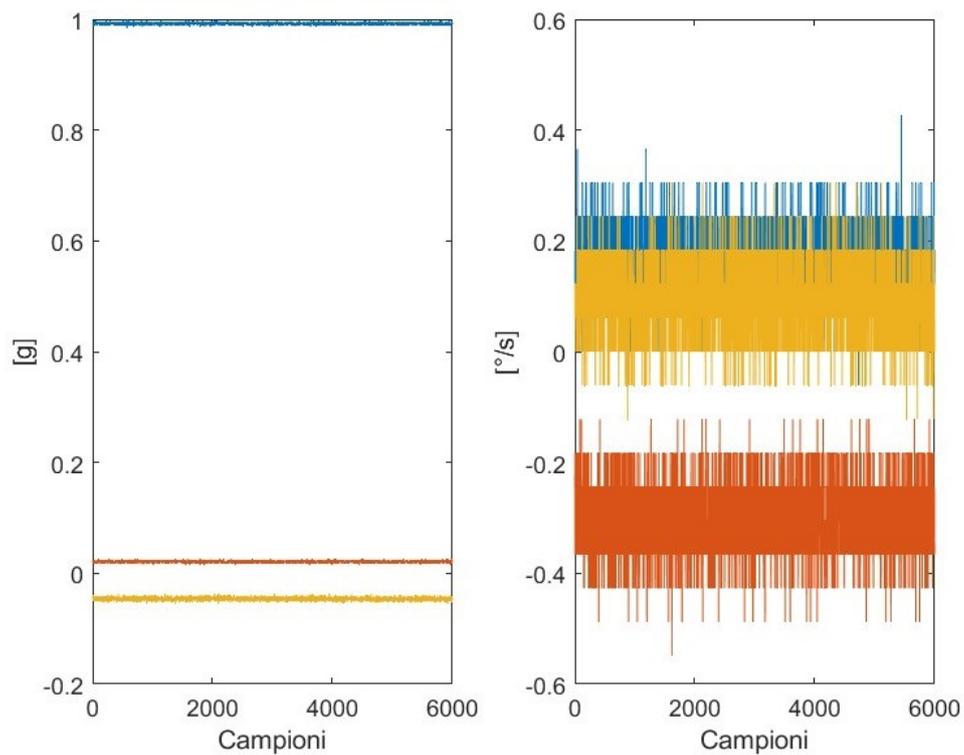


Figura 3.15 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prima prova statica (asse x allineato alla verticale) dal sensore Pivot 2.

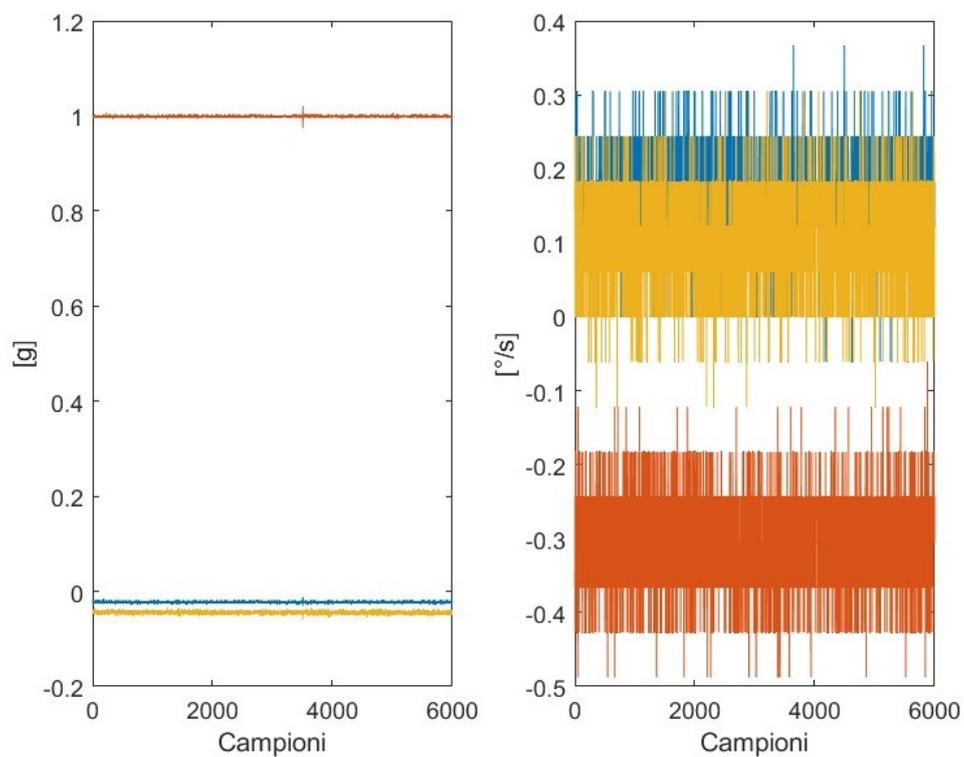


Figura 3.16 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la seconda prova statica (asse y allineato alla verticale) dal sensore Pivot 2.

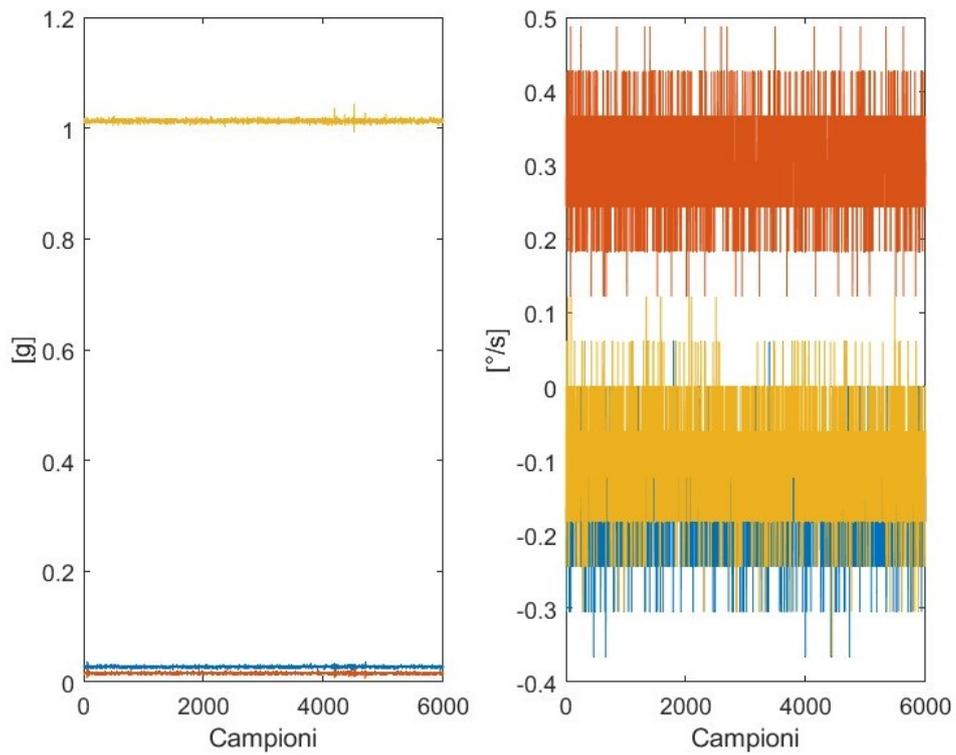


Figura 3.17 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la terza prova statica (asse z allineato alla verticale) dal sensore Pivot 2.

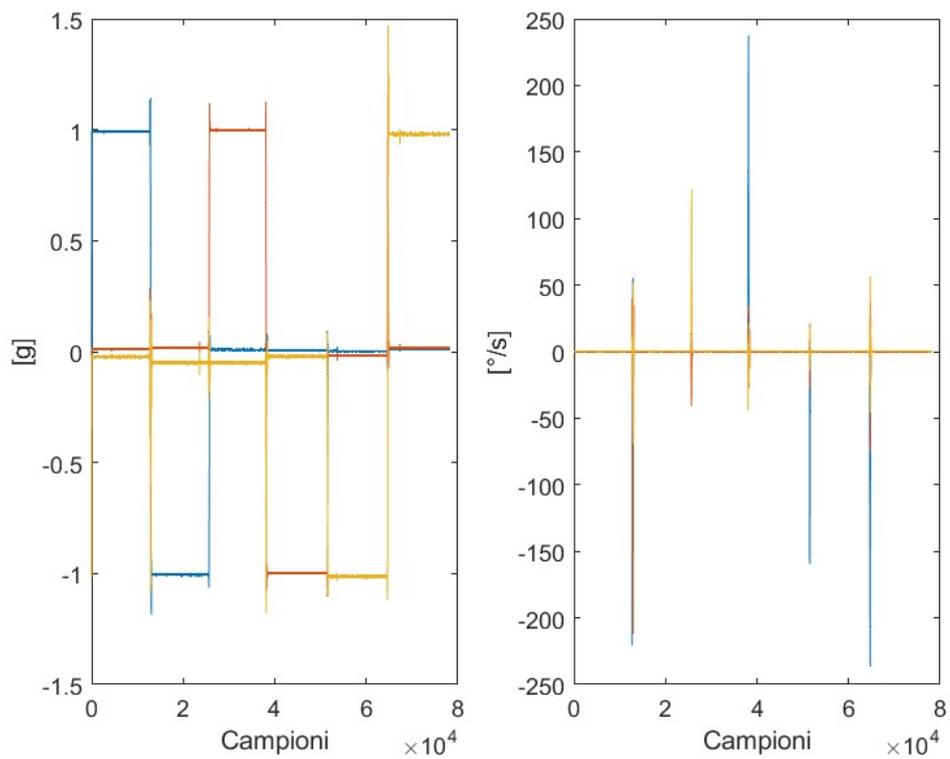


Figura 3.18 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prova di allineamento dal sensore Pivot 2.

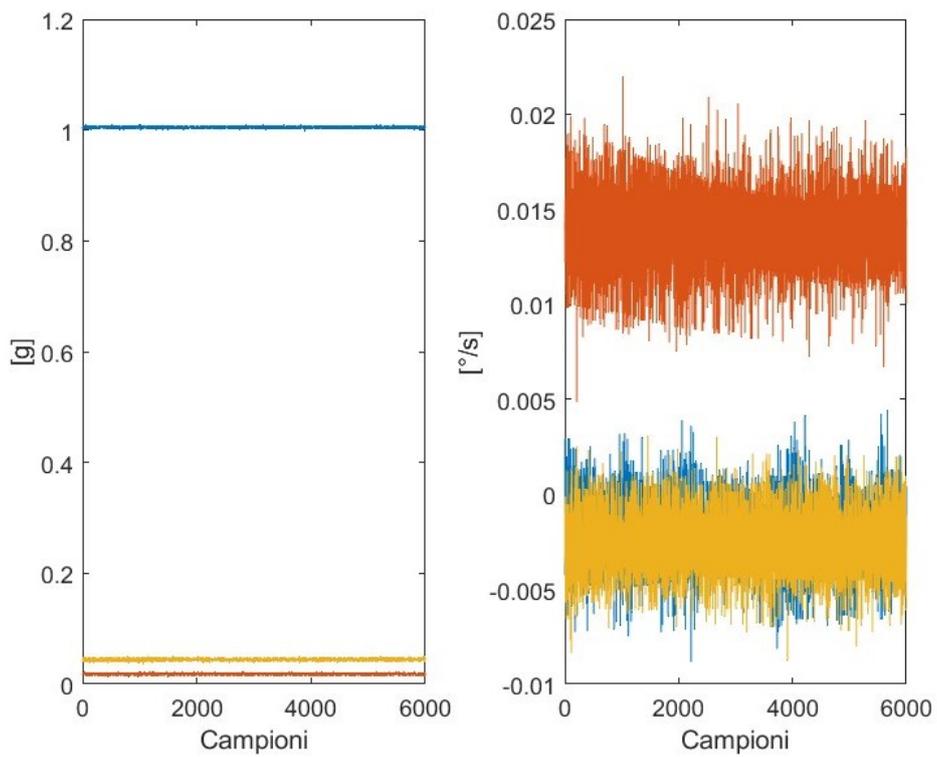


Figura 3.19 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prima prova statica (asse x allineato alla verticale) dal sensore Xsens HEAD.

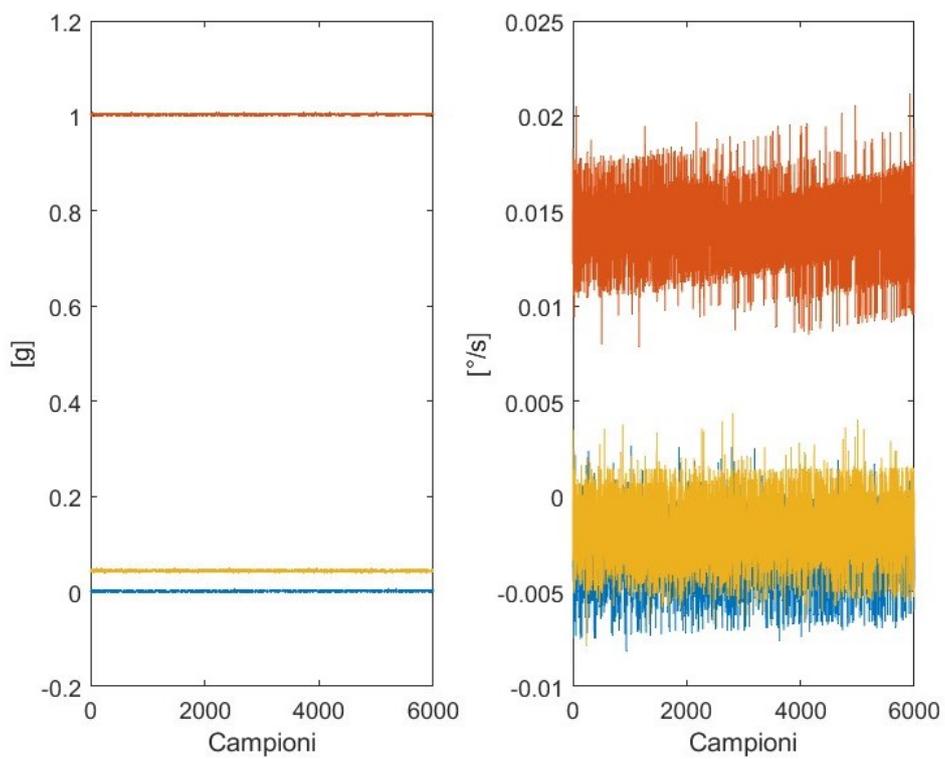


Figura 3.20 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la seconda prova statica (asse y allineato alla verticale) dal sensore Xsens HEAD.

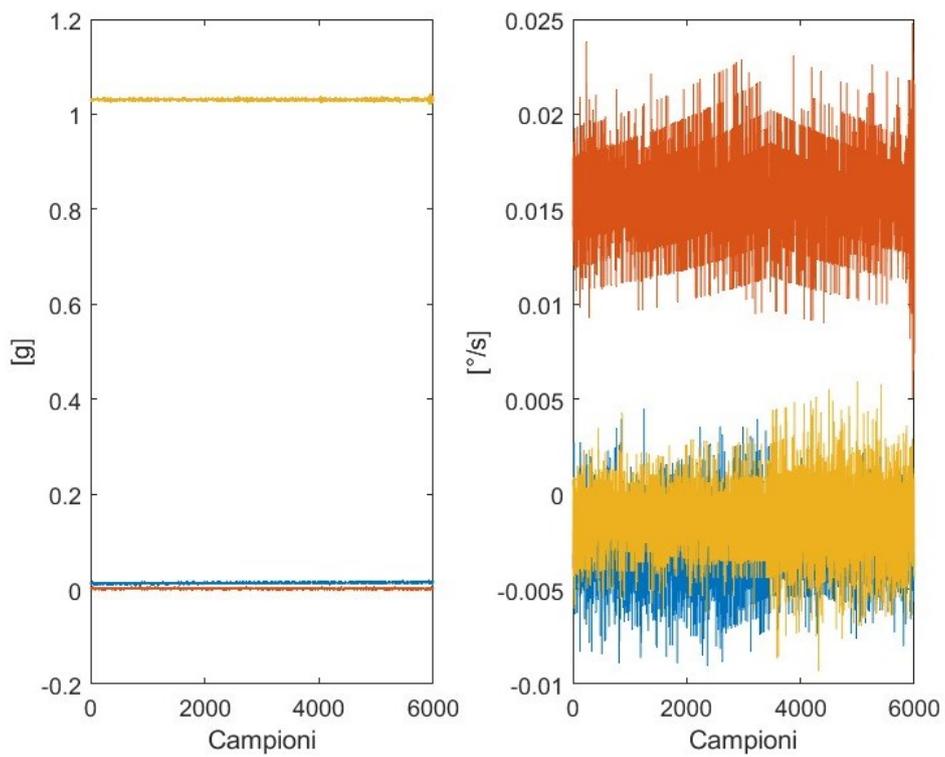


Figura 3.21 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la terza prova statica (asse z allineato alla verticale) dal sensore Xsens HEAD.

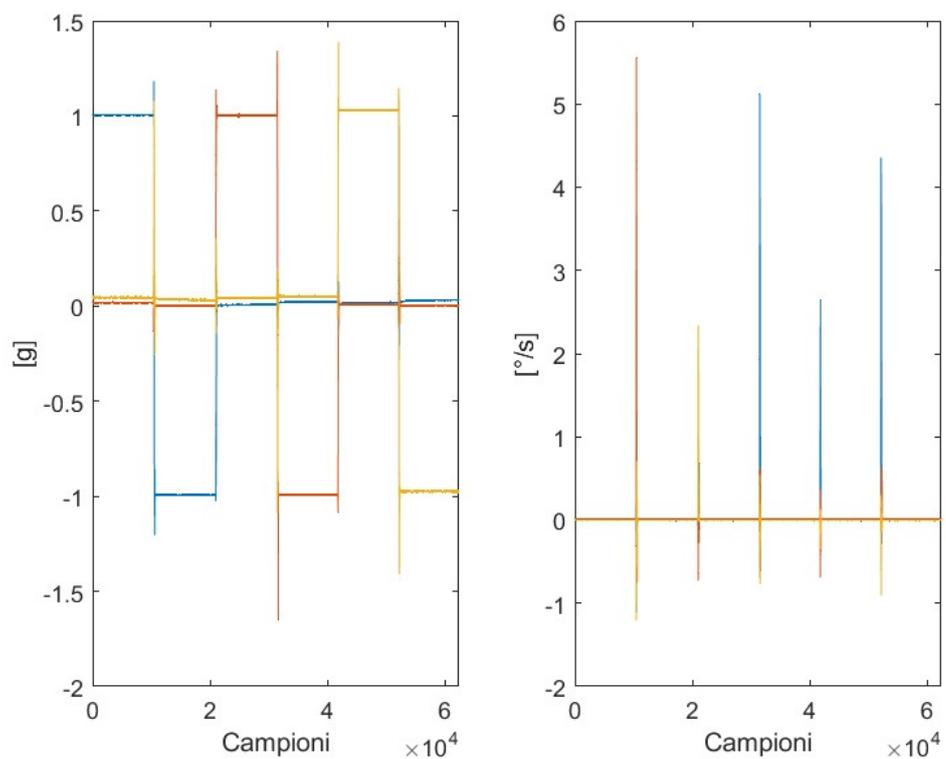


Figura 3.22 Rappresentazione dei segnali ottenuti da accelerometro (destra) e giroscopio (sinistra) durante la prova di allineamento dal sensore Xsens HEAD.

