

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di Laurea in Informatica

**Analisi sperimentale
dell'accuratezza di posizionamento
di una telecamera stereo dotata di IMU**

Relatore:
**Chiar.mo Prof.
LUIGI DI STEFANO**

Presentata da:
PAOLO CERONI

Correlatore esterno:
**Dott.
GIUSEPPE CASADIO**

**I Sessione
Anno Accademico 2022/23**

Vivi per imparare,
impara per vivere.

Indice

Elenco delle figure	3
Elenco delle tabelle	6
Introduzione	7
1 Scelta della telecamera	9
1.1 Modelli analizzati	9
1.2 Caratteristiche utili alla comparazione	10
2 Telecamere stereo e IMU	15
2.1 Telecamere stereo	15
2.2 Inertial Measurement Unit (IMU)	16
2.3 Telecamera stereo dotata di IMU	19
3 Descrizione tecnica della telecamera ZED2i	20
3.1 Dettagli tecnici hardware	20
3.2 Software a disposizione	21
3.3 Calibrazione	22
4 Sperimentazione	24
4.1 La prova iniziale	24
4.2 Raccolta dei dati grezzi dell'IMU	28
4.3 Analisi deriva nello spostamento con dispositivo fermo	30
4.3.1 Deriva con gravità sull'asse X	32
4.3.2 Deriva con gravità sull'asse Y	37
4.3.3 Deriva con gravità sull'asse Z	42
4.4 Analisi accuratezza spostamento rettilineo	46
4.4.1 Spostamento lungo asse X	46
4.4.2 Spostamento lungo asse Y	51
4.4.3 Spostamento lungo asse Z	56
4.5 Formule utilizzate	60

INDICE

5 Risultati degli esperimenti e conclusioni	62
Riferimenti Bibliografici	64

Elenco delle figure

1	disparità visione stereo	16
2	sistema coordinate assi ZED2i	17
3	grafico di un accelerometro in stabilità	17
4	grafico di un giroscopio in cui si effettuano due rotazioni sull'asse Y	18
5	programma per vedere il tracciamento posizionale	22
6	telecamera con protezione posiziona- ta sul piano con supporti alle estremità	25
7	spostamento rettilineo registrato dal programma di tracciamento posizionale	26
8	Due diverse situazioni per testare il tracciamento posizionale	27
9	Spostamento rettilineo della telecamera con stesso punto di arrivo e partenza	27
10	diverse fasi dello spostamento di andata della telecamera	29
11	sistema coordinate assi ZED2i	31
12	posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	32
13	accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	32
14	spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	33
15	spostamento Y e Z calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	34
16	accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	35
17	spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	35
18	posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	37
19	accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	38

ELENCO DELLE FIGURE

20	spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	39
21	spostamento X e Z calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	39
22	accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	40
23	spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	40
24	posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	42
25	accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	42
26	spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	43
27	spostamento X e Y calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	44
28	accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	44
29	spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	45
30	posizione iniziale per lo spostamento sull'asse X	46
31	grafico accelerazione spostamento su asse X	47
32	grafico accelerazione normalizzata spostamento su asse X	48
33	grafico spostamento effettuato su asse X	49
34	grafico spostamento normalizzato effettuato su asse X	50
35	posizionale iniziale per lo spostamento sull'asse Y	51
36	grafico accelerazione spostamento su asse Y	52
37	grafico accelerazioni normalizzate spostamento su asse Y	53
38	grafico spostamento effettuato su asse Y	54
39	grafico spostamento normalizzato effettuato su asse Y	55
40	posizionale iniziale per lo spostamento sull'asse Z	56

ELENCO DELLE FIGURE

41	grafico accelerazione spostamento su asse Z	56
42	grafico accelerazioni normalizzate spostamento su asse Z	57
43	grafico spostamento effettuato su asse Z	58
44	grafico spostamento normalizzato effettuato su asse Z	59

Elenco delle tabelle

1	principali dettagli hardware ZED2i	20
2	spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X	36
3	spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y	41
4	spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z	45

Introduzione

Il campo dell'informatica è da diversi anni in forte sviluppo e tutt'ora vi è una continua e costante ricerca per rendere efficiente, ottimizzare e migliorare il software già esistente.

In particolare, i sistemi di visione stanno rivoluzionando e automatizzando il lavoro in tantissimi settori rendendolo più veloce e sicuro. Il team di Specialvideo, un'azienda imolese che dal 1993 si occupa di sistemi di visione industriali, mi ha proposto di eseguire questa analisi sperimentale in seguito alla richiesta di determinare le posizioni assolute di alcuni oggetti all'interno di una stanza ottenute tramite l'immagine di una telecamera che si sposta all'interno della stessa. Per cui, innanzitutto è necessario selezionare il dispositivo adatto a questo tipo di utilizzo. Nello specifico, è essenziale che gli errori dei sensori non compromettano l'attendibilità dei dati che si ricavano e che saranno poi la base di tutte le elaborazioni.

L'obiettivo di questo elaborato è studiare gli errori di una telecamera nel tracciamento della sua posizione effettuata tramite il sensore IMU al suo interno.

Come metodi di ricerca ci siamo concentrati sul creare un programma *ad hoc* partendo dal software in dotazione per poter memorizzare le informazioni e analizzare i dati per valutare le prestazioni della telecamera quali ripetibilità e precisione.

Il presente volume è organizzato secondo questi capitoli:

1. *Scelta della telecamera*

Illustrazione dei criteri e delle principali caratteristiche qualitative osservate durante la scelta della telecamera usata per gli esperimenti effettuati.

2. Descrizione tecnica della telecamera ZED2i

Descrizione dei componenti hardware e software specifici della telecamera ZED2i.

3. Funzionalità delle telecamere stereo e dell'IMU

Illustrazione del funzionamento delle telecamere stereo, dell'IMU e di ciò che si ottiene unendoli.

4. Sperimentazione

Spiegazione di come sono stati elaborati i dati e come si è svolta l'analisi sperimentale.

5. Risultati degli esperimenti e conclusioni

Illustrazione dei risultati finali e dell'esito dell'analisi.

1 Scelta della telecamera

Per poter svolgere una scelta accurata e consapevole della telecamera da utilizzare è stato necessario raccogliere i dati di ciascuno dei 14 modelli di partenza (tutti stereo e dotati di IMU) e metterli a confronto per capire quale soddisfasse al meglio le nostre necessità. In particolare, si è svolta un'analisi sulla serie delle OAK di Luxonis, la ZED2i di Stereolabs e la Depth camera D435 di Intel (usata come termine di paragone poiché già in dotazione).

1.1 Modelli analizzati

Le telecamere prese in considerazione sono:

1. OAK-D Pro PoE
2. OAK-D Pro
3. OAK-D Pro W PoE
4. OAK-D Pro W
5. OAK-D W PoE
6. OAK-D W
7. OAK-D S2 PoE
8. OAK-D S2
9. OAK-D-PoE
10. OAK-D

11. OAK-D-Lite
12. OAK-D CM4 PoE
13. ZED 2i
14. Depth Camera D435

1.2 Caratteristiche utili alla comparazione

Durante l'osservazione delle telecamere, le principali caratteristiche tenute in considerazione sono state:

- **Shutter**

Può essere di 2 tipi: *rolling* o *shutter*.

Il **rolling shutter** funziona similamente a uno scanner: acquisisce l'immagine un po' per volta, quindi il risultato finale contiene frammenti acquisiti a istanti temporali diversi tra loro. Questo permette ai canali dei dati di non essere inondati da una grande quantità di dati per cui è più facile produrre un'immagine ad alta risoluzione. Il problema di questo metodo è che il movimento di una delle due parti in gioco genera una notevole distorsione.

Al contrario, il **global shutter** acquisisce l'immagine da cima a fondo in una volta sola, eliminando la distorsione ma riducendo la qualità dell'immagine per via della grande quantità di dati spediti [2].

- **Field of View**

Il **campo di vista**, chiamato anche **FOV**, è rappresentato da 3 misure in gradi che indicano l'estensione osservabile dalla lente. Vengono comunemente indicate la misura orizzontale, verticale e diagonale.

- **Focus**

Il **focus** indica la distanza minima che ci deve essere tra la lente e ciò che si vuole osservare. Questo dato è da tenere sotto particolare attenzione perché è fortemente legato al tipo di lavoro che bisogna svolgere.

Il focus può essere di due tipi: *fixed* o *auto*.

- **Max framerate**

Il **massimo framerate** indica il numero massimo di fotogrammi al secondo (FPS) che si riescono ad acquisire.

- **Pixel size**

La **dimensione dei pixel**, normalmente espressa in micrometri, indica le dimensioni di un singolo pixel.

- **Lens size**

La **dimensione della lente** rispetta delle misure standard (esprese seguendo un modello del tipo 1/4") da cui si ricava la lun-

ghezza orizzontale, verticale e diagonale della lente.

- **Risoluzione**

La **risoluzione** è espressa normalmente in *mega pixel* (MP) e la si ottiene dal prodotto dei pixel orizzontali e verticali (e.g. $4032 \times 3040 = 12\text{MP}$).

- **Baseline**

La **baseline** è l'interasse tra le due lenti che compongono la telecamera stereo.

- **IR illumination red**

Il **led di illuminazione a infrarossi** serve ad avere buone prestazioni anche in ambienti con poca o assenza di luce.

- **IR dot projection**

Il **laser dot projector a infrarossi** invia un flusso di piccoli punti di fronte al dispositivo di acquisizione dell'immagine che sono usati per migliorare notevolmente la percezione della profondità.

- **Grado di protezione**

Il **grado di protezione** è indicato tramite una convezione (CEI

70-1) che permette di esprimere con una sigla tutte le caratteristiche di un dispositivo. Questa sigla è composta dalle lettere IP (protezione internazionale) seguita da due caratteri (che possono essere cifre o la lettera x) e infine due lettere supplementari. Ciascun carattere indica una protezione di grado e tipo diverso. In questo modo è possibile sapere quanto la telecamera è adatta a lavorare in ambienti con agenti di disturbo quali acqua, polvere, etc...

- **Connessione e alimentazione**

La connessione e l'alimentazione del dispositivo avvengono principalmente tramite 2 diversi modelli:

- connettore **PoE** (Power over Ethernet) che è un cavo ethernet in grado di passare anche la corrente
- connettore **USB-C** che è un connettore di corrente simmetrico, posteriore ai tipi USB-A e USB-B

- **Software disponibile**

Molto influente durante la scelta è stata la vastità e il continuo aggiornamento del software offerto dal produttore per raccogliere e lavorare i dati dei sensori.

Di fatti, partendo da quanto a disposizione, si è adattato il codice alle necessità e specificità degli esperimenti da svolgere.

La telecamera scelta è stata la ZED2i di Stereolabs. Ciò che ci ha convinto è stata la possibilità di estrapolare le informazioni acquisite riguardo il tracciamento posizionale in modo efficace e in questo Stereolabs ha mostrato un'attenzione particolare oltre a un aggiornamento costante. Infatti abbiamo effettuato modifiche e miglioramenti a un programma già disponibile che effettua il tracciamento posizionale. Abbiamo dato meno importanza all'aspetto hardware dal momento che, per questa sperimentazione, avere ottime prestazioni senza però avere la possibilità di manipolare facilmente i dati era inutile.

Nel *capitolo 3* saranno illustrate nel dettaglio le proprietà della telecamera ZED2i.

2 Telecamere stereo e IMU

Prima di entrare nei dettagli della sperimentazione, è necessario illustrare brevemente le funzionalità di una telecamera stereo, di una IMU e di una telecamera stereo dotata di IMU.

2.1 Telecamere stereo

La prima telecamera stereografica o binoculare, detta comunemente stereo, è stata brevettata da J.B. Dancer nel 1852. Il suo scopo era quello di **riprodurre la vista umana** tramite due obiettivi paralleli per creare immagini tridimensionali. [6]

Lo sviluppo tecnologico ha permesso di aggiungere alle telecamere componenti utili a rendere questi strumenti versatili e utilizzabili anche per **automatizzare processi industriali**.

Inoltre, le telecamere stereo possono essere utili in applicazioni in cui la ricerca scientifica è ancora molto attiva, come l'identificazione delle dimensioni esatte di oggetti fisici.

