



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INFORMATICA, MODELLISTICA,
ELETTRONICA E SISTEMISTICA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Informatica

Analisi delle vibrazioni di un ponte a partire da dati inerziali

Relatore:

Ing. Luigi D'Alfonso

Candidato:

Riccardo Florio

Mat. 209502

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Sommario

Introduzione	1
Capitolo 1 Cedimento strutturale dei ponti	3
1.1 Cedimento differenziale e fondazioni dei ponti	3
1.2 Gli effetti del cedimento differenziale sulle strutture.....	4
1.3 Cedimenti e rischio sismico	5
1.4 Strategie di monitoraggio e mitigazione	6
Capitolo 2 Definizione e stima dell'orientamento di un corpo mediante sensori inerziali.....	8
2.1 Definizione dell'orientamento nello spazio tridimensionale	8
2.2 Matrici di rotazione	9
2.2.1 <i>Formulazione matematica delle matrici di rotazione</i>	9
2.2.2 <i>Rotazione di un vettore tramite matrici di rotazione</i>	10
2.2.3 <i>Limitazioni delle matrici di rotazione</i>	11
2.3 Angoli di Eulero	11
2.3.1 <i>Teorema di rotazione di Eulero</i>	11
2.3.2 <i>Roll Pitch e Yaw da accelerometro e magnetometro.....</i>	12
2.3.3 <i>Applicazione delle equazioni nella fusione dei sensori</i>	15
2.3.4 <i>Problematiche della rappresentazione tramite angoli di Eulero</i>	15
2.4 Quaternioni.....	15
2.4.1 <i>Proprietà dei quaternioni e rotazioni nello spazio</i>	16
2.4.2 <i>Vantaggi dei Quaternioni rispetto ad altre rappresentazioni</i>	16
2.5 Sensori inerziali per la stima dell'orientamento.....	17
2.5.1 <i>Accelerometri</i>	17
2.5.2 <i>Magnetometri</i>	19

2.5.3	<i>Filtraggio dei segnali mediante filtro complementare.....</i>	20
Capitolo 3	Setup Sperimentale	22
3.1	Progettazione digitale con SketchUp	22
3.2	Scelta dei componenti	25
3.3	Costruzione del modello fisico in scala	26
3.3.1	<i>Realizzazione della struttura in legno.....</i>	27
3.3.2	<i>Costruzione dei meccanismi interni alla base</i>	27
3.3.3	<i>Costruzione dello schema elettrico.....</i>	29
3.3.4	<i>Costruzione dei pezzi della strada</i>	30
3.4	Scrittura del codice Arduino e taratura dei parametri	31
3.4.1	<i>Scenari gestiti dal codice</i>	31
3.4.2	<i>Taratura dei servomotori</i>	31
3.4.3	<i>Limiti di movimento</i>	32
3.4.4	<i>Funzione di movimento graduale.....</i>	33
3.4.5	<i>Funzione di relax.....</i>	34
3.4.6	<i>Gestione degli scenari e dei pulsanti</i>	34
3.4.7	<i>Esecuzione del codice e configurazione iniziale.....</i>	35
Capitolo 4	Analisi dei dati e GUI	37
4.1	Conversione dei dati inerziali.....	37
4.2	Filtraggio dei dati	38
4.3	GUI e visualizzazione dei dati	41
4.4	Test e risultati	42
4.4.1	<i>Primo test: rilevazione del cedimento strutturale tra due piloni</i>	43
4.4.2	<i>Secondo test: rilevazione del cedimento strutturale sopra un pilone</i>	44
4.4.3	<i>Conclusione dei primi due esperimenti.....</i>	45

4.4.4	<i>Terzo esperimento: rilevazione di un terremoto tra due piloni.....</i>	45
4.4.5	<i>Quarto esperimento: rilevazione di un terremoto sopra un pilone.....</i>	46
Conclusioni	48
Bibliografia	50

Introduzione

L'analisi delle vibrazioni strutturali rappresenta un elemento cruciale per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle infrastrutture, in particolare dei ponti. La capacità di monitorare in modo efficace il comportamento dinamico di un ponte può prevenire eventi catastrofici, guidare le operazioni di manutenzione e ottimizzare la gestione delle risorse. Negli ultimi anni, l'evoluzione della tecnologia ha reso accessibili strumenti come i sensori inerziali, che offrono un'opportunità unica per raccogliere dati dettagliati sul comportamento di strutture complesse.

La trattazione si concentra sull'analisi delle vibrazioni di un ponte, utilizzando dati acquisiti da sensori inerziali. Il lavoro si articola intorno allo sviluppo di un sistema sperimentale, che combina un modello di ponte in scala con i sensori di uno smartphone per rilevare movimenti e oscillazioni in tempo reale. La scelta di utilizzare un dispositivo mobile non è casuale: gli smartphone sono dotati di sensori avanzati, come accelerometri e magnetometri, e rappresentano una soluzione pratica e accessibile per condurre esperimenti di questo tipo.

Il modello in scala è progettato per simulare due scenari distinti: un'azione di cedimento strutturale dei piloni e una scossa sismica. Entrambi i fenomeni sono regolabili, consentendo di riprodurre diverse intensità di movimento e di studiarne gli effetti sulla struttura. Tale configurazione offre un ambiente controllato per esaminare il comportamento dinamico del ponte e valutare l'efficacia dei metodi di monitoraggio adottati.

L'analisi si basa sull'acquisizione e sull'elaborazione dei dati grezzi forniti dai sensori del dispositivo mobile. Tali dati vengono trasformati in angoli di rollio, beccheggio e imbardata, consentendo di monitorare con precisione i movimenti del ponte in risposta a scenari di cedimento strutturale o a vibrazioni indotte da terremoti simulati. Per supportare l'elaborazione e la visualizzazione dei dati, è stata sviluppata un'applicazione desktop in Python, che integra algoritmi di

filtraggio per migliorare l'accuratezza delle misurazioni e una GUI interattiva per rappresentare graficamente i risultati.

Il lavoro non si limita solo alla creazione del modello in scala e del software. Attraverso esperimenti pratici, è stato possibile identificare i punti ottimali per il posizionamento dei sensori, dimostrando come la scelta della posizione possa influenzare significativamente la qualità dei dati raccolti. L'approccio sperimentale non soltanto contribuisce alla comprensione del comportamento dinamico dei ponti, ma offre anche un metodo replicabile per testare tecniche simili in ambito didattico e applicativo.

L'obiettivo principale del presente elaborato è dimostrare che l'uso combinato di sensori inerziali, algoritmi di stima e filtraggio e strumenti software può fornire un metodo efficace per studiare le vibrazioni strutturali. Allo stesso tempo, si punta a mettere in evidenza il potenziale di soluzioni semplici e accessibili, come l'uso di uno smartphone, per affrontare problemi complessi in ingegneria. Pur concentrandosi su un modello in scala, l'elaborato mira a gettare le basi per un'eventuale applicazione a strutture reali, contribuendo così al progresso delle tecniche di monitoraggio strutturale.

Capitolo 1

Cedimento strutturale dei ponti

Il cedimento strutturale rappresenta una delle problematiche principali che possono compromettere la stabilità e la funzionalità dei ponti, influenzando negativamente sia la loro capacità portante sia la sicurezza degli utenti. Questo fenomeno complesso è determinato da vari fattori, tra cui il comportamento del terreno di fondazione, i carichi dinamici e le condizioni ambientali. In particolare, il cedimento differenziale e il cedimento progressivo del suolo possono generare danni considerevoli, con impatti visibili sia sugli elementi strutturali principali, come piloni e travi, sia sui componenti secondari. Quando il terreno sottostante perde la sua capacità portante, come può accadere in presenza di terreni eterogenei o soggetti a liquefazione sismica, il ponte può subire deformazioni significative. Tali effetti risultano particolarmente rilevanti nelle zone in cui la risposta meccanica del suolo varia con la profondità e la composizione, causando inclinazioni o cedimenti differenziali che mettono a rischio la stabilità complessiva della struttura.

1.1 Cedimento differenziale e fondazioni dei ponti

Il cedimento differenziale si verifica quando diverse parti delle fondazioni di un ponte si abbassano con intensità o velocità differenti. Tale fenomeno, particolarmente rilevante nei terreni argilosi o incoerenti, può causare inclinazioni e rotazioni indesiderate nei piloni e nelle travi, portando alla formazione di lesioni sulle strutture.

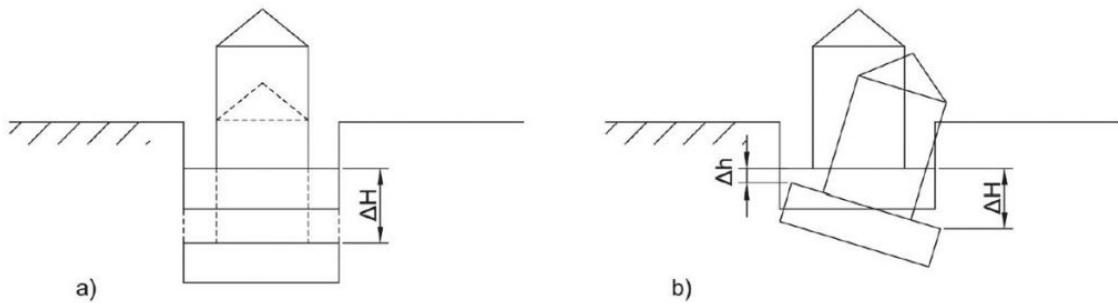


Figura 1 – Cedimento delle fondazioni di una struttura

I movimenti del terreno possono essere influenzati da fattori naturali, come variazioni nelle falde acquifere, e dall'attività umana, come l'estrazione di risorse minerarie o il pompaggio di acque sotterranee. Le fondazioni dei ponti situati in aree soggette a fenomeni di subsidenza sono particolarmente vulnerabili ai cedimenti differenziali. La subsidenza, dovuta a cedimenti lenti e progressivi del terreno, spesso innescati dalla compressione di strati di argilla e limo, porta ad abbassamenti non uniformi che causano tensioni interne e deformazioni anomale negli elementi strutturali.

Le strutture colpite da cedimenti differenziali possono manifestare fessurazioni inclinate, in particolare sui pilastri e sulle travi, compromettendo la resistenza complessiva del ponte. (1) (2) (3)

1.2 Gli effetti del cedimento differenziale sulle strutture

Le lesioni causate dai cedimenti differenziali possono propagarsi verticalmente e orizzontalmente, con inclinazioni che spesso raggiungono un angolo di 45° rispetto ai pilastri. Tale fenomeno è legato alle forze di trazione e compressione che si sviluppano all'interno delle strutture soggette a carichi non uniformi. Nei ponti in calcestruzzo armato, ad esempio, è comune osservare fessurazioni nelle travi e nelle sezioni di connessione con i piloni, dove il calcestruzzo può subire

danni da schiacciamento se il carico supera la capacità di sopportazione del materiale.

Per mitigare i rischi di cedimento strutturale, si adottano fondazioni profonde (ad esempio pali o micropali) nei terreni di bassa consistenza, che permettono di raggiungere strati di terreno più stabili e distribuiscono i carichi in modo più uniforme. (4) (5)

1.3 Cedimenti e rischio sismico

Il comportamento del terreno di fondazione diventa ancora più critico in zone sismiche, dove un cedimento differenziale può amplificare gli effetti di un terremoto.

Durante un evento sismico, un terreno non omogeneo o soggetto a cedimenti progressivi può causare oscillazioni aggiuntive e instabilità improvvisa nella struttura del ponte, aumentando il rischio di danni estesi. Per questo motivo, nelle aree ad alta sismicità, è fondamentale monitorare attentamente sia le fondazioni dei ponti sia i movimenti del terreno per identificare tempestivamente eventuali cedimenti.

In contesti sismici, i terreni sciolti o saturi d'acqua sono vulnerabili al fenomeno della liquefazione, una condizione in cui il suolo perde temporaneamente la sua capacità portante. Ciò può provocare cedimenti significativi nelle fondazioni superficiali dei ponti, soprattutto se il terreno di base subisce una significativa perdita di coesione. Per limitare tali rischi, la normativa sismica prevede criteri di classificazione del suolo di fondazione che permettono di adottare soluzioni di rinforzo o interventi geotecnici specifici nelle fasi di progettazione. (1) (6)

1.4 Strategie di monitoraggio e mitigazione

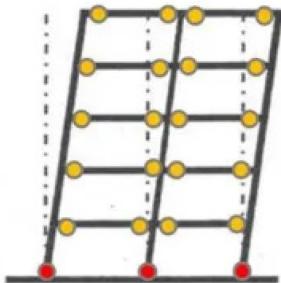
Il monitoraggio geotecnico e strutturale è essenziale per identificare tempestivamente i segnali di cedimento nelle fondazioni dei ponti. Attraverso sistemi di sensori che rilevano inclinazioni e spostamenti nei pilastri, è possibile ottenere dati in tempo reale sull'integrità delle strutture.