3.3 Calcolo dei parametri

Dopo aver acquisito e importato i dati come illustrato, vengono calcolate alcune metriche di tipo statico e dinamico attraverso la funzione “calc_par”. Lo scopo ultimo è quello di valutare i valori, al fine di considerare lo stato in cui si trova il sensore e, soprattutto, al fine di correggere i dati successivamente acquisiti, grazie a tali parametri correttivi calcolati.

I seguenti parametri sono espressi considerando sensori in cui l’accelerometro restituisce valori in unità di misura [g] e considerando i modelli di giroscopio e accelerometro descritti di seguito.

3.3.1 Modello di un giroscopio

Un giroscopio con risposta lineare può essere modellato come segue:

$$u_g = k_g w_s + d_g + b_g \quad (24)$$

Dove:

- u_g output restituito dal giroscopio, quindi affetto da errore; valore scalare in quanto corrispondente alla velocità angolare attorno ad un solo asse.
- k_g fattore di scala del giroscopio, corrisponde alla variazione dell’uscita in corrispondenza di una variazione dell’ingresso, cioè la pendenza della taratura e, quindi, quanto quest’ultima si discosta dall’essere una retta (relazione lineare).
- w_s velocità angolare reale, quindi non affetta da errori.
- d_g effetto dell’accelerazione lineare sul giroscopio, dipende dal principio di funzionamento del sensore.
- b_g bias del giroscopio, quindi il valore restituito in uscita quando il sensore è fermo.

Il modello (24) è presentato in forma scalare, può essere analizzato anche in forma matriciale, in quanto i giroscopi utilizzati sono solitamente sensori triassiali. Considerando che x, y, z siano i tre assi di sensibilità del dispositivo e X, Y, Z gli assi del sistema di riferimento, è possibile costruire la matrice di rotazione R_g :

$$R_g = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Inoltre, si definisce la matrice diagonale K_g contenente i tre fattori di scala, rispettivamente riferiti agli assi x, y, z .

$$K_g = \begin{bmatrix} k_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{gz} \end{bmatrix}$$

(26)

L'output del sensore, la velocità angolare reale, il bias e l'effetto dell'accelerazione sono espressi in forma vettoriale, con vettori 3x1:

$$\mathbf{u}_g = \begin{bmatrix} u_{gx} \\ u_{gy} \\ u_{gz} \end{bmatrix} \text{ dove } u_{gx} \text{ è la velocità angolare restituita lungo } x; u_{gy} \text{ lungo } y; u_{gz} \text{ lungo } z.$$

$$\mathbf{w}_s = \begin{bmatrix} w_{sx} \\ w_{sy} \\ w_{sz} \end{bmatrix} \text{ dove } w_{sx} \text{ è la velocità angolare reale lungo } x; w_{sy} \text{ lungo } y; w_{sz} \text{ lungo } z.$$

$$\mathbf{b}_g = \begin{bmatrix} b_{gx} \\ b_{gy} \\ b_{gz} \end{bmatrix} \text{ dove } b_{gx} \text{ è il valore dell'offset lungo } x; b_{gy} \text{ lungo } y; b_{gz} \text{ lungo } z.$$

$$\mathbf{d}_g = \begin{bmatrix} d_{gx} \\ d_{gy} \\ d_{gz} \end{bmatrix} \text{ dove } d_{gx} \text{ è l'effetto dell'accelerazione lineare sul giroscopio lungo } x; d_{gy} \text{ lungo } y; d_{gz} \text{ lungo } z.$$

Il modello in forma matriciale è espresso come segue:

$$\mathbf{u}_g = K_g \mathbf{R}_g \mathbf{w}_s + \mathbf{d}_g + \mathbf{b}_g$$

(27)

3.3.2 Modello di un accelerometro

Un accelerometro con risposta lineare può essere modellato come segue:

$$u_a = k_a a_s + b_a$$

(28)

Dove:

- u_a output restituito dall'accelerometro, quindi affetto da errore; valore scalare in quanto corrispondente all'accelerazione lineare lungo un solo asse.

- a_s accelerazione lineare reale, non affetta da errore.
- b_a bias dell'accelerometro, quindi l'accelerazione restituita quando il sensore è in condizione statiche.

Come illustrato nel caso dei giroscopi, anche per gli accelerometri è possibile elaborare un modello in forma matriciale nel caso di sensori 3D.

Matrice di rotazione:

$$R_a = \begin{bmatrix} r_{xX} & r_{xY} & r_{xZ} \\ r_{yX} & r_{yY} & r_{yZ} \\ r_{zX} & r_{zY} & r_{zZ} \end{bmatrix}$$

(29)

Matrice dei fattori di scala:

$$K_g = \begin{bmatrix} k_{gx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{gy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{gz} \end{bmatrix}$$

(30)

L'output del sensore, la velocità angolare reale, il bias e l'effetto dell'accelerazione sono espressi in forma vettoriale, con vettori 3x1:

$$\mathbf{u}_a = \begin{bmatrix} u_{ax} \\ u_{ay} \\ u_{az} \end{bmatrix} \text{ dove } u_{ax} \text{ è l'accelerazione lineare restituita lungo x; } u_{ay} \text{ lungo y; } u_{az} \text{ lungo z.}$$

$$\mathbf{a}_s = \begin{bmatrix} a_{sx} \\ a_{sy} \\ a_{sz} \end{bmatrix} \text{ dove } a_{sx} \text{ è l'accelerazione lineare reale lungo x; } a_{sy} \text{ lungo y; } a_{sz} \text{ lungo z.}$$

$$\mathbf{b}_a = \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} \text{ dove } b_{ax} \text{ è il valore dell'offset lungo x; } b_{ay} \text{ lungo y; } b_{az} \text{ lungo z.}$$

Il modello in forma matriciale è espresso come segue:

$$\mathbf{u}_a = \mathbf{K}_a \mathbf{R}_a \mathbf{a}_s + \mathbf{b}_a$$

(31)

3.3.3 Parametri giroscopio ([8], [18], [20])

Deviazione standard

La deviazione standard di un giroscopio è utile per quantificare l'influenza del rumore bianco nei segnali acquisiti. Si calcola per ciascuna prova statica e per ciascun asse; si ottengono, quindi, tre vettori 3x1 ciascuno dei quali è riferito ad una delle tre prove statiche e contiene, rispettivamente, deviazione standard lungo x , y e z .

$$std_g = std(gyr)$$

(32)

Offset del giroscopio

Calcolare l'offset del giroscopio \mathbf{b}_g consiste nel ricavare il valore di velocità angolare restituito, lungo ciascun asse, in condizioni statiche. Come la precedente, è una metrica di tipo statico e si ottiene calcolando il valor medio del segnale ottenuto lungo ciascun asse, per ciascuna delle tre prove statiche.

$$b_g = mean(gyr)$$

(33)

Effetto dell'accelerazione lineare

L'effetto dell'accelerazione lineare sul giroscopio d_g è un parametro statico che si ricava dal prodotto scalare tra il vettore 3x1 contenente i fattori $\mathbf{k}_{g,a}$ lungo i tre assi e il vettore 3x1 contenente l'accelerazione lineare lungo i tre assi. Nello specifico:

$$k_{g,a x} = \frac{u_{g+,x} - u_{g-,x}}{2}$$

(34)

dove al numeratore si ha la differenza tra il valor medio dell'output del giroscopio lungo l'asse x quando questo è allineato parallelo e antiparallelo alla direzione di \vec{g} . La stessa espressione viene calcolata per gli assi y e z analogamente, per ottenere $k_{g,a y}$ e $k_{g,a z}$.

$$d_g = \mathbf{k}_{g,a} \cdot \mathbf{a}$$

(35)

Dove \mathbf{a} è il vettore 3x1 che contiene i valori medi degli output dell'accelerometro lungo x , y e z in condizioni statiche, quando l'asse del sensore è allineato parallelamente alla direzione di \vec{g} .

Matrice di calibrazione

La matrice di calibrazione, ovvero l'inversa di $K_g R_g$, nell'articolo [18] è ricavata come segue:

$$U_g = K_g \cdot R_g \cdot w \quad (36)$$

$$K_g \cdot R_g = U_g w^{-1} \quad (37)$$

La distinzione tra K_g e R_g è ottenuta considerando che R_g è una matrice di rotazione, quindi le sue righe sono versori, cioè vettori di modulo unitario.

$$\begin{bmatrix} k_{g,x} \\ k_{g,y} \\ k_{g,z} \end{bmatrix} = \text{diag}[(U_g \cdot w^{-1}) \cdot (U_g \cdot w^{-1})^T] \quad (38)$$

$$R_g = K_g^{-1} \cdot U_g \cdot w^{-1} \quad (39)$$

Per poter ricavare la matrice di calibrazione risulta, dunque, necessario conoscere con precisione le velocità angolari con cui si è ruotato il dispositivo durante le prove dinamiche, non note nel caso dell'implementazione effettuata, motivo per cui non è stata calcolata tale matrice.

Una volta ottenuti tutti i parametri correttivi, è possibile ricavare il valore reale di velocità angolare:

$$w_{correct} = (K_g R_g)^{-1} (u_g - b_g - d_g) \quad (40)$$

3.3.4 Parametri accelerometro ([8], [18], [20])

Deviazione standard

La deviazione standard dell'accelerometro è utile per quantificare l'influenza del rumore bianco nei segnali acquisiti. Si calcola per ciascuna prova statica e per ciascun asse; si ottengono, quindi, tre vettori 3x1 ciascuno dei quali è riferito ad una delle tre prove statiche e contiene, rispettivamente, deviazione standard lungo x , y e z .

$$std_a = std(acc) \quad (41)$$

Offset dell'accelerometro

Calcolare l'offset dell'accelerometro \mathbf{b}_a consiste nel ricavare il valore di accelerazione restituito, lungo ciascun asse, in condizioni statiche. Come la precedente, è una metrica di tipo statico e si ottiene considerando la matrice U_{a+} 3x3 contenente i valori medi dell'output dell'accelerometro lungo i tre assi (ogni colonna è un asse, rispettivamente x, y, z), nelle tre prove (ogni riga è una prova, rispettivamente x, y, z allineati paralleli alla verticale); la stessa matrice è elaborata considerando gli assi allineati in verso antiparallelo alla verticale (U_{a-}). Si ottengono le seguenti espressioni:

$$U_{a+} = K_a \cdot R_a \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + B_a \quad (42)$$

$$U_{a-} = K_a \cdot R_a \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} + B_a \quad (43)$$

Dove B_a è la matrice 3x3 contenente gli offset, rispettivamente lungo x, y, z (colonne), per ogni prova (prima riga asse x allineato alla verticale, seconda asse y, terza asse z). Le matrici +I e -I contengono le accelerazioni espresse in multipli di g.

$$U_{a+} + U_{a-} = 2B_a \quad (44)$$

$$B_a = \frac{1}{2}(U_{a+} + U_{a-}) \quad (45)$$

Ciascuna riga di tale matrice contiene il vettore degli offset lungo x, y, z relativi agli assi x (prima riga), y (seconda riga) e z (terza riga) allineati alla verticale.

Matrice di calibrazione e fattori di scala

La matrice di calibrazione dell'accelerometro $(K_a \cdot R_a)^{-1}$ è ottenuta da:

$$U_{a+} - U_{a-} = 2(K_a \cdot R_a) \quad (46)$$

$$C_a = (K_a \cdot R_a)^{-1} = \frac{1}{2}(U_{a+} - U_{a-})^{-1} \quad (47)$$

$$\begin{bmatrix} k_{a,x}^2 \\ k_{a,y}^2 \\ k_{a,z}^2 \end{bmatrix} = \text{diag}[(K_a \cdot R_a) \cdot (K_a \cdot R_a)^T]$$

(48)

$$K_a = \begin{bmatrix} k_{a,x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{a,y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{a,z} \end{bmatrix}$$

(49)

Valutazione della bontà della calibrazione

È possibile calcolare due metriche dal test dinamico, esse permettono di valutare il disallineamento degli assi rispetto alla direzione dell'accelerazione gravitazionale, in termini di norma e di angolo; questi due errori sono idealmente nulli e sono calcolati come segue:

$$e_{|a|} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} - |g|$$

(50)

$$e_{\delta} = \cos^{-1}\left(\frac{a_i}{|a_i|} \cdot \frac{g_i}{|g_i|}\right)$$

(51)

$e_{|a|}$ è il disallineamento in termini di norma e si calcola con la differenza tra la norma del vettore delle accelerazioni lungo i tre assi e la norma del vettore accelerazione gravitazionale.

e_{δ} è il disallineamento in termini di angolo compreso tra l'asse i allineato alla verticale e la direzione di g .

In totale si calcolano sei valori per ciascuno dei due, in quanto entrambe le operazioni vanno effettuate per ogni frame del test dinamico; quindi, per ogni asse allineato parallelamente e anti parallelamente a g . Una volta ricavati tutti i parametri della calibrazione, questi due ultimi valori possono essere calcolati nuovamente, ma sugli output corretti con le altre metriche ricavate. In questo modo si può valutare se il *refinement* della calibrazione ha avuto un impatto positivo sui dati in uscita dai sensori, considerando se i valori di $e_{|a|}$ e e_{δ} si sono ridotti e sono più vicini al valore nullo ideale.

Con tutti i parametri correttivi calcolati, è possibile ricavare il valore reale di velocità angolare:

$$a_{correct} = (K_a R_a)^{-1}(u_a - b_a)$$

(52)

4. RISULTATI

L'elaborazione dei dati sulla piattaforma MATLAB ha prodotto ventisette strutture diverse in uscita, una per ciascuna unità calibrata, contenenti tutti i parametri calcolati, tali valori sono riportati in appendice. L'analisi di essi ha permesso la valutazione delle prestazioni di ciascun sensore in sé ed a confronto con le altre unità, con la possibilità di stabilire quale è attualmente il sensore più performante.

Occorre specificare che le valutazioni che seguono si basano sui parametri calcolati e non considerano gli effetti della temperatura e l'eventuale non orizzontalità del piano.

Per il sensore Ngimu si rappresentano i grafici complessivi per ciascun parametro, per ogni prova e asse; invece, per i sensori Pivot e Xsens, poiché caratterizzati da più di un'unità, si rappresentano grafici in cui sono state effettuate delle medie tra le tre prove statiche dei valori calcolati di ogni parametro di tipo statico.

4.1. Sensore *Ngimu*

Il sensore presenta una deviazione standard dell'accelerometro (g) in linea con gli altri sensori, non discostandosi particolarmente e con valori nel range [0,002; 0,003]. I valori risultano simili se si confrontano le tre prove statiche effettuate (figura 4.1).

La deviazione standard del giroscopio ($^{\circ}/s$) risulta, invece, essere più elevata rispetto agli altri sensori, essendo essa compresa nell'intervallo [0,08; 0,12] considerando le tre prove statiche e i tre assi. È possibile visualizzare che tra i tre assi non ci sono particolari differenze nei valori rilevati (figura 4.2).

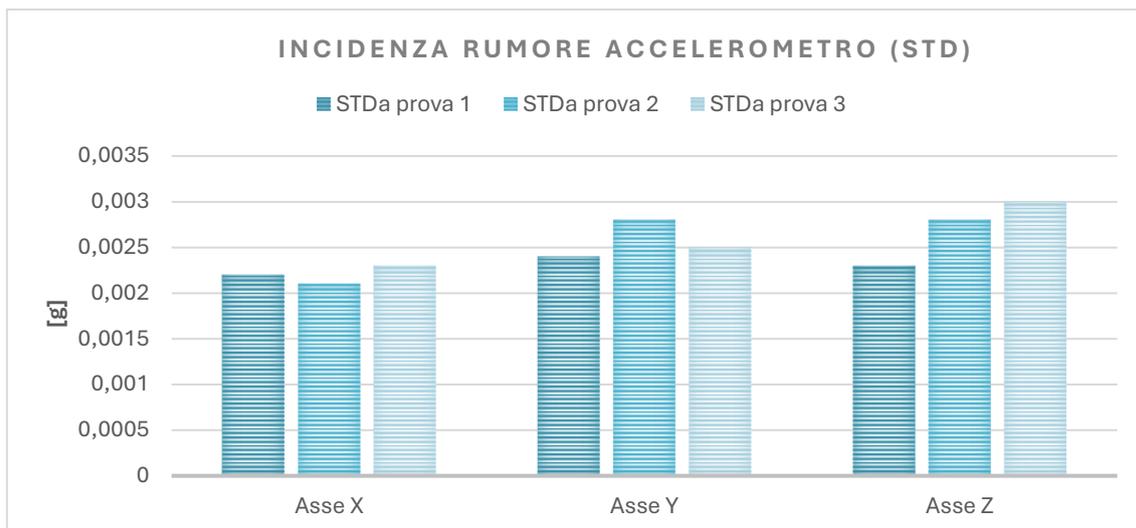


Figura 4.1 Grafico deviazione standard dell'accelerometro triassiale del sensore Ngimu; i tre gruppi rappresentano i tre assi del sensore, mentre le tre colonne di ciascun gruppo costituiscono le tre prove statiche effettuate.