Infatti, la caratteristica principale di questi dispositivi è la capacità di analizzare la profondità di ciò che viene ripreso. Questo richiede un classico algoritmo di *computer vision* ispirato al sistema di visione binoculare umano. Anche questo si basa su due obiettivi paralleli e calcola la profondità stimando la disparità tra gli abbinamenti dei punti chiave nelle immagini destre e sinistre come in *figura 1*. [3]

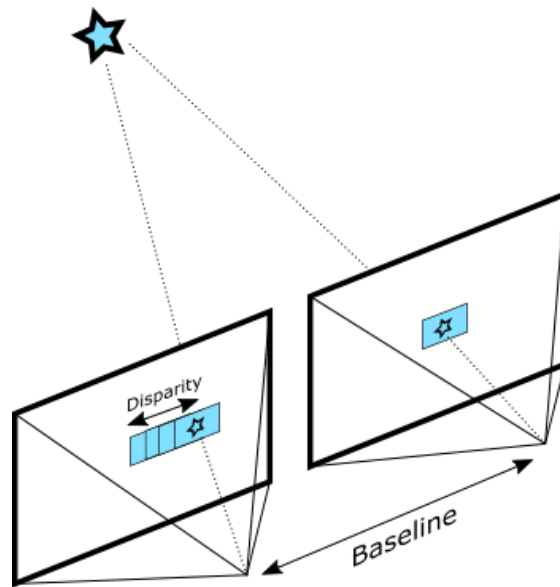


Figura 1: disparità visione stereo

2.2 Inertial Measurement Unit (IMU)

Un'Unità di Misurazione Inerziale (IMU) è principalmente la **combinazione di un accelerometro e un giroscopio**. É utilizzata per **rilevare gli spostamenti e misurarne l'intensità** in termini di accelerazione e velocità rotazionale. Ciascun sensore effettua queste misure su 3 assi (X, Y, Z) e l'unione di tutti questi dati permette di stabilire lo spostamento effettuato. Per questo, oltre alle telecamere, ha svariati campi d'utilizzo come smartphone, aerei, droni, contapassi, visori di realtà aumentata, etc... [4]

In *figura 2* è riportato il sistema di coordinate usato negli esperimenti che ha origine nel sensore sinistro della telecamera.

Per capire meglio cosa ci indicano i sensori, guardiamo qualche grafico. In *figura 3* è illustrato ciò che registra un accelerometro

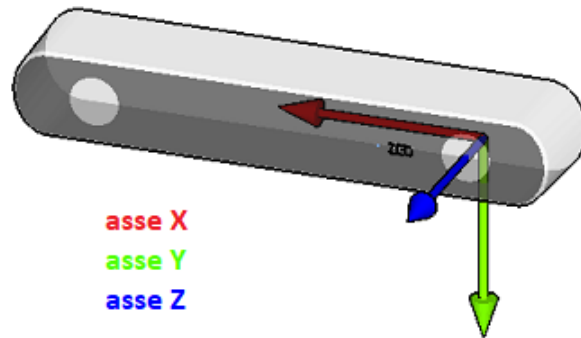


Figura 2: sistema coordinate assi ZED2i

tenendo il dispositivo fermo e in posizione orizzontale. Come ci si può aspettare, l'asse Y subisce la forza del campo gravitazionale terrestre, per cui si aggira attorno a $9,8m/s^2$, mentre l'accelerazione sugli altri due assi è attorno a $0m/s^2$.

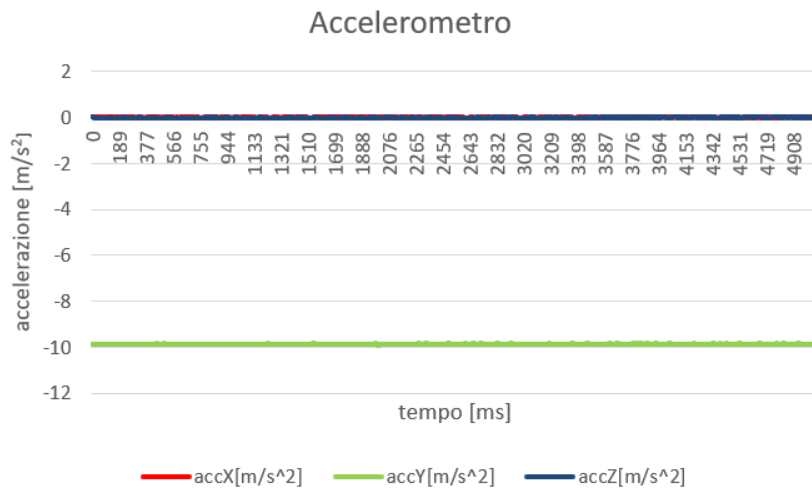


Figura 3: grafico di un accelerometro in stabilità

Mentre per quanto riguarda il giroscopio, in *figura 4* sono illu-

strate due rotazioni in direzioni opposte effettuate solo sull'asse Y . Difatti si può notare che la velocità angolare varia su questo asse, mentre è sempre intorno a $0^\circ/s$ sugli altri due.

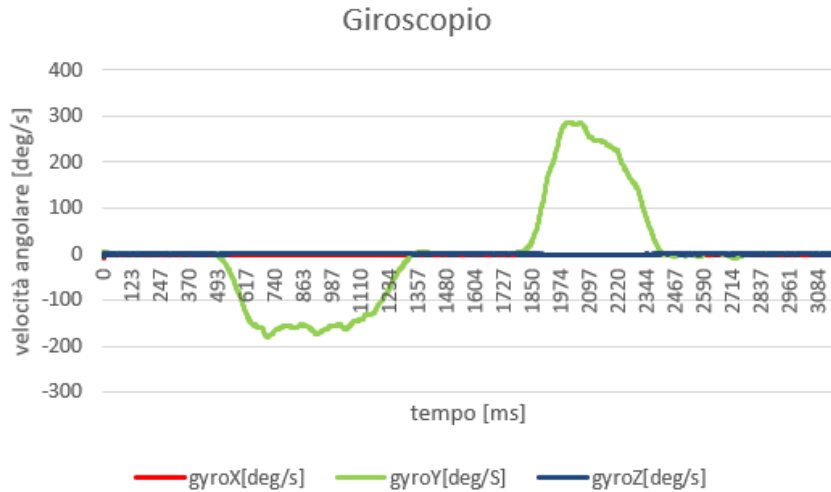


Figura 4: grafico di un giroscopio in cui si effettuano due rotazioni sull'asse Y

2.3 Telecamera stereo dotata di IMU

Se un tempo la ricerca si limitava a riprodurre la visione umana, ora si è evoluta abbastanza da riuscire a creare un singolo dispositivo composto da una telecamera stereo che include diversi sensori. Nel nostro caso, è presente un IMU che rende possibili servizi come il **tracciamento posizionale**, il mappatura spaziale e il rilevamento degli oggetti ripresi.

I campi d'uso concreti di questi dispositivi sono molteplici e in forte crescita. Alcuni di questi sono:

- *automazione industriale*: manipolazione, montaggio, conteggio dell'inventario
- *robotica*: servizi di ritiro e consegna, supporto nella vita quotidiana, assistenza nella preparazione dei cibi
- *agricoltura*: conteggio e previsione del raccolto, analisi dello stato di salute delle piante, identificazione e rimozione precisa delle erbe infestanti
- *logistica*: navigazione interna di veicoli, carico e scarico di macchine, palletizzazione e depallettizzazione [5]

3 Descrizione tecnica della telecamera ZED2i

La telecamera che abbiamo acquistato è l'ultimo modello della ZED2i di Stereolabs, che è dotata di un IMU composto da accelerometro, giroscopio e magnetometro. Inoltre possiede un barometro (non utilizzato durante questa sperimentazione) e un sensore di temperatura interna, utile a capire quando la temperatura della telecamera è stabile.

3.1 Dettagli tecnici hardware

Questa telecamera ha due sensori a colori CCD e non gode di illuminatori o proiettori a infrarossi. Di seguito in *tabella 1* si possono vedere i principali dettagli tecnici del dispositivo.

Codice prodotto	ZED2iMM
Focal length	2.12mm
Shutter	rolling
Pixel size	2 μ m x 2 μ m
Depth range	0.3m to 20m
Lens size	1/3 inch
Resolution	4MP (2688x1520)
Baseline	120mm
Peso	166g
Dimensioni	175.25 x 30.25 x 43.1 mm
Grado di protezione	IP66

Tabella 1: principali dettagli hardware ZED2i

Per ulteriori informazioni si rimanda al sito <https://www.stereolabs.com/zed-2i/>.

3.2 Software a disposizione

La ditta produttrice ha sviluppato un esteso servizio di API in diversi linguaggi. Conciliando le mie conoscenze e l'interesse dell'azienda, abbiamo scelto di utilizzare Python. Le funzioni implementate ci hanno permesso di ricavare (per ognuno dei 3 assi della telecamera) dati utili alla sperimentazione come:

- **velocità angolare** in gradi al secondo ($^{\circ}/s$), calcolata dal giroscopio
- **accelerazione** in metri al secondo quadro (m/s^2), calcolata dall'accelerometro
- **orientamento** in gradi ($^{\circ}$), usato come indicatore di calibrazione

Inoltre, hanno già sviluppato programmi utili a effettuare il **tracciamento posizionale** (*figura 5*) e altre funzionalità riguardanti diverse applicazioni come il rilevamento della profondità, la mappatura spaziale, il tracciamento dei corpi e il rilevamento degli oggetti. Quindi, partendo da questi, abbiamo creato un programma *ad hoc* che raccoglie i dati grezzi della telecamera per poi elaborarli.

Un esempio interessante può essere visto nel video in questo link <https://cdn2.stereolabs.com/assets/video/zed-spatial-mapping-point-c>

mp4.



Figura 5: programma per vedere il tracciamento posizionale

3.3 Calibrazione

Prima di ogni utilizzo, il dispositivo richiede una **calibrazione statica**.

Questo consiste nel lasciare la telecamera ferma su un piano orizzontale, preferibilmente un pavimento per evitare che fonti esterne (come le ventole dei PC o altro) possano interferire. Altri strumenti hanno invece bisogno di essere calibrati dinamicamente, spostandosi in posizioni con orientamenti ben precisi.

Ci siamo soffermati diverso tempo su questo processo contattando più volte il fornitore per assicurarci di non commettere errori a riguardo. Pertanto abbiamo compreso, specificamente per questo dispositivo, che la calibrazione è necessaria affinché la telecamera

capisca come **compensare gli errori sistematici e incrementali** (*bias*) che influenzano le misurazioni della velocità angolare. Infatti, il tempo di attesa è causato esclusivamente dagli errori del giroscopio.

Questo processo viene effettuato solo una volta che la temperatura della telecamera si è stabilizzata, normalmente attorno ai 36-37°. Più bassa è la temperatura iniziale del dispositivo, più tempo ci vuole per ultimare la calibrazione.

Appena dopo l'acquisto della telecamera bastavano pochi minuti affinché la telecamera si calibrasse, ma col passare del tempo l'attesa è inaspettatamente e gradualmente aumentata arrivando fino a diverse ore.

4 Sperimentazione

L'applicazione iniziale prevedeva l'utilizzo di una telecamera stereo con lo scopo di **riconoscere determinati oggetti in una stanza**. Questi oggetti erano dello stesso tipo ma a seconda della loro posizione dovevano essere manipolati in modi differenti. Per cui non bastava riconoscere l'oggetto all'interno del campo inquadrato, ma era necessario conoscere la **posizione assoluta nello spazio**.

Per questo è necessario il **tracciamento posizionale**, ovvero stimare la posizione del dispositivo rispetto al mondo circostante. Per farlo, la telecamera ZED2i utilizza un algoritmo di SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) che fonde i dati dell'IMU e le immagini acquisite.

4.1 La prova iniziale

Per prima cosa abbiamo stabilito lo spazio di lavoro. Tutti gli esperimenti hanno lo stesso movimento di base: fissando il punto di partenza, si compie uno spostamento di andata e ritorno su un **piano orizzontale** lungo $80cm$ in cui agli estremi sono fissati due supporti che stabiliscono l'inizio e la fine del tragitto. In questo modo è possibile avere un riscontro dei risultati ottenuti.

La telecamera, collegata al calcolatore tramite cavo *USB-C*, è posizionata all'interno di una protezione creata apposta su misura per evitare di danneggiarla. Si può osservare in *figura 6* una si-

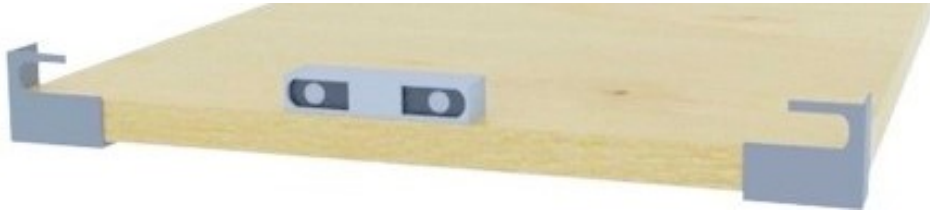


Figura 6: telecamera con protezione posizionata sul piano con supporti alle estremità

mulazione della telecamera (con apposita protezione) nel mezzo del percorso tra i due supporti. La lunghezza totale della telecamera è di $18,5\text{cm}$ e il suo spessore di $3,8\text{cm}$. Per cui lo spostamento percepito dal dispositivo dovrebbe essere di $80 - 18,5 = 61,5\text{cm}$ sull'asse X e di $80 - 3,8 = 76,2\text{cm}$ sugli assi Y e Z . Per visualizzare il movimento registrato dalla telecamera abbiamo usato l'apposito programma fornito dalla ditta produttrice che mostra a schermo lo spostamento calcolato dall'IMU e dall'algoritmo di SLAM.