In casi di cedimento avanzato, gli interventi di consolidamento del terreno o di rinforzo delle fondazioni diventano necessari per ripristinare la stabilità e garantire la sicurezza della struttura. L'importanza di adottare misure preventive, specialmente nelle zone a rischio di subsidenza e sismicità, è dunque un elemento chiave per la progettazione e la manutenzione dei ponti, con l'obiettivo di minimizzare i rischi associati ai cedimenti e preservare l'integrità a lungo termine della struttura.

Le pratiche di progettazione geotecnica richiedono un'attenta valutazione del "sistema geotecnico", considerando non solo il terreno ma anche le interazioni dinamiche tra il terreno stesso e le strutture in elevazione. Indagini dettagliate, sia in situ che in laboratorio, sono fondamentali per ottenere informazioni accurate sulle caratteristiche meccaniche e fisiche del terreno e per dimensionare correttamente le fondazioni.

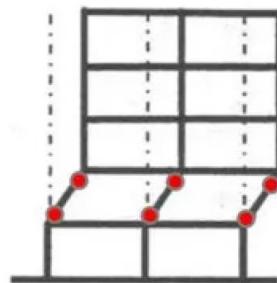
Il criterio della "gerarchia delle resistenze", ad esempio, viene impiegato per garantire che gli elementi non dissipativi del ponte (come gli appoggi) mantengano un comportamento elastico sotto azione sismica, riducendo così il rischio di cedimenti catastrofici.

CON GERARCHIA DELLE RESISTENZE



Meccanismo di collasso
Cerniere plastiche nelle travi
e alla base dei pilastri

SENZA GERARCHIA DELLE RESISTENZE



Piano soffice
Cerniere plastiche nei
pilastri

Figura 2 – Gerarchia delle resistenze in una struttura

L'analisi sul cedimento strutturale dei ponti fornisce una panoramica delle principali cause e conseguenze legate ai cedimenti del terreno, evidenziando la necessità di un monitoraggio costante e di interventi di manutenzione mirati per garantire la sicurezza e la funzionalità dei ponti nel tempo.

Con l'implementazione di strategie di monitoraggio avanzate e tecniche di ingegneria geotecnica, è possibile affrontare le sfide associate ai cedimenti strutturali, contribuendo a preservare le infrastrutture cruciali per la mobilità e la sicurezza pubblica.

Capitolo 2

Definizione e stima dell'orientamento di un corpo mediante sensori inerziali

La stima dell'orientamento di un corpo rigido nello spazio tridimensionale costituisce una parte essenziale di molti sistemi di navigazione, robotica, aeronautica e dispositivi mobili. Tale stima si basa su un insieme di dati raccolti tramite sensori, come accelerometri, giroscopi e magnetometri, i quali forniscono dati su accelerazioni, velocità angolari e campo magnetico, che devono essere poi fusi tramite metodi computazionali per ottenere una stima affidabile dell'orientamento nello spazio.

Per un'accurata rappresentazione dell'orientamento, è fondamentale scegliere una rappresentazione matematica robusta e priva di ambiguità, che possa variare in base al contesto applicativo. Le rappresentazioni dell'orientamento più utilizzate comprendono le *matrici di rotazione*, gli *angoli di Eulero* e i *quaternioni*. Ogni rappresentazione presenta vantaggi e limiti, che rendono alcune di esse più adatte per applicazioni specifiche.

2.1 Definizione dell'orientamento nello spazio tridimensionale

L'orientamento di un corpo nello spazio è definito dalla relazione tra un sistema di riferimento solidale al corpo stesso e un sistema di riferimento fisso o "inerziale". Definire l'orientamento di un corpo significa quindi stabilire come il sistema di riferimento del corpo è ruotato rispetto al sistema di riferimento globale. Dal punto di vista matematico, può essere, dunque, espresso tramite:

- Matrici di rotazione
- Angoli di Eulero
- Quaternioni

Ognuna di tali rappresentazioni ha proprietà uniche e implicazioni diverse sulla gestione delle rotazioni, come verrà spiegato in dettaglio.

2.2 Matrici di rotazione

Le matrici di rotazione sono uno dei metodi più diretti e completi per rappresentare l'orientamento di un corpo rigido. Tali matrici, note anche come *matrici dei coseni direttori* (DCM), descrivono come il sistema di riferimento solidale al corpo è orientato rispetto al sistema di riferimento globale. Una matrice di rotazione in tre dimensioni è una matrice ortogonale R di dimensioni 3×3 dove ciascuna colonna della matrice rappresenta un versore del sistema di riferimento del corpo espresso nel sistema di riferimento globale.

2.2.1 Formulazione matematica delle matrici di rotazione

Sia A un sistema di riferimento globale e B un sistema di riferimento solidale al corpo. La matrice di rotazione R è definita in modo che un vettore \vec{P} espresso con coordinate \vec{P}_A nel sistema A e \vec{P}_B nel sistema B sia correlato dalla relazione:

$$\vec{P}_A = R \cdot \vec{P}_B$$

dove:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

L'elemento r_{ij} della matrice R rappresenta il coseno che l'asse i del sistema di riferimento A forma con l'asse j del sistema di riferimento B . Per questo motivo, la matrice di rotazione prende anche il nome di *matrice dei coseni direttori*.

Le proprietà principali di R sono:

1. Ortogonalità: $R^T = R^{-1}$, il che implica che le righe e le colonne di R sono versori ortogonali tra loro.
2. Determinante unitario: $\det(R) = 1$.

2.2.2 Rotazione di un vettore tramite matrici di rotazione

Per ruotare un vettore di un angolo θ attorno a un asse specifico, è possibile utilizzare una delle seguenti matrici:

- Rotazione attorno all'asse x

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

- Rotazione attorno all'asse y

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

- Rotazione attorno all'asse z

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Una rotazione arbitraria può essere descritta come il prodotto di rotazioni elementari attorno agli assi x , y e z . Ad esempio, una rotazione sequenziale di angoli α , β , e γ attorno agli assi x , y , e z rispettivamente è rappresentata da:

$$R = R_z(\gamma) R_y(\beta) R_x(\alpha)$$

2.2.3 Limitazioni delle matrici di rotazione

Le matrici di rotazione sono particolarmente utili per rappresentare l'orientamento di un corpo in sistemi meccanici complessi, ma presentano alcuni limiti, come la ridondanza dei parametri. Poiché una matrice di rotazione 3×3 ha nove elementi, ma solo tre gradi di libertà indipendenti, tale rappresentazione può risultare inefficiente nei sistemi dinamici in tempo reale.

2.3 Angoli di Eulero

Gli angoli di Eulero forniscono una rappresentazione minimale per descrivere l'orientamento di un corpo, riducendo i parametri necessari da nove a tre. Gli angoli di Eulero descrivono una rotazione tridimensionale come una sequenza di rotazioni elementari attorno agli assi di riferimento.

2.3.1 Teorema di rotazione di Eulero

Il teorema di Eulero stabilisce che ogni rotazione tridimensionale può essere rappresentata come una sequenza di tre rotazioni attorno a ciascun asse di riferimento. Le convenzioni comuni per gli angoli di Eulero sono:

- Roll (ϕ): rotazione attorno all'asse x
- Pitch (θ): rotazione attorno all'asse y

- Yaw (ψ): rotazione attorno all'asse z

Questa sequenza di rotazioni è rappresentata dalla matrice risultante:

$$R = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi)$$

2.3.2 Roll Pitch e Yaw da accelerometro e magnetometro

Di seguito viene descritto il metodo per stimare gli angoli di *rollio* (roll), *beccheggio* (pitch) e *imbardata* (yaw) utilizzando i dati forniti dai sensori inerziali, in particolare accelerometro e magnetometro, che saranno analizzati più avanti. Tale stima è basata sulle seguenti ipotesi:

1. Gli assi dei sensori risultano allineati.
2. Il sistema di riferimento xyz è centrato sugli assi dei sensori stessi (sistema di riferimento del sensore).
3. Il sistema di riferimento globale è l'ENU (East-North-Up (7) (8)).

L'orientamento del sensore rispetto al sistema ENU può essere rappresentato dalla matrice di rotazione $R_{\text{enu} \rightarrow s}$, ottenuta tramite una sequenza di rotazioni lungo gli assi x , y e z :

$$R_{\text{enu} \rightarrow s} = R_x(r) R_y(p) R_z(y)$$

dove r , p e y indicano, rispettivamente, gli angoli di rollio, beccheggio e imbardata.

Stima di Roll e Pitch

Gli angoli di rollio e beccheggio possono essere stimati utilizzando i dati dell'accelerometro, assumendo $p \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$. La relazione di base è data da:

$$a_s = R_{\text{enu} \rightarrow s} a_{\text{enu}} = \underset{\text{enu} \rightarrow s}{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

Dove $a_s = \begin{bmatrix} a_{s,x} \\ a_{s,y} \\ a_{s,z} \end{bmatrix}$ rappresenta l'accelerazione misurata nel sistema di riferimento del sensore e g è l'accelerazione gravitazionale. Da tale relazione, è possibile derivare:

$$\begin{bmatrix} a_{s,x} \\ a_{s,y} \\ a_{s,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(p) \\ -\cos(p) \sin(r) \\ -\cos(p) \cos(r) \end{bmatrix}$$

Da qui, gli angoli r (rollio) e p (beccheggio) possono essere calcolati come segue:

$$r = \arctan_2 \left(\frac{a_{s,y}}{a_{s,z}} \right)$$

$$p = \arctan_2 \left(\frac{a_{s,x}}{\sqrt{a_{s,y}^2 + a_{s,z}^2}} \right)$$

dove $a_{s,x}$, $a_{s,y}$ e $a_{s,z}$ rappresentano le componenti dell'accelerazione misurate lungo gli assi x , y e z del sensore.

Stima di Yaw

L'angolo di imbardata (yaw) viene stimato utilizzando i dati del magnetometro. Sia $m_0 \in \mathbb{R}^3$ il vettore del campo magnetico di riferimento nel sistema di riferimento ENU nella posizione di interesse e $m_s \in \mathbb{R}^3$ il campo magnetico misurato nel sistema di riferimento del sensore. Utilizzando le notazioni $s_\theta = \sin(\theta)$ e $c_\theta = \cos(\theta)$, l'angolo di imbardata y può essere calcolato come:

$$y = \arctan_2(s_y, c_y)$$

Dove le componenti $m_{0,x}$ e $m_{0,y}$ del campo magnetico di riferimento sono definite come:

$$m_{0,x} = [m_{s,x}c_p + (m_{s,z}c_r + m_{s,y}s_r)s_p]c_y + [m_{s,z}s_r - m_{s,y}c_r]s_y$$

$$m_{0,y} = [-m_{s,z}s_r + m_{s,y}c_r]c_y + [m_{s,x}c_p + (m_{s,z}c_r + m_{s,y}s_r)s_p]s_y$$

Le relazioni possono essere semplificate come segue:

$$m_{0,x} = \alpha c_y + \beta s_y$$

$$m_{0,y} = -\beta c_y + \alpha s_y$$

E da cui:

$$\begin{bmatrix} c_y \\ s_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ -\beta & \alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_{0,x} \\ m_{0,y} \end{bmatrix}$$

2.3.3 Applicazione delle equazioni nella fusione dei sensori

Le equazioni di stima di rollio, beccheggio e imbardata possono essere agevolmente usate in un processo di stima basato su evoluzione dinamica degli angoli di euler (Gimbal Equations (9)). Grazie a tale strategia di sensor fusion risulta possibile ottenere una stima accurata e smooth (dolce) dell'orientamento del corpo.

2.3.4 Problematiche della rappresentazione tramite angoli di Eulero

La rappresentazione tramite angoli di Eulero è intuitiva e minimale, ma presenta alcune problematiche, come le *singolarità*. In particolare, il *blocco cardanico* si verifica quando due assi di rotazione diventano paralleli, riducendo il numero di gradi di libertà. Ad esempio, se il pitch è a $\pm 90^\circ$, l'asse x e l'asse z diventano paralleli, portando alla perdita di un grado di libertà.