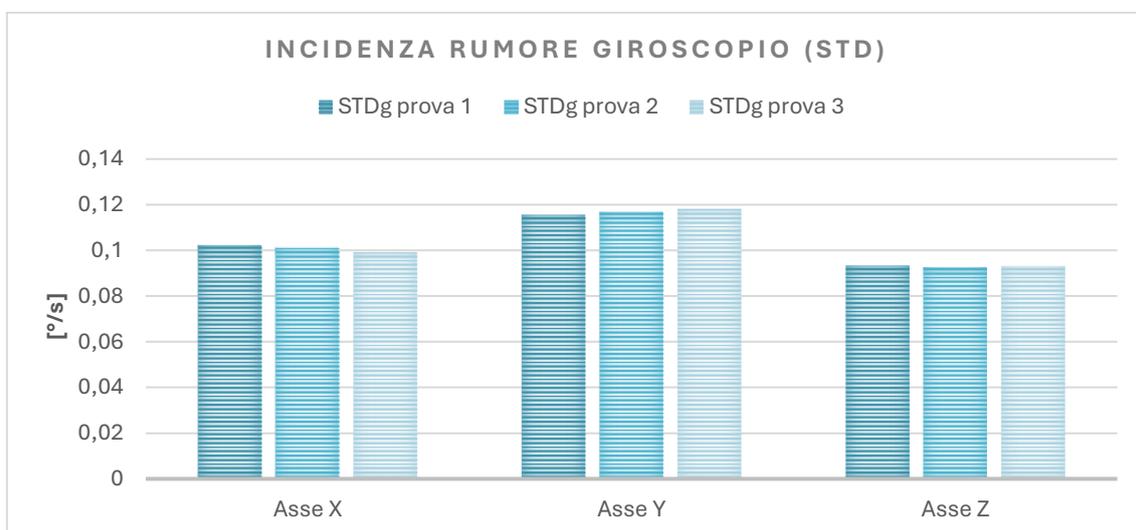


Figura 4.2 Grafico deviazione standard del giroscopio triassiale del sensore Ngimu; i tre gruppi rappresentano i tre assi del sensore, mentre le tre colonne di ciascun gruppo costituiscono le tre prove statiche effettuate.

L'accelerometro presenta lungo ciascun asse un offset negativo, visibile anche dalla figura 3.11, si noti che il bias dell'asse y risulta più rilevante rispetto agli altri due. Complessivamente, i valori dell'unità Ngimu sono maggiori ai valori dei sensori Pivot e Xsens. (figura 4.3)

Il bias del giroscopio, invece, è molto basso e vicino allo zero, condizione ideale. Risulta essere il più basso tra il gruppo di sensori calibrati. (figura 4.4)

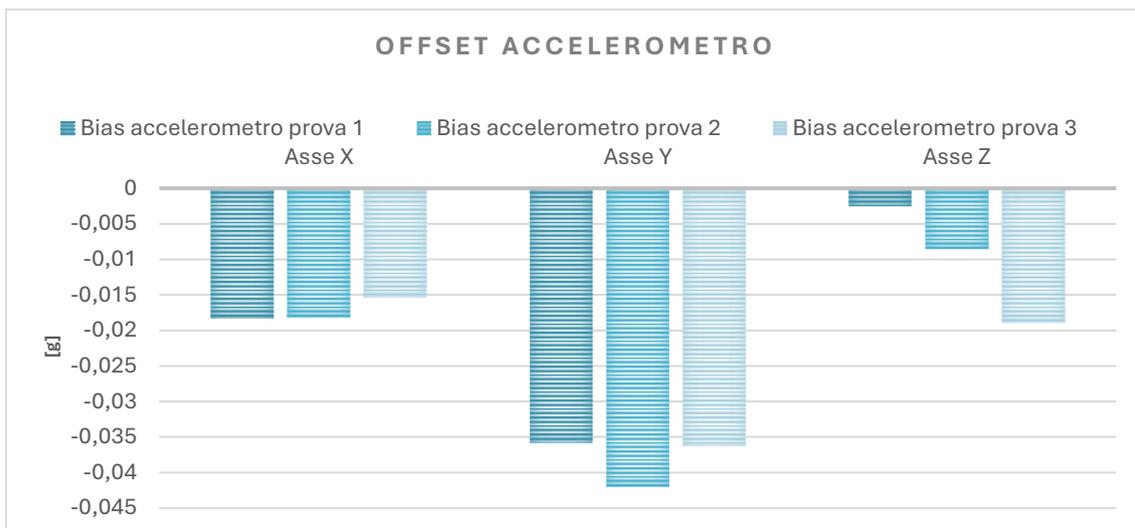


Figura 4.3 Grafico offset dell'accelerometro triassiale del sensore Ngimu; i tre gruppi rappresentano i tre assi del sensore, mentre le tre colonne di ciascun gruppo costituiscono le tre prove statiche effettuate.

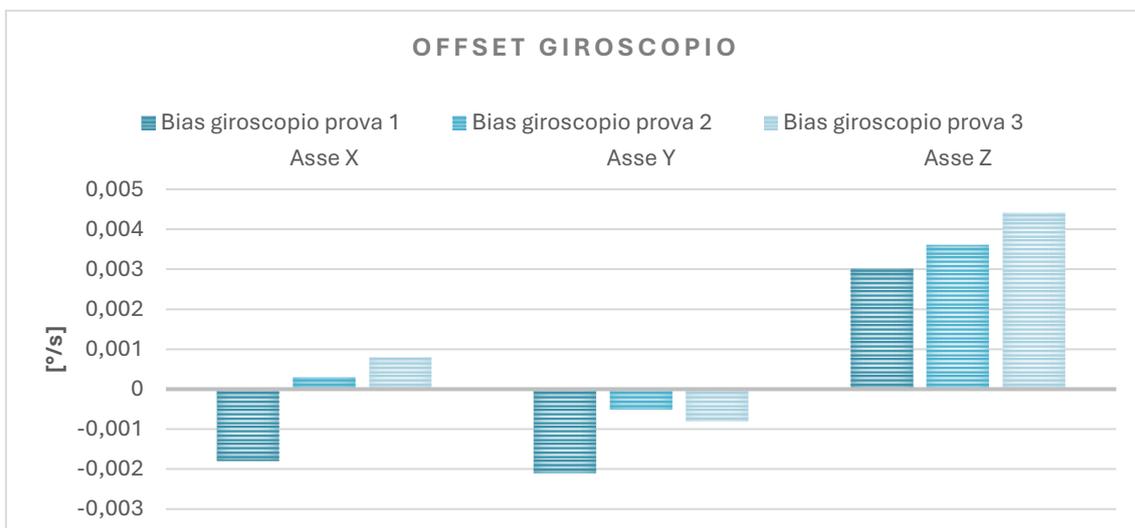


Figura 4.4 Grafico offset del giroscopio triassiale del sensore Ngimu; i tre gruppi rappresentano i tre assi del sensore, mentre le tre colonne di ciascun gruppo costituiscono le tre prove statiche effettuate.

Il sensore presenta un disallineamento compreso tra $-0,04$ e $+0,04$ g in modulo (figura 4.5), di circa 3° considerando l'angolo (figura 4.6). Tali valori non si discostano particolarmente dall'andamento del gruppo di sensori calibrati, seguendo la tendenza registrata complessivamente.

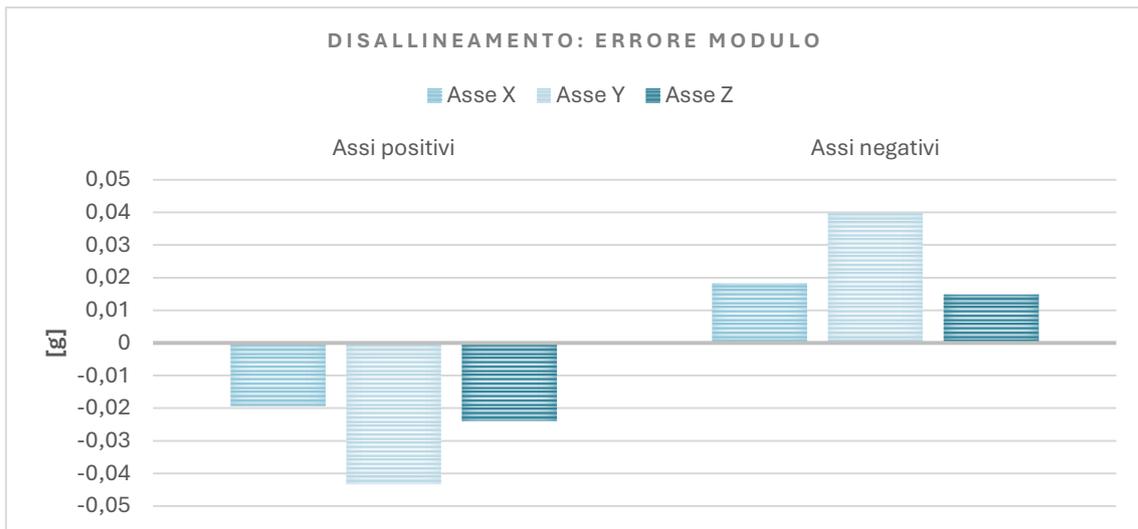


Figura 4.5 Disallineamento degli assi calcolato in termini di modulo; i due gruppi costituiscono rispettivamente l'allineamento degli assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto) e in modo antiparallelo, le tre colonne sono i tre assi.



Figura 4.6 Disallineamento degli assi calcolato in termini di angolo compreso; i due gruppi costituiscono rispettivamente l'allineamento degli assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto) e in modo antiparallelo, le tre colonne sono i tre assi.

Per il sensore Ngimu è stato calcolato un valore del parametro d_g pari a: 0,000825 °/s.

4.2. Sensori Pivot

Per visualizzare l'andamento delle otto unità Pivot, si analizzano gli andamenti considerando le medie tra le tre prove dei valori registrati lungo ciascun asse (x, y, z).

L'accelerometro presenta valori di deviazione standard molto simili tra gli otto sensori, tutti nell'intorno di 0,002 g. Si noti che l'asse z è caratterizzato da valori maggiori rispetto agli altri due assi, per tutte le unità, dunque è maggiormente affetto da rumore. (figura 4.7)

Il giroscopio, invece, è caratterizzato da una deviazione standard con valor medio: [0,059; 0,064; 0,062] °/s, quindi, tra i tre assi non si registrano particolari differenze. Considerando le tre tipologie di sensori, l'andamento si colloca a metà tra i valori del Ngimu e del Xsens. (figura 4.8)

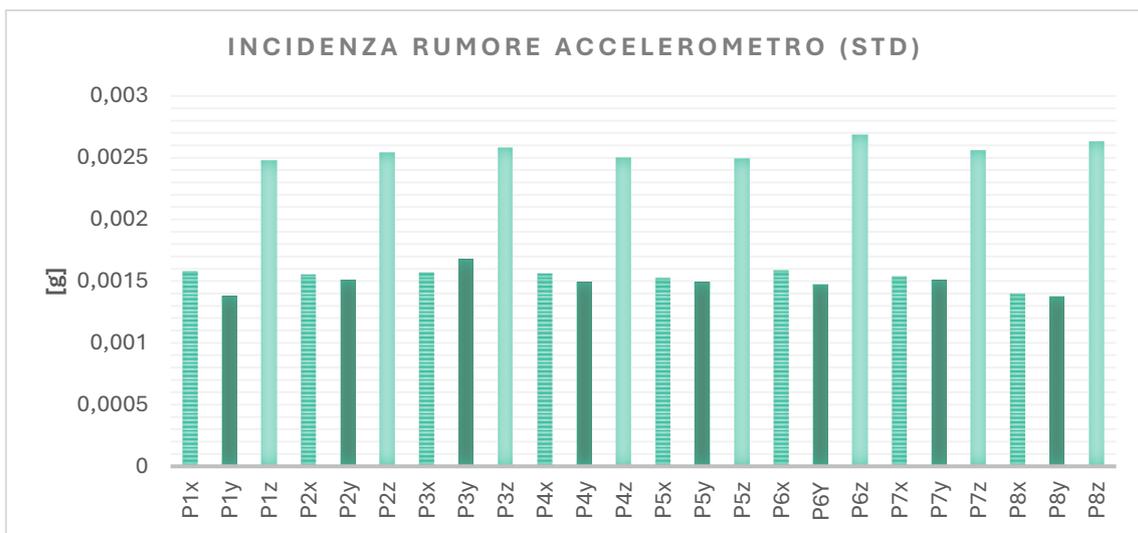


Figura 4.7 Grafico deviazione standard dell'accelerometro triassiale dei sensori Pivot; per ciascuno degli otto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

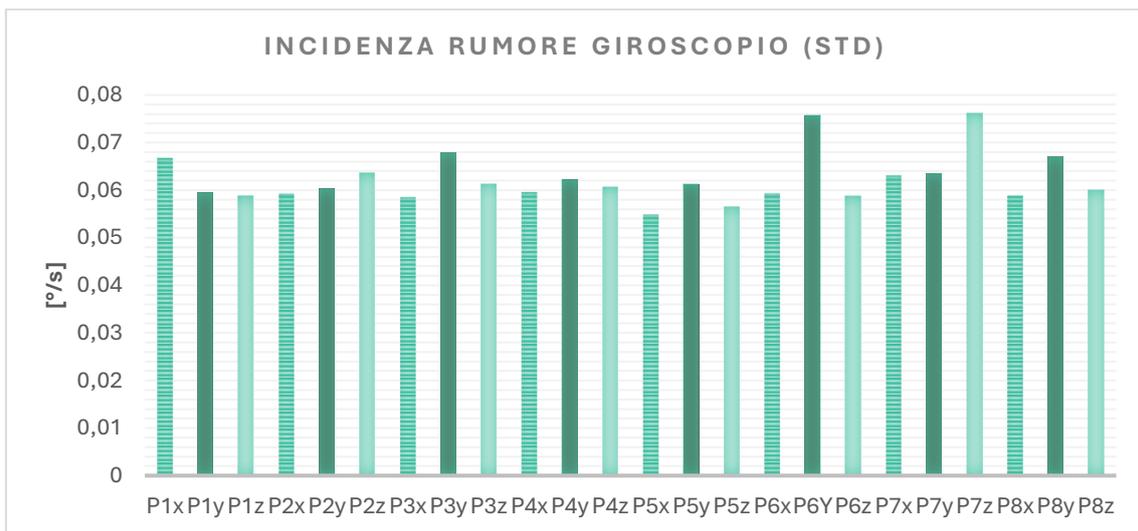


Figura 4.8 Grafico deviazione standard del giroscopio triassiale dei sensori Pivot; per ciascuno degli otto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

L'offset dell'accelerometro registrato mediamente lungo gli assi x e z è per tutti i sensori compreso tra -0,1 e 0,1 g; si registrano picchi negativi fuori da questo intervallo negli offset lungo l'asse z di

alcuni sensori, in particolare i più evidenti sono il 2, che registra il picco maggiore, il 4 e il 6. (fig. 4.9)

La maggior parte dei sensori registra un offset del giroscopio compreso tra $-0,1$ e $0,1$ $^{\circ}/s$ per tutti e tre gli assi; l'unica eccezione è costituita dal sensore 5, che ha un picco a $0,3$ nell'offset dell'asse z. In media, gli offset degli assi x e y sono i maggiori registrati tra i tre gruppi di sensori; invece, l'asse z presenta un bias che è mediamente in linea con gli altri registrati. (fig. 4.10)

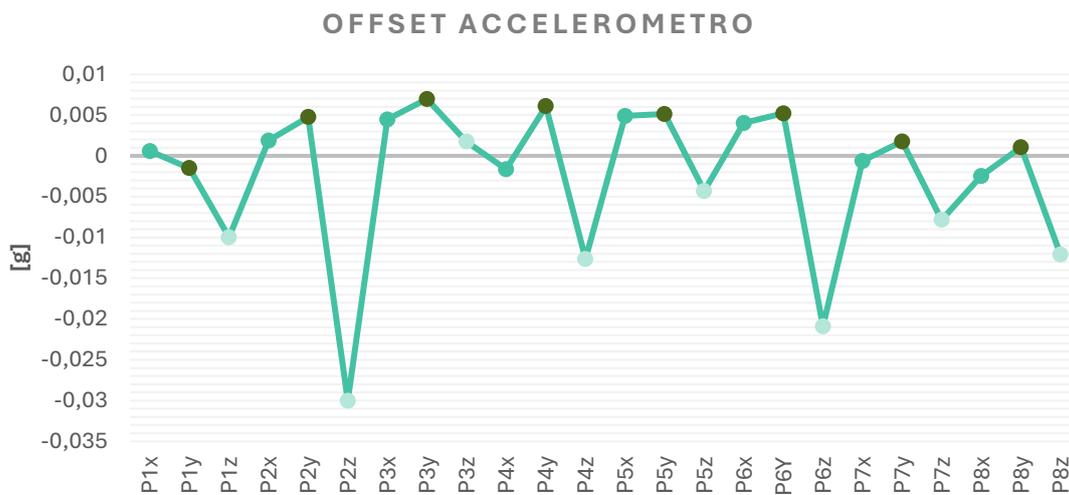


Figura 4.9 Grafico offset degli accelerometri dei sensori Pivot; per ciascuno degli otto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

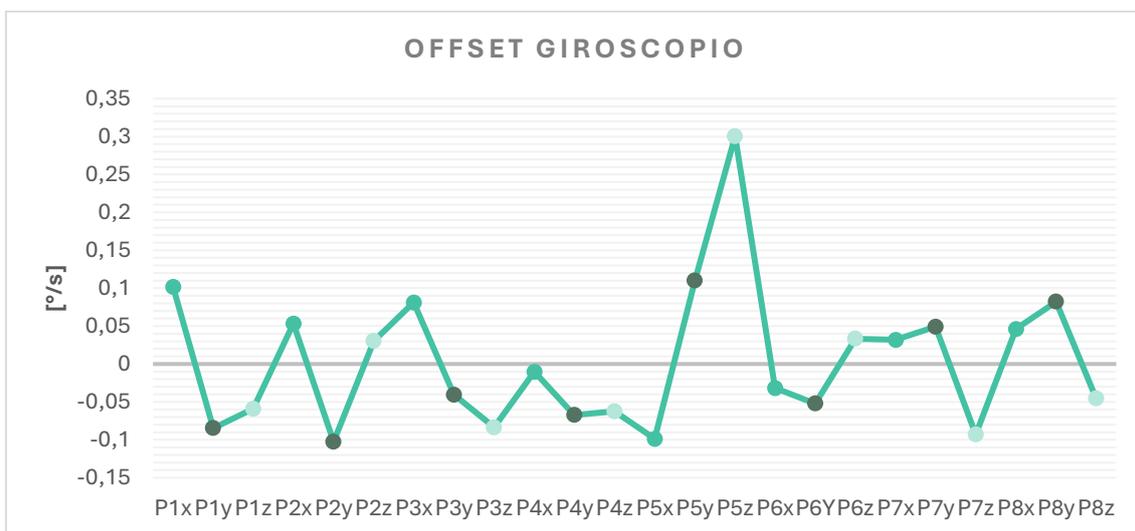


Figura 4.10 Grafico offset dei giroscopi dei sensori Pivot; per ciascuno degli otto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

L'errore di disallineamento in modulo risulta compreso tra $-0,0009$ e $0,01$ g; nello specifico il sensore 2 e il sensore 3 presentano i picchi maggiori nel disallineamento dell'asse z e il sensore 4 i picchi

maggiori per quello dell'asse x. Il sensore 8 rispecchia maggiormente le condizioni di idealità, con errori molto vicini allo zero.