In *figura 7* dove il rettangolo nero è la telecamera e la linea blu è il tracciamento del movimento si vede che effettuando uno spostamento rettilineo di andata e ritorno su un piano, il programma lo registra correttamente.

Dopo qualche tentativo ci siamo resi conto di due principali difetti:

- quando il **sensore di visione destro viene coperto**, il dispositivo non se ne rende conto e continua a effettuare il tracciamento posizionale con scarsissimi risultati. Mentre quando è quello di sinistra a essere coperto, il programma si blocca perché capisce di non poter effettuare calcoli affidabili interrompendo

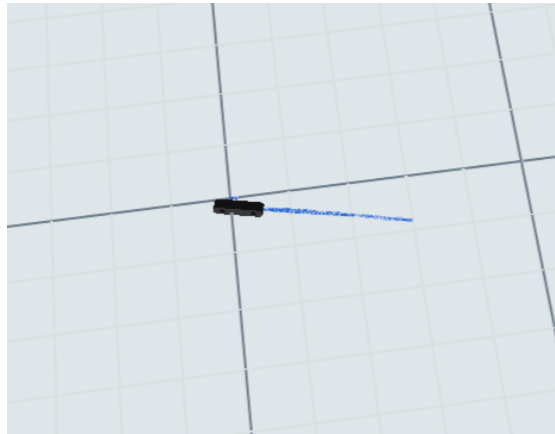


Figura 7: spostamento rettilineo registrato dal programma di tracciamento posizionale

quindi il tracciamento posizionale

- quando lo **spazio inquadrato non gode di un pattern complesso** e articolato, la stima della posizione ha una qualità nettamente inferiore. In *figura 8* si può osservare come abbiamo creato le due situazioni diverse durante la sperimentazione. Invece in *figura 9* si nota come lo stesso spostamento nella realtà sia percepito in modo particolarmente diverso in presenza o meno di un pattern

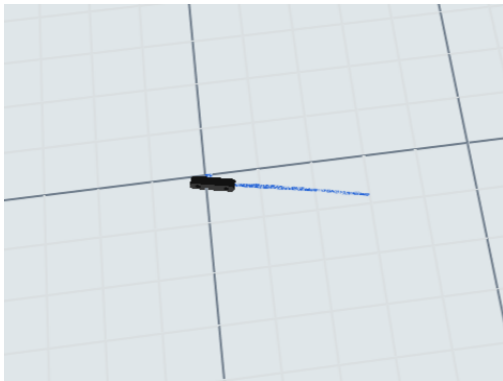


(a) si inquadra un pattern articolato

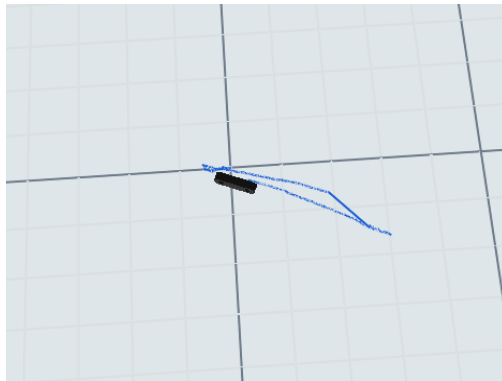


(b) non si inquadra un pattern articolato

Figura 8: Due diverse situazioni per testare il tracciamento posizionale



(a) vedendo un pattern articolato



(b) senza vedere un pattern articolato

Figura 9: Spostamento rettilineo della telecamera con stesso punto di arrivo e partenza

Il fornitore ci ha confermato che non c'è una soglia per capire quando la visione diventa poco affidabile e non esiste modo di utilizzare unicamente i dati dell'IMU quando questo avviene. Di conseguenza, per risolvere questi problemi e poter avere sempre una stima affidabile della posizione, abbiamo provato a effettuare il tracciamento posizionale sfruttando esclusivamente i **dati ottenuti dall'IMU**.

4.2 Raccolta dei dati grezzi dell'IMU

Siamo quindi passati all'analisi delle prestazioni di tracciamento posizionale da parte dell'IMU.

Tenendo sempre come riferimento lo spostamento avanti e indietro su un piano orizzontale lungo 80cm , abbiamo raccolto alcuni dei suoi **dati grezzi** disponibili ovvero: il **timestamp** dell'IMU poi l'**accelerazione**, la **velocità angolare** e l'**orientamento** sui tre assi.

Ai fini della sperimentazione sono sufficienti i dati dell'accelerometro e il timestamp dell'IMU, mentre gli altri dati possono essere utili come indicatori generali.

La sperimentazione effettuata consiste nell'elaborazione dei dati dell'IMU su ognuno dei 3 assi in due condizioni:

- **dispositivo fermo** per 30 secondi per analizzare la *deriva nello spostamento*
- **spostamento di andata e ritorno** nello stesso punto (esempio spostamento di andata in *figura 10*)

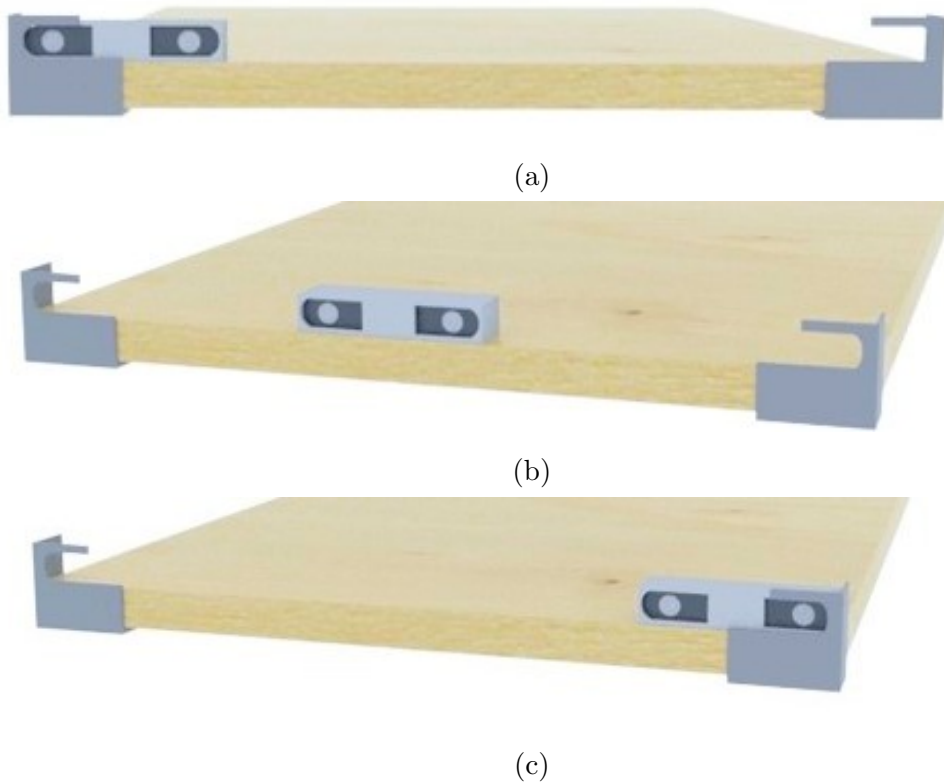


Figura 10: diverse fasi dello spostamento di andata della telecamera

Abbiamo eseguito la raccolta dati muovendo il dispositivo solo su un asse alla volta. Così facendo abbiamo potuto fare i calcoli con valori scalari.

Bisogna considerare la **forza di gravità** g che è sempre presente e influenza i dati sull'asse che ha la sua stessa direzione. Inoltre ci siamo accorti che, quando la telecamera è calibrata, talvolta può essere presente un *offset* nell'accelerazione sui singoli assi. Quando necessario, **normalizzeremo l'accelerazione** sugli assi interessati per visualizzare i dati in modo chiaro e corretto.

Innanzitutto siamo partiti dallo studio della **deriva** da fermo.

4.3 Analisi deriva nello spostamento con dispositivo fermo

Si parla di deriva quando in una serie di calcoli sono presenti (anche minimi) **errori che si propagano nel tempo** facendo crescere senza sosta l'errore nei risultati. Questo può fare in modo che quando in realtà il dispositivo è fermo, i calcoli dicano il contrario, ovvero che sia registrato uno spostamento quando sappiamo che non è così.

In questo caso, ci interessava analizzare la deriva nello spostamento quando il dispositivo è tenuto in posizione stabile e ferma per circa 30 secondi. Lo scopo è osservare quanto la telecamera pensa di essersi spostata su ognuno dei 3 assi.

Abbiamo fatto 3 esperimenti, ciascuno cambiando l'asse che ha la stessa direzione della gravità. Per ciascun esperimento mostriamo il posizionamento della telecamera, i dati registrati dall'accelerometro e lo spostamento calcolato in base a quei dati.

Dal momento che la telecamera rimane ferma, in teoria ci aspetteremmo che l'accelerazione su un asse si aggiri attorno a $9,8m/s^2$ e che sia nulla sugli altri due. Per cui, secondo le regole del moto uniformemente accelerato, lo spostamento dovrebbe essere esponenziale solo sull'asse che subisce la gravità e nullo sugli altri due. Dopodiché effettuando la normalizzazione, tutti gli assi dovrebbero avere un'accelerazione e, di conseguenza, anche lo spostamento nulli.

Riportiamo per comodità in *figura 11* il sistema di coordinate utilizzato.

Gli esperimenti sono uguali tra loro per cui spieghiamo il primo nel dettaglio (asse X) e per gli altri due (Y e Z) saremo più sintetici

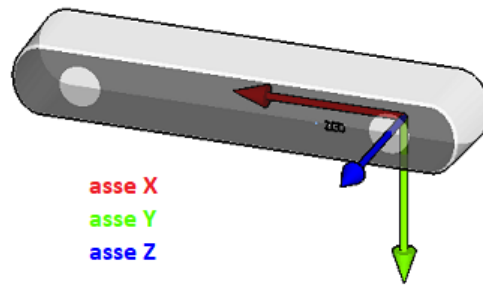


Figura 11: sistema coordinate assi ZED2i

mostrando principalmente i grafici.

Alla fine del capitolo nella *sezione 4.5* saranno spiegate le formule che abbiamo utilizzato.

4.3.1 Deriva con gravità sull'asse X

Inizialmente la telecamera è posizionata come in *figura 12*.



Figura 12: posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

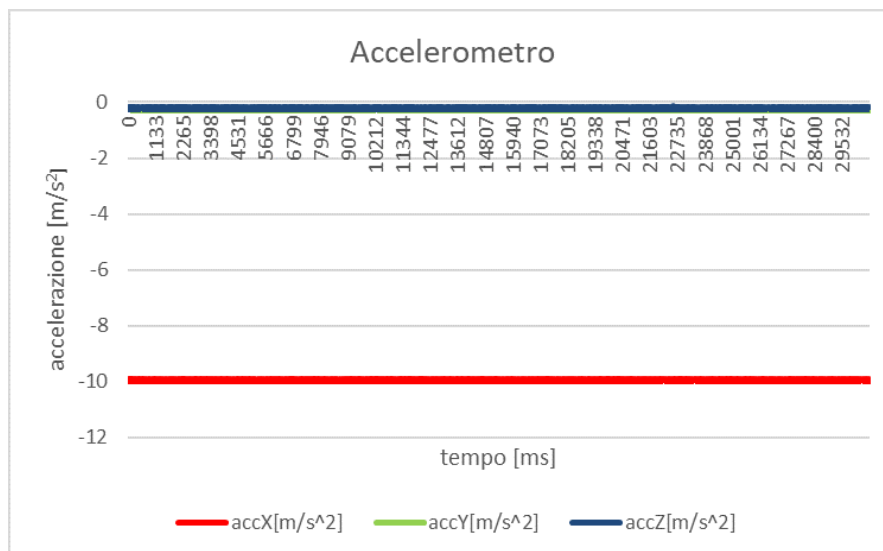


Figura 13: accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

In *figura 13* si può notare che, come previsto, sull'asse X influisce la gravità mentre gli altri due assi tendono a $0m/s^2$. In realtà, queste due accelerazioni non sono trascurabili e vedremo che hanno importanti conseguenze.

Le medie sui 3 assi sono:

- *asse X*: $-9,9275m/s^2$
- *asse Y*: $-0,2352m/s^2$
- *asse Z*: $-0,1864m/s^2$

Il rispettivo grafico degli spostamenti calcolati, il cui segno positivo o negativo indica la concordanza o meno con il verso dell'asse, è visibile in *figura 14*.