Figura 3 – Blocco cardanico

2.4 Quaternioni

I quaternioni rappresentano un'estensione dei numeri complessi nello spazio quadridimensionale e sono molto usati nella stima dell'orientamento per via della

loro efficienza computazionale e della mancanza di singolarità. Un quaternione q è definito come:

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$$

con la condizione:

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$$

2.4.1 Proprietà dei quaternioni e rotazioni nello spazio

Data una rotazione di angolo θ attorno a un asse unitario $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$, il quaternione corrispondente è:

$$q = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)(u_x i + u_y j + u_z k)$$

La rotazione di un vettore \vec{v} si ottiene tramite il prodotto quaternione:

$$\overrightarrow{v'} = q \vec{v} q^{-1}$$

2.4.2 Vantaggi dei Quaternioni rispetto ad altre rappresentazioni

I quaternioni non presentano singolarità e sono più efficienti computazionalmente rispetto alle matrici di rotazione e agli angoli di Eulero, rendendoli ideali per applicazioni che richiedono continuità di rotazione.

2.5 Sensori inerziali per la stima dell'orientamento

I sensori inerziali, come accelerometri e giroscopi, costituiscono i componenti chiave per la misurazione dell'orientamento in sistemi di navigazione e controllo. I dati ottenuti da tali sensori possono essere utilizzati singolarmente o in combinazione per migliorare la precisione e ridurre gli errori accumulati.

Si possono distinguere due tipologie di sensori inerziali: *sensori locali* e *sensori globali*.

I sensori locali forniscono informazioni che non sono legate al valore dello stato (posizione), ma al valore delle relative variazioni di stato (velocità). Tali sensori svolgono un ruolo cruciale nell'analisi del movimento e nei sistemi di tracciamento, fornendo informazioni sui movimenti locali di utenti, oggetti e veicoli. Di solito forniscono un'informazione differenziale, non legata alla posizione dell'utente ma al movimento relativo dell'utente. I sensori locali comuni includono accelerometri e giroscopi.

I sensori globali forniscono informazioni strettamente correlate al valore dello stato (posizione). Raccolgono dati da un'ampia area geografica o in tutto il mondo. Misure tipiche sono: posizione geografica, informazioni temporali e dati ambientali.

2.5.1 Accelerometri

Gli accelerometri sono dispositivi che misurano l'accelerazione lungo uno o più assi. La loro principale applicazione nella stima dell'orientamento è quella di fornire una misura dell'accelerazione dovuta alla gravità, che permette di determinare l'inclinazione del sensore rispetto al suolo.

Esistono diverse tipologie di accelerometri, ma sono tutte riconducibili al sistema massa – molla – smorzatore.

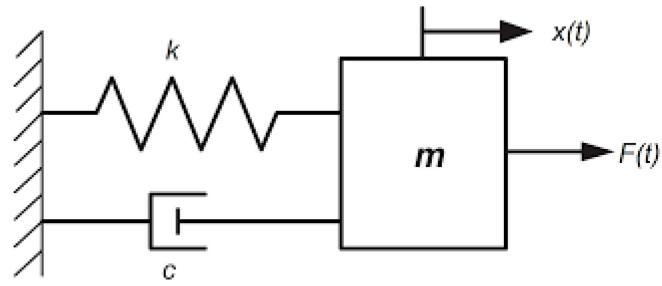


Figura 4 - Sistema massa - molla - smorzatore

Gli accelerometri MEMS, ovvero Micro – Electro – Mechanical Systems, che sono i più diffusi, possono essere classificati come:

- **Capacitivi:** Misurano l'accelerazione attraverso variazioni nella capacità elettrica dovute allo spostamento di una massa interna collegata a un elemento elastico. Questo tipo di accelerometro è molto diffuso nei dispositivi mobili grazie alla sua alta sensibilità e capacità di rilevare sia accelerazioni statiche sia dinamiche.
- **Piezoelettrici:** Basati sulle proprietà dei materiali piezoelettrici, gli accelerometri di questo tipo generano un segnale elettrico quando sottoposti a uno stress meccanico. Sono particolarmente adatti a misurazioni dinamiche ad alta frequenza, come le vibrazioni, ma meno efficaci per misurare accelerazioni statiche come la gravità.
- **Ad estensimetro (o resistivi):** Utilizzano variazioni di resistenza in un materiale estensimetrico, rilevando l'accelerazione tramite la deformazione di elementi sensibili. Tali accelerometri sono spesso utilizzati in ambienti industriali per la loro robustezza e resistenza alle vibrazioni.
- **Termici:** In questi accelerometri, un fluido all'interno di una cavità cambia distribuzione di temperatura in risposta all'accelerazione. Poiché non contengono parti mobili, sono ideali per applicazioni in condizioni di urti estremi. (10)

2.5.2 Magnetometri

Un magnetometro è un dispositivo che misura il campo magnetico o il momento di dipolo magnetico. Esistono diversi tipi di magnetometri, ciascuno con il proprio metodo per misurare la direzione, l'intensità o la variazione di un campo magnetico in una determinata posizione. In tale contesto, un esempio comune di magnetometro è la bussola, che misura la direzione del campo magnetico terrestre e permette di orientarsi rispetto al Nord magnetico. Il magnetometro rileva dunque il campo magnetico locale applicato al sensore stesso, fornendo informazioni critiche per la stima dell'orientamento rispetto al campo magnetico terrestre.

Il campo magnetico terrestre può essere approssimato come quello di un gigantesco dipolo magnetico inclinato rispetto all'asse di rotazione terrestre.

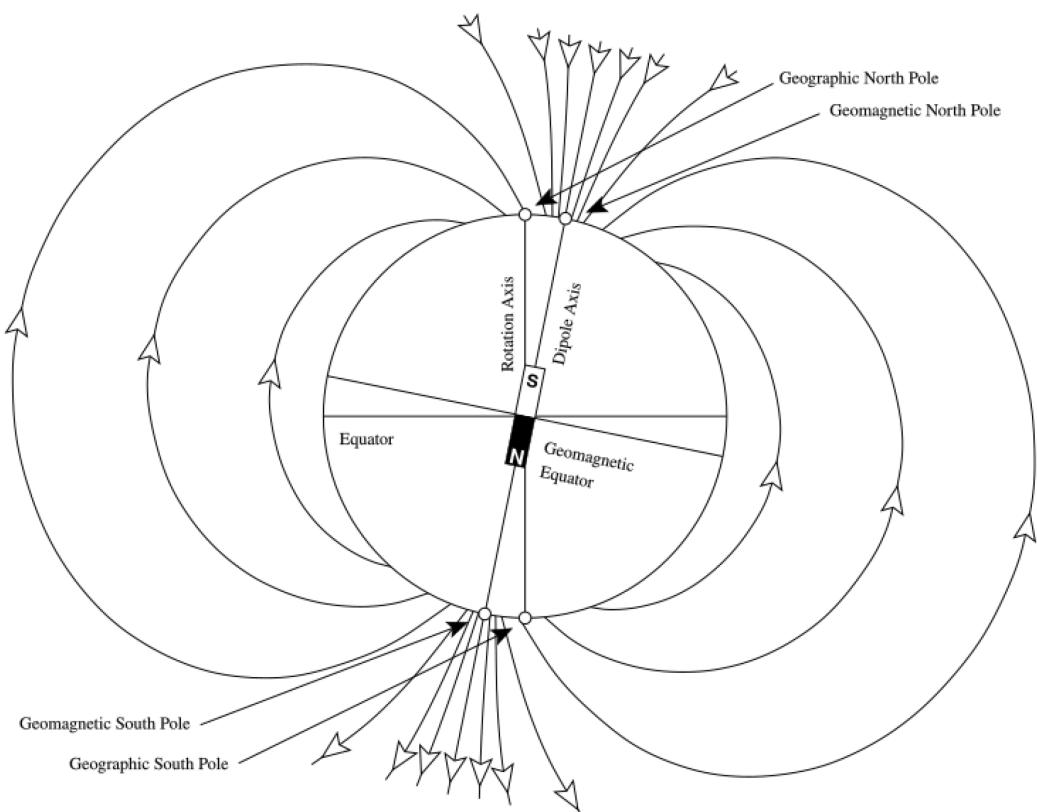


Figura 5 - Approssimazione del dipolo inclinato al campo magnetico terrestre

Tale campo magnetico, rappresentato dal vettore $m_0(\text{lat}, \text{lon}, \text{alt}) \in R^3$, varia localmente ma può essere considerato costante a livello di piccole variazioni spaziali. La sua intensità e direzione in una posizione specifica sulla Terra sono spesso tabulate o calcolate mediante modelli matematici, i quali forniscono un'accurata mappa del campo magnetico globale. Per calcolare i valori locali del campo magnetico, sono disponibili strumenti online come il calcolatore geomagnetico fornito dalla NOAA: NOAA Geomagnetic Calculator.

I magnetometri possono essere classificati principalmente in due categorie: *vettoriali* e *scalari*. I magnetometri vettoriali misurano sia la direzione sia l'intensità di un campo magnetico, mentre quelli scalari misurano solo l'intensità.

Tra i tipi più comuni di magnetometri vi sono:

- Magnetometri **fluxgate**: Ideali per misurazioni ambientali di precisione; rilevano i campi magnetici attraverso un nucleo magnetico.
- Magnetometri **a vapori di cesio**: Utilizzati per la loro estrema sensibilità e capacità di rilevare variazioni minime, offrono grande precisione nelle indagini geofisiche.
- Magnetometri **a protoni**: Sono adatti per misurazioni di intensità in campo aperto grazie alla loro stabilità.

I magnetometri vengono scelti in base alle specifiche esigenze di accuratezza, campo di misura e tipo di applicazione, come rilevamenti geofisici, militari e archeologici. (11)

2.5.3 Filtraggio dei segnali mediante filtro complementare

I dati estratti da accelerometro e giroscopio possono essere soggetti a rumore, ovvero ad un segnale di tipo stocastico. Tali dati possono essere “depurati” utilizzando il *filtro passa – basso* seguente:

$$y(t) = \alpha y(t - T) + (1 - \alpha)x(t), \quad 0 < \alpha < 1$$

Dove:

- $y(t)$ è il valore filtrato al tempo t .
- $y(t - T)$ è il valore filtrato al tempo precedente.
- $x(t)$ è il valore attuale del segnale (ad esempio, roll, pitch o yaw).
- α un coefficiente che determina il grado di “smussamento”.

Tale filtro serve a ottenere un segnale più dolce e meno influenzato da rumore o variazioni rapide, mantenendo una rappresentazione più accurata della tendenza generale del movimento. (12)

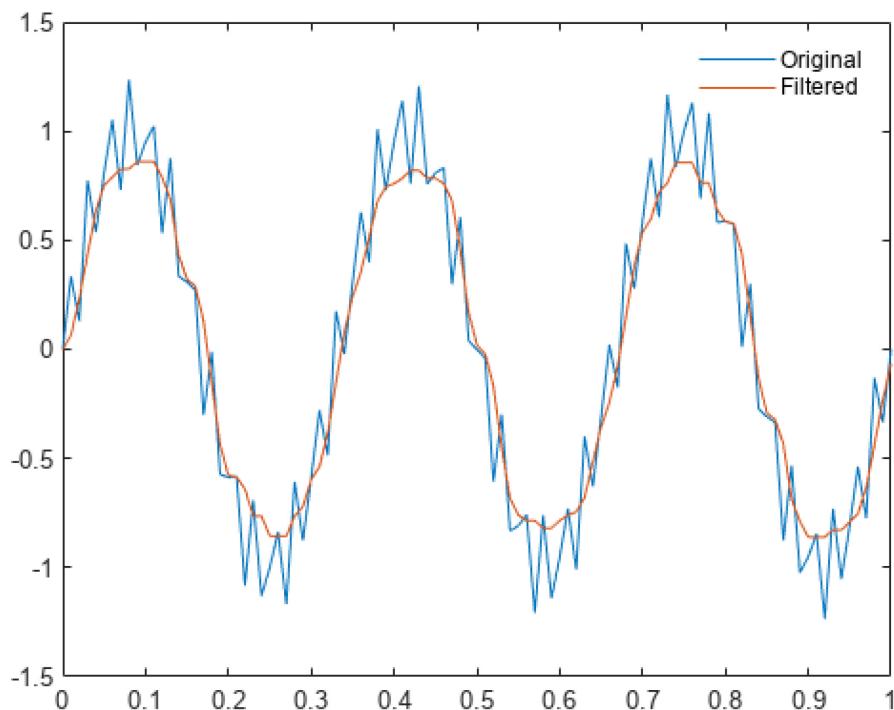


Figura 6 – Esempio di filtraggio di un segnale

Capitolo 3

Setup Sperimentale

Il capitolo descrive in dettaglio la costruzione del modello in scala di ponte utilizzato per simulare eventi di cedimento, come l'abbassamento dei piloni e movimenti sismici. Il processo si è articolato in diverse fasi, dall'ideazione digitale del progetto alla sua costruzione fisica, fino alla programmazione dei servomotori con Arduino Uno.