Il disallineamento degli assi dell'accelerometro è espresso tramite un angolo che per tutti i sensori e per tutti gli assi è compreso tra 0° e 4° . L'asse i picchi più notevoli sono registrati dai sensori 1 (asse y negativo), 2 (assi y positivo e x negativo), 6 (asse x negativo), 7 (assi z positivo, x negativo, z negativo). Il sensore 8 presenta gli errori più piccoli, dunque si avvicina maggiormente alla condizione ideale.

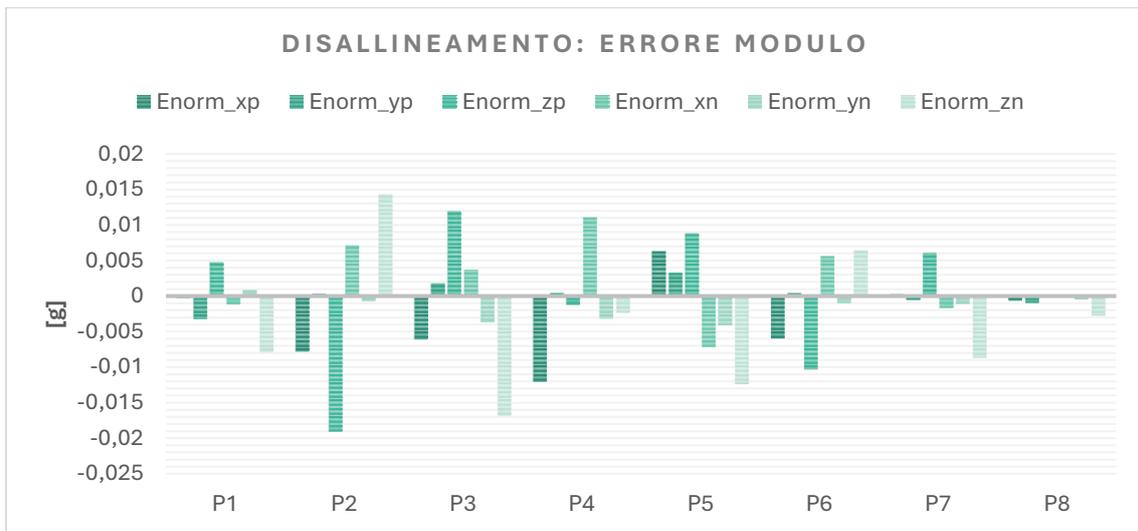


Figura 4.11 Disallineamento degli assi calcolato in termini di modulo; per ciascuna unità, i sei gruppi costituiscono rispettivamente l'allineamento dei 3 assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto).

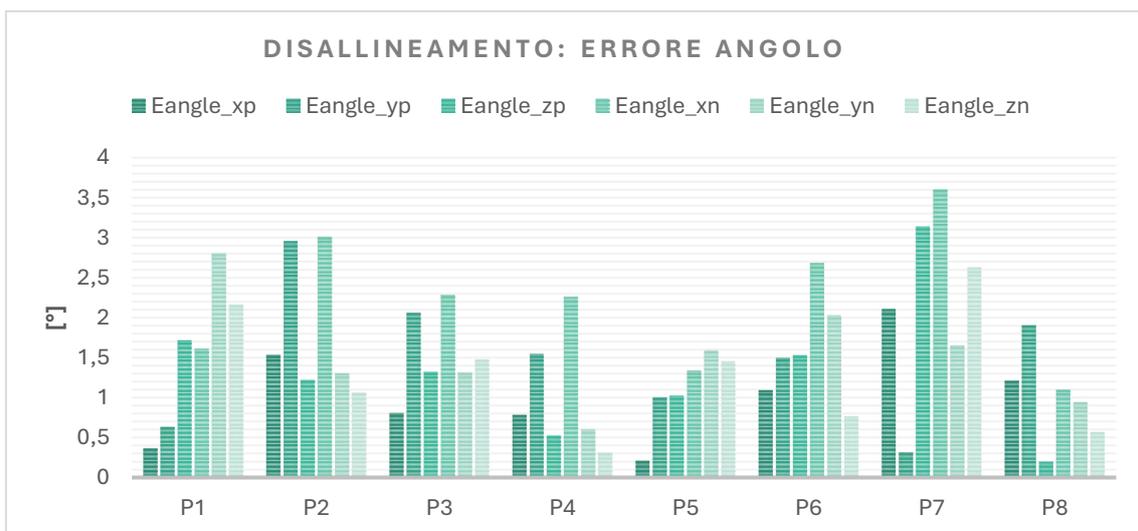


Figura 4.12 Disallineamento degli assi calcolato in termini di angolo compreso; per ciascuna unità, i sei gruppi costituiscono rispettivamente l'allineamento dei 3 assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto) e in modo antiparallelo.

Per i sensori Pivot sono stati calcolati otto valori del parametro d_g , con un valor medio pari a: 0,00851 °/s.

4.3. Sensore Xsens

Anche nel caso dei diciotto sensori Xsens sono state effettuate delle medie tra i valori di ogni asse registrati nelle tre prove.

Le deviazioni standard medie di ogni asse degli accelerometri si mantengono in un intervallo compreso tra 0,001 e 0,0025 g. Occorre notare che l'asse z di tutti i sensori presenta una standard deviation maggiore rispetto agli altri due assi; complessivamente, l'andamento è in linea con gli altri sensori calibrati. (fig. 4.13)

Le deviazioni standard dei giroscopi sono comprese tra 10^{-3} e $2 \cdot 10^{-3}$ °/s, non si registrano picchi particolari. I sensori Xsens, in media, presentano dei valori molto inferiori e vicini allo zero rispetto alle altre tipologie di sensori, caratterizzati da deviazioni standard anche fino ad un ordine di grandezza superiori. (fig. 4.14)

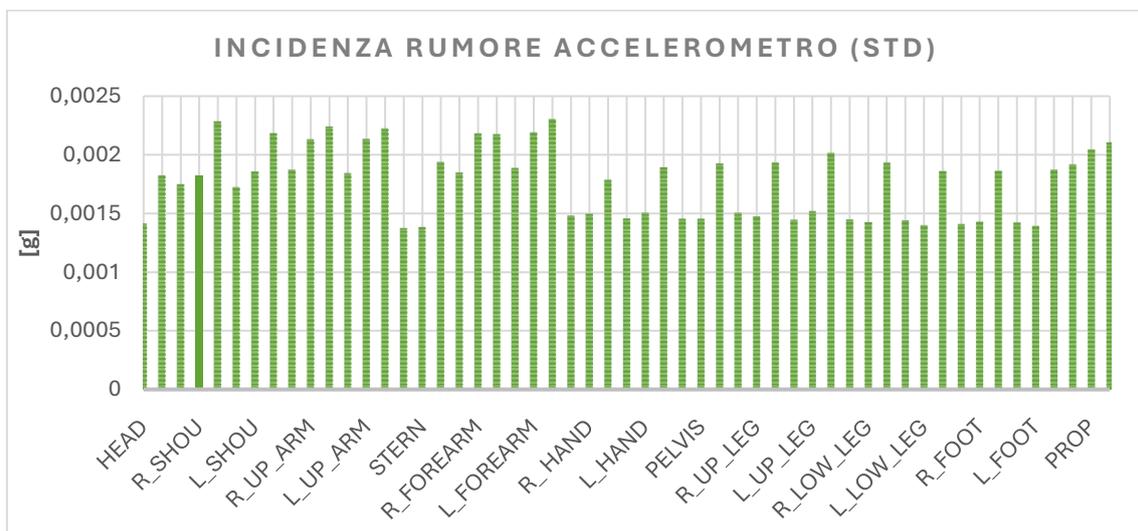


Figura 4.13 Grafico deviazione standard dell'accelerometro triassiale dei sensori Xsens; per ciascuno dei diciotto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

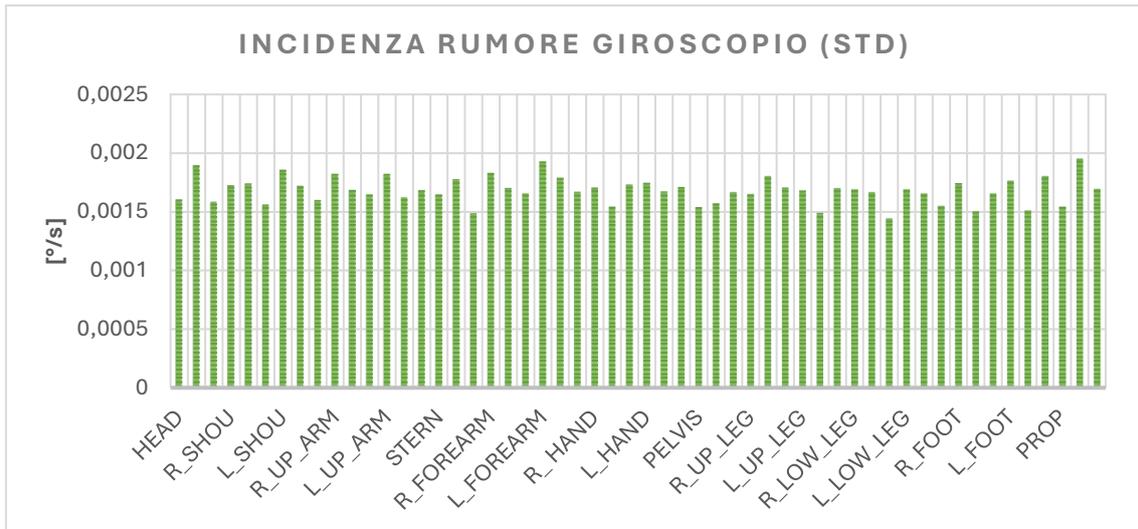


Figura 4.14 Grafico deviazione standard del giroscopio triassiale dei sensori Xsens; per ciascuno dei diciotto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

Gli accelerometri sono caratterizzati da valori di offset compresi tra -10^{-2} e 4×10^{-2} g. Si visualizza una tendenza per cui l'asse z presenta un offset maggiore rispetto agli altri due assi dello stesso sensore, ad eccezione del sensore "Prop", in cui l'asse z ha l'offset minore tra i tre assi. (fig. 4.15)

Gli offset dei giroscopi sono oscillanti tra -2×10^{-2} e 2×10^{-2} °/s, valori molto prossimi allo zero e dunque molto vicini alla condizioni di idealità. (fig. 4.16)

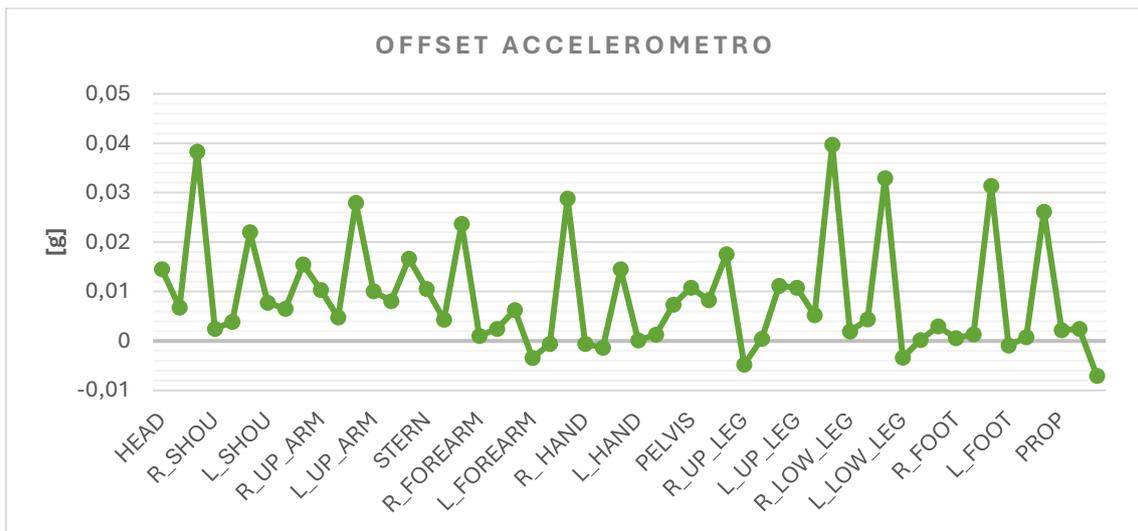


Figura 4.15 Grafico offset degli accelerometri dei sensori Xsens; per ciascuno dei diciotto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

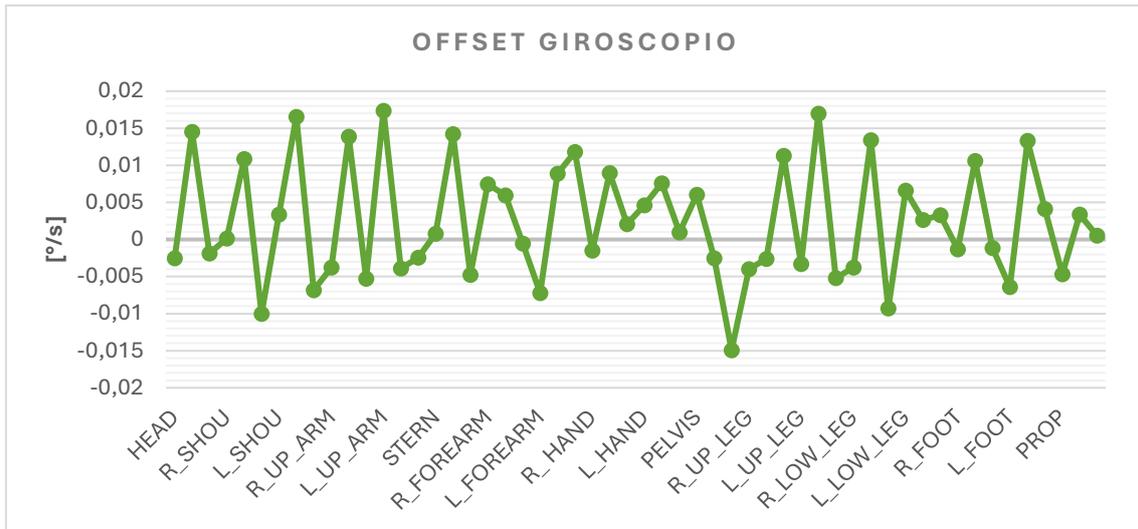


Figura 4.16 Grafico offset dei giroscopi dei sensori Xsens; per ciascuno dei diciotto sensori è stato tracciato il valore medio tra i tre parametri calcolati nelle tre prove statiche, per ciascuno dei tre assi.

La tendenza del disallineamento in modulo degli assi x e y negativi e positivi è quella di essere compreso tra -0,01 e +0,01 g; gli assi z, negativi e positivi, presentano errori maggiori, con picchi che arrivano fino a +0,03 g (z+ “Head” e z+ “Left upper leg”) e fino a -0,02 g (z- “Head”, z- “Left upper leg”). (fig. 4.17)

Il disallineamento espresso in gradi presenta picchi maggiori con l’asse x positivo e con l’asse y negativo. (fig. 4.18)

In generale i valori di disallineamento non si discostano molto da quelli dei sensori Pivot

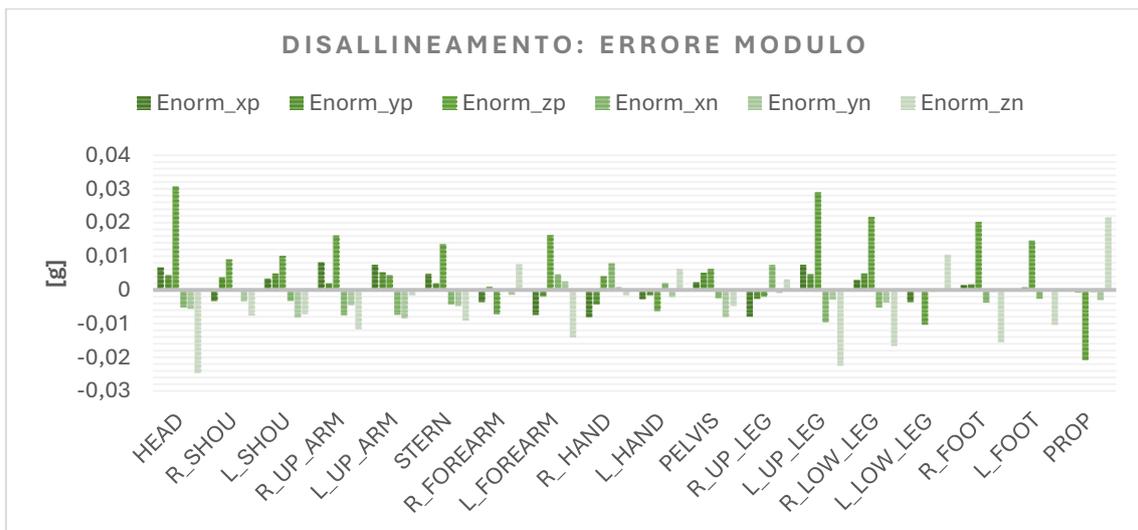


Figura 4.17 Disallineamento degli assi calcolato in termini di modulo; per ciascuna unità, i sei gruppi costituiscono rispettivamente l’allineamento dei 3 assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l’alto).