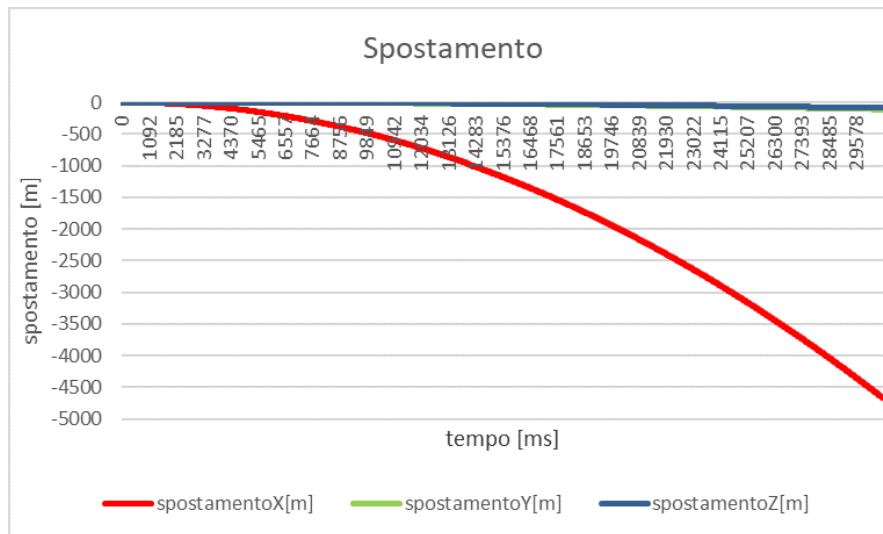


Figura 14: spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

Può sembrare che solo sull'asse X sia calcolato un grosso spostamento di quasi $5000m$ per via della gravità ma, osservando separata-

mente l'andamento degli assi Y e Z in *figura 15*, si nota che in realtà anche questi registrano una notevole variazione, rispettivamente di 110 e 87 metri circa.

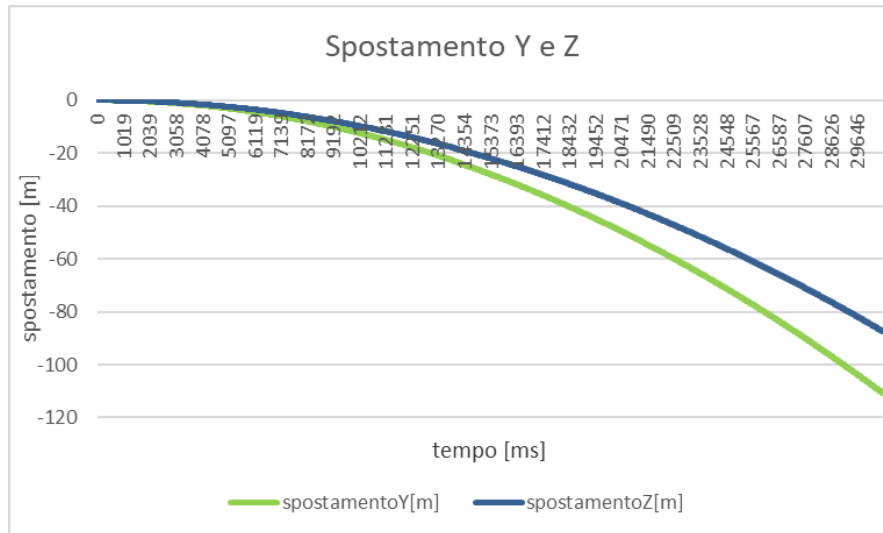


Figura 15: spostamento Y e Z calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

Effettuiamo quindi la normalizzazione sottraendo ai rispettivi dati la media dell'accelerazione su ogni asse durante tutto il tempo dell'esperimento. Le accelerazioni normalizzate sono visibili in *figura 16* mentre il relativo spostamento in *figura 17*.

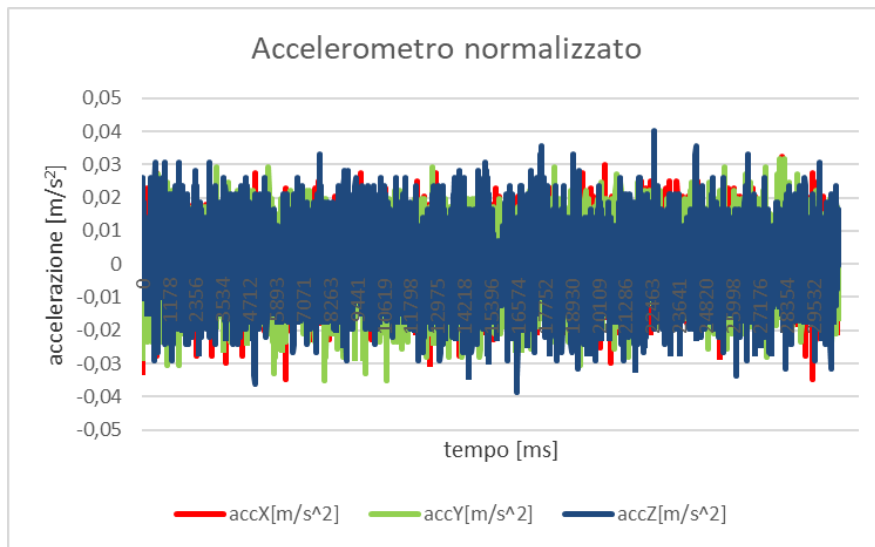


Figura 16: accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

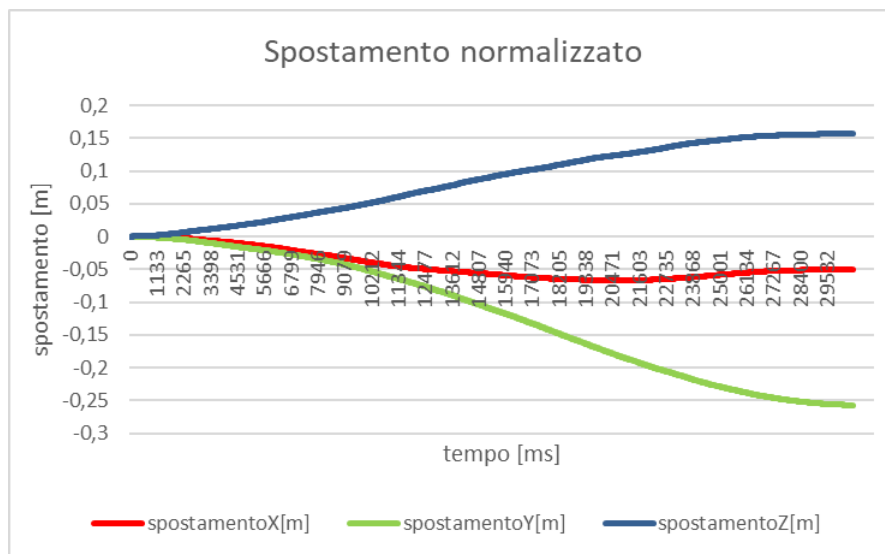


Figura 17: spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

Dal grafico in *figura 17* si nota che gli spostamenti finali dei 3 assi calcolati con le accelerazioni normalizzate sono rispettivamente

di $0,0036m$, $0,0102m$ e $0,0020m$. Si vede che la deriva aumenta piuttosto rapidamente, per cui in *tabella 2* sottolineiamo il valore assoluto dello spostamento in centimetri dopo 1, 5, 10, 20 e 30 secondi approssimati a 2 cifre significative.

Tempo (s)	Spostamento X (cm)	Spostamento Y (cm)	Spostamento Z (cm)
1	0,00	0,13	0,14
5	1,19	1,79	1,88
10	3,82	5,09	4,97
20	6,65	17,21	12,08
30	5,11	25,64	15,75

Tabella 2: spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse X

4.3.2 Deriva con gravità sull'asse Y

Inizialmente la telecamera è posizionata come in *figura 18*.



Figura 18: posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

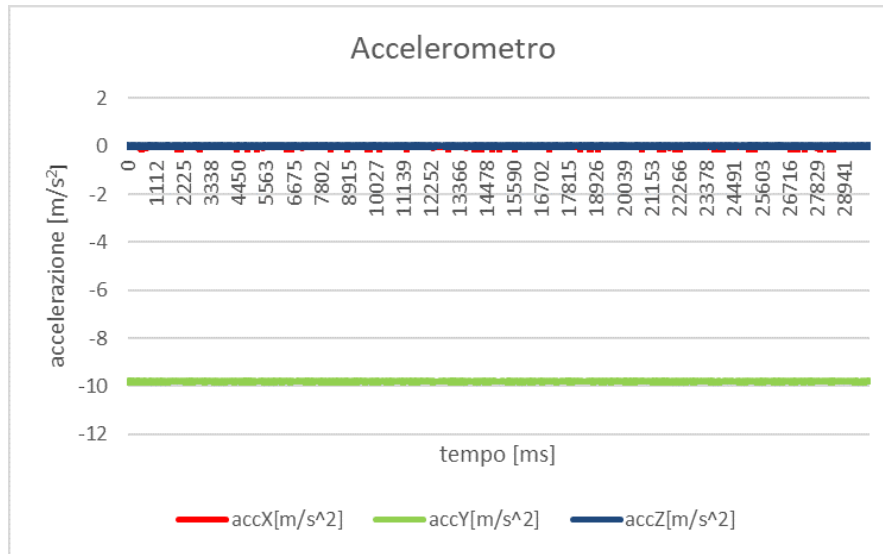


Figura 19: accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

In *figura 19* si possono notare le accelerazioni sui 3 assi. Le rispettive medie sono:

- *asse X*: $-0,049582574m/s^2$
- *asse Y*: $-9,795388717m/s^2$
- *asse Z*: $0,030499733m/s^2$

Il grafico dei rispettivi spostamenti calcolati è visibile in *figura 20*, dove si nota che l'asse Y affetto dalla gravità conta uno spostamento di quasi $4500m$, mentre in *figura 21* si nota che gli assi X e Z registrano rispettivamente uno spostamento di 15 e 22 metri circa.

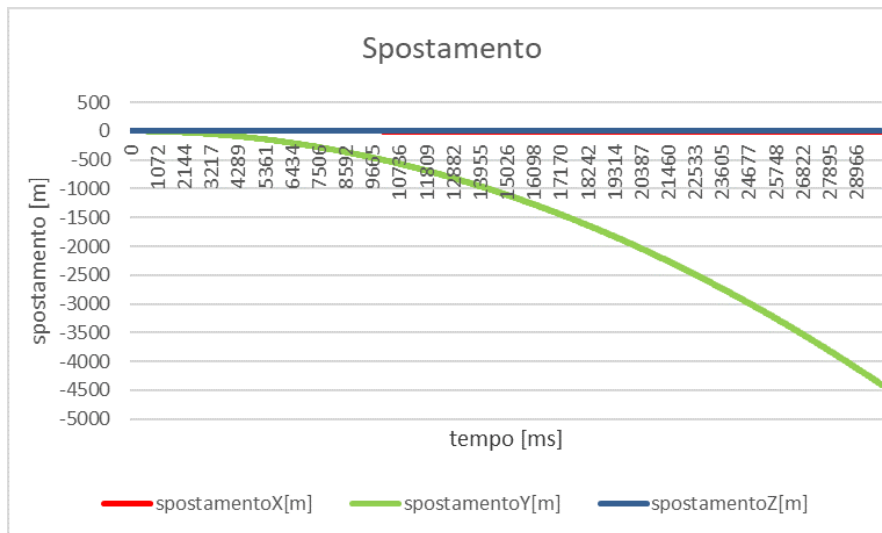


Figura 20: spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

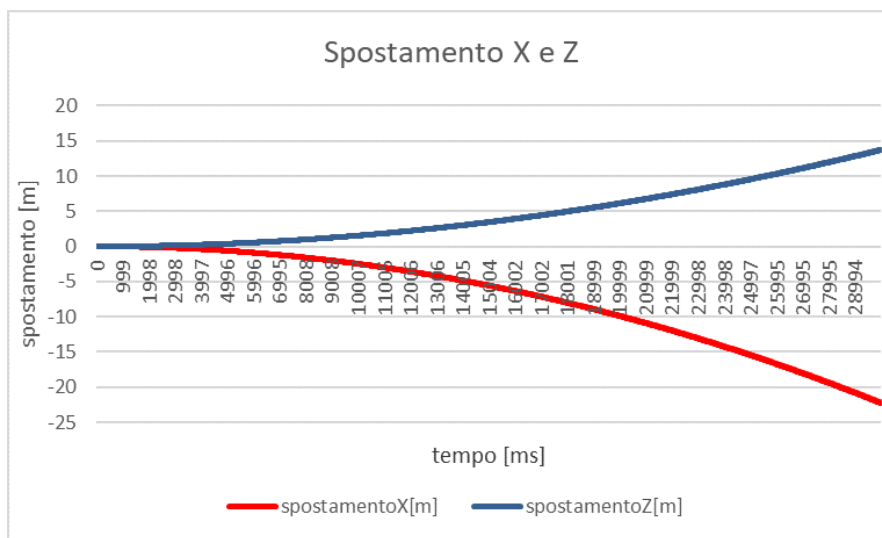


Figura 21: spostamento X e Z calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

Analogamente a quanto fatto nella sezione precedente, le accelerazioni normalizzate sono visibili in *figura 22* e il relativo spostamento

in figura 23.