3.1 Progettazione digitale con SketchUp

La progettazione del modello di ponte è iniziata con la creazione di un modello tridimensionale utilizzando **SketchUp**, un software di modellazione 3D intuitivo e versatile, ampiamente utilizzato per creare progetti architettonici e prototipi. SketchUp permette di realizzare disegni dettagliati con misure precise, fornendo una rappresentazione visiva accurata del progetto. Tale software si è rivelato particolarmente utile per ottenere un'idea preliminare delle dimensioni complessive della struttura, dei componenti necessari e della disposizione dei vari elementi.

Grazie alla modellazione 3D, è stato possibile stimare le misure complessive del modello in scala, definendo le dimensioni finali di 1 metro di larghezza, 30 cm di profondità e 32 cm di altezza, e calcolare lo spazio necessario per l'installazione dei vari componenti. Il modello digitale ha permesso, inoltre, di pianificare i dettagli strutturali del ponte, come la disposizione dei piloni, delle cerniere e delle piastre di metallo che sostengono i piloni, oltre che di valutare la posizione ottimale dei servomotori.

Il ponte è composto da tre piloni e sei servomotori: tre dedicati al movimento verticale per simulare il cedimento dei piloni e tre per generare oscillazioni orizzontali che simulano un movimento sismico. La strada del ponte è costituita da pannelli separati, collegati da cerniere, per consentire il movimento indipendente dei segmenti, simulando l'effetto di un cedimento strutturale.

Parallelamente alla progettazione strutturale, è stato creato uno schema elettrico preliminare della componentistica, che include la disposizione dei collegamenti tra Arduino, i servomotori e i pulsanti di controllo. È stato utilizzato un alimentatore da 12V per alimentare la scheda Arduino, mentre per i servomotori è stato aggiunto un convertitore di tensione che riduce l'alimentazione a 5V, garantendone così un funzionamento sicuro e stabile. Lo schema è stato fondamentale per comprendere e definire le connessioni necessarie e le specifiche tecniche dei componenti elettronici, e per verificare che la configurazione dei componenti fosse coerente con lo spazio disponibile nella base del ponte.

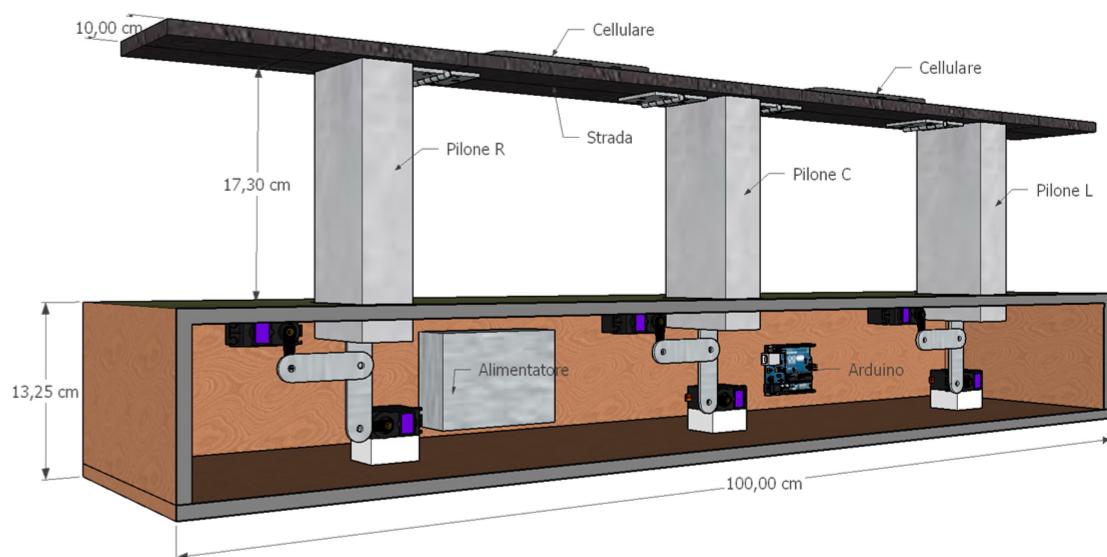


Figura 7 - Modello tridimensionale

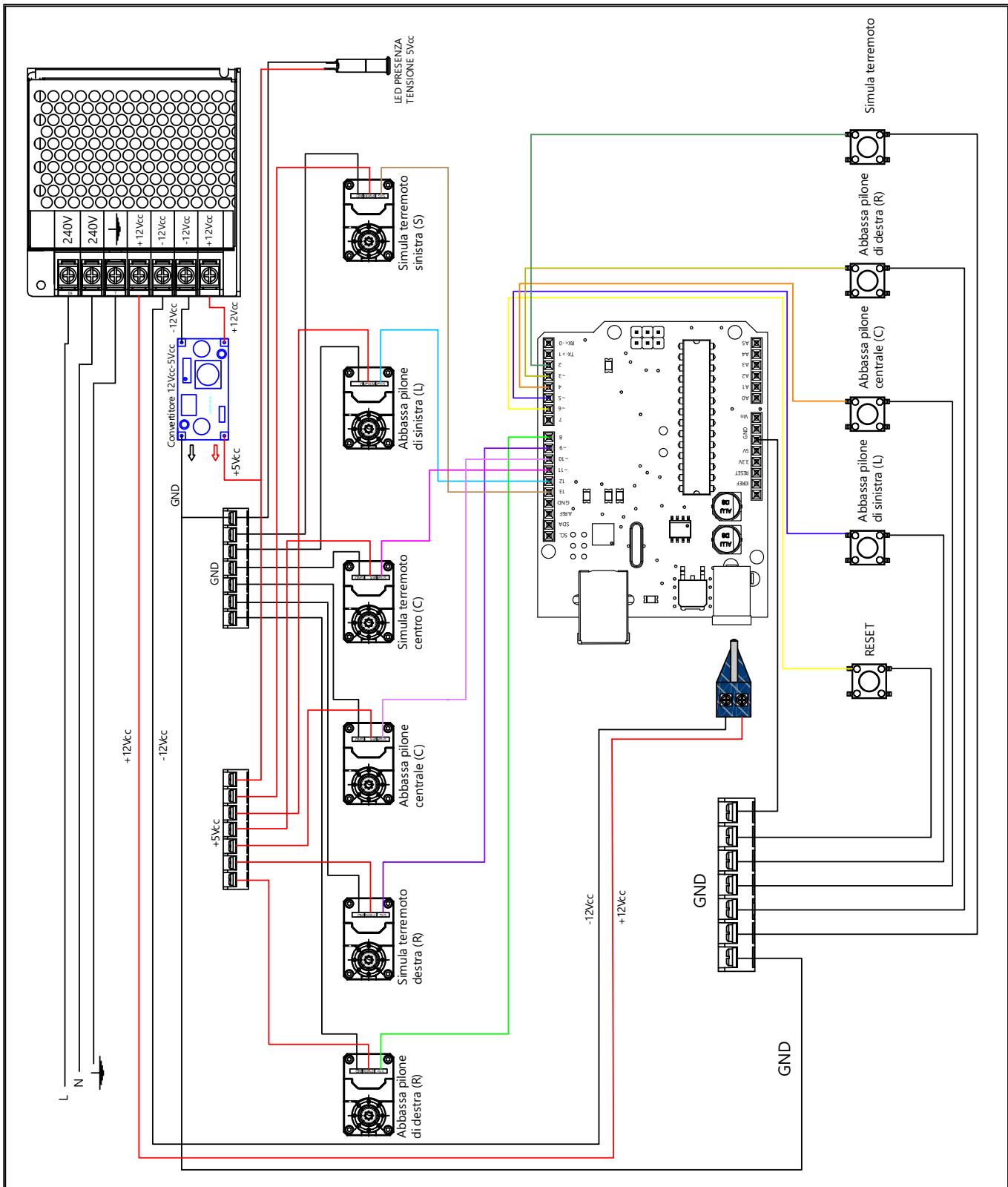


Figura 8 - Schema elettrico

3.2 Scelta dei componenti

La scelta dei componenti per la realizzazione del modello in scala del ponte è stata guidata da considerazioni legate alla precisione dei movimenti, alla capacità di supporto strutturale e all'affidabilità dell'alimentazione. Di seguito, vengono descritte le principali specifiche tecniche dei componenti selezionati e le motivazioni per il loro utilizzo.

Per costruire la struttura del ponte sono stati utilizzati **pannelli di multistrato** di dimensioni $60\text{ cm} \times 1\text{ m}$. Questo materiale è ideale per supportare il peso e le sollecitazioni derivanti dai movimenti dei servomotori. La struttura in multistrato consente anche una facile lavorabilità, permettendo il fissaggio di piastre di metallo, cerniere e servomotori con precisione.

Per il controllo del movimento dei piloni e delle oscillazioni orizzontali sono stati utilizzati **servomotori Diymore 15KG**. Tali motori, con ingranaggi in metallo e doppio cuscinetto a sfere, offrono una coppia elevata di 15 kg/cm e alta velocità, garantendo movimenti fluidi e potenti. Grazie alla loro struttura rinforzata, questi servomotori sono particolarmente adatti per il modello in scala, poiché supportano agevolmente il peso del ponte e permettono simulazioni accurate di cedimenti strutturali e movimenti sismici. Inoltre, l'elettronica digitale offre un controllo più preciso e reattivo rispetto ai modelli analogici, una caratteristica fondamentale per la stabilità e la ripetibilità dei movimenti richiesti dal progetto.

La scheda microcontrollore **Arduino Uno** è stata scelta per il controllo dei servomotori e dei pulsanti grazie alla sua versatilità e facilità di programmazione. Arduino Uno offre numerosi pin digitali e analogici, sufficienti per gestire i sei servomotori e i vari pulsanti del sistema. Inoltre, la vasta documentazione e la comunità di supporto rendono questa scheda ideale per progetti di prototipazione rapida e sperimentazione, facilitando la scrittura e il debug del codice.

È stato selezionato un **alimentatore da 12V** con corrente massima di 10A per garantire un'alimentazione stabile alla scheda Arduino e ai componenti elettronici. L'uso di un alimentatore di tale potenza assicura che non ci siano cali

di tensione durante il funzionamento simultaneo dei servomotori. Inoltre, è stato utilizzato un convertitore di tensione per ridurre l'alimentazione a 5V per i servomotori, prevenendo sovratensioni e prolungando la vita utile dei motori.

Per collegare i servomotori ai piloni e garantire movimenti precisi e controllati, sono state utilizzate **piastre di giunzione** in metallo lunghe 295 mm. Le piastre sono realizzate in acciaio inossidabile, un materiale resistente che assicura la durabilità della struttura anche durante le simulazioni prolungate. Le piastre sono forate, il che facilita il montaggio e il fissaggio dei servomotori ai piloni in modo sicuro e stabile. Tale design garantisce un collegamento saldo e una distribuzione uniforme delle forze durante i movimenti, contribuendo alla stabilità del ponte.

Sono state utilizzate **cerniere** in acciaio inossidabile per collegare i pannelli della strada. Le cerniere consentono ai pannelli di muoversi indipendentemente, simulando in modo realistico i cedimenti differenziali durante le prove di abbassamento dei piloni. La scelta di cerniere in acciaio garantisce durabilità e resistenza alla deformazione durante le simulazioni.

I componenti sono stati selezionati con cura per assicurare che il modello in scala del ponte possa simulare in modo realistico le condizioni di cedimento e oscillazione. La robustezza dei materiali e la precisione dei servomotori contribuiscono a replicare fedelmente gli scenari di cedimento, rendendo il modello in scala un efficace strumento di studio.

3.3 Costruzione del modello fisico in scala

La fase di costruzione del modello in scala del ponte ha seguito attentamente le linee guida e gli schemi dettagliati descritti in precedenza, assicurando precisione e coerenza con il progetto. Il processo si è svolto in più passaggi, iniziando con la realizzazione della struttura in legno, proseguendo con l'assemblaggio dei meccanismi interni e la costruzione del circuito elettrico e concludendosi con l'installazione dei componenti della strada.

