



**Università degli Studi di Palermo**

Dipartimento di Ingegneria Informatica  
Curriculum Intelligenza Artificiale

# **Robot assistivo per fisioterapia**

*Progetto di Intelligenza Artificiale 2, Robotica e Robotica  
medica*

**Autori:**

Stefano Corrao  
Antonino La Barbera  
Riccardo Sciacca  
Davide Sgroi

**Professori:**

ch.mo Prof. Antonio Chella  
Prof.ssa Valeria Seidita

Anno Accademico 2024–2025

# 1 Introduzione

La fisioterapia rappresenta una componente essenziale nei percorsi di riabilitazione, sia in ambito post-operatorio che nel recupero da patologie neurologiche, come l'ictus, e nelle terapie dedicate ai pazienti anziani. Attraverso esercizi mirati, i trattamenti fisioterapici permettono di ristabilire la mobilità, migliorare la qualità della vita e ridurre il rischio di ricadute o complicanze.

Nonostante la loro importanza, i percorsi fisioterapici presentano alcune criticità. I terapeuti, infatti, sono spesso sottoposti a un carico di lavoro elevato, che rende complesso garantire un'assistenza continuativa e individualizzata a ciascun paziente. Allo stesso tempo, l'efficacia della riabilitazione dipende fortemente dall'impegno del paziente, che necessita di costante motivazione e di un feedback immediato per poter eseguire correttamente gli esercizi proposti. In assenza di un controllo diretto e regolare, il rischio è che gli esercizi vengano svolti in modo parziale, scorretto o che vengano abbandonati, compromettendo così il percorso riabilitativo.

Negli ultimi anni, la ricerca nel campo della robotica applicata alla fisioterapia ha evidenziato un crescente interesse verso l'impiego di sistemi robotici a supporto della riabilitazione. Da un lato, sono stati sviluppati robot indossabili, come esoscheletri e ortesi motorizzate, in grado di assistere il movimento degli arti e favorire il recupero motorio attraverso esercizi ripetuti e controllati. Questi sistemi hanno mostrato risultati promettenti soprattutto in ambito post-ictus e nella riabilitazione degli arti inferiori. Dall'altro lato, si stanno diffondendo robot sociali e da compagnia, come Pepper o Nao, che, pur non intervenendo fisicamente sul movimento, svolgono un ruolo fondamentale di motivazione, guida e monitoraggio. Tali robot possono fornire istruzioni vocali, mostrare esercizi attraverso i propri movimenti e incoraggiare il paziente a completare correttamente la sessione, migliorando così l'aderenza al percorso terapeutico. Questa distinzione mette in luce come la robotica riabilitativa stia evolvendo in due direzioni complementari: quella mecatronica, focalizzata sul supporto fisico al movimento, e quella cognitivo-assistiva, rivolta all'interazione, alla supervisione e al supporto motivazionale.

In questo contesto, la robotica assistiva si configura come una possibile risposta innovativa a tali esigenze. I robot sociali e di servizio possono essere impiegati come supporto al terapeuta, affiancando il paziente nello svolgimento degli esercizi e fornendo incoraggiamento, monitoraggio e correzioni in tempo reale. È importante sottolineare che il robot non si pone come sostituto della figura professionale, bensì come strumento complementare, capace di aumentare la qualità e la continuità della terapia. Grazie alle tecnologie di interazione uomo-robot e all'integrazione con sistemi di intelligenza artificiale, è possibile pensare a soluzioni personalizzate che si adattino alle caratteristiche del singolo paziente, favorendo una maggiore aderenza al percorso terapeutico e migliorandone gli esiti.

## 2 Obiettivi

Il progetto si propone di sviluppare un **assistente robotico in grado di supportare l'utente durante le sessioni di fisioterapia**, con particolare attenzione all'interazione personalizzata e al monitoraggio dei progressi. L'obiettivo principale è consentire al robot di riconoscere efficacemente i movimenti dell'utente, analizzandone la correttezza e identificando eventuali posture scorrette. Questo compito è fondamentale per garantire che ogni esercizio venga svolto in maniera sicura ed efficace, prevenendo possibili traumi o sovraccarichi muscolari.