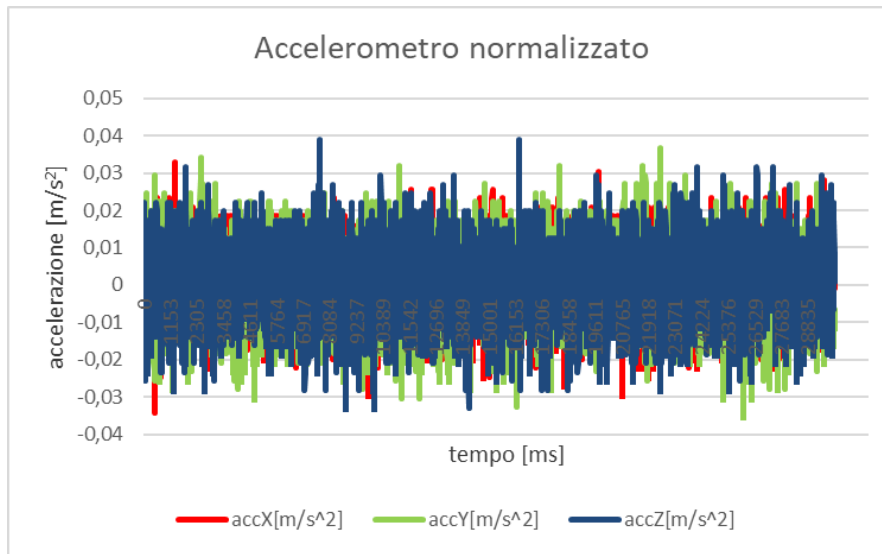


Figura 22: accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

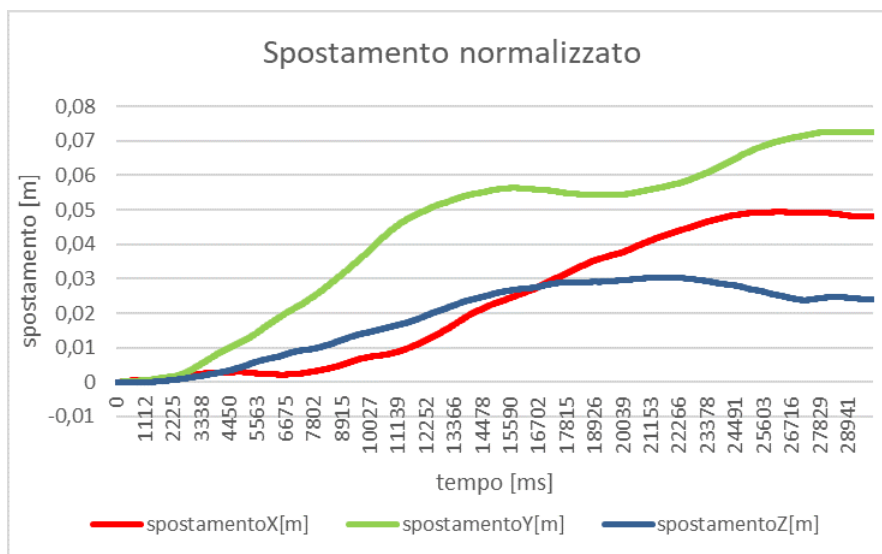


Figura 23: spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

Dal grafico in *figura 23* si nota che gli spostamenti finali dei 3 assi calcolati con le accelerazioni normalizzate sono rispettivamente di $0,0479m$, $0,0725m$ e $0,0240m$. In *tabella 3* sottolineiamo il valore assoluto dello spostamento in centimetri dopo 1, 5, 10, 20 e 30 secondi approssimati a 2 cifre significative.

Tempo (<i>s</i>)	Spostamento X (<i>cm</i>)	Spostamento Y (<i>cm</i>)	Spostamento Z (<i>cm</i>)
1	0,06	0,05	0,00
5	0,29	1,18	0,49
10	0,73	3,79	1,45
20	3,75	5,45	2,95
30	4,79	7,25	2,40

Tabella 3: spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Y

4.3.3 Deriva con gravità sull'asse Z

Inizialmente la telecamera è posizionata come in *figura 24*.



Figura 24: posizione telecamera durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

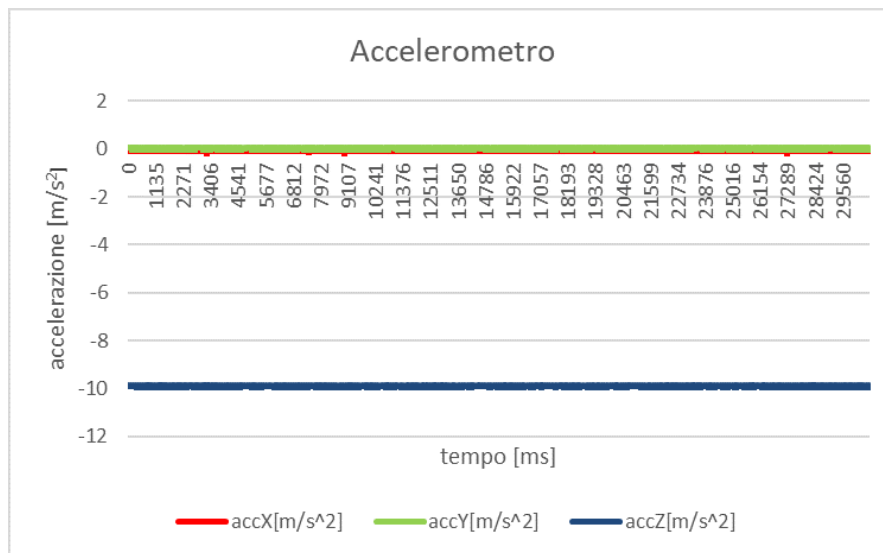


Figura 25: accelerometro durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

In *figura 25* si possono notare le accelerazioni sui 3 assi. Le rispettive medie sono:

- *asse X*: $-0,08188473m/s^2$
- *asse Y*: $0,049246975m/s^2$
- *asse Z*: $-9,886205023m/s^2$

Il grafico dei rispettivi spostamenti calcolati è visibile in *figura 26*, dove si nota che l'asse *Z* conta uno spostamento di quasi $5000m$, mentre in *figura 27* si nota che gli assi *X* e *Y* registrano rispettivamente uno spostamento di 40 e 23 metri circa.

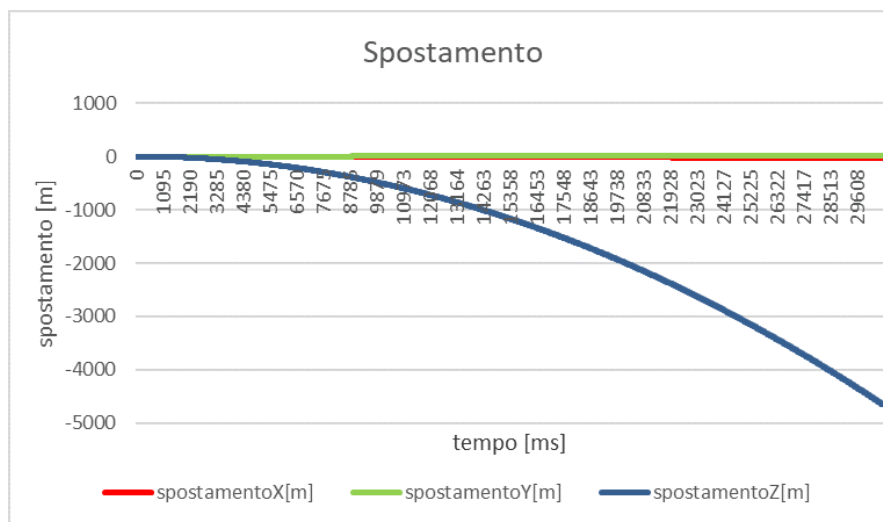


Figura 26: spostamento calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse *Z*

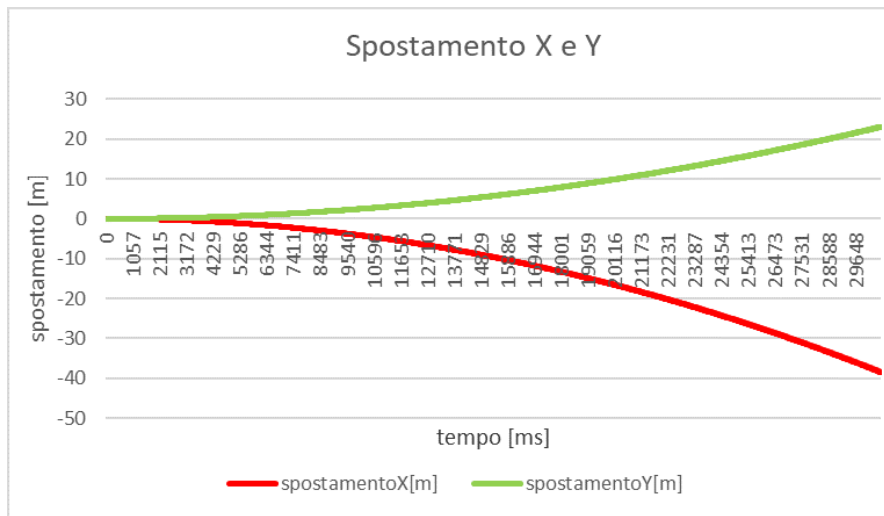


Figura 27: spostamento X e Y calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

Analogamente a quanto fatto nella sezione precedente, le accelerazioni normalizzate sono visibili in *figura 28* e il relativo spostamento in *figura 29*.

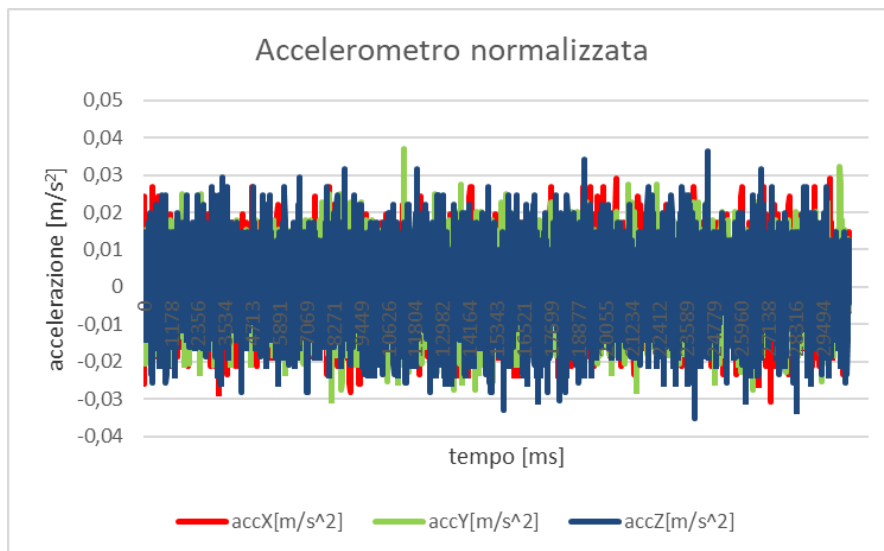


Figura 28: accelerometro normalizzato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

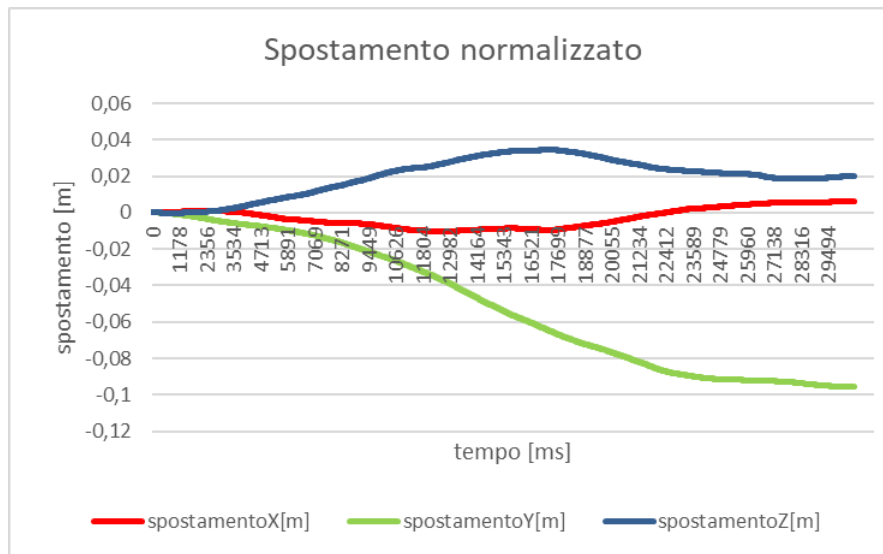


Figura 29: spostamento normalizzato calcolato durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

Dal grafico in *figura 29* si nota che gli spostamenti finali dei 3 assi calcolati con le accelerazioni normalizzate sono rispettivamente di $0,0063m$, $0,0955m$ e $0,0200m$. In *tabella 4* sottolineiamo il valore assoluto dello spostamento in centimetri dopo 1, 5, 10, 20 e 30 secondi approssimati a 2 cifre significative.