3.3.1 Realizzazione della struttura in legno

La costruzione del modello in scala ha avuto inizio con la realizzazione della struttura portante in multistrato. La prima parte completata è stata la base del ponte, che serve non solo come sostegno della struttura complessiva, ma anche come alloggio per i meccanismi interni, l'elettronica e l'alimentazione. La base è stata assemblata in modo stabile per supportare le sollecitazioni dei movimenti simulati e per garantire la corretta distribuzione del peso.

Successivamente, sono stati installati i tre piloni, posizionati in punti specifici della base come previsto nella progettazione iniziale. Ogni pilone è stato fissato con precisione per garantire stabilità e per permettere il corretto collegamento ai servomotori, come previsto dal progetto. I piloni, oltre a sostenere la strada del ponte, devono potersi muovere in modo controllato per simulare gli scenari di cedimento.



Figura 9 – Struttura portante e piloni

3.3.2 Costruzione dei meccanismi interni alla base

Con la struttura in legno completata, il passo successivo ha riguardato l'installazione dei meccanismi interni nella base del ponte. I sei servomotori sono

stati posizionati nei punti designati della base. Tre servomotori sono stati montati per generare movimenti verticali nei piloni, simulando l'abbassamento controllato, mentre gli altri tre servomotori sono stati destinati alle oscillazioni orizzontali per riprodurre le vibrazioni sismiche.

Per collegare i servomotori ai piloni, sono state utilizzate le piastre di metallo, montate tra i servomotori e i piloni per creare un punto di ancoraggio stabile. Tale configurazione consente di mantenere allineati i movimenti e di distribuire le forze uniformemente sui piloni durante le simulazioni. Inoltre, assicura che i movimenti dei servomotori si trasmettano efficacemente ai piloni, evitando sforzi eccessivi sui singoli componenti.

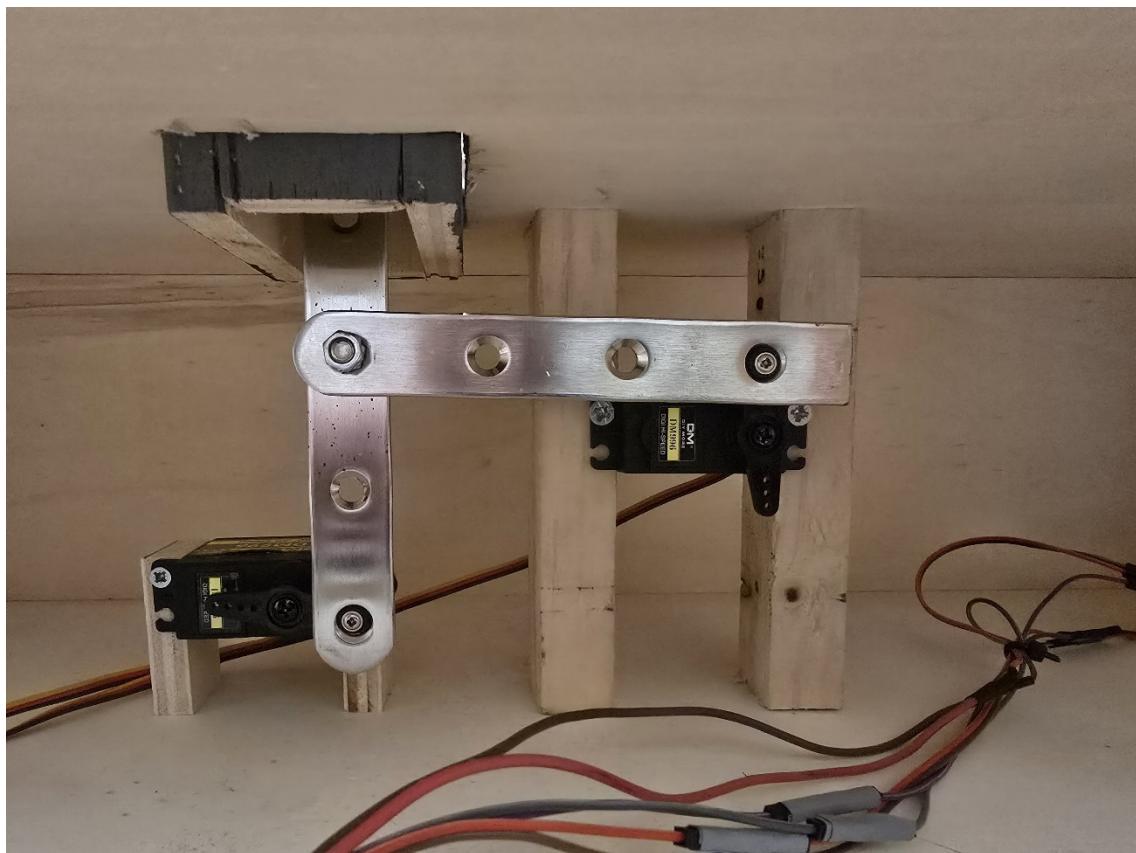


Figura 10 – Meccanismi interni

3.3.3 Costruzione dello schema elettrico

Una volta completato il montaggio meccanico, è stato costruito lo schema elettrico, seguendo attentamente il progetto elettronico preliminare. I servomotori sono stati collegati alla scheda Arduino Uno, che funge da unità di controllo centrale. Inoltre, sono stati collegati i pulsanti di controllo, ciascuno associato a uno specifico movimento, e gli alimentatori necessari.

Per monitorare il corretto funzionamento dei servomotori e verificare la stabilità dell'alimentazione, è stato installato un LED collegato al circuito a 5V condiviso con i servomotori. Il LED permette di rilevare eventuali cali di tensione nel circuito: se l'intensità del LED diminuisce, ciò può indicare un abbassamento della tensione, suggerendo che uno o più servomotori potrebbero non funzionare correttamente. In questo modo, è possibile intervenire rapidamente in caso di malfunzionamento, garantendo l'affidabilità del sistema.

Il circuito elettrico è stato testato attentamente per verificare che tutti i collegamenti fossero solidi e che non ci fossero interferenze nel funzionamento dei servomotori e dei pulsanti. La disposizione ordinata dei cavi e l'adeguato fissaggio della componentistica interna hanno contribuito a rendere il circuito affidabile e facile da manutenere.

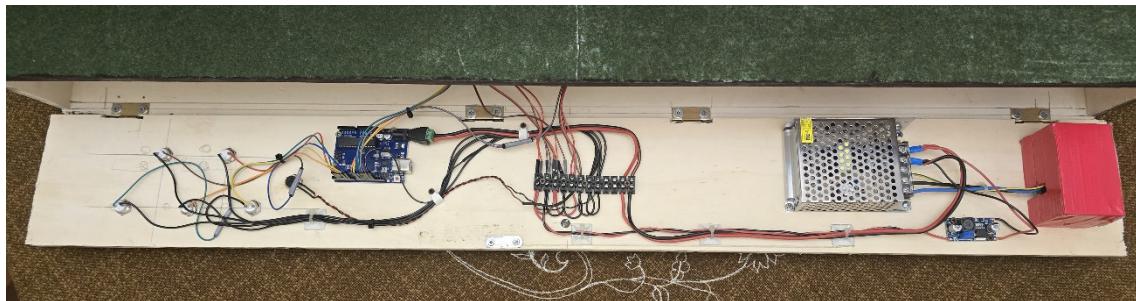


Figura 11 – Circuito elettrico

3.3.4 Costruzione dei pezzi della strada

L'ultimo passaggio della costruzione ha riguardato la realizzazione e l'assemblaggio della strada del ponte. I pannelli di multistrato, tagliati in sezioni corrispondenti alla larghezza del ponte, sono stati collegati tra loro tramite cerniere in acciaio inossidabile. Tale accorgimento permette ai pannelli di muoversi in modo indipendente, simulando efficacemente i cedimenti differenziali durante le prove.

Completata la struttura, il modello in scala è stato rifinito per ottenere un aspetto più realistico. La superficie della strada e delle parti visibili è stata dipinta con vernice all'acqua, scelta per la sua facilità d'uso. Sono stati inoltre aggiunti dettagli decorativi come piccoli ciuffi di erba artificiale e guard rail, che contribuiscono a rendere il modello in scala più accattivante e vicino a una rappresentazione realistica di un viadotto.



Figura 12 – Foto del modello in scala

3.4 Scrittura del codice Arduino e taratura dei parametri

Per soddisfare i requisiti del progetto, è stato sviluppato un codice specifico per Arduino, strutturato per consentire una gestione indipendente dei movimenti dei piloni e simulare un terremoto realistico. Il codice risponde a diverse condizioni, come il controllo della velocità dei movimenti, la regolazione dell'intensità del terremoto e la gestione degli stress sui servomotori, garantendo che ogni azione simuli accuratamente le dinamiche richieste.

3.4.1 Scenari gestiti dal codice

Il codice è stato sviluppato per rispondere a specifici scenari:

- Ogni pilone può abbassarsi in modo indipendente dagli altri tramite tre pulsanti, uno per ciascun pilone.
- Il movimento di abbassamento è lento e controllato, simulando un cedimento strutturale graduale.
- È possibile regolare la lunghezza dell'abbassamento di ogni pilone.
- La simulazione del terremoto è gestita dai tre servomotori orizzontali che sono attivati da un pulsante separato. L'intensità delle oscillazioni sismiche può essere regolata all'interno del codice.

Per ottenere gli effetti desiderati e mantenere il controllo della stabilità del ponte, sono state introdotte diverse costanti e funzioni specifiche.

3.4.2 Taratura dei servomotori

Nella fase di taratura sono state definite le costanti che rappresentano le posizioni iniziali di ogni servomotore. Tali costanti, come *initialStateVerticalRight*, *initialStateVerticalCenter* e *initialStateVerticalLeft* per i servomotori verticali, e *initialStateHorizontalRight*, *initialStateHorizontalCenter* e *initialStateHorizontalLeft* per quelli orizzontali, regolano la posizione di partenza di ogni

servomotore. La taratura è stata effettuata collegando Arduino ad un computer, modificando gradualmente i valori ed osservando il comportamento del modello in scala. Tale passaggio è stato essenziale per ottenere un allineamento preciso con la struttura fisica del ponte, assicurando che i movimenti fossero naturali e corretti.

```
// Calibration of servomotors
const int initialStateVerticalRight = 90;
const int initialStateVerticalCenter = 90;
const int initialStateVerticalLeft = 90;
const int initialStateHorizontalRight = 99;
const int initialStateHorizontalCenter = 101;
const int initialStateHorizontalLeft = 97;
```

3.4.3 Limiti di movimento

Le costanti *maxVertical*, *minVertical*, *maxHorizontal* e *minHorizontal* definiscono i limiti di movimento dei servomotori, regolando rispettivamente quanto i piloni possono abbassarsi e quanto possono oscillare in orizzontale durante la simulazione del terremoto. Questi limiti consentono di gestire l'ampiezza dei movimenti e sono tarati per simulare realisticamente il comportamento del ponte. In particolare, la variabilità di *maxVertical* e *minVertical* permette di regolare la lunghezza del movimento dei piloni, mentre *maxHorizontal* e *minHorizontal* regolano l'intensità delle oscillazioni orizzontali durante il terremoto.

```
// Movement limits
const int maxVertical = 30;
const int minVertical = -30;
const int maxHorizontal = 13;
const int minHorizontal = -13;
```

3.4.4 Funzione di movimento graduale

La funzione `writeSlowly()` rappresenta un elemento chiave del progetto. Questa funzione ha il compito di far muovere lentamente il servomotore verso la posizione di destinazione, imitando un movimento controllato e graduale, essenziale per la simulazione del cedimento del pilone.

In particolare, per evitare uno stress eccessivo sui servomotori quando questi sollevano i piloni, la funzione incorpora una logica di “rimbalzo”, in cui i servomotori si muovono di alcuni gradi oltre la posizione target (in base alla costante `servoStressIndex`) e poi ritornano gradualmente alla posizione desiderata.