Un altro obiettivo chiave consiste nel **guidare l'utente nella correzione della postura**. Il robot è progettato per fornire feedback immediato e chiaro, utilizzando la comunicazione vocale. Questo tipo di supporto permette all'utente di comprendere rapidamente gli errori e di correggerli autonomamente, aumentando la precisione dei movimenti e la qualità complessiva della sessione riabilitativa. La capacità del robot di offrire un feedback costante e motivazionale contribuisce anche a mantenere alta la motivazione del paziente, un fattore noto per influenzare significativamente l'aderenza e i risultati della fisioterapia.

Infine, il sistema è capace di **dimostrare gli esercizi fisioterapici in modo chiaro e comprensibile per l'utente**. Grazie ai suoi attuatori, Nao è in grado di riprodurre movimenti articolati, mostrando al paziente come eseguire correttamente l'esercizio richiesto. Questo approccio visivo facilita la comprensione, riducendo il rischio di errori legati a istruzioni solo verbali, e permette al paziente di avere un modello da imitare direttamente. La dimostrazione da parte del robot svolge quindi un duplice ruolo: da un lato, fornisce un riferimento pratico immediato che migliora l'apprendimento motorio; dall'altro, contribuisce ad aumentare il coinvolgimento e la motivazione del paziente, che percepisce l'interazione come più naturale e intuitiva.

## 3 Vista d'insieme del sistema

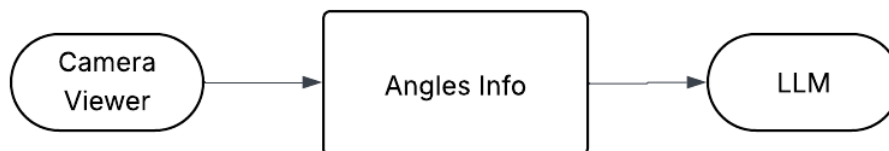


Figura 1: Schema a blocchi del sistema

L'architettura del sistema è strutturata secondo un modello a nodi, in linea con i principi dei middleware robotici, al fine di garantire modularità e chiarezza nella gestione del flusso informativo. Essa si compone principalmente di due nodi, collegati da un topic che funge da canale di comunicazione, e permette al robot NAO di percepire, elaborare ed erogare un feedback in tempo reale durante esercizi di fisioterapia.

Il primo nodo, denominato Camera Viewer, ha il compito di acquisire i flussi video provenienti dalle due camere integrate di NAO. I frame ottenuti vengono opportunamente combinati per ottenere una visione più ricca della scena e, successivamente, elaborati tramite la libreria MediaPipe Pose. Quest'ultima consente l'individuazione automatica dei landmark corporei dell'utente, dai quali vengono calcolati gli angoli articolari rilevanti per l'esercizio in corso. L'insieme di questi dati, che costituisce una rappresentazione numerica e strutturata della postura dell'utente, viene pubblicato sul topic Angles Info, rendendolo disponibile per ulteriori elaborazioni.

Il secondo nodo, denominato LLM, sottoscrive il topic Angles Info e riceve quindi in tempo reale i valori degli angoli calcolati dal Camera Viewer. A questi dati vengono affiancati gli angoli target, ossia quelli corrispondenti alla postura corretta del robot durante l'esercizio di riferimento. In questa fase, il nodo LLM costruisce un prompt che integra entrambe le informazioni e lo invia al modello linguistico Gemini. L'LLM è responsabile dell'analisi comparativa tra la postura dell'utente e quella ideale, e restituisce come output un messaggio in linguaggio naturale che suggerisce le correzioni necessarie per migliorare l'esecuzione del movimento.

Questa architettura realizza dunque un ciclo chiuso di percezione elaborazione interazione: i dati sensoriali vengono trasformati in conoscenza semantica attraverso MediaPipe, confrontati con un modello ideale tramite l'LLM, e infine convertiti in un feedback comprensibile e immediatamente fruibile dall'utente. Tale approccio consente a NAO di svolgere il ruolo di assistente alla fisioterapia, fornendo un supporto personalizzato e adattivo, capace di ridurre gli errori posturali e di favorire l'apprendimento motorio in modo progressivo.

## 4 Stima della postura

### 4.1 Rappresentazione dei landmarks con MediaPipe

*MediaPipe* è una libreria sviluppata da Google per l'elaborazione di flussi multimediali in tempo reale. Essa fornisce soluzioni di visione artificiale già ottimizzate per compiti come il face tracking, l'hand tracking e il body pose estimation. In particolare, il modulo *MediaPipe Holistic* consente di stimare congiuntamente i landmark di volto, mani e corpo a partire da immagini RGB, rendendolo adatto ad applicazioni di interazione uomo-robot.

