

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Indirizzo automazione

Tesi di Laurea Magistrale

Ottimizzazione e integrazione di manipolatori robotici su robot mobile per operazioni di soccorso in pozzi artesiani

Relatore

Prof. Terenziano Raparelli

Candidato

Salvatore Stefano Carnemolla

Correlatori

Prof.ssa Daniela Maffiodo

Ing. Simone Astuti

Anno Accademico 2025/2026

Sommario

I pozzi artesiani costituiscono una risorsa idrica di inestimabile valore poiché, sfruttando la naturale pressione delle falde sotterranee, consentono la risalita dell'acqua senza la necessità di impiegare pompe meccaniche. Tuttavia, la loro capillare diffusione e il frequente stato di abbandono o di mancata messa in sicurezza li trasformano in pericoli latenti, tramutandoli talvolta in trappole letali, in particolar modo per i bambini. Le operazioni di soccorso all'interno di questi ambienti angusti rappresentano una delle sfide più complesse nell'ambito delle emergenze, a causa degli spazi estremamente confinati e dei limiti intrinseci delle tecniche di estrazione tradizionali.

In questo contesto, la robotica teleoperata si offre come soluzione tecnologica promettente per intervenire in modo rapido e sicuro. Le procedure di recupero convenzionali, come la trivellazione di pozzi paralleli o l'impiego di sistemi di aggancio rudimentali calati dall'alto, comportano tempistiche dilatate e rischi severi per l'incolumità della vittima. Con l'avanzare delle tecnologie di ispezione e miniaturizzazione, si sono succedute diverse soluzioni: dalle semplici sonde dotate di telecamere e sensori, fino allo studio concettuale di dispositivi compatti in grado di operare all'interno del condotto.

In questo scenario si inserisce il dispositivo di soccorso realizzato in collaborazione tra il DIMEAS del Politecnico di Torino e l'Università degli Studi dell'Aquila. Grazie alla sua compattezza, alle spiccate capacità di movimento e alla notevole precisione operativa, il robot riesce a muoversi e operare agilmente all'interno di condotti verticali angusti. L'efficacia del sistema è garantita da un'architettura Master-Slave per la teleoperazione bilaterale, la quale consente a un operatore in superficie di controllare da remoto i movimenti del manipolatore con elevata affidabilità. Nello specifico, il presente elaborato si pone come obiettivi principali l'integrazione meccanica dei bracci robotici nell'alloggiamento predisposto sul dispositivo principale, l'implementazione di una comunicazione robusta a lunga distanza tra i moduli Master e Slave e la minimizzazione del cablaggio complessivo.

Dal punto di vista metodologico, la trattazione affronta inizialmente le problematiche relative ai pozzi artesiani, proseguendo con una revisione dello stato dell'arte sulle tecnologie attualmente disponibili. Successivamente, viene fornita una descrizione generale del robot di soccorso di partenza, la cui analisi si concentra in particolar modo sui suoi bracci robotici, che costituiscono il fulcro di questo elaborato. A valle della definizione degli obiettivi, viene analizzata nel dettaglio l'architettura hardware progettata, basata su microcontrollori della famiglia STM32 e su driver di potenza GDS34, i quali garantiscono un accurato controllo degli attuatori brushless. Un focus particolare è dedicato all'implementazione dei protocolli di comunicazione, con un'analisi approfondita dell'integrazione tra il bus CAN e lo standard logico MIT. In seguito, vengono illustrate la configurazione elettronica generale del sistema e il montaggio dei bracci robotici nel dispositivo principale. Infine, vengono discussi i risultati sperimentali ottenuti e si delineano i possibili sviluppi futuri del progetto.