Questa gestione specifica degli angoli aiuta a ridurre lo sforzo interno al servomotore durante il movimento verso l'alto, un aspetto fondamentale per prevenire danni ai motori durante il funzionamento continuo del modello in scala.

```
void writeSlowly(Servo& servo, int target) {
    int initialValue = servo.read();

    if (initialValue > target) {
        for (int i = initialValue; i > target; i--) {
            servo.write(i);
            delay(20);
        }
    } else {
        if (initialValue != target) {
            for (int i = initialValue;
                 i < target + servoStressIndex; i++) {
                servo.write(i);
                delay(20);
            }
            delay(200);
        }
    }
}
```

```

        servo.write(target);
    }
}
}

```

3.4.5 Funzione di relax

La funzione *relaxServos()* è stata implementata per rilassare i servomotori, evitando sforzi inutili quando i movimenti sismici sono completati. Permette, dunque, di eseguire un piccolo movimento in senso inverso (di 2 gradi), seguito dal ritorno alla posizione originaria, sfruttando la funzione *writeSlowly()* per evitare movimenti bruschi. L'idea è quella di ridurre la tensione accumulata sui servomotori durante l'attivazione del terremoto, garantendo così una durata maggiore e una migliore stabilità operativa.

```

void relaxServos() {
    servoVerticalRight.write(servoVerticalRight.read() - 2);
    writeSlowly(servoVerticalRight,
                servoVerticalRight.read() + 2);
    servoVerticalCenter.write(servoVerticalCenter.read() - 2);
    writeSlowly(servoVerticalCenter,
                servoVerticalCenter.read() + 2);
    servoVerticalLeft.write(servoVerticalLeft.read() - 2);
    writeSlowly(servoVerticalLeft,
                servoVerticalLeft.read() + 2);
}

```

3.4.6 Gestione degli scenari e dei pulsanti

I pulsanti di controllo permettono di attivare i vari scenari previsti, come l'abbassamento individuale dei piloni e l'attivazione del terremoto. Ogni pilone è associato ad un pulsante specifico che ne controlla l'abbassamento tramite la funzione *handleButton()*. Allo stesso modo, la funzione *handleButton-*

Heartquake() gestisce il pulsante che attiva e disattiva il terremoto. Entrambe le funzioni verificano lo stato del pulsante e, in base ad esso, attivano i movimenti definiti.

Il sistema di debouncing integrato, implementato con un breve ritardo, evita che i pulsanti registrino più attivazioni consecutive per errore, garantendo così un controllo preciso e affidabile.

3.4.7 Esecuzione del codice e configurazione iniziale

Nella funzione *setup()*, vengono inizializzati i servomotori e i pulsanti, assegnando i pin corrispondenti e impostando le posizioni di partenza dei servomotori in base alle costanti di calibrazione. La variabile *vGap*, che regola l'altezza iniziale dei servomotori verticali, assicura che i piloni partano da una posizione sollevata.

```
void setup() {  
    // Attaching the servo motors to the corresponding pins  
    servoVerticalRight.attach(pinServoVerticalRight);  
    servoVerticalCenter.attach(pinServoVerticalCenter);  
    servoVerticalLeft.attach(pinServoVerticalLeft);  
    servoHorizontalRight.attach(pinServoHorizontalRight);  
    servoHorizontalCenter.attach(pinServoHorizontalCenter);  
    servoHorizontalLeft.attach(pinServoHorizontalLeft);  
  
    // Setting up buttons with internal pull-up resistors  
    pinMode(pinButtonVerticalRight, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(pinButtonVerticalCenter, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(pinButtonVerticalLeft, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(pinButtonCenter, INPUT_PULLUP);  
    pinMode(pinButtonHeartquake, INPUT_PULLUP);
```

```
// Initial positions  
int vGap = maxVertical + servoStressIndex;  
servoVerticalRight.write(initialStateVerticalRight + vGap);  
servoVerticalCenter.write(initialStateVerticalCenter+vGap);  
servoVerticalLeft.write(initialStateVerticalLeft + vGap);  
servoHorizontalRight.write(initialStateHorizontalRight);  
servoHorizontalCenter.write(initialStateHorizontalCenter);  
servoHorizontalLeft.write(initialStateHorizontalLeft);  
delay(200);  
  
Serial.begin(9600);  
} //setup
```

Il setup iniziale stabilisce un punto di riferimento per tutti i movimenti futuri, facilitando la gestione delle simulazioni.

Capitolo 4

Analisi dei dati e GUI

Di seguito viene descritto il processo di analisi dei dati raccolti dai sensori inerziali di un dispositivo mobile e la loro conversione in angoli di rollio (roll), beccheggio (pitch) e imbardata (yaw). Viene inoltre presentata l'applicazione desktop sviluppata in Python per monitorare in tempo reale i movimenti del ponte e viene illustrato il processo di simulazione che sfrutta il modello in scala di ponte realizzato.

4.1 Conversione dei dati inerziali

I dati acquisiti dai sensori accelerometrici e magnetici del dispositivo mobile vengono elaborati utilizzando le formule introdotte nel Capitolo 2. La conversione in angoli è implementata nel file ‘sensors.py’:

- **Roll:** calcolato con la formula $r = \arctan_2\left(\frac{a_{s,y}}{a_{s,z}}\right)$.
- **Pitch:** calcolato come $p = \arctan_2\left(\frac{a_{s,x}}{\sqrt{a_{s,y}^2 + a_{s,z}^2}}\right)$.
- **Yaw:** stimato utilizzando il campo magnetico e applicando trasformazioni matriciali per tenere conto dell'influenza dell'orientamento.

Il seguente codice illustra il calcolo di roll e pitch:

```
if sensor_type == 'android.sensor.accelerometer':  
    a_sx, a_sy, a_sz = values  
    self.roll = math.atan2(a_sy, a_sz)
```

```

self.pitch = math.atan2(a_sx, math.sqrt(a_sy ** 2 +
                                         a_sz ** 2))

```

Ecco invece l'implementazione di yaw, che utilizza i valori del sensore magnetico:

```

if sensor_type == 'android.sensor.magnetic_field':
    m_sx, m_sy, m_sz = values
    alpha_mf = m_sx * math.cos(self.pitch) + (m_sz *
                                                math.cos(self.roll) + m_sy * math.sin(self.roll)) *
                                                math.sin(self.pitch)
    beta_mf = m_sz * math.sin(self.roll) - m_sy *
                                                math.cos(self.roll)
    matr = np.array([[alpha_mf, beta_mf], [-beta_mf,
                                              alpha_mf]])
try:
    matr_inv = np.linalg.inv(matr)
    vett = np.array([self.E, self.N])
    ris = np.dot(matr_inv, vett)
    c_y, s_y = ris[0], ris[1]
    self.yaw = math.atan2(c_y, s_y)
except np.linalg.LinAlgError:
    print("Matrix inversion failed due to a
          singular matrix.")
return

```

4.2 Filtraggio dei dati

Per migliorare l'accuratezza dei dati grezzi, è stato applicato un filtro basato sul seguente algoritmo:

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_0 = \alpha_0, & se k = 0 \\ \hat{\alpha}_k = \beta \hat{\alpha}_{k-1} + (1 - \beta) \alpha_k, & se k > 0, \\ & con \beta \in [0,1] \\ & k = k + 1 \end{cases}$$

Dove β è un parametro che regola l'intensità del filtro:

- $\beta \rightarrow 1$: maggiore effetto filtrante.
- $\beta \rightarrow 0$: minore effetto filtrante.

Inoltre, per garantire la continuità degli angoli, sono state normalizzate le misure nel range $[-\pi, \pi]$. Ciò è implementato nel metodo *normalize_angle* nel file ‘utils.py’:

```
def normalize_angle(angle):
    while angle > math.pi:
        angle -= 2 * math.pi
    while angle < -math.pi:
        angle += 2 * math.pi
    return angle
```

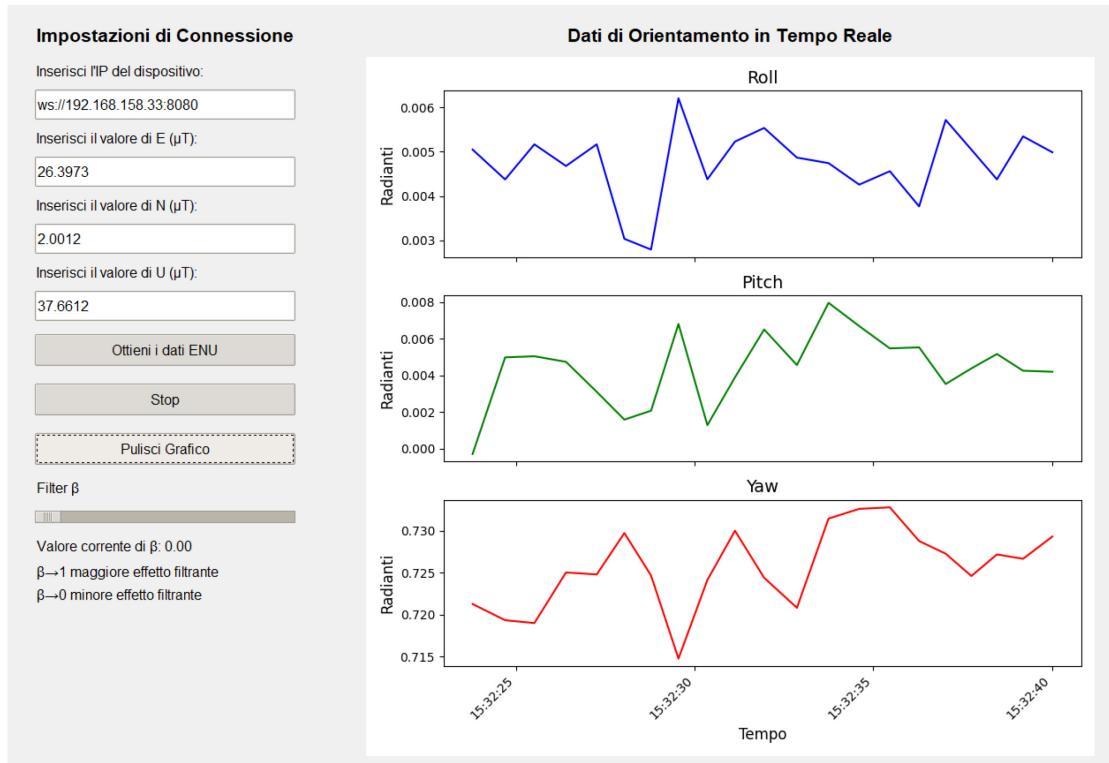


Figura 13 - Roll, pitch e yaw prima del filtraggio

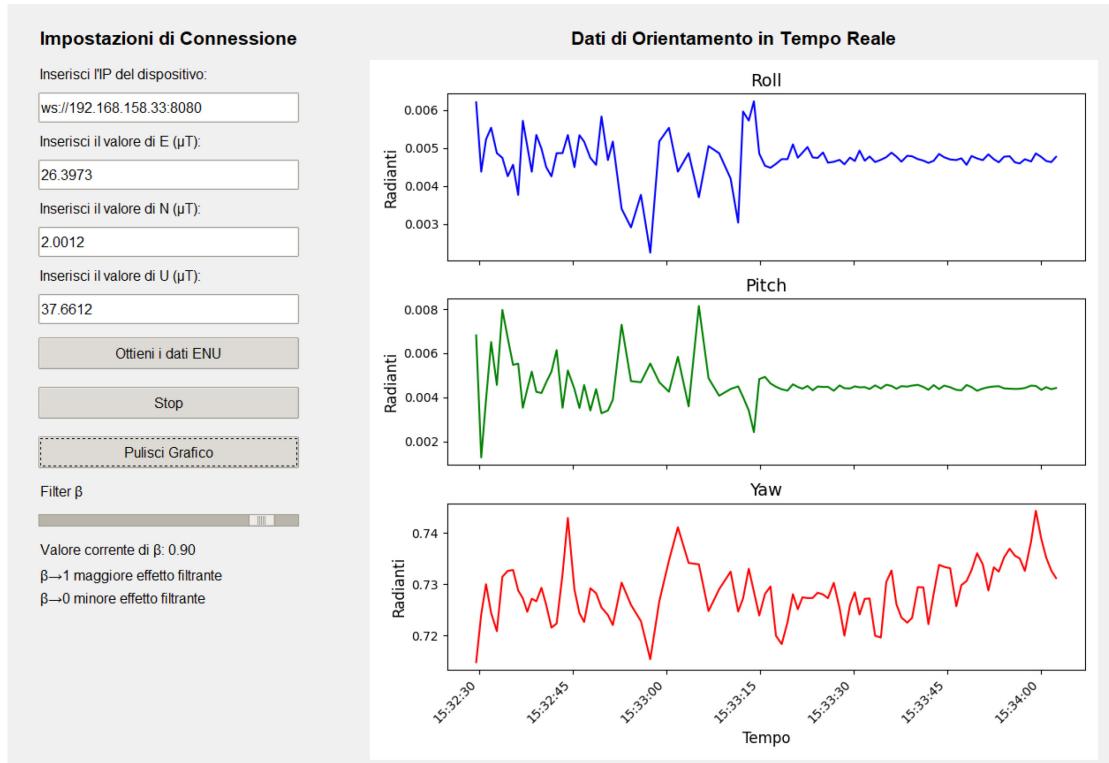


Figura 14 - Roll, pitch e yaw dopo il filtraggio

4.3 GUI e visualizzazione dei dati

L'applicazione desktop (13) è stata sviluppata utilizzando la libreria *tkinter* per la GUI e *matplotlib* per la visualizzazione dei dati. I dati di roll, pitch e yaw vengono rappresentati graficamente in tempo reale.