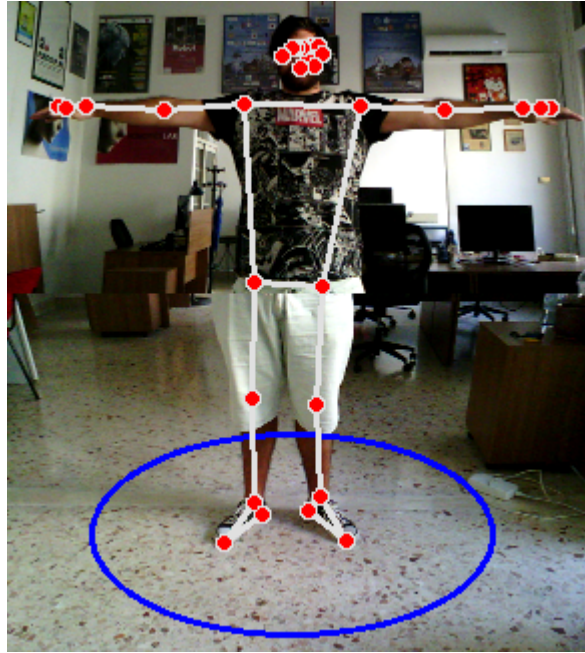


Figura 2: Landmark necessari per il calcolo di angoli e posa

Nel caso del pose estimation, MediaPipe utilizza reti neurali convoluzionali per rilevare i principali punti anatomici (landmarks) di una persona. Ogni landmark è rappresentato da una terna di coordinate normalizzate:

$$(x, y, z) \in [0, 1]^3$$

dove  $x$  e  $y$  indicano la posizione 2D normalizzata rispetto alla dimensione dell'immagine, mentre  $z$  rappresenta una profondità relativa (negativa se il punto è davanti al piano di riferimento); tuttavia la coordinata  $z$  risulta poco precisa e approssimativa. Infatti, mentre le coordinate  $x$  e  $y$  sono direttamente ricavate dalla proiezione bidimensionale dei punti sull'immagine catturata dalla fotocamera, la stima della profondità (asse  $z$ ) avviene in maniera indiretta tramite modelli di apprendimento e non da una misura geometrica reale. Questo comporta che la variabile  $z$  risulti approssimativa e particolarmente sensibile a rumore, variazioni di illuminazione e posizione dell'utente.

Il problema risulta accentuato in quanto la profondità è l'asse perpendicolare al piano dell'immagine, quindi eventuali piccoli movimenti avanti o indietro rispetto alla camera producono variazioni poco distinguibili dai modelli monoculari. Inoltre, nel caso specifico del sistema utilizzato, la disponibilità di sole due camere frontali riduce drasticamente le possibilità di una triangolazione accurata, rendendo la stima tridimensionale meno robusta rispetto a sistemi basati su camere stereo calibrate o sensori di profondità dedicati (come LiDAR o sensori a tempo di volo). Di conseguenza, l'uso del-

la coordinata  $z$  in applicazioni critiche deve essere trattato con cautela e, se possibile, integrato con fonti aggiuntive di informazione per migliorare l'accuratezza.

## 4.2 Calcolo degli angoli articolari

A partire dai landmark estratti con MediaPipe, è stato possibile ricavare una stima degli angoli principali delle articolazioni degli arti superiori. Il calcolo degli angoli rappresenta un passaggio fondamentale, poiché consente di tradurre le coordinate normalizzate dei punti chiave del corpo in valori significativi dal punto di vista biomeccanico.

Il procedimento adottato si basa sulla definizione di vettori tra coppie di landmark e sull'applicazione di relazioni geometriche. In questo modo è possibile stimare in maniera consistente le rotazioni relative delle articolazioni considerate.

Nei paragrafi successivi vengono descritti nel dettaglio i metodi adottati per la stima dei tre angoli di interesse: *Shoulder Roll*, *Shoulder Pitch* ed *Elbow Roll*.

### Shoulder Roll

Per il calcolo dello *Shoulder Roll* vengono utilizzati i landmark della spalla e del gomito relativi al lato di interesse. A partire da tali punti, si costruisce il vettore bidimensionale

$$\vec{v} = (v_x, v_y) = (x_E - x_S, y_E - y_S),$$

dove  $(x_S, y_S)$  e  $(x_E, y_E)$  rappresentano rispettivamente le coordinate della spalla e del gomito.