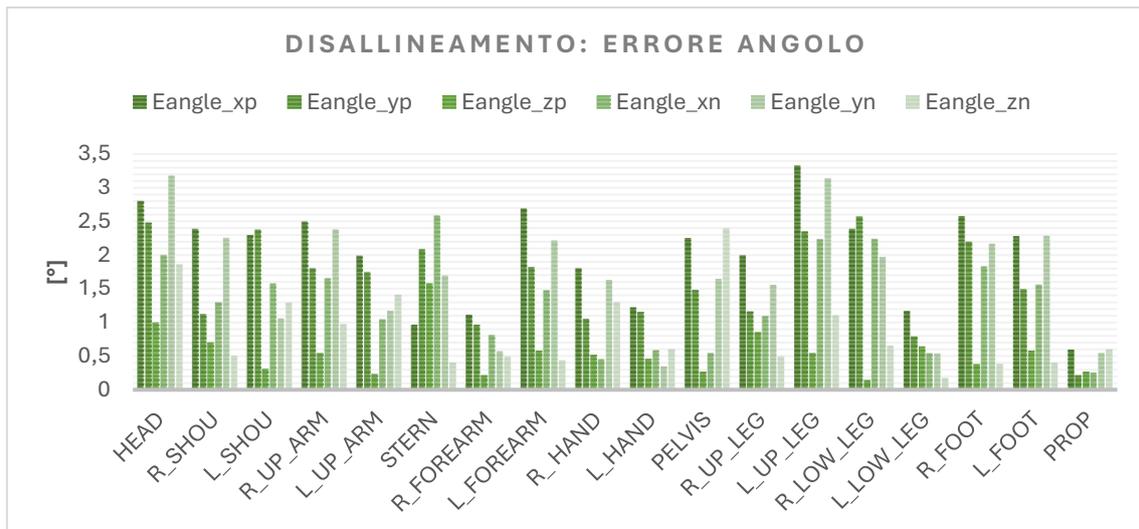


Figura 4.18 Disallineamento degli assi calcolato in termini di angolo compreso; per ciascuna unità, i sei gruppi costituiscono rispettivamente l'allineamento dei 3 assi parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto).

Per i sensori Xsens sono stati calcolati otto valori del parametro d_g , con un valor medio pari a: 0,00114 °/s.

4.4. Sensori a confronto

Considerando l'insieme delle ventisette unità calibrate, distinte nelle tre tipologie, è possibile elaborare le seguenti considerazioni:

- I sensori Xsens risultano essere i più performanti complessivamente, poiché caratterizzati da una minore influenza del rumore e da offset più bassi.
- Il sensore Ngimu presenta l'accelerometro con maggiore sensibilità al rumore (deviazione standard più alta) e con gli offset più alti.
- Gli offset del giroscopio più elevati sono quelli calcolati per i sensori Pivot.
- I sensori Pivot, mediamente, sono caratterizzati da giroscopi che maggiormente risentono dell'effetto dell'accelerazione lineare, poiché presentano un valor medio del parametro d_g maggiore.
- L'andamento all'interno delle due categorie Pivot e Xsens è molto omogeneo, non si registrano differenze particolari nei parametri calcolati; l'unica eccezione è costituita dal sensore Pivot 5 che presenta offset del giroscopio più elevati rispetto agli altri, e dal sensore Pivot 8, i cui valori di offset del giroscopio sono molto più bassi e prossimi allo zero.

- Ci sono casi in cui non si registra omogeneità tra i tre assi (x, y, z) della stessa unità: le deviazioni standard dell'accelerometro e gli offset del giroscopio risultano essere, in media, maggiori per gli assi z dei sensori Pivot e Xsens.

Nei seguenti grafici è possibile visualizzare l'andamento d'insieme delle tre categorie di sensori a confronto. Si precisa che per Pivot e Xsens sono state effettuate le medie tra i valori calcolati per ciascun sensore (media sulle distribuzioni di otto valori per Pivot e di diciotto valori per Xsens).

Si specifica che tutti i valori calcolati sono riportati in Appendice, organizzati in tabelle.

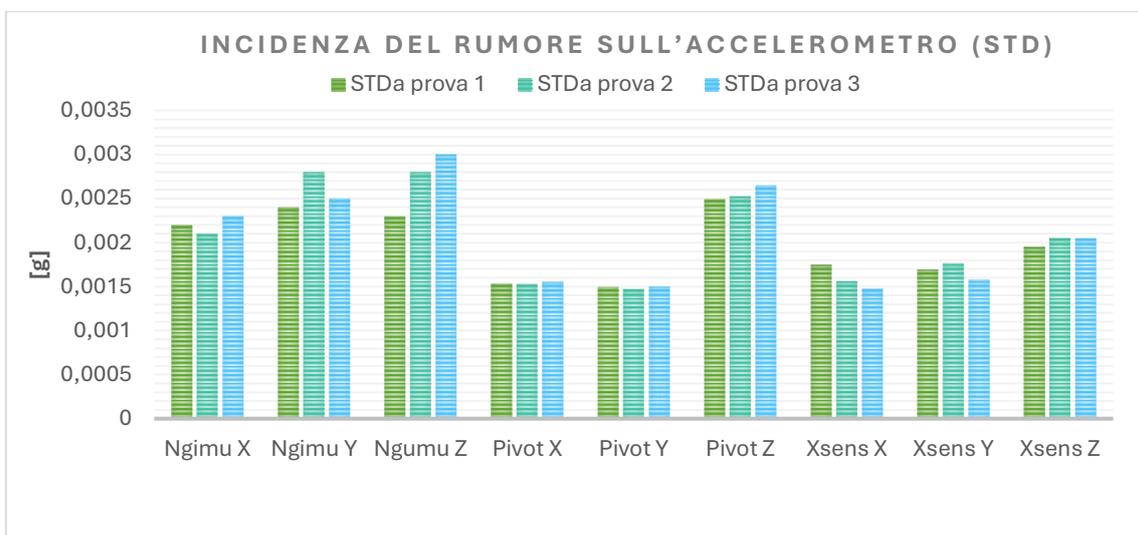


Figura 4.19 Deviazione standard degli accelerometri di ciascun gruppo di sensori; per i Pivot e gli Xsens sono raffigurati i valori medi del parametro tra tutte le unità.

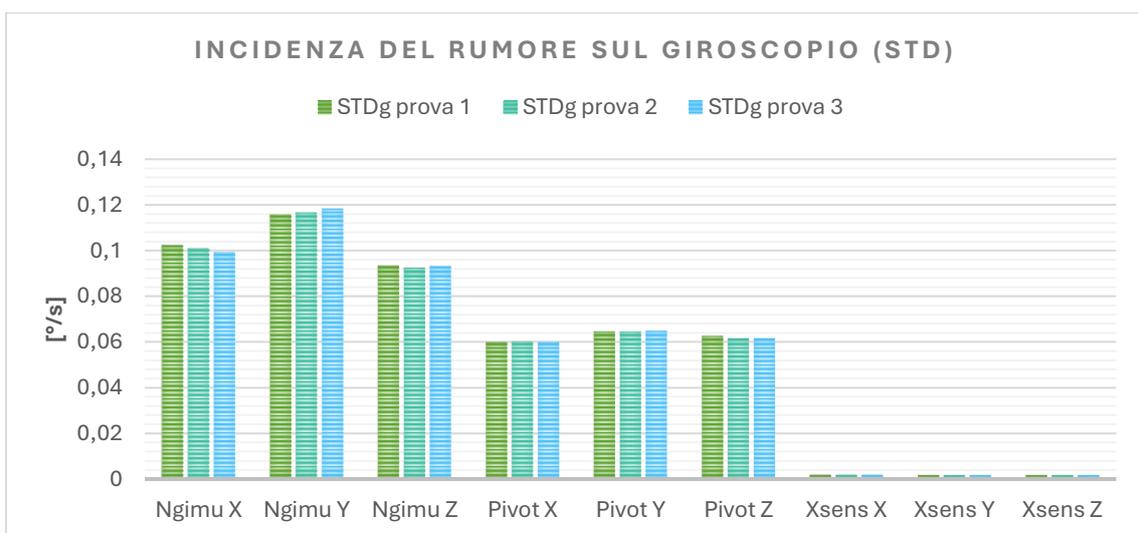


Figura 4.20 Deviazione standard dei giroscopi di ciascun gruppo di sensori; per i Pivot e gli Xsens sono raffigurati i valori medi del parametro tra tutte le unità.

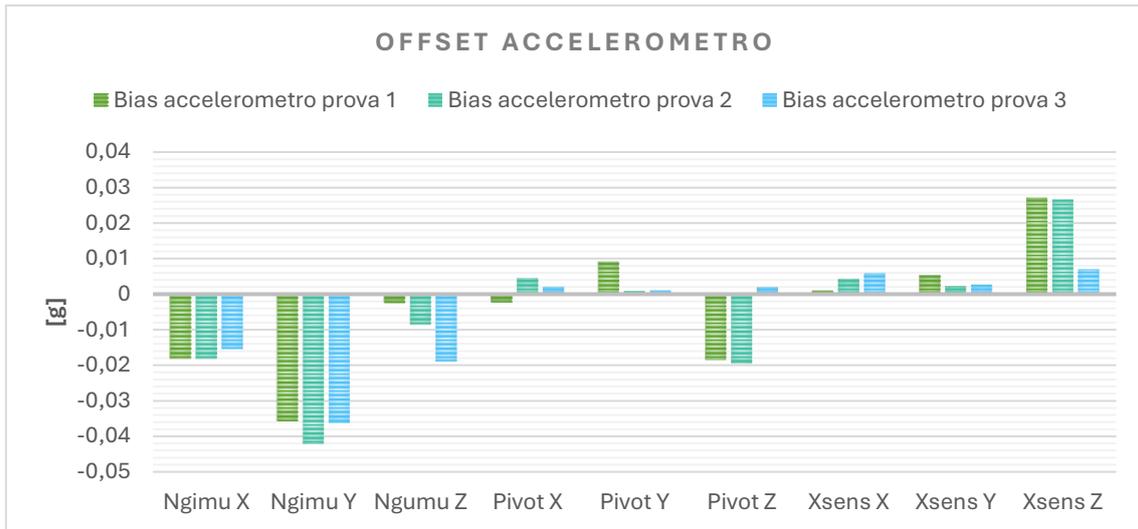


Figura 4.21 Offset degli accelerometri di ciascun gruppo di sensori; per i Pivot e gli Xsens sono raffigurati i valori medi del parametro tra tutte le unità.

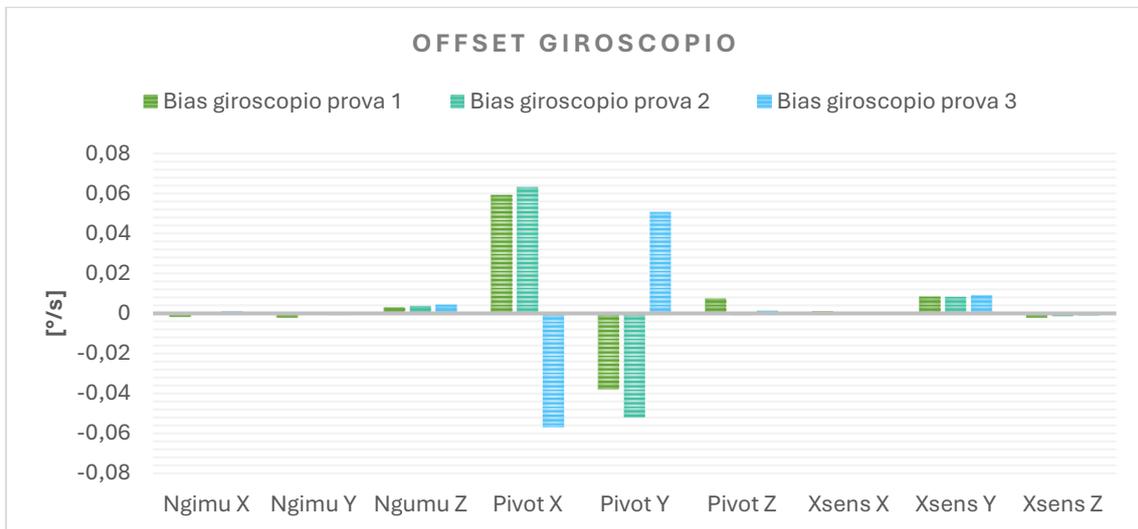


Figura 4.22 Offset dei giroscopi di ciascun gruppo di sensori; per i Pivot e gli Xsens sono raffigurati i valori medi del parametro tra tutte le unità.

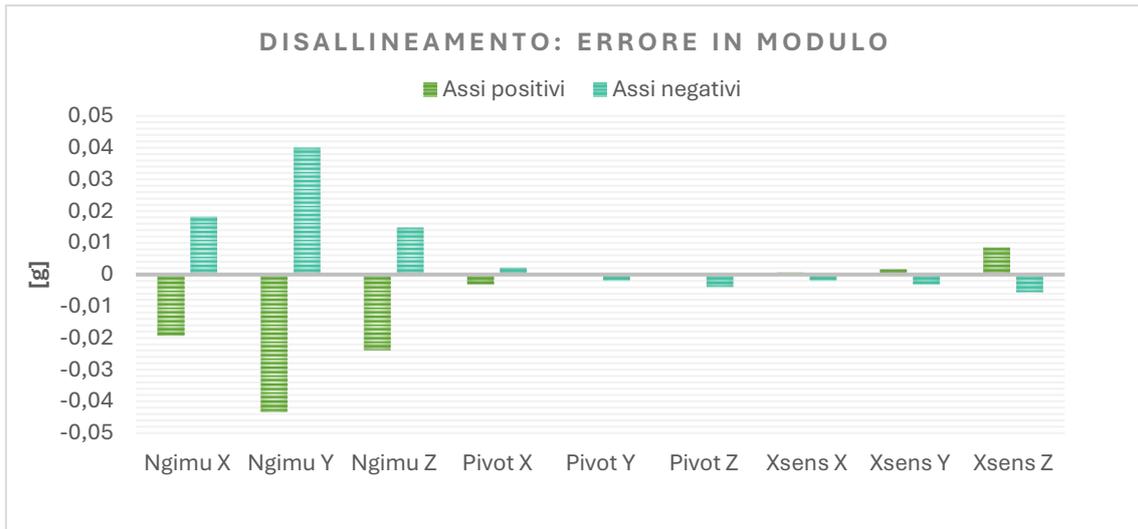


Figura 4.23 Disallineamento degli assi calcolato in termini di modulo; per ogni tipologia le due colonne rappresentano gli assi allineati parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto) e in modo antiparallelo, i tre gruppi sono gli assi. Per Pivot e Xsens sono state rappresentate le medie tra il parametro calcolato per ciascuna unità.

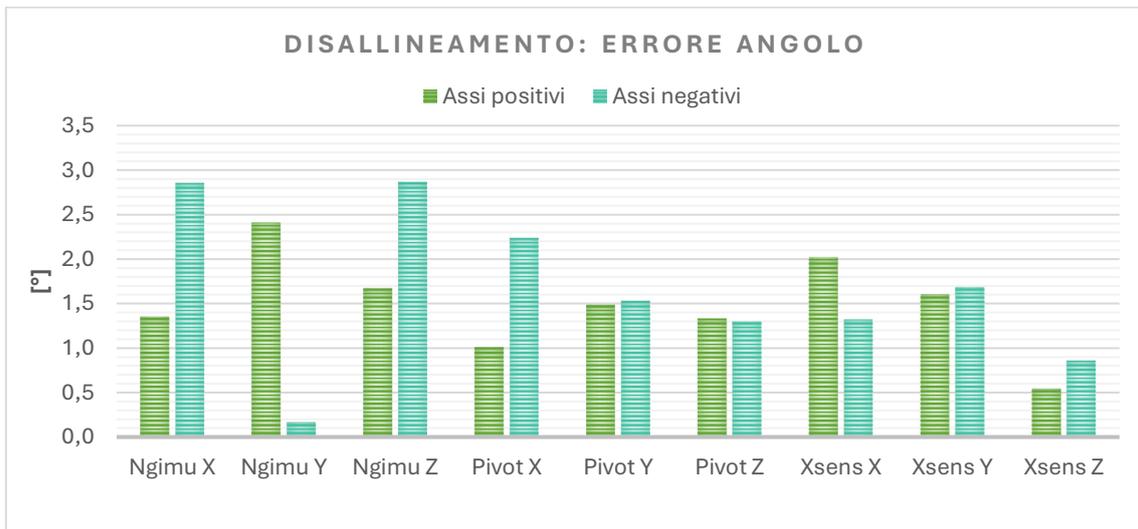


Figura 4.24 Disallineamento degli assi calcolato in termini di angolo compreso; per ogni tipologia le due colonne rappresentano gli assi allineati parallelamente alla direzione di g (considerata verso l'alto) e in modo antiparallelo, i tre gruppi sono gli assi. Per Pivot e Xsens sono state rappresentate le medie tra il parametro calcolato per ciascuna unità.

CONCLUSIONI

In questa tesi sperimentale è stato approfondito il mondo dei sensori inerziali applicati alla biomeccanica del movimento, con particolare attenzione alle procedure di calibrazione che è necessario implementare prima dell'utilizzo delle IMU.

È sicuramente possibile concludere che le unità di misura inerziali IMU costituiscono una grande risorsa per il futuro dell'analisi del movimento e di altre applicazioni biomeccaniche. I vantaggi che si possono trarre dall'impiego di questi dispositivi sono numerosi. Tra essi, certamente spicca la comodità di poter effettuare valutazioni e test fuori da laboratori specializzati e in modo continuo nel tempo. Sono in costante sviluppo software in grado di elaborare segnali acquisiti dalle IMU, con il fine di estrarre *features* specifiche e utili sia per il monitoraggio di soggetti a rischio, che per la valutazione di percorsi di riabilitazione motoria.

Il mondo della *wearable technology* costituisce, dunque, un mondo di grande interesse e in continuo sviluppo; tuttavia, a frenare l'avanzata di questi sistemi sono gli errori e il rumore a cui i segnali acquisiti sono sottoposti. Infatti, analisi di questo tipo richiedono una precisione elevata nei dati calcolati, altrimenti le conseguenti valutazioni non risulterebbero valide. Conseguentemente, è necessario innanzi tutto effettuare procedure di calibrazione opportune.

Partendo da questo proposito, è stato implementato sperimentalmente un protocollo di calibrazione elaborato tendendo in considerazione gli articoli: "*Procedure of effortless in-field calibration of three-axis rate gyros and accelerometers*" di Franco Ferraris, Ugo Grimaldi, Marco Parvis e "*Time- and Computation-Efficient Calibration of MEMS 3D Accelerometers and Gyroscopes*" di Sara Stančičin e Sašo Tomažič. L'applicazione di tale procedura è semplice e rapida, richiede soltanto l'utilizzo di una cassa di plastica e permette di valutare le condizioni dei sensori e le prestazioni di essi; inoltre, permette di correggere i dati acquisiti e di ottenere i valori reali di accelerazione lineare e velocità angolare.