Indice

1 Introduzione e stato dell'arte **1**

1.1 Il problema dei soccorsi nei pozzi artesiani 1

1.1.1 I limiti intrinseci delle tecniche di estrazione tradizionali 2

1.1.2 Procedura di salvataggio tradizionale 2

1.2 Tipologie di dispositivi di salvataggio teleoperati 3

1.2.1 Sviluppi preliminari 4

1.2.2 Transizione verso l'intelligenza artificiale e l'IoT 4

1.2.3 Teleoperazione e feedback aptico nel soccorso 5

1.2.4 Requisiti per un dispositivo di salvataggio robotico che opera in pozzi artesiani 6

1.3 Rassegna delle soluzioni attualmente disponibili 8

1.3.1 Robot di salvataggio sviluppato dall'università di Scienza e Tecnologia di Shandong 8

1.3.2 Robot di salvataggio sviluppato dal Priyadarshini College of Engineering 9

1.3.3 Robot di salvataggio sviluppato dall'Indian Institute of Information Technology 11

1.3.4 Robot di salvataggio sviluppato dalla VIT University 13

1.3.5 Robot di salvataggio sviluppato dall'IIT Madras 14

1.3.6 Robot di salvataggio sviluppato dalla METS School of Engineering . . . 17

1.3.7 Robot di salvataggio sviluppato dal Chennai Ramapuram SRM Institution of Science and Technology 18

1.3.8 Robot di salvataggio sviluppato dall'Amrita School of Engineering . . . 20

1.3.9 Robot di salvataggio sviluppato da diverse università in Chennai 22

1.3.10 Robot di salvataggio sviluppato dal Mangalam College of Engineering . 23

1.3.11 Robot di salvataggio sviluppato dall'Adhiyamaan College of Engineering 25

1.3.12 Robot di salvataggio sviluppato dal Gurudeva Institute of Science and Technology 26

1.3.13 Robot di salvataggio sviluppato dal NIT Tiruchirappalli 28

1.3.14 Robot di salvataggio sviluppato dal Sri Krishna College of Technology . 29

1.3.15 Robot di Salvataggio Sviluppato dal Govt. Model Engineering College . 31

1.3.16 Robot di salvataggio sviluppato dall'Acharya Institute of Technology . . 33

1.3.17 Sintesi e analisi comparativa dello stato dell'arte 34

2 Struttura del sistema **36**

2.1 Descrizione del dispositivo 36

2.1.1 Architettura e progettazione funzionale 37

2.1.2 Architettura elettronica e di controllo 39

2.2 Logica di funzionamento generale . . . 40
2.3 Braccia robotiche tele-operate . . . 41
2.3.1 Architettura meccanica . . . 41
2.3.2 Architettura elettronica e di controllo . . . 42
2.4 Stato iniziale del manipolatore robotico e Obiettivi della tesi . . . 43
2.4.1 Stato iniziale e criticità riscontrate . . . 43
2.4.2 Obiettivi della tesi . . . 44

3 Validazione Elettromeccanica e Architettura di Controllo 45
3.1 Validazione degli attuatori . . . 45
3.1.1 Analisi dei carichi del manipolatore . . . 45
3.1.2 Test sperimentale di sollevamento e banco prova . . . 47
3.2 Il microcontrollore STM32G474RET6 . . . 48
3.2.1 Introduzione . . . 48
3.2.2 Architettura e periferiche integrate . . . 49
3.2.3 Ecosistema di sviluppo software . . . 49
3.2.4 Organizzazione dei file di progetto . . . 51
3.2.5 Sviluppo del codice . . . 52
3.2.6 Analisi della logica di controllo . . . 53
3.3 Driver di potenza GDS34 . . . 54
3.3.1 Introduzione . . . 54
3.3.2 Architettura Hardware . . . 55
3.3.3 Software di configurazione . . . 56
3.3.4 Configurazione e Inizializzazione degli Attuatori . . . 57
3.4 Protocolli di comunicazione . . . 59
3.4.1 Protocollo CAN Bus . . . 59
3.4.2 Protocollo MIT . . . 60

4 Sistema finale 62
4.1 Configurazione elettronica . . . 62
4.1.1 Architettura del Master . . . 62
4.1.2 Architettura dello Slave . . . 64
4.1.3 Schema complessivo . . . 65
4.2 Integrazione meccanica del manipolatore . . . 66
4.2.1 Sistemi di ancoraggio al dispositivo principale . . . 66
4.2.2 Progettazione delle interfacce per i driver di potenza . . . 67
4.2.3 Ottimizzazione strutturale dei giunti e supporti per il cablaggio . . . 69

5 Conclusioni e sviluppi futuri 72
5.1 Risultati ottenuti . . . 72
5.1.1 Strumentazione utilizzata . . . 72

5.1.2 Commenti sul sistema finale 74
5.2 Sviluppi futuri 75
5.2.1 Miglioramento del controllo PD 75
5.2.2 Impiego dei motori GIM3505-8 V1.1 75
5.2.3 Integrazione del feedback aptico 76
5.2.4 Aggiornamento del Digital Twin del sistema 76
5.2.5 Ottimizzazione degli ingombri 77