Il vettore viene normalizzato in modo da ottenere

$$\vec{n} = \frac{\vec{v}}{\|\vec{v}\|}, \quad \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

L'angolo di rollio è ricavato considerando la componente orizzontale normalizzata  $n_x$  e applicando la funzione

$$\theta_{roll} = \arcsin(n_x).$$

### Shoulder Pitch

Il calcolo dello *Shoulder Pitch* mira a stimare l'inclinazione del braccio rispetto al busto lungo la direzione verticale. Poiché non è possibile utilizzare direttamente la coordinata  $z$  fornita da MediaPipe, l'approccio adottato si basa su una stima derivata dai landmark della spalla, del gomito e dell'anca.

Si calcola innanzitutto la lunghezza del busto come distanza tra spalla e anca:

$$L_{bust} = \sqrt{(x_S - x_H)^2 + (y_S - y_H)^2},$$

dove  $(x_S, y_S)$  e  $(x_H, y_H)$  sono rispettivamente le coordinate della spalla e dell'anca. La lunghezza del braccio viene quindi stimata come una frazione empirica di  $L_{bust}$ :

$$L_{arm} = 0.95 \cdot L_{bust}.$$

Si considera la componente verticale del vettore spalla-gomito:

$$v_y = y_E - y_S,$$

e si definisce il rapporto

$$\sin \theta = \frac{v_y}{L_{arm}}.$$

L'angolo di pitch della spalla viene quindi calcolato come

$$\theta_{pitch} = \arcsin(\sin \theta) \cdot \pi,$$

dove il fattore  $\pi$  consente di scalare l'angolo stimato alla misura in radianti. In questo modo, il pitch assume valori nulli quando il braccio è perpendicolare al busto, positivi quando il braccio si sposta verso il basso e negativi quando il braccio si solleva verso l'alto.

## Elbow Roll

L'Elbow Roll rappresenta l'angolo di piegatura del gomito e viene calcolato a partire dai landmark della spalla, del gomito e del polso. Per il lato di interesse, si definiscono due vettori nel piano dell'immagine XY:

$$\vec{v}_1 = (x_S - x_E, y_S - y_E), \quad \vec{v}_2 = (x_W - x_E, y_W - y_E),$$

dove  $(x_S, y_S)$ ,  $(x_E, y_E)$  e  $(x_W, y_W)$  rappresentano le coordinate di spalla, gomito e polso, rispettivamente.

L'angolo tra i due vettori viene calcolato utilizzando il prodotto scalare:

$$\cos \theta = \frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{\|\vec{v}_1\| \|\vec{v}_2\|}, \quad \vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2 = v_{1x}v_{2x} + v_{1y}v_{2y}.$$

Si ottiene quindi l'angolo in radianti tramite:

$$\theta = \arccos(\cos \theta),$$

e successivamente si calcola l'angolo di piegatura del gomito come

$$\theta_{elbow} = \pi - \theta,$$

in modo da misurare l'ampiezza della flessione.

Infine, per convenzione, viene invertito il segno per il braccio sinistro:

$$\theta_{elbow}^{(left)} = -\theta_{elbow},$$

mentre per il braccio destro il segno rimane invariato. In questo modo l'angolo assume valori coerenti con la direzione della flessione del gomito.

### 4.3 Gestione dell'orientamento dell'utente

Per alcune pose, come quelle che richiederebbero la misura diretta della coordinata  $z$ , non è possibile ottenere una stima accurata della posizione articolare utilizzando esclusivamente la proiezione bidimensionale fornita dalle camere. Per ovviare a questa limitazione, il sistema è in grado di stimare l'orientamento dell'utente rispetto alla telecamera e, se necessario, richiedere all'utente di ruotarsi lateralmente o di spalle per una migliore visualizzazione delle articolazioni.

L'orientamento viene stimato a partire dai landmark di spalla e anca, proiettati sul piano dell'immagine. Si definiscono le coordinate pixel di spalla e anca come

$$LSH = (x_{LS}, y_{LS}), \quad RSH = (x_{RS}, y_{RS}), \quad LHP = (x_{LH}, y_{LH}), \quad RHP = (x_{RH}, y_{RH}),$$

dove  $LSH$  e  $RSH$  rappresentano rispettivamente la spalla sinistra e destra, mentre  $LHP$  e  $RHP$  rappresentano l'anca sinistra e destra.