Il lavoro svolto ha permesso di valutare e dimostrare sperimentalmente l'utilità dell'applicazione di tali algoritmi prima dell'utilizzo di un sensore inerziale e la necessità di ripeterli nel tempo, in modo particolare in tutti i casi in cui varino le condizioni di ambientali.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Presentazione power point “I segnali in biomeccanica del movimento”, professoressa Federica Verdini.
- [2] Elodie Piche, Marine Guilbot, Frédéric Chorin, Olivier Guerin, Raphaël Zory, Pauline Gerus, “Validity and repeatability of a new inertial measurement unit system for gait analysis on kinematic parameters: Comparison with an optoelectronic system”, *Measurement*, Volume 198, 2022, 111442, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111442>.
- [3] Ahmad, Norhafizan, Raja Ghazilla, Raja Ariffin, Khairi, Nazirah, Kasi, Vijayabaskar. (2013), “Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications” *International Journal of Signal Processing Systems*, Vol 1, 2013, pp. 256-262.
- [4] H.J. Luinge, “Inertial Sensing of Human Movement”.
- [5] A. Kannan, “Design and modeling of a MEMS-based accelerometer with pull in analysis,” T, University of British Columbia, 2008.
- [6] N. Yazdi, F. Ayazi e K. Najafi, "Micromachined inertial sensors," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 8, pp. 1640-1659, Aug. 1998, doi: 10.1109/5.704269.
- [7] Oliver J. Woodman, “An introduction to inertial navigation”. Computer Laboratory, Aug 2007.
- [8] Sara Stančin e Sašo Tomažič, “Time- and Computation-Efficient Calibration of MEMS 3D Accelerometers and Gyroscopes”, *Sensors* 2014, 14, 14885-14915; doi:10.3390/s14081488.
- [9] Majid Dadafshar, “Accelerometer and gyroscopes sensors: operation, sensing, and applications”.
- [10] Giacomo Langfelder, Cesare Buffa, Attilio Frangi, Alessandro Tocchio, Ernesto Lasalandra, e Antonio Longoni, “Z-Axis Magnetometers for MEMS Inertial Measurement Units Using an Industrial Process”.
- [11] Elena Bergamini, Gabriele Ligorio, Aurora Summa, Giuseppe Vannozzi, Aurelio Cappozzo e Angelo Maria Sabatini, “Estimating Orientation Using Magnetic and Inertial Sensors and Different Sensor Fusion Approaches: Accuracy Assessment in Manual and Locomotion Tasks”.
- [12] Weijun Tao, Tao Liu, Rencheng Zheng e Hutian Feng, “Gait Analysis Using Wearable Sensors”.

- [13] Xavier Marimon, Itziar Mengual, Carlos López-de-Celis, Alejandro Portela, Jacobo Rodríguez-Sanz, Iria Andrea Herráez e Albert Pérez-Bellmunt, “Kinematic Analysis of Human Gait in Healthy Young Adults Using IMU Sensors: Exploring Relevant Machine Learning Features for Clinical Applications”.
- [14] Ugo Della Croce, Agnese Peruzzi, Andrea Cereatti, “La valutazione e l’intervento riabilitativo del cammino mediante l’uso di sensori a basso costo”.
- [15] [https://www.treccani.it/enciclopedia/deambulazione_\(Dizionario-di-Medicina\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/deambulazione_(Dizionario-di-Medicina)/)
- [16] <https://www.policlinicoitalia.it/laboratorio-analisi-movimento/>
- [17] Tao Liu, Yoshio Inoue, Kyoko Shibata, “Development of a wearable sensor system for quantitative gait analysis, Measurement”, Volume 42, Issue 7, 2009, Pages 978-988, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.002>.
- [18] Franco Ferraris, Ugo Grimaldi, Marco Parvis, “Procedure of effortless in-field calibration of three-axis rate gyros and accelerometers”.
- [19] <https://marche.coni.it/documentazione.html>
- [20] <https://www.siamoc.it/news/corsi/dir/ii-workshop-siamoc-sui-sensori-inerziali-scarica-tutto-il-materiale-qui.html>
- [21] Jared B. Bancroft e Gérard Lachapelle, “Data Fusion Algorithms for Multiple Inertial Measurement Units”.
- [22] <https://x-io.co.uk/ngimu/>
- [23] <https://www.movella.com/products/wearables/xsens-mtw-awinda>

APPENDICE

Nelle seguenti tabelle sono contenuti i valori dei parametri calcolati per la procedura di calibrazione e, conseguentemente, per le valutazioni effettuate sui sensori.

Tabella 1. Sensore Ngimu

Parametri	NGIMU
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00224565242079882;0.00239298619184529;0.00231520010398833]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00212454158560399;0.00277377968641737;0.00283765886595059]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00230178329965615;0.00247718310133778;0.00302926835157999]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.102280284907435;0.115471566319763;0.0932814358925063]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.100993788877074;0.116591017290656;0.0925194477019556]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.0992482740981733;0.118326171300289;0.0932132352079290]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.00179414300494835;-0.00211360353132289;0.00295175358180607]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.000292371743418759;-0.000469847383141763;0.00356107514409462]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.000831547266266667;-0.000819044200333333;0.00440048886166667]
Offset accelerometro (x) [g]	[-0.0182946861523084;-0.0358056491609732;-0.00252549071272871]
Offset accelerometro (y) [g]	[-0.0182101000463002;-0.0420677137893690;-0.00855900736888018]
Offset accelerometro (z) [g]	[-0.0153838754671971;-0.0362170345900683;-0.0189369798783529]
Fattori di scala accelerometro	[0.998790173995380;0.998103371760611;0.994680254722008]

Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00191340038842404
Matrice di calibrazione accelerometro	[1.00101745809954,-0.0148023521366687,0.00657184125870197;0.0183717897678846,1.00175965853158,0.00811228137203479;-0.00812002543501189,-0.00874439027754305,1.00529529134659]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999869560947271,0.0147163305942131,-0.00665512621623435;-0.0184138934658439,0.999798862244928,-0.00794755189836494;0.00794884914739320,0.00884586783781424,0.999929280709105]
Errore norma (x positivo)	-0.0193585927322150
Errore norma (y positivo)	-0.0433160226073298
Errore norma (z positivo)	-0.0239073895180810
Errore norma (x negativo)	0.0182222960798854
Errore norma (y negativo)	0.0399761580779979
Errore norma (z negativo)	0.0148188827989225
Errore angolo (x positivo)	1.35287522823777
Errore angolo (y positivo)	2.40995579077631
Errore angolo (z positivo)	1.67403817621852
Errore angolo (x negativo)	2.85591542704698
Errore angolo (y negativo)	0.169425971543138
Errore angolo (z negativo)	2.86533879284618

Tabella 2. Sensori Pivot 1 e 2

Parametri	PIVOT 1	PIVOT 2
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00153878365753623;0.00142263523759853;0.00245877559916114]	[0.00152892841933886;0.00149851577428793;0.00251906712353811]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00159722830511683;0.00127777469157330;0.00248299026370218]	[0.00151077361568489;0.00141263708113108;0.00258163466784323]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00159958147212315;0.00144011201224891;0.00248190113901067]	[0.00162295188356255;0.00161769332133250;0.00253105285250932]
Deviazione standard	[0.0664362833558681;0.0592590573286503;0.0581232621972455]	[0.0587247346714232;0.0605722695833759;0.0624657874083087]

giroscopio (x) [°/s]		
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.0669783332020274;0.0600885951093740;0.0596567989733187]	[0.0595989875950175;0.0599384354285195;0.0641220741440959]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.0666646776185730;0.0590297082600399;0.0587170640528192]	[0.0592297022037464;0.0604612287566299;0.0644819981013510]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.267028665954053;-0.195373941741420;-0.148389902495928]	[0.156681203539250;-0.300417410106451;0.0938766303177127]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.287198068614586;-0.229575558545125;-0.175986929007770]	[0.157666811628959;-0.305802691421354;0.0996073825094207]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.248952410370634;0.171150336732499;0.146845444458446]	[-0.153785344718972;0.298690055722426;-0.102604850411112]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.000664399357919510;-0.00683422880040827;-0.0154535604742960]	[-0.00690375660046239;0.0145627584204716;-0.0368301653500458]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.000778190614064323;-0.00141813929449258;-0.0209203007181095]	[0.00633976368521913;2.44099941676401e-06;-0.0365849669586319]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.000342512901495584;0.00374778845452841;0.00645013754218049]	[0.00623292927741210;-0.000308379592984503;-0.0166643775516580]
Fattori di scala accelerometro	[0.999154018824189;0.998538709432750;0.998383457358669]	[0.998870549437964;0.999055826306109;0.997563756572942]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00421581108975701	0.0119114440622553
Matrice di calibrazione	[1.00074657474908,-0.00674082314522158,-0.00908404191783635;0.00967845669862927,1.00094779241964,-0.0269153279708207;0.0109593598682387,0.0320071151934519,1.00123083021604]	[1.00127150189305,0.00292149162190267,-0.0131447469539184;-0.00235979259824143,1.00078096801927,0.0143218838286344;-0.00432893443320535,-0.0183593699564259,1.00241502678503]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999936533151337,0.00643837524054860,0.00924537687430569;-0.00996057014409485,0.999591702038521,0.0267808935275968;-0.0106351735245107,-0.0320302131145966,0.999430316996606]	[0.999909947593651,-0.00267770876726756,0.0131501550949345;0.00229491618501065,0.999895747378455,-0.0142557965117496;0.00436586747533028,0.0183290415048074,0.999822476962137]
Errore norma (x positivo)	-0.000221880263753553	-0.00776472379151339
Errore norma (y positivo)	-0.00322358289620437	0.000287891451315642
Errore norma (z positivo)	0.00471629934102840	-0.0190535628640400

Errore norma (x negativo)	-0.00117647933978489	0.00707643277341969
Errore norma (y negativo)	0.000746655863395767	-0.000788483145915296
Errore norma (z negativo)	-0.00792901853346562	0.0142253255491640
Errore angolo (x positivo)	0.364044570250565	1.53440609286306
Errore angolo (y positivo)	0.638186224738339	2.95570654568828
Errore angolo (z positivo)	1.71570150971866	1.22177534690997
Errore angolo (x negativo)	1.61124424582690	3.00992301034780
Errore angolo (y negativo)	2.79965742436349	1.30512118591056
Errore angolo (z negativo)	2.16068085372834	1.05879977921100

Tabella 3. Sensori Pivot 3 e 4

PARAMETRI	PIVOT 3	PIVOT 4
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00149934087649187;0.00154752920792255;0.00249658115253091]	[0.00152857934366983;0.00158048294057185;0.00226157176801637]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00153221535604004;0.00173692434372171;0.00232093790893907]	[0.00153387040310638;0.00159197394659702;0.00246652793027727]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00167365434726593;0.00175099084135807;0.00291300162040297]	[0.00162253198557305;0.00130885281640594;0.00276660853052639]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.0586338819915705;0.0681478161712624;0.0618970997581558]	[0.0588233751392372;0.0618074719616538;0.0607515497302280]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.0589540353331730;0.0678331152417680;0.0607959033041691]	[0.0597718687344147;0.0621817665603710;0.0596250107775006]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.0577316597200462;0.0676557549819029;0.0609464257243663]	[0.0600657624360177;0.0624984306156429;0.0614598541945070]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.243861795391829;-0.127082478123567;-0.249257237614874]	[-0.0349636849143032;-0.201754992054173;-0.186076710792107]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.263106555411501;-0.126442340910663;-0.253992220808732]	[-0.0174869229112221;-0.204701655415158;-0.188139375144796]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.263492669920872;0.131980035847686;0.252407119138685]	[0.0218662743201337;0.204691494507017;0.186645721648021]
Offset accelerometro (x) [g]	[-0.00451637780422010;0.0166090482315447;-0.00614106633269455]	[-0.0111623648662723;0.0159008736174179;-0.0200364555126229]

Offset accelerometro (y) [g]	[0.00934756316655557;0.00256097453809784;-0.00298729508623563]	[0.00331569087443759;0.00165772338724796;-0.0183943138383186]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.00855151257342526;0.00172631547085902;0.0143662986507457]	[0.00297602580559490;0.000704635164972505;0.000494831265101636]
Fattori di scala accelerometro	[0.998649006685405;0.998959231627643;0.997466170305881]	[0.999189265892045;0.998446368947526;0.998154705500189]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00500695026226297	0.00979679224162851
Matrice di calibrazione	[1.00132588828570,0.0142222186600206,-0.0195013807925733;-0.0125147538085110,1.00072047822198,0.0258612269471216;0.00737406760686224,-0.0214560424935876,1.00210262155364]	[1.00096143129396,0.00378449793009493,-0.0146470088319150;-0.00255282778947600,1.00153332916559,0.00803674220721021;-0.00308984367466271,-0.00604686032058543,1.00186872582923]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999708742937211,-0.0137830911084846,0.0198104945520392;0.0126812529201406,0.999593117030555,-0.0255496812018017;-0.00709325058176560,0.0215358920334528,0.999742912528270]	[0.999885909665312,-0.00368983631190738,0.0146476196278655;0.00252563904205461,0.999964933468268,-0.00798454640108501;0.00310217286601571,0.00602574183116451,0.999977033215710]
Errore norma (x positivo)	-0.00605627293444839	-0.0119925083642573
Errore norma (y positivo)	0.00176562902750253	0.000437447195457829
Errore norma (z positivo)	0.0118453669153859	-0.00133006809853718
Errore norma (x negativo)	0.00367308653031050	0.0110263259196034
Errore norma (y negativo)	-0.00374377428500226	-0.00318779907955835
Errore norma (z negativo)	-0.0168315219169190	-0.00234706855108296
Errore angolo (x positivo)	0.808554675986195	0.786319803912332
Errore angolo (y positivo)	2.06351212768707	1.54927232232638
Errore angolo (z positivo)	1.31910912103607	0.526882726596540
Errore angolo (x negativo)	2.28314978471855	2.25973396027676
Errore angolo (y negativo)	1.31326677647418	0.605062823212691
Errore angolo (z negativo)	1.47068567271295	0.312356084872887

Tabella 4. Sensori Pivot 5 e 6

PARAMETRI	PIVOT 5	PIVOT 6
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00152702481757285;0.00140829813716099;0.00239463252022106]	[0.00156041654014821;0.00146240619666169;0.00266617662029397]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00151910181975372;0.00154753236570550;0.00255965526930435]	[0.00156211969177661;0.00140932634288379;0.00263791377533095]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00152990488118400;0.00152200067415897;0.00252574637777851]	[0.00163762407289020;0.00155078982845301;0.00275306706994808]

Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.0546853494128646;0.0608977749395851;0.0547194392392090]	[0.0591328955870793;0.0746044982057926;0.0580718071132901]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.0548321342562033;0.0609180261017376;0.0569126496345662]	[0.0590600929527155;0.0760780732128952;0.0601825913793857]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.0549391439245711;0.0617489232241995;0.0578630808401610]	[0.0596813314783757;0.0763892548897305;0.0579607166805052]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.293121878060979;0.318788332025969;0.890156518629008]	[-0.110113761527552;-0.138798005210516;0.0895176007250837]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.288610434846230;0.321338719969442;0.894505387313496]	[-0.167065651659686;-0.134113826557364;0.0735954576676255]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.286049885994616;-0.309846732861602;-0.883297905633611]	[0.182845542003165;0.116718351819414;-0.0632922968123207]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00684138906536413;0.00793113257165472;-0.0100142001072738]	[-0.00532186692842862;0.0153693866777412;-0.0281011514356982]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.00694643340693218;0.00380494852420427;-0.0135606061099192]	[0.00825000846213131;0.000861143910910689;-0.0261506301684094]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.000851542646538077;0.00361670678584819;0.0106450357232128]	[0.00924308839151808;-0.000618427202237128;-0.00847714345786121]
Fattori di scala accelerometro	[0.999483543552083;0.999459273323703;0.998164996671980]	[0.999308161457576;0.99931871706106;0.997962275725983]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.0132947861737173	0.00388710073247698
Matrice di calibrazione	[1.00041334030359,0.00482923786388794,-0.00924646178430673;-0.0106501525339410,1.00039012166124,-0.0136707238167366;0.0114237057648181,0.0181730223544046,1.00171523289073]	[1.00079971070843,0.0129889781707966,-0.00950513112793803;-0.0112220127998927,1.00052002435809,-0.00896174485745139;-0.0133059296801178,0.0132334029169586,1.00222325142091]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999945559935061,-0.00499352771374826,0.00916197834148536;0.0104872408598305,0.999850575343280,0.0137420800776202;-0.0116090931057750,-0.0181056920704236,0.999768679681411]	[0.999870271120597,-0.0131044177623680,0.00936563742272861;0.0113321677007444,0.999894848693429,0.00904839939142588;0.0131427593859840,-0.0133948180018416,0.999823907858989]
Errore norma (x positivo)	0.00627871456302964	-0.00595961530688409
Errore norma (y positivo)	0.00326985940028329	0.000417191596866986
Errore norma (z positivo)	0.00874225039519024	-0.0103368678137355
Errore norma (x negativo)	-0.00713843100977924	0.00560596798832831
Errore norma (y negativo)	-0.00411048723568325	-0.00101836821272556
Errore norma (z negativo)	-0.0123920720298641	0.00635402834814539
Errore angolo (x positivo)	0.212754971890917	1.09120528362616
Errore angolo (y positivo)	1.00323678931408	1.49449093641534
Errore angolo (z positivo)	1.02658743136035	1.52937646928127

Errore angolo (x negativo)	1.33923023390094	2.68387167127763
Errore angolo (y negativo)	1.58627454800636	2.02851344473912
Errore angolo (z negativo)	1.45334546451301	0.763651114552125

Tabella 5. Sensori Pivot 7 e 8

PARAMETRI	PIVOT 7	PIVOT 8
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00155800594615114;0.00150212558131889;0.00256357630444527]	[0.00153797837693320;0.00152981568005149;0.00260857402815614]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00149557036394260;0.00150552500130282;0.00254908905853400]	[0.00149506218236893;0.00130729373151930;0.00263250770201075]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00155873071630347;0.00151771377804695;0.00255926023357185]	[0.00116272577356401;0.00129055688052599;0.00264134932563239]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.0631738376257326;0.0640626668781661;0.0860430556947171]	[0.0590900828101798;0.0673238246083710;0.0591055778099640]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.0631138339505790;0.0628270231157655;0.0712987593319593]	[0.0588683903725846;0.0668583499626684;0.0607708335116038]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.0627805188776173;0.0634769891860632;0.0711843961038779]	[0.0584432302588947;0.0670236857895165;0.0603031274105409]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.102919838563493;0.122184920399448;-0.282605338134706]	[0.140616807767813;0.217717778744197;-0.147942822537710]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.116230628228630;0.0838173312577997;-0.301687523624117]	[0.153490678382874;0.179736304111919;-0.155634630000693]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.123627769355516;-0.0588011754138545;0.305548668717821]	[-0.155614308184411;-0.150686267735868;0.167035168935262]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00157094585798195;0.00484538384227629;-0.0137368869511331]	[-0.000354799265226635;0.00379705595942343;-0.0179623789915222]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.00193184762175054;0.000482178751458118;-0.0169404545856941]	[-0.000670705273079487;-0.000427825831111450;-0.0197085072409807]
Offset accelerometro (z) [g]	[-0.00541633360585736;-3.69404578403603e-05;0.00712800308021577]	[-0.00634297766778454;-0.000191292987627062;0.00129979150610315]
Fattori di scala accelerometro	[0.999157773954979;0.999001633356405;0.998648237291163]	[0.999543834720636;0.999078031891272;0.998511256990980]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.0163016061676728	0.00364778274476423
Matrice di calibrazione	[0.999881311426727,-0.00687032279896351,-0.0489792225634127;0.000517674167843785,1.00079045906920,-0.0117190190890633;0.0444087912935270,0.0231814620606350,1.00016584915036]	[1.00037861967863,0.00779247416788147,0.00284510927044295;-0.0131839626845374,1.00095353693767,0.0110687587045116;-0.00334289833184695,-