Tempo (s)	Spostamento X (cm)	Spostamento Y (cm)	Spostamento Z (cm)
1	0,04	0,08	0,02
5	0,19	0,80	0,63
10	0,73	2,38	2,09
20	0,52	7,64	2,92
30	0,63	9,55	2,00

Tabella 4: spostamenti normalizzati sui 3 assi in diversi istanti durante lo studio della deriva da fermo con gravità sull'asse Z

4.4 Analisi accuratezza spostamento rettilineo

Dopo aver studiato la deriva del dispositivo da fermo, passiamo ora ad analizzare l'accuratezza del calcolo di uno spostamento standard. Partendo e arrivando nello stesso punto, muoviamo in modo rettilineo la telecamera su un piano di 80cm . Abbiamo eseguito l'esperimento 3 volte, ciascuna cambiando l'asse in linea con lo spostamento.

A differenza degli esperimenti precedenti, in questi casi la normalizzazione è stata calcolata solo su una parte dei dati. Infatti, prima di eseguire gli spostamenti, sapendo che le accelerazioni dovrebbero essere nulle, abbiamo sempre tenuto il dispositivo fermo per qualche secondo per poter calcolare le medie in questo specifico periodo di stabilità e sottrarle poi a tutti i dati.

Essendo anche in questo caso analoghi, scendiamo più nei dettagli del primo esperimento e riportiamo solo le informazioni principali degli altri due.

4.4.1 Spostamento lungo asse X

La telecamera è inizialmente posizionata come in *figura 30*, per cui l'accelerazione di gravità è sull'asse Y .



Figura 30: posizione iniziale per lo spostamento sull'asse X

Invece, in *figura 31* si può notare l'andamento delle accelerazioni.

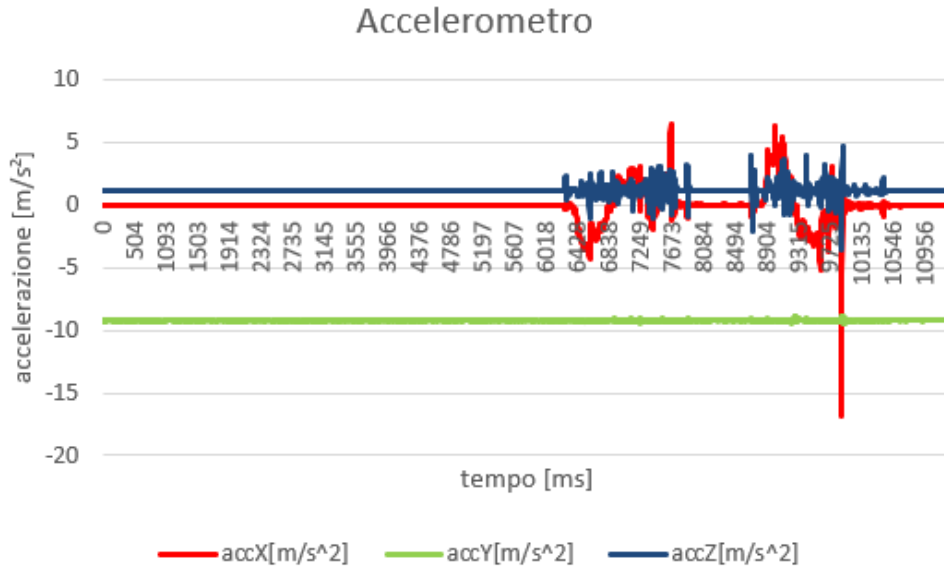


Figura 31: grafico accelerazione spostamento su asse X

Per avere dati più chiari applichiamo delle normalizzazioni su ogni asse per cercare di far sì che fin tanto che non inizia lo spostamento, le accelerazioni siano pari a $0m/s^2$. In questo caso lo spostamento inizia a $6269ms$, per cui calcoliamo la media dell'accelerazione dall'inizio a quell'istante.

Le medie dell'accelerazione sui 3 assi in questo arco di tempo sono:

- *asse X*: $-0,0535m/s^2$
- *asse Y*: $-9,2392m/s^2$
- *asse Z*: $1,14273m/s^2$

Come si vede anche in *figura 31*, l'asse X presenta un *offset* molto ridotto, mentre l'asse Z uno molto più evidente. Invece l'asse Y è pressoché costante intorno a $9,2m/s^2$ per via della forza di gravità.

Per applicare la normalizzazione sottraiamo a tutti i dati di ciascun asse, la rispettiva media calcolata nel momento di stabilità del dispositivo. Ciò che si ottiene è visibile in *figura 32*.

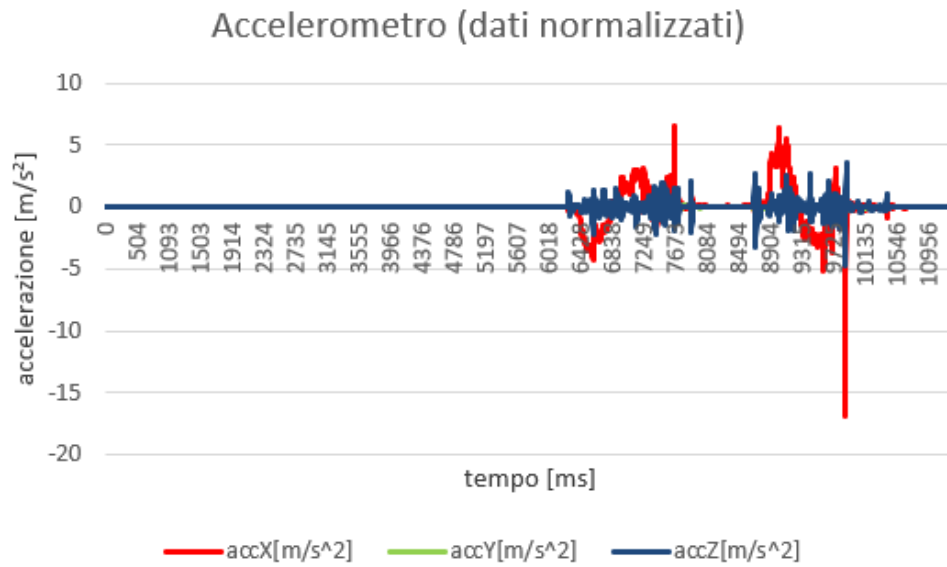


Figura 32: grafico accelerazione normalizzata spostamento su asse X

Come si può vedere in *figura 33*, lo spostamento calcolato senza normalizzare l'accelerazione ha una deriva notevole sugli assi X e Z (i quali non hanno realmente subito variazioni notevoli) che non permette nemmeno di notare lo spostamento effettivo sull'asse X .

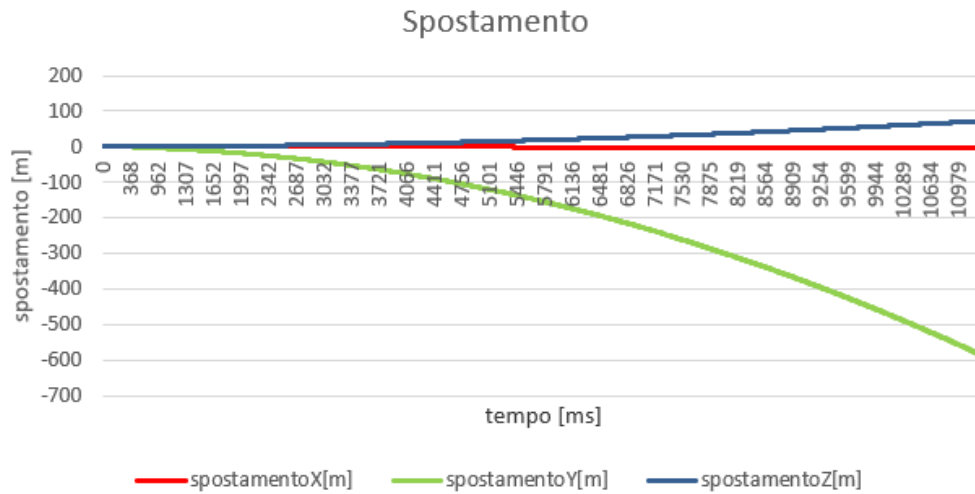


Figura 33: grafico spostamento effettuato su asse X

Un grafico più simile a quello che ci aspetteremmo è illustrato in *figura 34* dove sono rappresentati gli spostamenti calcolati con le accelerazioni normalizzate.

Il picco più basso della linea rossa che si vede in *figura 34* a $7656ms$ corrisponde al momento in cui è terminato il movimento di andata. Dato che in quel punto lo spostamento realmente compiuto è di $61,5cm$ e quello calcolato è pari a $61,5145402cm$ possiamo affermare che in questo frangente la stima di posizionamento abbia un errore davvero trascurabile e sia piuttosto affidabile.

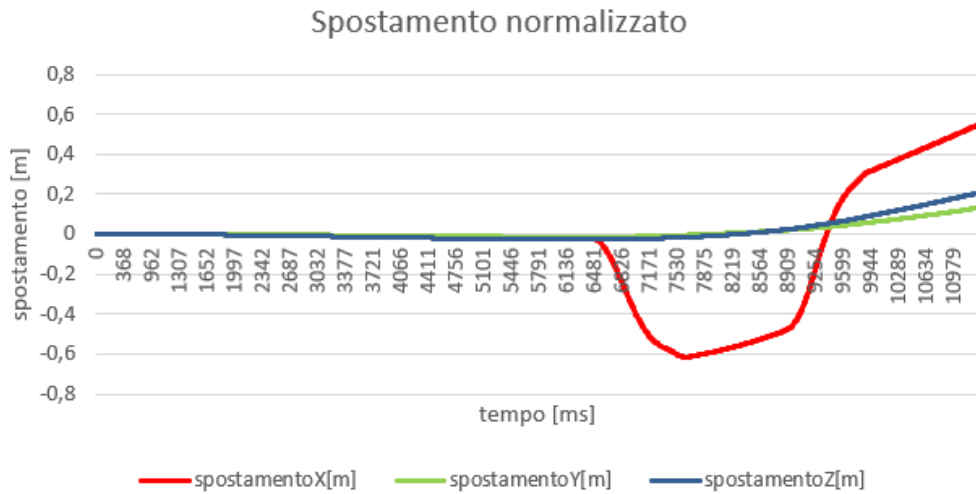


Figura 34: grafico spostamento normalizzato effettuato su asse X

Quello che si nota dopo, invece, è inaspettato e non rispecchia quanto avvenuto nella realtà.

Dopo il picco minimo, la telecamera è tenuta ferma un paio di secondi, per cui, dopo quell'istante, la linea rossa in *figura 34* dovrebbe avere un andamento costante fino a quando la telecamera viene riportata al punto di partenza registrando uno spostamento di $0m$. Invece le linee relative gli assi Y e Z dovrebbero rimanere costanti. Dalla *figura 34* si nota a colpo d'occhio che questo non accade.

Dato che ci siamo resi conto che tale comportamento era presente in ogni esperimento che includeva lo spostamento della telecamera, abbiamo voluto capire come mai questo accadesse.

Essendo l'accelerazione e il tempo gli unici dati utilizzati nei calcoli, abbiamo capito per esclusione che il problema è legato all'accelerazione. Di conseguenza abbiamo fatto una prova: tenendo

il dispositivo immobile abbiamo misurato le medie delle accelerazioni per 30 secondi, poi abbiamo mosso il dispositivo arbitrariamente e abbiamo ricalcolato le medie delle accelerazioni con il dispositivo fermo per altri 30 secondi. Il problema è che la differenza tra le accelerazioni acquisite prima e dopo il movimento è notevole, quando invece dovrebbe essere nulla trattandosi di condizioni di stabilità in entrambi i casi.

Abbiamo quindi dedotto che lo spostamento del dispositivo causa una variazione dell'accelerazione (probabilmente per un difetto hardware) che rende i dati inutilizzabili per poter effettuare calcoli affidabili.

4.4.2 Spostamento lungo asse Y

La telecamera è inizialmente posizionata come in *figura 35*, per cui l'accelerazione di gravità è sull'asse Z .