Viene calcolata la larghezza delle spalle come distanza euclidea:

$$\text{shoulder\_width} = \sqrt{(x_{RS} - x_{LS})^2 + (y_{RS} - y_{LS})^2},$$

e la lunghezza del torso come distanza tra il punto medio delle spalle e il punto medio delle anche:

$$\text{torso\_len} = \sqrt{\left(\frac{x_{LS} + x_{RS}}{2} - \frac{x_{LH} + x_{RH}}{2}\right)^2 + \left(\frac{y_{LS} + y_{RS}}{2} - \frac{y_{LH} + y_{RH}}{2}\right)^2}.$$

A partire da queste due misure, si calcola il rapporto

$$r = \frac{\text{shoulder\_width}}{\text{torso\_len}},$$

che rappresenta una stima della visibilità delle spalle rispetto al busto. In base a  $r$ , il sistema classifica l'orientamento dell'utente in tre categorie:

- “di fronte” se le spalle risultano larghe rispetto al torso ( $r > 0.4$ ),
- “lateralmente” se le spalle sono relativamente strette rispetto al torso ( $r \leq 0.4$ ),
- “girato di spalle” se le spalle appaiono larghe ma invertite rispetto all'asse X, indicando che l'utente ha le spalle rivolte verso la telecamera opposta.

Questa stima permette al sistema di adattare le istruzioni e di suggerire all'utente di assumere la posizione più adatta per la corretta misurazione degli angoli articolari.



## 5 LLM

### 5.1 Explainability del sistema

Il ruolo dell’LLM non è soltanto dire “cosa fare”, ma rendere *spiegabile* la correzione: collegare in modo chiaro i numeri, ovvero le differenze in radianti, alle azioni motorie (alza/abbassa/apri/chiudi/stendi/piega) e motivarne il perché. L’explainability è progettata secondo questi principi:

- **Trasparenza lessicale:** il prompt include un glossario dei giunti NAO in *radianti* e le regole per interpretarli, così il modello spiega usando termini coerenti con la cinematica reale.
- **Fedeltà ai dati** (*faithfulness*): ogni frase è ancorata a una variazione dei diversi arti, con indicazione del *lato* e della quantità.
- **Semplicità:** istruzioni direttamente eseguibili dall’utente.
- **Coerenza temporale:** il sistema parla ogni 10 secondi circa, selezionando l’errore con magnitudo maggiore nel periodo; l’arrotondamento in radianti stabilizza la formulazione della risposta.

In questo modo, il passaggio da misure numeriche a linguaggio naturale rimane controllato: le correzioni sono *comprensibili, fedeli e utili* durante l’esecuzione dell’esercizio.

### 5.2 Obiettivo

Il robot NAO mostra una posa, acquisisce la posa dell’utente, calcola le differenze articolari e delega all’LLM la generazione di messaggi correttivi comprensibili, con esplicito riferimento al lato (destro/sinistro). La componente LLM trasforma le differenze angolari tra posa target e posa dell’utente in **istruzioni vocali brevi**.

### 5.3 Integrazione ad alto livello

1. **Stima posa utente** (MediaPipe) e confronto con la posa target del robot.
2. **Costruzione input LLM:** dizionario `differences` con chiavi L/R+Giunto e valori in radianti (segno conservato).
3. **Chiamata LLM:** prompt strutturato (Sez. 5.5) con temperatura zero.
4. **Output:** una o più frasi naturali sulle correzioni che l’utente dovrebbe attuare

## 5.4 Dati di ingresso e uscita

### Ingresso LLM

Struttura dizionario `differences` con coppie <chiave, valore>, ad es.:

```
RShoulderPitch: -0.8
LShoulderRoll: -0.5
LElbowRoll: 1.5
```

Le chiavi seguono la convenzione NAO: L/R + ShoulderPitch/ShoulderRoll/ElbowRoll. I valori sono differenze in radianti (misurato - target) con segno.