		0.00133873744952870,1.00147340218106]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.998783438917260,0.00572204672407896,0.0489785700679357;-0.00103581445869433,0.999931418695888,0.0116655472754404;-0.0443460213164812,-0.0234384265983783,0.998741243041455]	[0.999965874979857,-0.00778846953597226,-0.00275474464429350;0.0131399722319980,0.999852185884401,-0.0110881699088160;0.00335889304384702,0.00131130428223502,0.999993499138169]
Errore norma (x positivo)	0.000192967053328718	-0.000617680591368785
Errore norma (y positivo)	-0.000566274363502513	-0.000940956475515548
Errore norma (z positivo)	0.00602364847633960	-0.000188382333315984
Errore norma (x negativo)	-0.00165510611986389	5.19060105057179e-05
Errore norma (y negativo)	-0.00113101023028307	-0.000504420775574039
Errore norma (z negativo)	-0.00869649520475461	-0.00274471195222836
Errore angolo (x positivo)	2.10779174665624	1.21305721941540
Errore angolo (y positivo)	0.319417205114439	1.90760240294968
Errore angolo (z positivo)	3.13259657009273	0.199087455619361
Errore angolo (x negativo)	3.60038441224820	1.10132928267697
Errore angolo (y negativo)	1.65148040518897	0.943400102686050
Errore angolo (z negativo)	2.62376724742018	0.569205862014952

Tabella 6. Sensori Xsens ‘Head’ e ‘Right shoulder’

PARAMETRI	XSENS HEAD	XSENS RIGHT SHOULDER
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00141412661434023;0.00140582411730655;0.00180800125988997]	[0.00211109394205943;0.00191838864522923;0.00215747727583539]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00139463971973525;0.00142751368904715;0.00170978288711614]	[0.00147739804847248;0.00173332277942612;0.00207694152634534]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00162704099502771;0.00140179332703884;0.00195468710922556]	[0.00164973003011391;0.00181140612419713;0.00261832406045422]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00157199869263564;0.00192799839321009;0.00151490081415410]	[0.00186887873457086;0.00172010653426859;0.00160366040971419]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00150910001326099;0.00172055491741859;0.00157036981463065]	[0.00163522249495368;0.00188885822952185;0.00153157951512997]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00173293610878284;0.00204328330480461;0.00167057552594825]	[0.00167666489359032;0.00161275153861094;0.00155096417261708]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.00206458366666667;0.0138439401666667;-0.00255848116666666]	[0.000545072500000000;0.0103840038333333;-0.0105599755000000]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.00292536916666667;0.0140767708333333;-0.00174381600000000]	[-0.000118305666666666;0.0103989683333333;-0.0100909883333333]

Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.00258866166666667;0.0157093841666667;-0.00137978083333333]	[-1.32140000000000e-05;0.0117880215000000;-0.00937533700000001]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00555720497484225;0.00985828415277712;0.0401905069593396]	[-0.00197902646534776;0.00731036707949287;0.0308938756979172]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.0139619098566821;0.00528415101050922;0.0468324824727649]	[0.00246703069026382;0.00388196714071298;0.0288232862990385]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.0240049326811145;0.00525039922839908;0.0278883031727130]	[0.00242107671147571;0.00382830901781405;0.00835286849915062]
Fattori di scala accelerometro	[0.999875692269107;0.998187490117108;1.00276109858304]	[0.997914995404034;0.999692604236301;1.00076542251968]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.000825197985623998	0.00131855131204402
Matrice di calibrazione	[1.00007079538396,-0.00817218034283702,-0.00559001015114406;0.00745564927523804,1.00178359556209,0.00378518329047366;0.00744996473054829,-0.00169821211250982,0.997227699996399]	[1.00206680059559,-0.00601623434180388,-0.00844329080352466;0.00573719555384099,1.00025635040690,0.00936512259361235;0.00494410765081384,-0.00822562289850579,0.999162309977730]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999951115177057,0.00816668109762342,0.00557427807077389;-0.00742627602908491,0.999965062542727,-0.00383720187896483;-0.00746140372336758,0.00163427175537347,0.999970827879647]	[0.999946274396462,0.00608338843563422,0.00839289614950851;-0.00567853663319090,0.999939503379354,-0.00942039294064824;-0.00498059236342005,0.00819318004469521,0.999954031693690]
Errore norma (x positivo)	0.00658887051947511	-0.00325007514644047
Errore norma (y positivo)	0.00438154374758014	0.00370974649074205
Errore norma (z positivo)	0.0307777598527121	0.00914923123964147
Errore norma (x negativo)	-0.00512277713107728	9.87627660158285e-05
Errore norma (y negativo)	-0.00560745332623251	-0.00347956857523845
Errore norma (z negativo)	-0.0246391710847151	-0.00759356428319260
Errore angolo (x positivo)	2.80203802552430	2.38763345293440
Errore angolo (y positivo)	2.48349622662766	1.12582777592852
Errore angolo (z positivo)	0.998262422472003	0.702964085149556
Errore angolo (x negativo)	1.99800407415749	1.29657071808937
Errore angolo (y negativo)	3.17110589640151	2.25008228656237
Errore angolo (z negativo)	1.86391018427715	0.504284495798821

Tabella 7. Sensori Xsens 'Left shoulder' e 'Stern'

PARAMETRI	XSENS LEFT SHOULDER	XSENS STERN
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00202166070138172;0.00194410238554803;0.00207054097469416]	[0.00139457415912111;0.00137929435264217;0.00191288874842782]

Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00150364524591749;0.00177926680071784;0.00201084155318244]	[0.00135478704307081;0.00139490971851826;0.00183021096601428]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00163947418171950;0.00184585838859874;0.00246500283376408]	[0.00137183860765440;0.00137568966912826;0.00206980666762157]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00202965728120244;0.00170892701061880;0.00173295342790595]	[0.00167298244653537;0.00170224966988224;0.00146907666692499]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00181662923778535;0.00180046353989532;0.00155049267074777]	[0.00147575195493234;0.00193811370888640;0.00160098396806265]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00172700810062853;0.00165408588068391;0.00151587027689617]	[0.00179586008660412;0.00168721704617388;0.00139636938279413]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.003689641333333334;0.016212127666667;-0.00735431750000000]	[0.000976978500000001;0.0139844935000000;-0.00525194766666667]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.002907343833333333;0.0160127008333333;-0.00625544333333333]	[0.000262154333333333;0.0138449511666667;-0.00449333083333333]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.003569546833333334;0.0174246835000000;-0.00690230233333333]	[0.001059150833333333;0.0148317373333333;-0.00457094800000000]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00307182510865955;0.00999363870887302;0.0313756627123478]	[0.00495212566509018;0.00716956241238081;0.0299701529272814]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.00784998036344945;0.00615857211022103;0.0288552129605990]	[0.0133733295639989;0.00321904678306201;0.0299653683016813]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.00765399554542473;0.00672701454276818;0.00877611291763947]	[0.0132339581017843;0.00258051432474472;0.0112368958554481]
Fattori di scala accelerometro	[0.999486477687113;0.997888096353125;1.00136659944833]	[0.999708649851242;0.998007243035561;1.00216397491144]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.000156920065348735	0.00106966585359302
Matrice di calibrazione	[1.00049160334121,0.00491763499563447,-0.00855723351109878;-0.00531228477353027,1.00203728879561,-0.0107000739940619;0.00521424726748505,0.0116251561325836,0.998547068924766]	[1.00018082319382,0.00425588947700461,0.0133454516064527;-0.00340953758879389,1.00198116218624,-0.00239762766744964;-0.0145467605127492,0.00409114479295774,0.997750747765917]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999951209924401,-0.00500619144138863,0.00851562199600050;0.00525321670135789,0.999928311635527,0.0107598933086097;-0.00527272152582948,-0.0115747054248479,0.999919109029345]	[0.999901637338582,-0.00419240792589605,-0.0133842954018856;0.00344317139866978,0.999991294623116,0.00235695750986821;0.0145283430813427,-0.00414429836381407,0.999885869506307]
Errore norma (x positivo)	0.00331883164747315	0.00470631551587331
Errore norma (y positivo)	0.00484352139444357	0.00188262078692355
Errore norma (z positivo)	0.0100781970356943	0.0136706573641367

Errore norma (x negativo)	-0.00325500223939760	-0.00433018988503686
Errore norma (y negativo)	-0.00817038404781957	-0.00478512554077052
Errore norma (z negativo)	-0.00723464306071305	-0.00916166062630424
Errore angolo (x positivo)	2.29836833321000	0.964525578118142
Errore angolo (y positivo)	2.37991480742727	2.08541291233908
Errore angolo (z positivo)	0.318028626157725	1.57559698696424
Errore angolo (x negativo)	1.57648666481256	2.58099559512821
Errore angolo (y negativo)	1.06060441958571	1.69177976700402
Errore angolo (z negativo)	1.29799740923425	0.404845691634416

Tabella 8. Sensori Xsens ‘Right forearm’ e ‘Left forearm’

PARAMETRI	XSENS RIGHT FOREARM	XSENS LEFT FOREARM
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00244148584610836;0.00247276066636373;0.00205028748532453]	[0.00250088857588622;0.00251431846412945;0.00220789427606673]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00161384871882671;0.00229931004125993;0.00248404996469187]	[0.00162880396502219;0.00231643170692271;0.00251054328559474]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00149221507695484;0.00176552892790051;0.00199043152985914]	[0.00153138755524636;0.00173478710262194;0.00219041702370349]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00181741119734051;0.00164455970868694;0.00183039124544305]	[0.00183739074301659;0.00162757087620599;0.00190713781960512]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00200803232329492;0.00163928925825141;0.00155994979429129]	[0.00215291555835259;0.00206818702607988;0.00161078914910633]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00166995175219392;0.00182474462846882;0.00157775115047184]	[0.00179862528241703;0.00167246318896639;0.00149303786153979]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.00798661116666666;0.00580284833333333;-0.00116893200000000]	[-0.00677417916666667;0.00829287650000000;0.0108491970000000]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.00723330616666667;0.00558543950000000;-0.000885670833333333]	[-0.00758664550000000;0.00828792200000000;0.0120547346666667]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.00721729549999999;0.00650509416666667;0.00041282450000000]	[-0.00729056783333333;0.01011788566666667;0.0125781511666667]
Offset accelerometro (x) [g]	[-0.00161387049660905;0.00481552517325944;0.0140770914327734]	[-0.00630729822297632;0.00173394800322950;0.0361724999791914]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.00231710532953988;0.00110000088330503;0.0119218311134349]	[-0.00221074921084338;-0.00209020560793383;0.0351135701049486]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.00247419288426445;0.00142967895598780;-0.00729297747860891]	[-0.00170208527936476;-0.00147160094452488;0.0151587683738063]

Fattori di scala accelerometro	[0.997934566138451;0.999615001553976;1.00019681071152]	[0.997951031528026;0.999578692685833;1.00106402494272]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00150836165822958	0.00123077866471341
Matrice di calibrazione	[1.00204761148004,0.00616150363438453,-0.00523214874289572;-0.00597290453727590,1.00035679984137,-0.00268258620950670;0.00344200578509669,0.00481841776779355,0.999789734474435]	[1.00201823402297,-0.00108506902836767,-0.0102954628859197;0.00119791141651377,1.00042158527750,0.00353032877033611;0.00848426832023928,-0.00158057125349338,0.998881423910622]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999967271254199,-0.00618423064574534,0.00521648461626227;0.00595124849680762,0.999978607549649,0.00271423735029860;-0.00346349543539119,-0.00479528217192508,0.999982504581086]	[0.999946321396314,0.00110083060081485,0.0103025481299041;-0.00116546338693880,0.999993032808062,-0.00354626993165511;-0.00846874321234311,0.00157066128516873,0.999962906017784]
Errore norma (x positivo)	-0.00352064090858686	-0.00731401768709216
Errore norma (y positivo)	0.000837341936266014	-0.00201034454452511
Errore norma (z positivo)	-0.00710542296511652	0.0162386437815445
Errore norma (x negativo)	-0.000381941587975548	0.00454154075887198
Errore norma (y negativo)	-0.00145477740844377	0.00241118271499428
Errore norma (z negativo)	0.00751114794142925	-0.0141017007260159
Errore angolo (x positivo)	1.11761870521852	2.68973617253054
Errore angolo (y positivo)	0.966321781401231	1.82487889704922
Errore angolo (z positivo)	0.219924455875733	0.579768347805687
Errore angolo (x negativo)	0.814972198574379	1.47969296251698
Errore angolo (y negativo)	0.574351694263157	2.21247797264031
Errore angolo (z negativo)	0.496589107765075	0.439753145122534

Tabella 9. Sensori Xsens 'Right upper arm' e 'Left upper arm'

PARAMETRI	XSENS RIGHT UPPER ARM	XSENS LEFT UPPER ARM
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00251546291475158;0.00231243707197455;0.00208895548597451]	[0.00243015055432179;0.0022901616276696;0.00201127531541608]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00160768084085443;0.00232845785984340;0.00246506563790745]	[0.00161900578114376;0.00234347837780322;0.00257283497936961]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00149513898931994;0.00175446167959768;0.00216469055175599]	[0.00148068295253235;0.00176560394427071;0.00208288527287965]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00186247425160149;0.00166354385896585;0.00185835075156152]	[0.00174571719001997;0.00159140821188899;0.00188243849638441]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00191139622267127;0.00156728197803082;0.00156291864047624]	[0.00198112927028434;0.00165564804814040;0.00159990846474767]

Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00169300098610894;0.00182576774278192;0.00152041622207636]	[0.00174320453002171;0.00162075647784075;0.00156862640187812]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.003225953333333333;0.0136362243333333;-0.005945736833333333]	[0.01780351483333333;-0.003151781333333333;-0.002419917666666667]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.003755691166666667;0.0134989425000000;-0.005446937833333334]	[0.01672772050000000;-0.003412222333333333;-0.002406333833333333]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.004347132000000000;0.0144435756666667;-0.004430694666666667]	[0.017618395833333334;-0.005131408000000000;-0.002442127000000000]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00746430307826657;0.00708681630703411;0.0355307621852355]	[0.00712649240756902;0.0102381903899469;0.0241777159294382]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.0116937156158649;0.00339922873031157;0.0344532767984133]	[0.0113308094590419;0.00665174824753156;0.0225613889869867]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.0117443846514877;0.00383831906371024;0.0139662580701379]	[0.0116654380912729;0.00740521236606675;0.00318982869997342]
Fattori di scala accelerometro	[0.999696691004453;0.997956382939680;1.00214172997297]	[0.999669047304593;0.998068981700884;1.00126943247249]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00155723619684165	0.000456211609166312
Matrice di calibrazione	[1.00029202415508,-0.00214910081411244,-0.00734395903508923;0.00191237721587166,1.00204189849264,0.00447122349854849;0.00497972555894342,-0.00305994666444024,0.997829652231686]	[1.00030282655621,-0.000187685474523518,-0.00921384215202059;-9.44226376856076e-05,1.00190697406969,-0.00586182333923979;0.00767693570313506,0.00767500736386789,0.998675276256108]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999970640107322,0.00216710333768905,0.00735000588273756;-0.00188941985020061,0.999988113355609,-0.00449480145499158;-0.00498400451063406,0.00304296992809473,0.999982949871174]	[0.999957429468359,0.000116642699610922,0.00922635602565745;4.93428163986635e-05,0.999982770459835,0.00586995304581608;-0.00767488353320243,-0.00766138645640534,0.999941197931317]
Errore norma (x positivo)	0.00809022195470759	0.00736369137257788
Errore norma (y positivo)	0.00184292725767898	0.00517251248907874
Errore norma (z positivo)	0.0161386694518728	0.00441031673384605
Errore norma (x negativo)	-0.00738171861903735	-0.00733297539313070
Errore norma (y negativo)	-0.00459728148470709	-0.00839239884152573
Errore norma (z negativo)	-0.0116973536040067	-0.00167566594405483
Errore angolo (x positivo)	2.49622580018817	1.99212522286892
Errore angolo (y positivo)	1.80565412351014	1.74750258381456
Errore angolo (z positivo)	0.549756905898069	0.242733925431172
Errore angolo (x negativo)	1.65379387170750	1.04650408262702
Errore angolo (y negativo)	2.37596203784810	1.16819277092728
Errore angolo (z negativo)	0.975114611068689	1.41054951974293

Tabella 10. Sensori Xsens ‘Right hand’ e ‘Left hand’

PARAMETRI	XSENS RIGHT HAND	XSENS LEFT HAND
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00148026974726977;0.00145294982320413;0.00175018857839579]	[0.00149468831095383;0.00146790803422007;0.00188074426561944]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00154569376350440;0.00144320889032252;0.00181856649495661]	[0.00145089565585940;0.00145875860222234;0.00189281829483671]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00141289484130127;0.00159808826768360;0.00178427546679098]	[0.00142123571819619;0.00158686060956485;0.00190341444761419]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00178600362747582;0.00154571500182495;0.00171717022143209]	[0.00186462916007330;0.00175472658579083;0.00163228461485339]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00161902737564640;0.00155670999425744;0.00180272047369423]	[0.00172855520786127;0.00169094647366362;0.00191190204827895]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00171498951233415;0.00152893716269327;0.00167473212159513]	[0.00164474293570160;0.00157404197056942;0.00159183312141413]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.001129938333333333;0.0087246833333333;0.00129720466666667]	[0.00514587866666667;0.00694782200000000;0.000470434500000000]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.00176933716666667;0.00848795983333333;0.00210472783333334]	[0.00455772633333334;0.00710838083333333;0.001074279333333333]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.00160992866666667;0.00969483016666667;0.00286493800000000]	[0.00421493933333333;0.00872804366666667;0.00135467516666667]
Offset accelerometro (x) [g]	[-0.00810789031763465;-0.000102449370908454;0.0182514637298812]	[-0.00243665322684106;0.00293023424909983;0.0152509871358511]
Offset accelerometro (y) [g]	[-0.000313300730883960;-0.00245282792657259;0.0223419048065554]	[0.00132601484530016;0.000134195642894297;0.0129156589005468]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.00667527222357266;-0.00147060691209977;0.00301271129463399]	[0.00156962455798651;0.000756223342660689;-0.00619061956374556]
Fattori di scala accelerometro	[0.999711661149387;0.997949999530115;1.00120105737152]	[0.999529857581033;0.998028016402472;0.999964703674499]
Effetto dell’accelerazione sul giroscopio	0.00151134178140021	0.000490386407258622
Matrice di calibrazione	[1.00015298109198,-0.00519220002396851,-0.0125426816683813;0.00665397260201176,1.00203673197102,0.00533432489800979;0.0153903681085697,-0.00363788260573615,0.998713044889414]	[1.00046437934582,0.00115777164653233,-0.00597788014658154;-0.00107051852727716,1.00194189760307,-0.00702881242258708;0.00389414547019236,0.00826069309701257,0.999995618640098]