L'applicazione mobile **SensorServer** (14) completa il setup sperimentale fornendo la connessione tra il dispositivo mobile e l'app desktop. SensorServer trasforma il telefono in un server WebSocket, permettendo di trasmettere in tempo reale i dati dei sensori accelerometrici, giroscopici e magnetici. L'app desktop si connette al telefono tramite l'indirizzo IP fornito da SensorServer, consentendo di raccogliere e analizzare i dati.

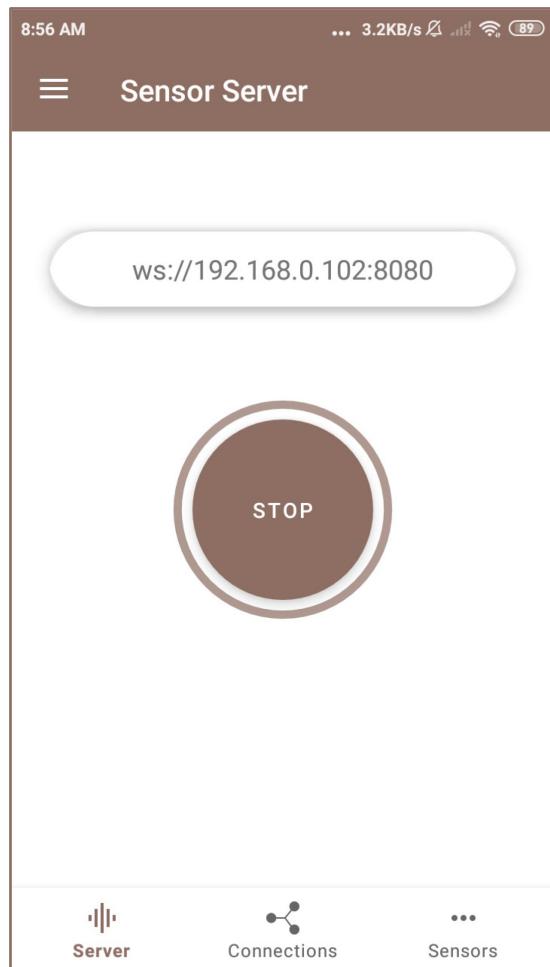


Figura 15 - Applicazione SensorServer

La GUI offre le seguenti funzionalità:

- Connessione al dispositivo mobile tramite un indirizzo IP fornito dall'app SensorServer.
- Inserimento dei valori ENU, calcolabili tramite un link diretto integrato nell'app.
- Avvio della ricezione dei dati e gestione del filtro β .
- Visualizzazione dei dati di orientamento in tre grafici distinti.

Nel file ‘gui.py’, la funzionalità di animazione per il grafico è gestita dal metodo `animate`. Esso aggiorna periodicamente i dati raccolti e li visualizza in tre grafici separati per roll, pitch e yaw:

```
def animate(self, i):
    if self.running:
        self.x_graph.append(dt.datetime.now())
        self.y_graph_roll.append(self.filtered_roll)
        self.y_graph_pitch.append(self.filtered_pitch)
        self.y_graph_yaw.append(self.filtered_yaw)
        ...
    
```

4.4 Test e risultati

Per valutare l'efficacia del sistema sviluppato e analizzare il comportamento dinamico del modello in scala, sono stati eseguiti quattro esperimenti, ciascuno mirato a testare scenari di cedimento strutturale e vibrazioni indotte da terremoti.

4.4.1 Primo test: rilevazione del cedimento strutturale tra due piloni

Il primo test è stato eseguito posizionando il dispositivo mobile al centro del tratto di strada tra due piloni. Dopo aver avviato l'app mobile SensorServer e collegato l'app desktop al dispositivo tramite l'indirizzo IP, sono stati inseriti i dati ENU e avviata la ricezione dei dati. A questo punto, uno dei due piloni tra i quali si trovava il sensore è stato abbassato. Dal grafico del roll è emerso chiaramente un angolo di rotazione significativo, evidenziando l'inclinazione del pannello stradale. Il risultato dimostra che il sensore posizionato tra due piloni è in grado di rilevare efficacemente un cedimento strutturale.

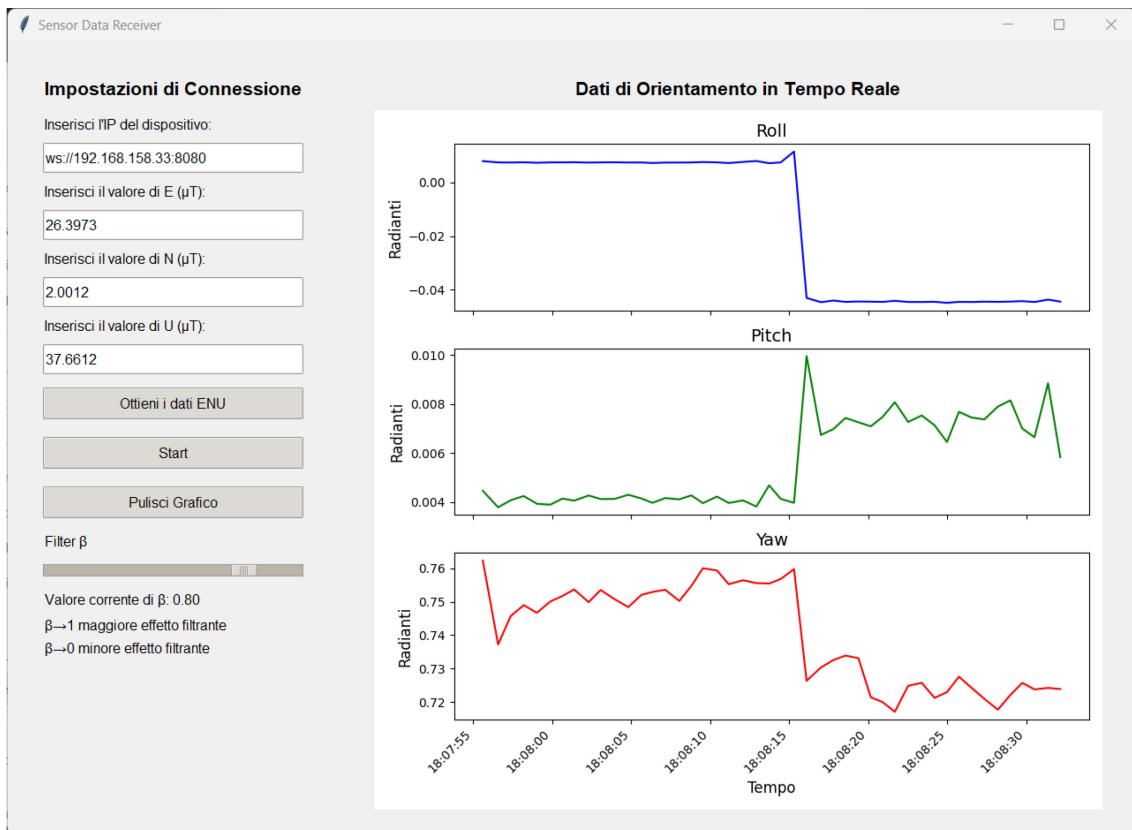


Figura 16 – Rilevamento del cedimento strutturale nel grafico del roll con sensore posizionato tra due piloni

4.4.2 Secondo test: rilevazione del cedimento strutturale sopra un pilone

Nel secondo test, il dispositivo è stato posizionato direttamente sopra un pilone, quindi è stata avviata la ricezione dall'app desktop. Quando il pilone su cui era posizionato il sensore è stato abbassato, i grafici hanno mostrato una rotazione visibile, ma di entità significativamente inferiore rispetto al posizionamento tra due piloni. Il risultato evidenzia che, pur registrando una lieve inclinazione, il sensore sopra un pilone è meno sensibile ai cedimenti strutturali rispetto a quando posizionato tra due piloni.

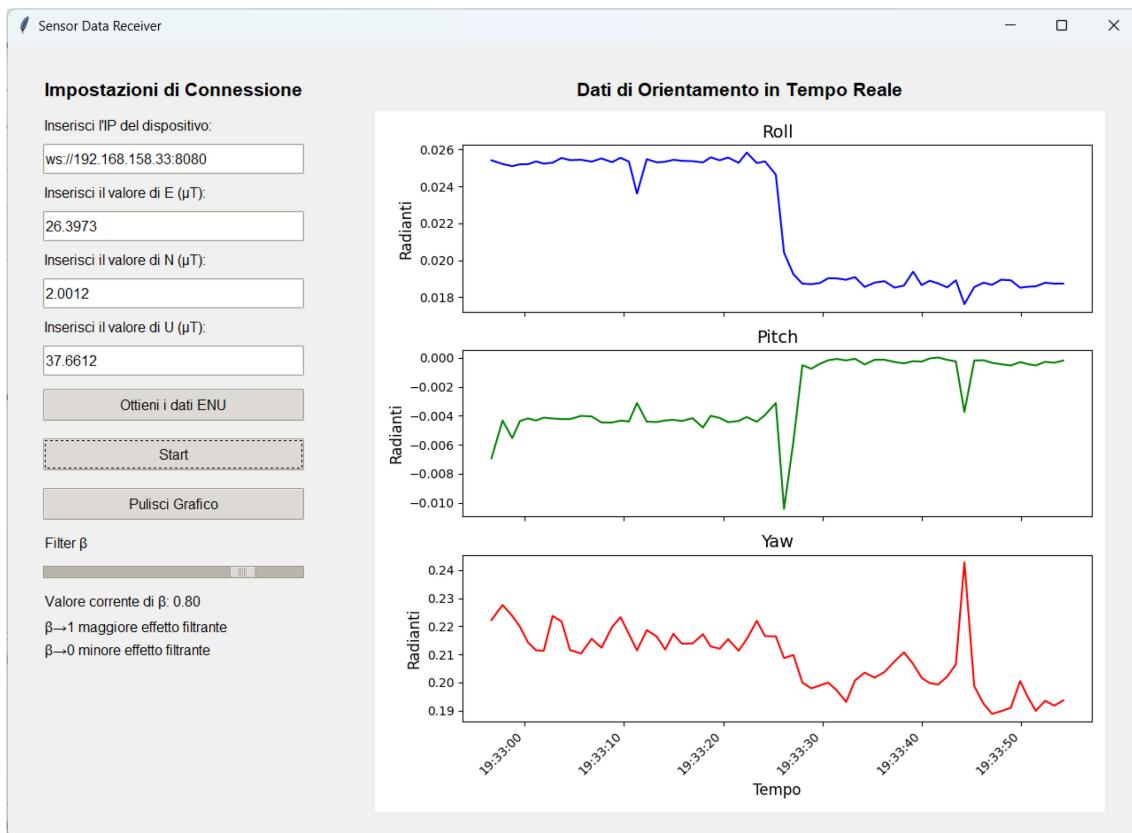


Figura 17 - Rilevamento del cedimento strutturale nel grafico del roll con sensore posizionato sopra un pilone

4.4.3 Conclusione dei primi due esperimenti

Dai primi due esperimenti è emerso che il sensore posizionato tra due piloni è più efficace nel rilevare i cedimenti strutturali rispetto a un sensore posto sopra un singolo pilone. Tale risultato è attribuibile al fatto che, tra due piloni, le inclinazioni e le rotazioni della strada risultano più evidenti e rilevabili.

4.4.4 Terzo esperimento: rilevazione di un terremoto tra due piloni

Nel terzo test, il dispositivo mobile è stato nuovamente posizionato tra due piloni, e il terremoto simulato è stato avviato. I grafici di roll, pitch e yaw hanno evidenziato oscillazioni chiare e ben definite, indicando che il sensore è in grado di rilevare le vibrazioni indotte dal terremoto anche in questa posizione.