### Uscita LLM

Testo breve, una o più righe per correzione, ad es.:

```
Alza il braccio destro fino ad allinearlo alla spalla.
Chiudi leggermente il braccio sinistro verso il tronco.
```

## 5.5 Prompt LLM

Il prompt elenca gli angoli errati in *radianti* e le regole per interpretarli, oltre ai vincoli formali di output. Ecco un esempio:

```
Sei un fisioterapista virtuale che osserva la postura delle
braccia di un paziente.
Ti fornisco i seguenti valori in radianti che descrivono la
distanza di spalle e gomiti tra la posizione dell'utente e la
posizione corretta:

- LShoulderRoll: -0.60
- LElbowRoll: 0.80
- RShoulderPitch: -1.0
```

Ti faccio qualche esempio di come interpretare questi valori:

- Se ShoulderRoll ha un valore positivo, significa che il braccio e' troppo vicino al corpo (punta internamente) e deve essere allontanato dal corpo.
- Se ShoulderRoll ha un valore negativo, significa che il braccio e' troppo lontano dal corpo (punta esternamente) e deve essere avvicinato al corpo.
- Se ShoulderPitch ha un valore positivo, significa che il braccio e' troppo basso e deve essere alzato.
- Se ShoulderPitch ha un valore negativo, significa che il braccio e' troppo alto e deve essere abbassato.

- Se ElbowRoll ha un valore positivo, significa che il gomito e' troppo chiuso e deve essere aperto.
- Se ElbowRoll ha un valore negativo, significa che il gomito e' troppo aperto e deve essere chiuso.

Fornisci suggerimenti naturali e chiari, di massimo un paio di frasi, per correggere la postura dell'utente in base agli errori rilevati.

Rispondi in italiano.

Esempio di risposta: "Abbassa leggermente il braccio sinistro", "Alza di molto il braccio destro", "Avvicina il braccio sinistro al corpo", "Allontana il braccio destro dal corpo", "Fletti completamente il gomito sinistro", "Chiudi il gomito destro".

Evita di usare la parola "spalla" nelle tue risposte, usa sempre "braccio".

Se non ci sono errori, non dire nulla.

La costruzione del prompt viene effettuata in maniera dinamica per ridurre al minimo il rischio di allucinazioni del modello e limitare le correzioni solo agli angoli effettivamente rilevanti. Nella fase di pre-elaborazione, il sistema confronta i valori misurati delle articolazioni con quelli di riferimento e seleziona esclusivamente gli angoli che risultano fuori soglia. Questi angoli vengono quindi passati all'LLM, insieme alla descrizione semantica di ciascuno. In questo modo il modello non riceve informazioni ridondanti e non può proporre modifiche su articolazioni che non richiedono alcuna correzione.

Anche la spiegazione associata agli angoli segue lo stesso principio di selezione mirata. Il sistema genera il testo di supporto in modo condizionale, includendo soltanto le istruzioni per correggere gli angoli segnalati. Se, ad esempio, l'unico problema rilevato è un'eccessiva rotazione della spalla destra, il prompt conterrà esclusivamente la spiegazione di cosa significa tale rotazione e di come modificarla, senza menzionare gomiti, spalle o altre articolazioni non coinvolte. Questo approccio riduce il rumore nel prompt e facilita una risposta coerente e focalizzata, rendendo il comportamento dell'LLM più controllabile e affidabile.

## 5.6 Configurazione e policy d'inferenza

- **Modello:** Gemini 1.5 Pro.
- **Temperature:** 0 (stile controllato e ripetibile).
- **Max tokens:** 100 (ampio per più righe brevi).
- **Cadenza parlato:** al massimo una emissione ogni 10s.
- **Soglia:** si ignorano differenze con  $|\Delta| < 0.4$  rad.

## 5.7 Esempio

```
RShoulderPitch: -1.5  
LShoulderRoll:  1.2  
LElbowRoll:     0
```

```
Alza il braccio destro fino ad allinearlo alla spalla.  
Chiudi il braccio sinistro verso il tronco.
```

## 5.8 Privacy e limiti

L’LLM riceve solo differenze angolari aggregate, senza immagini o dati personali. Il feedback ha scopo informativo e non sostituisce il parere di un professionista. La qualità dipende dalla stima della posa e dalla corretta interpretazione del segno delle differenze.

## 5.9 Riproducibilità

L’accesso al modello avviene tramite libreria *google-generativeai* con chiave *GEMINI\_API\_KEY* impostata come variabile d’ambiente. I parametri d’inferenza (temperatura, max tokens) e i vincoli del prompt sono stati fissati come sopra per garantire stabilità stilistica.