Matrice di rotazione accelerometro	[0.999907839204375,0.0052266580385 2701,0.0125297702846535;- 0.00656925641478251,0.999963714561 360,-0.00542350724206207;- 0.0154097091583521,0.0035501866565 2030,0.999874960701766]	[0.999981457714559,- 0.00120472151705944,0.0059693 2769522967;0.001042612370969 55,0.999974711264274,0.007034 89810702073;- 0.00390099299329206,- 0.00823983243616283,0.9999584 42844046]
Errore norma (x positivo)	-0.00799499221992507	-0.00269538301032175
Errore norma (y positivo)	-0.00436862110424958	-0.00165816184447677
Errore norma (z positivo)	0.00413086333807840	-0.00623448392956939
Errore norma (x negativo)	0.00776072094638887	0.00200218787292749
Errore norma (y negativo)	0.000774002281005903	-0.00211120082537757
Errore norma (z negativo)	-0.00167601587691079	0.00617088306061518
Errore angolo (x positivo)	1.80430875571969	1.22588517816557
Errore angolo (y positivo)	1.05511990646814	1.15557751704361
Errore angolo (z positivo)	0.519627092255464	0.459598738847105
Errore angolo (x negativo)	0.455998824242678	0.587536655533480
Errore angolo (y negativo)	1.63184904975591	0.349340090243871
Errore angolo (z negativo)	1.30395200537727	0.605127568601913

Tabella 11. Sensori Xsens ‘Pelvis’ e ‘Right upper leg’

PARAMETRI	XSENS PELVIS	XSENS RIGHT UPPER LEG
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00146109324135464;0.00145070411 510011;0.00187961023628166]	[0.00153446183529188;0.001428 07251593039;0.00195634127655 059]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00146441613227610;0.00147036710 617698;0.00182562363538853]	[0.00150349775594586;0.001419 59089584941;0.00193420622831 852]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00143522358015080;0.00143630649 487758;0.00206848506963105]	[0.00147703789727190;0.001575 27718069066;0.00190848576948 990]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00140737836777001;0.00168445684 811787;0.00172249175059806]	[0.00162666200458604;0.001694 03068068109;0.00163611889109 355]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00150882850079041;0.00154857724 491067;0.00151556072851887]	[0.00141972520269009;0.001831 89741328078;0.00168520328156 932]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00170319533652259;0.00148145915 191098;0.00176070487680253]	[0.00190456252517248;0.001885 85330899122;0.00179388640548 216]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.006127657833333333;- 0.0019926290000000;- 0.0154637403333333]	[-0.0030310070000000;- 0.0022509130000000;0.0105469 7333333333]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.005976244833333333;- 0.001663542333333333;- 0.0145470150000000]	[-0.003822645333333333;- 0.0024003520000000;0.0107680 311666667]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.006068910333333333;- 0.0039797830000000;- 0.0147402590000000]	[-0.0050950380000000;- 0.003194375833333333;0.0125033 635000000]

Offset accelerometro (x) [g]	[0.00199036822099508;0.0106817420932733;0.0218760597239910]	[-0.00773979823444360;0.00260911279482642;0.0187794110172939]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.0101800954003419;0.00652516671958020;0.0249068209070150]	[-0.00341814058852916;-0.000772663501037885;0.0172381433879267]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.0202277772087255;0.00748260755385485;0.00592215124356560]	[-0.00315821422729239;-0.000406927897338211;-0.00254652246202314]
Fattori di scala accelerometro	[0.999637084815640;0.998095913033513;1.00053057771860]	[0.999553702335413;0.998005734205294;1.00056310001633]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.000479796134297288	0.00197322046977417
Matrice di calibrazione	[1.00018511273019,-0.00777411949713693,-0.0129464565128495;0.00432143317850008,1.00188234203100,-0.000481679540488208;0.0199393006659552,0.00282148904928431,0.999413086439766]	[1.00024871280499,0.0157545520750795,-0.0132355971008770;-0.0161374210379072,1.00187543690448,0.00174196483344835;0.0117394691247163,-0.000139425662026623,0.999350205259098]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999886244827337,0.00772214335576120,0.0129563076175480;-0.00432908264679623,0.999990538790646,0.000425878656948733;-0.0199187341550745,-0.00297017655581203,0.999797190474592]	[0.999788389642870,-0.0157198865817837,0.0132688017986858;0.0161492306797367,0.999868423621335,-0.00152898444731046;-0.0117305208821103,0.000323618238071037,0.999931142704872]
Errore norma (x positivo)	0.00229068328798118	-0.00779070963607664
Errore norma (y positivo)	0.00495085248159310	-0.00269050785857772
Errore norma (z positivo)	0.00626198791831959	-0.00193912098076866
Errore norma (x negativo)	-0.00241965853496555	0.00726650944076588
Errore norma (y negativo)	-0.00802789440581840	-0.000982636917969737
Errore norma (z negativo)	-0.00472454721884631	0.00307970221013677
Errore angolo (x positivo)	2.25400360308149	2.00126097357185
Errore angolo (y positivo)	1.48517709556080	1.16498533511925
Errore angolo (z positivo)	0.270648156461540	0.858837739078916
Errore angolo (x negativo)	0.547141465517613	1.09371075250749
Errore angolo (y negativo)	1.64611777228338	1.55693194923480
Errore angolo (z negativo)	2.39109142888655	0.498107294414040

Tabella 12. Sensori Xsens 'Left upper leg' e 'Right lower leg'

PARAMETRI	XSENS LEFT UPPER LEG	XSENS RIGHT LOWER LEG
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00148602714267275;0.00148491299447134;0.00202802582858610]	[0.00142229713212888;0.00144699310594060;0.00192774415191962]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00142478110044754;0.00146156374302513;0.00202869509108948]	[0.00150975631920795;0.00143148445886811;0.00190103199452385]

Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00142091308635239;0.00160584714110957;0.00198226156440611]	[0.00140772226155499;0.00139638500428793;0.00196846850326673]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00161033220976083;0.00140247805081927;0.00189636419290986]	[0.00162728559742899;0.00167593551162589;0.00139424147866386]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00184481301193772;0.00146100284982819;0.00169888520189177]	[0.00189040606999225;0.00149010267422033;0.00151874667685827]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00158537027124550;0.00160660499162806;0.00150293317029965]	[0.00155671533292441;0.00183602216546127;0.00141896269443888]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.003039646666666666;0.0165511758333333;-0.005906136166666667]	[-0.003319721666666667;0.0134445133333333;-0.009868261833333333]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.003240423666666667;0.0163454813333333;-0.005449978833333333]	[-0.003829447833333333;0.012714957833333333;-0.009672421833333333]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.003600567333333333;0.0180708030000000;-0.004186955666666667]	[-0.004194026000000000;0.014063375500000000;-0.008357232333333333]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.00799038088453086;0.00721995321540872;0.0475554482849528]	[0.00395526347885239;0.00468182545518662;0.0399485072144789]
Offset accelerometro (y) [g]	[0.0123937104179545;0.00403565828563063;0.0457849746075280]	[0.000968937338170446;0.00403706335216664;0.0396071368754205]
Offset accelerometro (z) [g]	[0.0119531572464732;0.00450594076998040;0.0257975486501492]	[0.000885697431331951;0.00445075537019739;0.0191697260191597]
Fattori di scala accelerometro	[0.997790949283452;0.999738423250711;1.00316892037534]	[0.998039845411307;0.999777843347851;1.00252559595459]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00172094599479245	0.00143585738124746
Matrice di calibrazione	[1.00216497873798,-0.00729913604906226,-0.00905929325075325;0.00752370580152407,1.00022842181783,0.00486392823188929;0.00682686483795813,-0.00380970512826991,0.996791201388781]	[1.00196714817209,-0.00161576238626687,-0.00126363941059944;-0.00108648858876122,1.00020381035663,-0.00541912392738015;0.000557661505241361,0.00653195761602507,0.997466094124500]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999932152663002,0.00733145185777369,0.00905206520040306;-0.00747344912350216,0.999959835024636,-0.00494731196730604;-0.00684012830142553,0.00375880347079579,0.999969541556786]	[0.999997895063874,0.00160709942014608,0.00127557801627067;0.00108131437446977,0.999984650122900,0.00543417682854707;-0.000563637052334696,-0.00653139679033801,0.999978511353739]
Errore norma (x positivo)	0.00741227798960833	0.00286631592857196
Errore norma (y positivo)	0.00457962274501758	0.00481433257466813
Errore norma (z positivo)	0.0289837097030426	0.0216778865314617

Errore norma (x negativo)	-0.00951462903264992	-0.00515653641537988
Errore norma (y negativo)	-0.00284493805669704	-0.00368558022648142
Errore norma (z negativo)	-0.0224757906948581	-0.0166011318842934
Errore angolo (x positivo)	3.32578632578939	2.38611410225432
Errore angolo (y positivo)	2.34838230720846	2.57301031584651
Errore angolo (z positivo)	0.546685549618354	0.147978476163519
Errore angolo (x negativo)	2.23051582358518	2.23686782402246
Errore angolo (y negativo)	3.13324721614989	1.96729730184401
Errore angolo (z negativo)	1.10678224690151	0.651443086280421

Tabella 13. Sensori Xsens ‘Left lower leg’ e ‘Right foot’

PARAMETRI	XSENS LEFT LOWER LEG	XSENS RIGHT FOOT
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00146997040961589;0.00138367948834779;0.00190077977954989]	[0.00142031462147012;0.00139930503070067;0.00186684867812979]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00140563787833443;0.00143544065815238;0.00177544862212153]	[0.00139623982416352;0.00146091541066463;0.00179921448070537]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00145472430940863;0.00138102291664983;0.00190172197059435]	[0.00141495891846825;0.00142848603450288;0.00191876311497461]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00170755238922262;0.00153274022190576;0.00170415456696601]	[0.00161305464474050;0.00154684323927813;0.00153621753089092]
Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00174123577819390;0.00163065897209894;0.00149420774766164]	[0.00165437873277105;0.00147976244057111;0.00172354936976948]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00162919111374897;0.00180382998267836;0.00145002776825184]	[0.00196110518051252;0.00148835287462023;0.00171231408464395]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[0.00675390733333333;0.0022981255000000;0.00282750450000000]	[-0.00112302150000000;0.01047065416666667;-0.00149074933333333]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[0.00628203016666667;0.00270751266666667;0.00338395966666667]	[-0.00129406366666667;0.0101327713333333;-0.00137259150000000]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[0.00670542150000000;0.0029695950000000;0.00368434816666667]	[-0.00157087133333333;0.0112557875000000;-0.00053744416666667]
Offset accelerometro (x) [g]	[-0.00160266183974378;0.000764490237016229;0.0101915907661329]	[0.00230732689641866;0.00198450905481095;0.0382948552577289]
Offset accelerometro (y) [g]	[-0.00428403234187438;-0.000126744565677350;0.00899424621040904]	[-0.000249388693457648;0.00104822573743679;0.0379489401443626]

Offset accelerometro (z) [g]	[-0.00418216211331411;-0.000123985485939228;-0.0102832883102558]	[-0.000317293031861323;0.00105457416968052;0.0178171154790547]
Fattori di scala accelerometro	[0.997932049755328;0.999587932438695;1.00000005902521]	[0.998065930253001;0.999705115307457;1.00235317795001]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00100488608270061	0.000822254092355769
Matrice di calibrazione	[1.00203529664040,-0.00951977838448302,-0.00712822139024197;0.00623246968721600,1.00037243926131,2.04591712178109e-05;0.00679510882204450,0.000905810642439870,0.999975087459353]	[1.00192136473827,-0.00143082650540833,-0.00653683993987112;-0.00187812657954269,1.00029901410999,-0.000355112563135620;0.00635581938816857,0.00124168850004644,0.997631287960337]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999929383876010,0.00950910822192901,0.00712770104354518;-0.00621925084683685,0.999980658173359,-6.47925865657173e-05;-0.00677511526634468,-0.000969925784195654,0.999976578254262]	[0.999977519307754,0.00142223263530863,0.00655271954554073;0.00187218565474271,0.999998179664946,0.000368222307287092;-0.00634584211779678,-0.00125036844920674,0.999979083214523]
Errore norma (x positivo)	-0.00353102328818439	0.00136798174429357
Errore norma (y positivo)	-0.000460462047539485	0.00148871623615975
Errore norma (z positivo)	-0.0102434117112759	0.0201731006753367
Errore norma (x negativo)	-0.000489396816834950	-0.00375383761055302
Errore norma (y negativo)	-0.000259123805577997	-0.000633224755336307
Errore norma (z negativo)	0.0102655667720808	-0.0154616184342889
Errore angolo (x positivo)	1.16784195219199	2.57644368722526
Errore angolo (y positivo)	0.795740059331895	2.19610895155050
Errore angolo (z positivo)	0.642336153048720	0.383418933250873
Errore angolo (x negativo)	0.544939577049596	1.82903493046352
Errore angolo (y negativo)	0.537428235344561	2.16002142626966
Errore angolo (z negativo)	0.176948546165345	0.385894839104537

Tabella 14. Sensori Xsens 'Left foot' e 'Prop'

PARAMETRI	XSENS LEFT FOOT	XSENS PROP
Deviazione standard accelerometro (x) [g]	[0.00143555380173758;0.00138098475752639;0.00184830568382017]	[0.00146302969054748;0.00137129098832343;0.00181874011364451]
Deviazione standard accelerometro (y) [g]	[0.00140142255133596;0.00140199844884485;0.00182986055527279]	[0.00283751177303681;0.00321907800593239;0.00251346511528898]
Deviazione standard accelerometro (z) [g]	[0.00142383484587912;0.00139906739425300;0.00193686660390976]	[0.00144776078442730;0.00153876292300840;0.00197856918969280]
Deviazione standard giroscopio (x) [°/s]	[0.00175963423592463;0.00165048849393548;0.00160914617056985]	[0.00149258519846019;0.00186026622041985;0.00149056845206047]

Deviazione standard giroscopio (y) [°/s]	[0.00172287524444200;0.00147128270102759;0.00199248752911113]	[0.00155445259581581;0.00208873942151603;0.00208380433797541]
Deviazione standard giroscopio (z) [°/s]	[0.00181282194686523;0.00141561640498598;0.00180925471039887]	[0.00159052162727341;0.00191405306270604;0.00150892191364811]
Offset giroscopio (x) [°/s]	[-0.00523975600000000;0.0127169128333333;0.00365856033333334]	[-0.00437011000000000;0.00320937000000000;-0.000220280666666667]
Offset giroscopio (y) [°/s]	[-0.00636884050000000;0.0127712561666667;0.00402025350000000]	[-0.00461988450000000;0.00320436683333333;0.000854922833333333]
Offset giroscopio (z) [°/s]	[-0.00753968850000001;0.0144459265000000;0.00458452583333334]	[-0.00504034183333333;0.00369374966666666;0.000988158333333333]
Offset accelerometro (x) [g]	[0.000956153366216295;0.00137576362994887;0.0331070614207860]	[0.000362753727250031;0.00387527590967255;0.00100888406128710]
Offset accelerometro (y) [g]	[-0.00161128852802481;0.000582308869350789;0.0328662543245851]	[0.00332493601559101;0.00115741784286416;-0.00114197958172449]
Offset accelerometro (z) [g]	[-0.00198132523274664;0.000397625225901018;0.0124651270999516]	[0.00292863173840717;0.00237651770916196;-0.0210333622106137]
Fattori di scala accelerometro	[0.998019930246322;0.999719305830621;1.00214886093743]	[0.999763460080120;0.998075085469101;1.00029326524316]
Effetto dell'accelerazione sul giroscopio	0.00132938922204334	0.00169792477872286
Matrice di calibrazione	[1.00197072175122,-0.00429842494524464,-0.00623389907034328;0.00103883435279178,1.00026019092345,0.00683720340455839;0.00603952381485536,-0.00587949550273252,0.997813371283452]	[1.00022664556942,-0.00435990969810395,-0.00514104586109684;0.00416752924446309,1.00189904598386,-0.00454785424229146;0.00282957029563063,0.00670962515966647,0.999688329422394]
Matrice di rotazione accelerometro	[0.999971279171858,0.00433373074567485,0.00621768519799505;-0.000995427186691556,0.999975986538960,-0.00685824103905553;-0.00603349920847098,0.00585183067786936,0.999964675858612]	[0.999977357593712,0.00431697660751556,0.00516217133274704;-0.00417931433267595,0.999981016483671,0.00452769301006963;-0.00280090108885311,-0.00670891897010453,0.999973572330461]
Errore norma (x positivo)	-0.000257306706187464	0.000158711652334637
Errore norma (y positivo)	0.000621769040925783	-0.000777798856392943
Errore norma (z positivo)	0.0146316624432146	-0.0207548519343405
Errore norma (x negativo)	-0.00259345307082623	-0.000610705152565138
Errore norma (y negativo)	-9.48001628721743e-05	-0.00305437154827500
Errore norma (z negativo)	-0.0103262378489309	0.0213586014981192
Errore angolo (x positivo)	2.28043029029969	0.595185156120290
Errore angolo (y positivo)	1.49915910439877	0.219750651505802
Errore angolo (z positivo)	0.580590130894773	0.268509951936935

Errore angolo (x negativo)	1.55753961111696	0.254584721609241
Errore angolo (y negativo)	2.27848494857890	0.548466598468726
Errore angolo (z negativo)	0.402734076605307	0.607756797111327