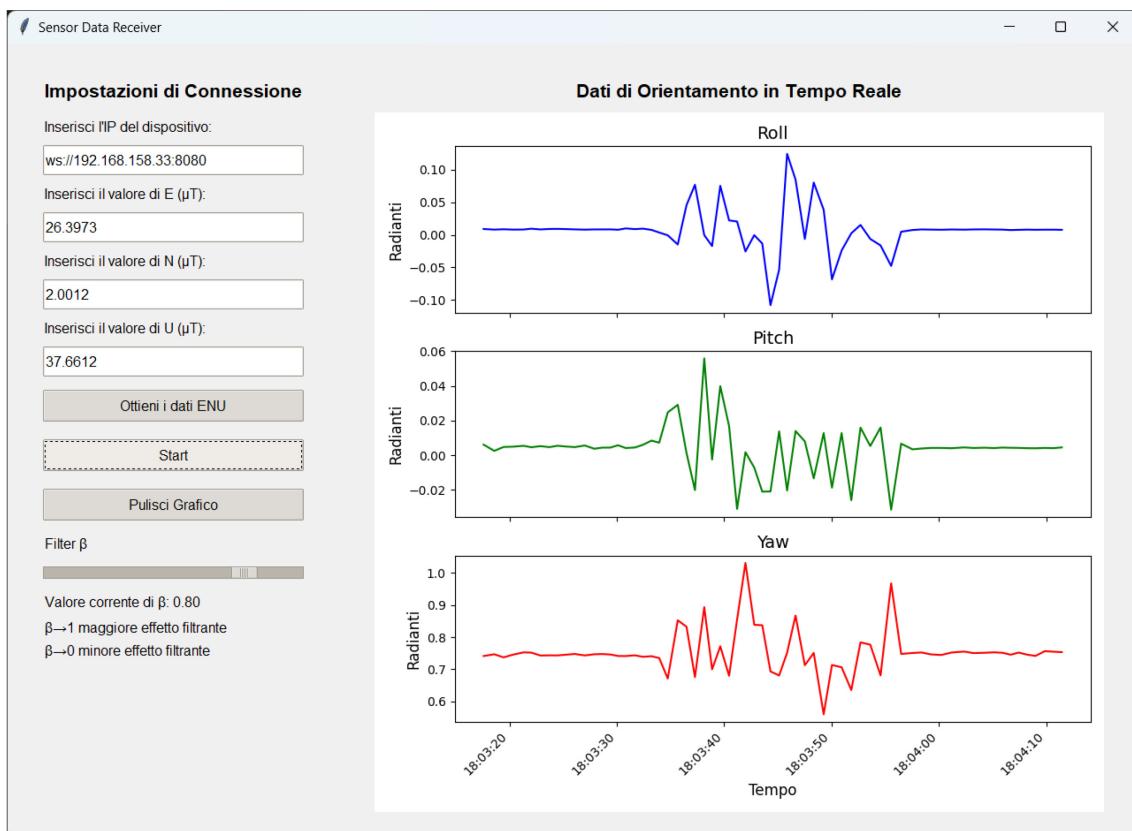


Figura 18 – Rilevamento del terremoto con sensore tra due piloni

4.4.5 Quarto esperimento: rilevazione di un terremoto sopra un pilone

Nel quarto e ultimo test, il dispositivo mobile è stato posizionato direttamente sopra un pilone, e il terremoto simulato è stato avviato. In tale configurazione, i grafici di roll, pitch e yaw hanno mostrato oscillazioni più marcate rispetto al posizionamento tra due piloni. Il risultato suggerisce che il sensore posto sopra un pilone è più efficace nel rilevare terremoti, poiché registra direttamente le vibrazioni trasmesse dalla base della struttura.

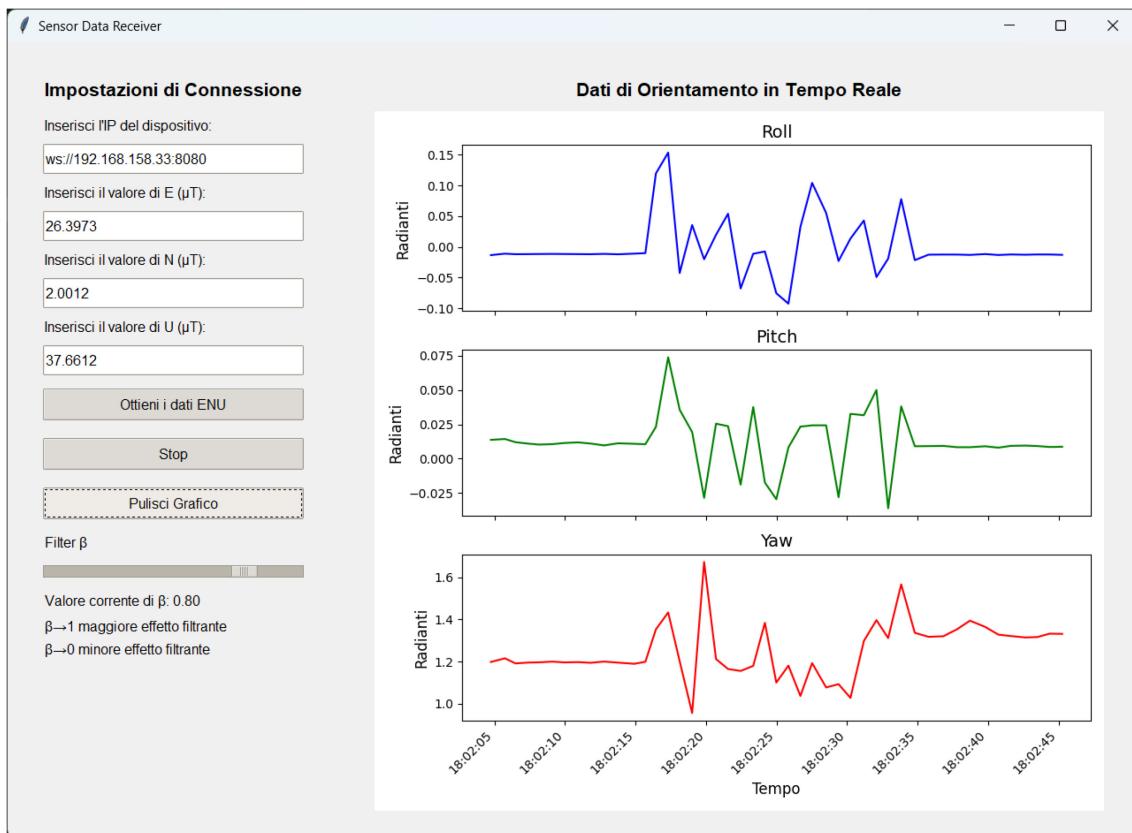


Figura 19 – Rilevamento del terremoto con sensore posizionato sopra il pilone

Dai quattro esperimenti condotti, è possibile dedurre che il posizionamento ottimale dei sensori dipende dal fenomeno che si intende monitorare. Per rilevare cedimenti strutturali, la posizione ideale è tra due piloni, dove le rotazioni dei pannelli sono più evidenti. Per rilevare vibrazioni indotte da terremoti, invece, i

sensori posizionati direttamente sopra i piloni si sono dimostrati più efficaci, registrando oscillazioni più marcate su tutti e tre i grafici.

Conclusioni

Il presente elaborato ha avuto come obiettivo principale il monitoraggio di fenomeni strutturali complessi come i cedimenti dei piloni e le vibrazioni indotte dai terremoti. Il sistema sperimentale sviluppato ha combinato un modello in scala di ponte con un dispositivo mobile per la raccolta dei dati e un'applicazione desktop per la loro elaborazione e visualizzazione.

Gli obiettivi iniziali sono stati pienamente raggiunti. Il progetto ha dimostrato che è possibile utilizzare sensori di uso comune, come quelli integrati negli smartphone, per rilevare con precisione i movimenti di un ponte. Gli algoritmi implementati hanno permesso di convertire i dati grezzi in angoli di rollio, beccheggio e imbardata, offrendo una rappresentazione dettagliata delle oscillazioni strutturali. Inoltre, l'applicazione desktop ha fornito un'interfaccia intuitiva per visualizzare in tempo reale i dati raccolti, rendendo il sistema facilmente utilizzabile per esperimenti e analisi.

I test effettuati hanno evidenziato risultati interessanti riguardo al posizionamento ottimale dei sensori. Si è osservato, infatti, che i punti migliori per rilevare i cedimenti strutturali si trovano nel mezzo tra due piloni, dove le oscillazioni risultano amplificate e più evidenti. D'altra parte, le vibrazioni indotte dai terremoti sono state meglio rilevate dai sensori posizionati sui piloni, con oscillazioni chiaramente visibili su tutti e tre i grafici di roll, pitch e yaw. Tali risultati sottolineano l'importanza di un posizionamento strategico dei sensori per ottenere dati significativi.

Nonostante l'ottimo contenuto informativo ottenuto, è corretto sottolineare i limiti dell'approccio proposto. L'uso di un dispositivo mobile introduce inevitabilmente delle approssimazioni rispetto ai sensori professionali, che potrebbero offrire maggiore accuratezza e affidabilità. Tuttavia, il progetto dimostra come soluzioni accessibili e facilmente replicabili possano rappresentare un primo passo verso l'implementazione di sistemi di monitoraggio strutturale più sofisticati.

In prospettiva, il lavoro svolto potrebbe essere esteso per applicazioni su ponti reali, integrando sensori e algoritmi di stima degli angoli più avanzati e testando ulteriormente la validità dell'approccio proposto. In definitiva, la strategia descritta rappresenta un contributo significativo alla ricerca nel campo del monitoraggio strutturale, evidenziando come la tecnologia possa essere sfruttata per affrontare problemi complessi e migliorare la sicurezza delle infrastrutture.

Bibliografia

1. Redazione Tecnica. Cedimento strutturale: cause, effetti e soluzioni. *BibLus*. [Online] 30 Ottobre 2023. <https://biblus.acca.it/cedimento-strutturale/>.
2. Buoso, Alessandra e Coppola, Luigi . Le lesioni e i quadri fessurativi di strutture in c.a. dovuti ai cedimenti fondazionali. *Ingenio*. [Online] 25 Aprile 2022. <https://www.ingenio-web.it/articoli/i-dissesti-strutturali-delle-opere-in-c-a-i-cedimenti-fondazionali/>.
3. Redazione Tecnica. Cedimenti e strutture. Quando si manifestano e come stimarli? *Ediltecnico*. [Online] 27 Novembre 2019.
<https://ediltecnico.it/cedimenti-e-strutture-quando-si-manifestano-e-come-stimarli/>.
4. Gianni Bizzotto, Daniele Brusarosco. Le verifiche geotecniche previste dalle nuove Norme Tecniche 2018 in Sismicad. *Ingenio*. [Online] 19 Marzo 2018.
<https://www.ingenio-web.it/articoli/fondazioni-geotecnica-e-ntc-2018-le-soluzioni-con-sismicad/>.
5. Palmisano, Fabrizio. Corso di "Tecnica delle costruzioni". *dicatechpoliba.it*. [Online] 2013/2014.
https://docs.dicatechpoliba.it/filemanager/209/CORSO_TECNICA_2013_2014/Palmisano%20-%20Fondazioni%20-%201.pdf.
6. Norme tecniche per il progetto sismico dei ponti. *regione.abruzzo.it*. [Online]
https://www.regione.abruzzo.it/zonesismiche/File_pdf/norme%20tecniche%20ponti.pdf.
7. Farrell, J.A. *Aided Navigation*. s.l. : McGraw-Hill.
8. Titterton, D. e Weston, J. . *Strapdown Inertial Navigation Technology*. s.l. : Peter Peregrinus Ltd, 1997.
9. Nastro, Vincenzo. *Navigazione inerziale e integrate*. s.l. : Alfredo Guida Editore, 2004.

10. Murgia, Michele. Valutazione sperimentale degli effetti sistematici in un sistema di taratura accelerometrico triassiale. *webthesis.biblio.polito.it*. [Online] 2021/2022. <https://webthesis.biblio.polito.it/23393/1/tesi.pdf>.
11. Magnetometro – Codevintec. *codevintec.it*. [Online]
<https://www.codevintec.it/magnetometro/>.
12. Analisi e sintesi di filtri digitali. *teoriadeisegnali.it*. [Online]
<https://teoriadeisegnali.it/libro/html/libro-5.2.html> .
13. Florio, Riccardo. *Applicazione desktop*. 2024.
14. Farooq, Umer. *Applicazione ServerSensor*.
15. Rogers, R.M. . *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. s.l. : AIAA Education Series, 2000.