# 6 Scenario applicativo

Per la validazione del prototipo, il sistema è stato testato in un ambiente di laboratorio, dove è stato possibile simulare in modo controllato esercizi tipici della fisioterapia. Lo scenario applicativo è stato concepito per replicare le condizioni di una sessione reale, consentendo al robot Nao di interagire con l’utente e di svolgere le proprie funzioni di guida, monitoraggio e feedback, ma senza i vincoli e le variabili presenti in un contesto clinico reale.

Durante le sperimentazioni, il robot ha guidato l’utente nell’esecuzione di esercizi di base, come l’alzata delle braccia o movimenti di estensione e flessione degli arti superiori. I sensori di Nao hanno acquisito informazioni sui movimenti, consentendo al sistema di analizzare la postura e di generare feedback correttivo immediato. La modularità del sistema ha permesso di monitorare separatamente le diverse componenti, come il riconoscimento delle pose, la gestione della camera e la generazione dei segnali di incoraggiamento o correzione.



Figura 3: Posa 1



Figura 4: Posa 2

Lo scenario di laboratorio ha permesso di testare non solo la funzionalità del robot, ma anche l'interazione uomo-robot, valutando la chiarezza delle istruzioni, la reattività del sistema e la capacità di adattare i feedback correttivi o incoraggiativi in tempo reale.

## 7 Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto ha permesso di sviluppare un prototipo funzionante di assistente robotico basato su Nao, in grado di guidare l'utente durante esercizi di fisioterapia simulati, monitorare i movimenti e fornire feedback correttivo immediato. L'architettura modulare

adottata si è rivelata efficace nel separare le componenti hardware e software, permettendo una gestione flessibile dei sensori e del modulo di feedback. I test in laboratorio hanno dimostrato la fattibilità del sistema, e quindi l'intuizione di un assistente di fisioterapia robotico, e hanno fornito indicazioni utili per affinare le interazioni uomo-robot, ponendo le basi per future applicazioni in contesti clinici reali.

Tra gli sviluppi futuri, un obiettivo centrale riguarda l'introduzione della comunicazione multimodale, in modo che il robot possa interagire con l'utente non solo tramite voce e riproduzione di gesti, ma anche attraverso la riproduzione di espressioni facciali e la capacità di spostarsi attorno l'utente. Questo tipo di interazioni più ricca aumenterebbe la chiarezza delle istruzioni e il coinvolgimento del paziente, migliorando l'efficacia delle sessioni di fisioterapia.

Un altro passo importante sarà ampliare il numero, la tipologia e la complessità degli esercizi gestiti dal robot. Attualmente il sistema si limita a movimenti delle braccia; in futuro sarà possibile includere esercizi che coinvolgono gambe, tronco e testa, rendendo il prototipo più completo e rappresentativo dei percorsi di fisioterapia reali.

Inoltre, lo sviluppo di sistemi di profilazione per piani di fisioterapia personalizzati permetterà di adattare gli esercizi alle caratteristiche, ai progressi e alle esigenze specifiche di ciascun paziente. L'integrazione di dati storici e la gestione di piani individualizzati aumenterebbero l'efficacia e la sicurezza delle sessioni, rendendo il robot un vero supporto al terapeuta.

Ulteriormente, lo sviluppo di una base di conoscenza da fornire all'LLM per migliorare l'explainability dei feedback, magari costruita attraverso l'ausilio ed il coinvolgimento di figure esperte nel settore della fisioterapia, al fine di associare ad ogni feedback una spiegazione che miri ad arricchire l'interazione uomo-robot con l'importanza e i benefici che ogni postura corretta porta al fisico, così da incrementare la fiducia e l'accettabilità del robot da parte dell'utente.

Infine, un'ulteriore miglioria del sistema riguarda l'integrazione di strumenti di supporto e diagnostica quali telecamere aggiuntive per la triangolazione del movimento e sensori di movimento e accelerometri indossabili dall'utente. Questi strumenti consentirebbero di acquisire dati più precisi sui movimenti del paziente, migliorando la qualità complessiva del monitoraggio e della valutazione, e aprirebbero la strada a funzionalità avanzate di analisi e reportistica clinica.

Il prototipo sviluppato rappresenta un primo passo verso un assistente robotico completo e adattivo, capace di affiancare il terapeuta nella gestione di percorsi di fisioterapia controllati, efficaci e personalizzati, con ampie possibilità di evoluzione futura grazie alla modularità e all'integrazione di nuove tecnologie.