Figura 35: posizionale iniziale per lo spostamento sull'asse Y

Invece, in *figura 36* si può notare l'andamento delle accelerazioni.

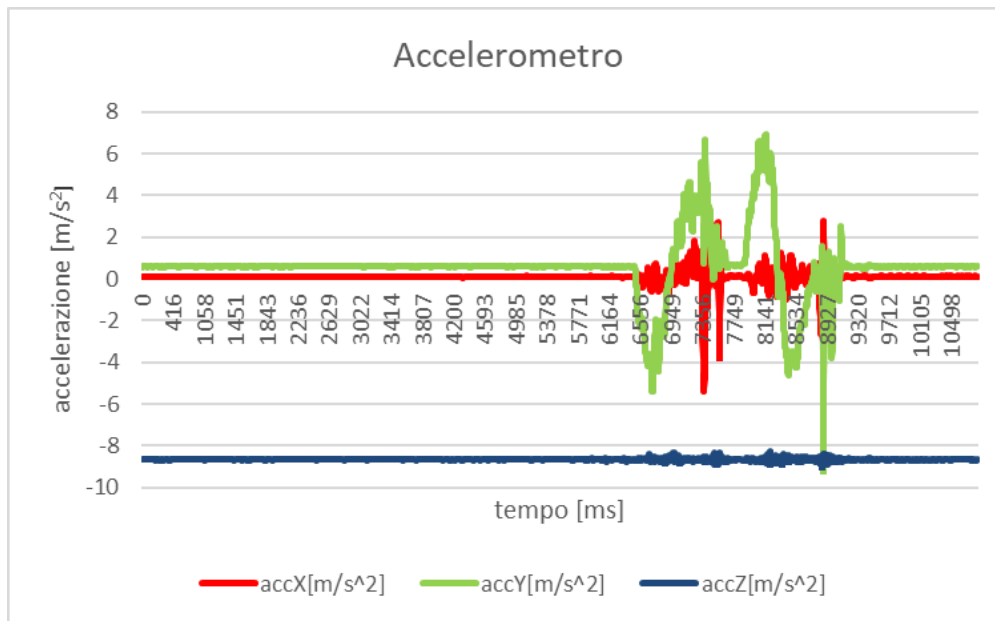


Figura 36: grafico accelerazione spostamento su asse Y

Le medie dell'accelerazione per la normalizzazione sono calcolate fino a 6496ms quando comincia il movimento e sono rispettivamente:

- asse X: $0,1045\text{m/s}^2$
- asse Y: $0,6010\text{m/s}^2$
- asse Z: $-8,6491\text{m/s}^2$

I dati dell'accelerometro normalizzati sono visibili in *figura 37*.

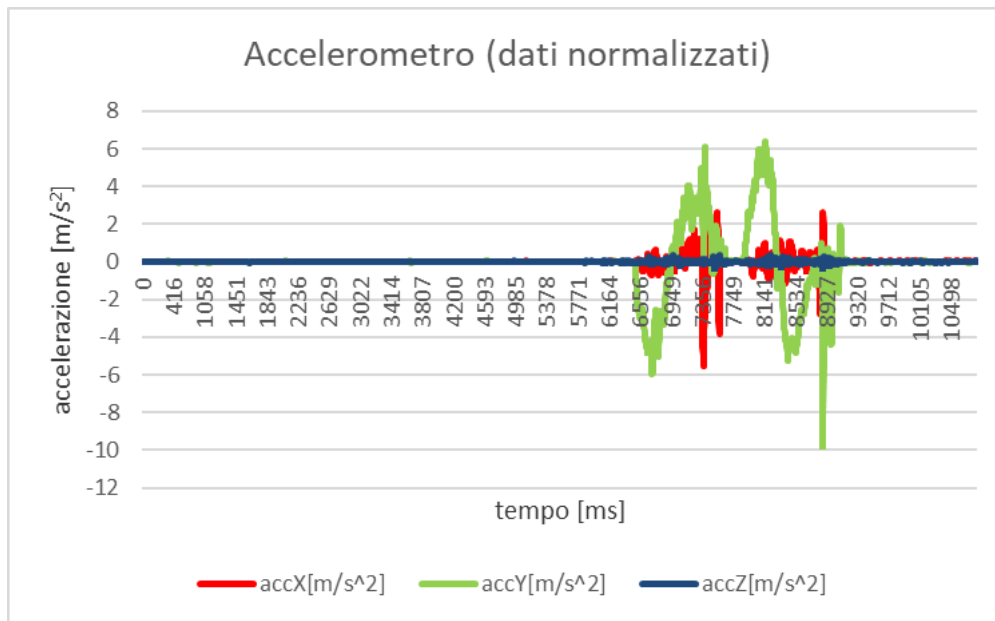


Figura 37: grafico accelerazioni normalizzate spostamento su asse Y

Come nel caso precedente, in *figura 38*, si può notare che gli spostamenti calcolati senza normalizzare le accelerazioni hanno una deriva notevole che non permettono di notare lo spostamento sull'asse Y che ci interessa.

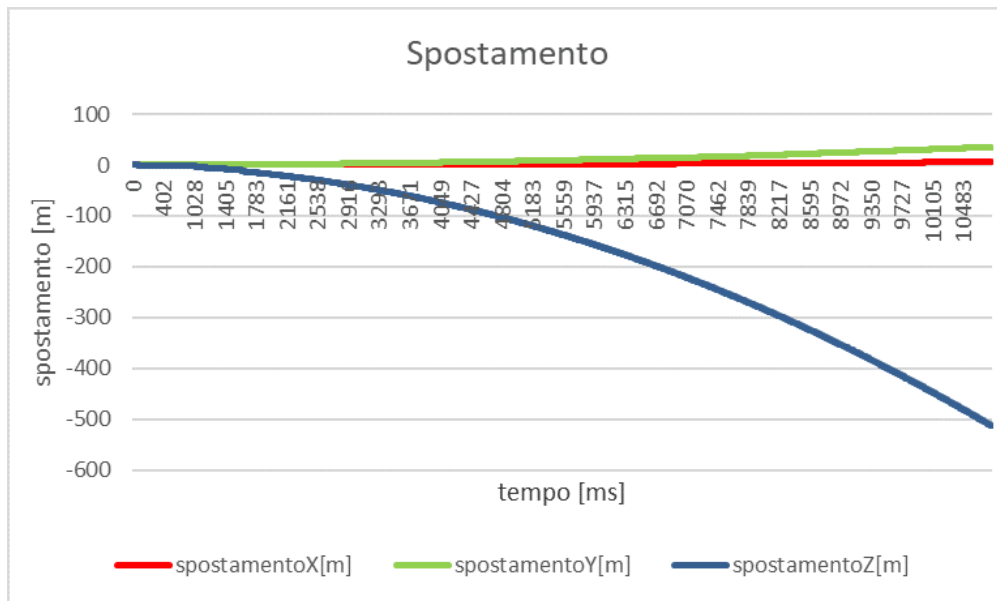


Figura 38: grafico spostamento effettuato su asse Y

Gli spostamenti calcolati con le accelerazioni normalizzate sono rappresentati in *figura 39*.

La distanza calcolata nel momento in cui termina il movimento di andata è visibile nella linea verde a $7656ms$ in *figura 39*. Dato che in quel punto lo spostamento realmente compiuto è di $76,2cm$ e quello calcolato è pari a $77,0209416cm$ in questo caso la precisione è minore del caso precedente e meno affidabile, pur essendo un errore ancora limitato.

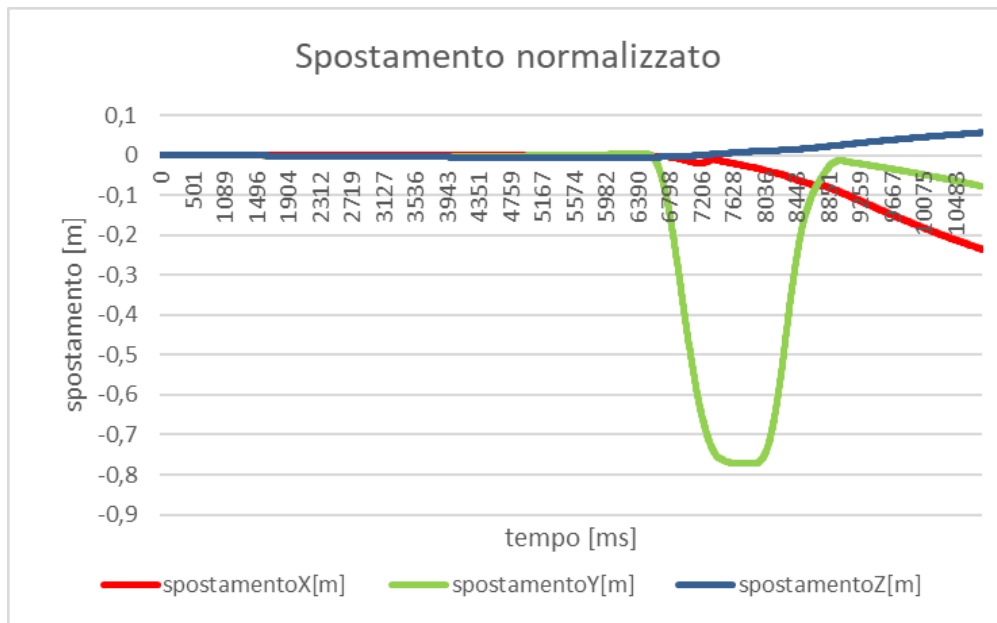


Figura 39: grafico spostamento normalizzato effettuato su asse Y

Per lo stesso motivo descritto nella sezione precedente, notiamo anche in questo caso che, una volta completato il movimento di andata, il grafico comincia ad avere un andamento che non descrive l'effettivo movimento della telecamera.

4.4.3 Spostamento lungo asse Z

La telecamera è inizialmente posizionata come in *figura 40*, per cui l'accelerazione di gravità è sull'asse Y.



Figura 40: posizionale iniziale per lo spostamento sull'asse Z

Invece, in *figura 41* si può notare l'andamento delle accelerazioni.

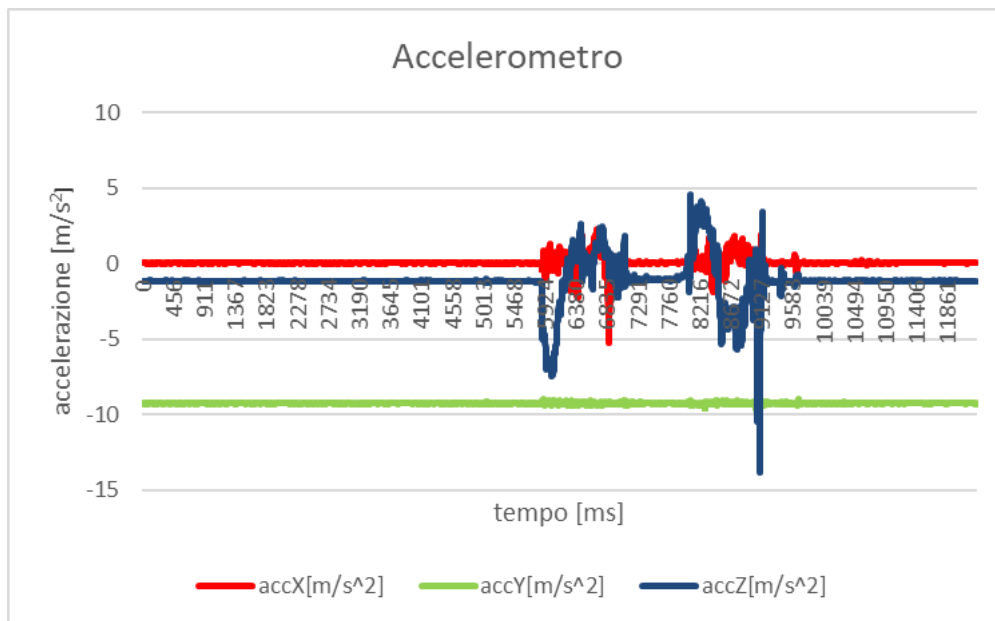


Figura 41: grafico accelerazione spostamento su asse Z

Le medie dell'accelerazione per la normalizzazione sono calcolate fino a $5853ms$ quando comincia il movimento e sono rispettivamente:

- *asse X*: $0,0463m/s^2$
- *asse Y*: $-9,2486m/s^2$
- *asse Z*: $-1,1457m/s^2$

I dati dell'accelerometro normalizzati sono visibili in *figura 42*.

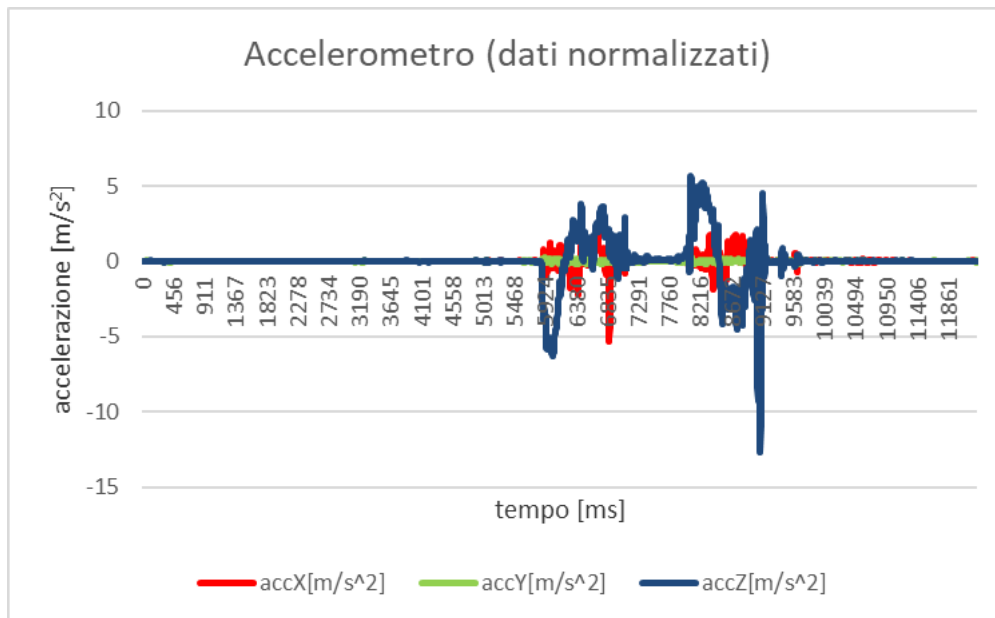


Figura 42: grafico accelerazioni normalizzate spostamento su asse Z

Come nei casi precedenti, in *figura 43*, si può notare che gli spostamenti calcolati senza normalizzare le accelerazioni hanno una deriva tale da non permettere di notare lo spostamento sull'asse *Z* che ci interessa.

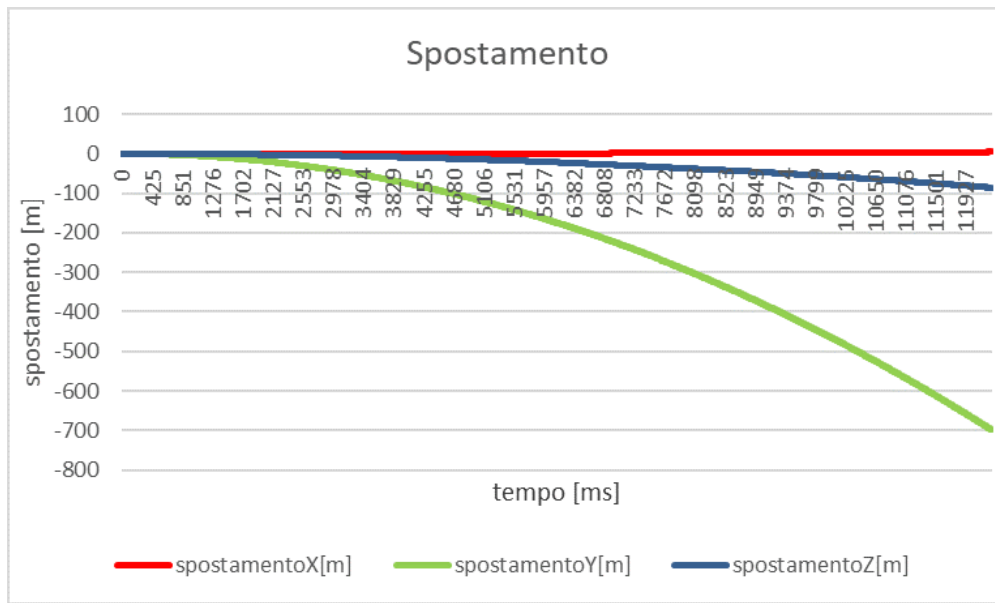


Figura 43: grafico spostamento effettuato su asse Z

Gli spostamenti calcolati con le accelerazioni normalizzate sono rappresentati in *figura 44*.

La distanza calcolata nel momento in cui termina il movimento di andata è visibile nella linea blu a $7087ms$ in *figura 44*. Dato che in quel punto lo spostamento realmente compiuto è di $76,2cm$ e quello calcolato è pari a $0,7350592cm$ in questo caso la precisione è minore di entrambi i casi precedenti e comincia a essere un errore notevole.

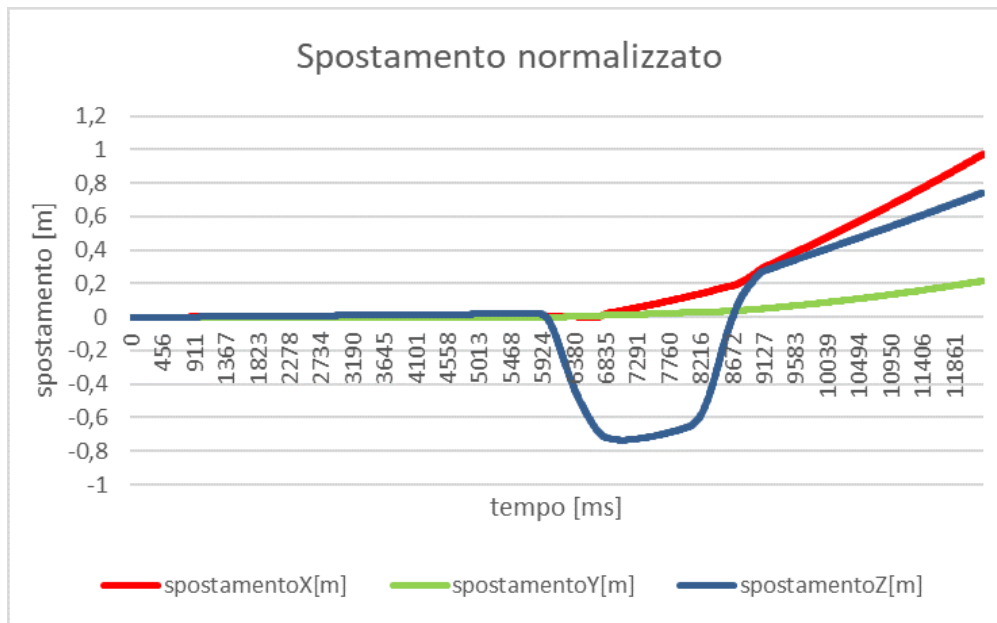


Figura 44: grafico spostamento normalizzato effettuato su asse Z

Come nei casi precedenti, una volta completato il movimento di andata, il grafico comincia ad avere un andamento non attendibile.

4.5 Formule utilizzate

Ora analizziamo nel dettaglio in che modo sono stati trattati i dati.

Tra tutto ciò il programma creato ci mette a disposizione, ciò che interessa è l'accelerazione lungo ogni singolo asse e il timestamp dell'IMU in millisecondi. Abbiamo effettuato i calcoli sui singoli intervalli creati facendo la differenza tra un istante del timestamp i e il suo successivo $i + 1$ (all'incirca di $2 - 3ms$ ciascuno).

Per convenzione indichiamo con v_i la velocità e con S_i lo spostamento all'istante i .

Per ogni asse stabiliamo

$$v_0 = S_0 = 0$$

ovvero che lo spostamento e la velocità iniziali sono pari a 0.

Dopodiché la velocità all'istante i è

$$v_i = v_{i-1} + a_i(t_i - t_{i-1})$$

mentre lo spostamento è

$$S_i = \frac{1}{2}a_i(t_i - t_{i-1})^2 + v_{i-1}(t_i - t_{i-1}) + S_{i-1}$$

Si ricordi che oltre all'errore umano dovuto alla manipolazione manuale del dispositivo, i dati acquisiti non possono comunque essere del tutto precisi. Inoltre, ci sono sempre errori intrinseci (talvolta incrementali) che influenzano i dati, per cui è facile che dopo qualche tempo questi siano talmente grandi che i dati non risultino più affidabili.

In particolare, i giroscopi sono soggetti all'instabilità dei *bias*, errori sistematici che, per via dell'integrazione di dati imperfetti e *noise* intrinseci all'interno del dispositivo, generano nel tempo un errore di deriva. Questi errori si accumulano man mano che le stime della rotazione o dell'angolo basate sul giroscopio si spostano a lungo termine.

Gli accelerometri, al contrario, sono sensibili alle vibrazioni e ad altre accelerazioni non gravitazionali. [1]

5 Risultati degli esperimenti e conclusioni

In generale non è possibile dare un totale esito positivo ma ci sono comunque risultati soddisfacenti per quanto riguarda la deriva nello spostamento da fermo.

Infatti, considerando che queste prove sono state fatte per sopperire a problemi di durata molto limitata nel tracciamento posizionale, possiamo stabilire che l'errore di deriva sullo spostamento può essere accettabile a seconda dei casi d'uso. Ad esempio, abbiamo potuto notare che in 5 secondi l'errore assoluto di deriva minimo è di $0,19\text{cm}$ (appena percettibile) e comunque sempre inferiore a $1,88\text{cm}$ su tutti gli assi. Tale risultato è più che apprezzabile per le applicazioni pratiche alla base di questo elaborato.

Tuttavia ci sono diversi punti negativi che rendono insoddisfacente il dispositivo utilizzato.

Innanzitutto la grossa variazione delle accelerazioni in momenti di stabilità prima e dopo un movimento che peggiorano estremamente la veridicità dei calcoli effettuati rendendoli inutilizzabili. Abbiamo eseguito diversi tentativi ma non è stato possibile risolvere questo problema. Per correggere questo difetto potrebbe essere sufficiente effettuare calcoli molto complessi ma che richiedono algoritmi sofisticati e analisi approfondite.

Un altro problema legato all'accelerometro è il fatto che, in condizioni di stabilità, è quasi sempre capitato che fossero presenti degli *offset* nei 2 assi non affetti dalla gravità, che quindi richiedevano sempre un'attenzione particolare rendendo difficili le analisi durante

le fasi di movimento come descritto sopra.

Inoltre l'accelerazione di gravità registrata dalla telecamera era piuttosto variabile, infatti a distanza di pochi minuti passava da $8,6m/s^2$ a $9,3m/s^2$ a $9,6m/s^2$.

A fronte dei calcoli effettuati non riteniamo che il tracciamento posizionale sia affidabile senza sfruttare algoritmi di *SLAM*, tanto più in ambienti chiusi come quelli lavorativi industriali in cui può essere più difficile trovare spazi con pattern articolati come può capitare invece in spazi aperti.

Una possibile idea di sviluppo e continuazione di questo progetto è svolgere gli stessi esperimenti con una telecamera diversa dalla ZED2i di Stereolabs e metterli a confronto per capire se esiste margine di miglioramento.

Riferimenti bibliografici

- [1] Ian Beavers. *The Case of the Misguided Gyro*. URL: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/raqs/raq-issue-139.html>. (ultima consultazione: 12.05.2023).
- [2] Usman Dawood. *What is a global shutter – and why is it so important?* URL: <https://www.digitalcameraworld.com/news/what-is-a-global-shutter-and-why-is-it-so-important>. (ultima consultazione: 11.04.2023).
- [3] Sergey Dorodnicov. *The basics of stereo depth vision*. URL: <https://www.intelrealsense.com/stereo-depth-vision-basics/>. (ultima consultazione: 18.04.2023).
- [4] Balaji Gunasekaran. *IMU Sensors: Everything You Need To Know!* URL: <https://embeddedinventor.com/what-is-an-imu-sensor-a-complete-guide-for-beginners/>. (ultima consultazione: 18.04.2023).
- [5] Basler Italy S.r.l. *Basler Stereo Camera*. URL: <https://www.baslerweb.it/it/prodotto/basler-stereo-camera/>. (ultima consultazione: 16.05.2023).
- [6] Giuseppe Santagata. *Stereoscopia e macchina fotografica stereoscopica*. URL: <https://fotografiaartistica.it/stereoscopia-e-macchina-fotografica-stereoscopica/>. (ultima consultazione: 14.04.2023).

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il prof Di Stefano per la disponibilità e Giuseppe Casadio per il continuo supporto e affiancamento.

Ringrazio i miei genitori e la mia famiglia che mi hanno permesso di intraprendere e completare questo corso di studi.

Fare parte di un buon gruppo è stato essenziale per arrivare fino a qui. Ringrazio i miei compagni e compagne senza i quali questi tre anni sarebbero stati molto più difficili e faticosi: Fede, Andre, Gaia, Geno, Erik, Tia, Luca, Lele, Foxy, Gian e Frau.

Ultimo ma non meno importante, ringrazio Mauro che ha sopportato ogni mio *“Stavolta davvero non lo passo”* prima di quasi tutti gli esami.