A Appendice A **78**

Bibliografia **82**

Elenco delle figure

1.1 Rappresentazione geologica e topografica dei pozzi artesiani. 1
1.2 Flowchart dell'operazione di salvataggio tradizionale. 3
1.3 Esempio di Snake Robot. 4
1.4 Schema dell'operazione di salvataggio tramite Octobot. 4
1.5 Prototipo sperimentale di robot con algoritmo di IA integrato. 5
1.6 Tuta aptica utilizzata per la simulazione di operazioni sottomarine. 6
1.7 Struttura del dispositivo di salvataggio. 9
1.8 Architettura del sistema di salvataggio. 10
1.9 Layout strutturale del dispositivo di salvataggio. 12
1.10 Componenti del sistema di salvataggio. 14
1.11 Meccanismi del dispositivo. 15
1.12 Configurazione del prototipo di salvataggio. 17
1.13 CAD del dispositivo di salvataggio. 19
1.14 Dispositivo di salvataggio complessivo. 21
1.15 Configurazioni dei bracci robotici. 21
1.16 Composizione del dispositivo di salvataggio. 23
1.17 Design del dispositivo di salvataggio. 24
1.18 Robot durante una simulazione di soccorso. 26
1.19 Rappresentazione del dispositivo durante l'estrazione. 27
1.20 Struttura del robot. 29
1.21 Moduli del sistema di salvataggio. 30
1.22 Piattaforme del robot. 32
1.23 Telaio del dispositivo. 33

2.1 Dispositivo completo. 38
2.2 Sistema di scorrimento. 38
2.3 Dispositivo di sicurezza. 38
2.4 Schema collegamenti controllo motore. 39
2.5 Slave. 41
2.6 Master. 42
2.7 Schema sistema di controllo Master - Slave. 42
2.8 Sistema Master - Slave di partenza. 43

3.1 Diagrammi di corpo libero della spalla dello Slave. 46
3.2 Banco prova per il test di sollevamento. 47
3.3 Scheda STM32 Nucleo-G474RE. 48
3.4 Schermata di configurazione dei pin nel software STM32CubeMX. 50
3.5 Ambiente di sviluppo integrato STM32CubeIDE. 50

3.6 Organizzazione dei file del progetto. 52
3.7 Driver GDS34. 55
3.8 Layout del driver GDS34. 56
3.9 Modulo CP2102. 57
3.10 Software SteadyWin Motor Wizard. 57
3.11 Interfaccia di configurazione del software SteadyWin Motor Wizard. 58
3.12 Sezione di un cavo per bus CAN. 59
3.13 Architettura di una rete CAN con nodi interconnessi. 60

4.1 Modulo transceiver CAN SN65HVD230. 63
4.2 Layout del Master. 63
4.3 Layout dello Slave. 64
4.4 Layout complessivo. 65
4.5 Staffe di ancoraggio principali. 66
4.6 Dettaglio degli adattatori e dell'assemblaggio sul telaio. 67
4.7 Supporto magnete. 68
4.8 Interfaccia driver. 68
4.9 Coperchio motore. 68
4.10 Assemblaggio dei componenti sul motore. 68
4.11 Adattatore per motori GIM4310-10. 69
4.12 Staffa per i morsetti della spalla. 70
4.13 Staffa per i morsetti del gomito. 70
4.14 Anello per i morsetti del polso. 70
4.15 Assemblaggio dei componenti per il fissaggio dei morsetti. 70
4.16 Giunti del polso con spessore strutturale maggiorato. 71

5.1 Cavi AWG22 e AWG18. 72
5.2 Alimentatore da banco stabilizzato. 73
5.3 Setup dell'unità Master. 73
5.4 Dispositivo Slave integrato. 74
5.5 Interfaccia di Coppelia. 76
5.6 Dettaglio del *Digital Twin* nel condotto. 77

Introduzione e stato dell'arte

Il presente capitolo descrive il contesto operativo e le sfide su cui si basa lo sviluppo di nuovi sistemi meccatronici per le operazioni di ricerca e soccorso nei pozzi artesiani. Dopo aver inquadrato le problematiche e i vincoli ambientali, la trattazione prosegue con l'analisi dello stato dell'arte delle tecnologie e delle procedure di recupero oggi disponibili.

1.1 Il problema dei soccorsi nei pozzi artesiani

Tra le possibili modalità di approvvigionamento idrico, la captazione delle acque sotterranee attraverso la perforazione di pozzi artesiani costituisce una delle principali risorse strategiche a livello globale. In questa configurazione geologica, l'acqua sotterranea è intrappolata tra strati di terreno impermeabile (come argilla o roccia compatta) che applicano ad essa una pressione positiva superiore a quella atmosferica. A differenza dei pozzi freatici tradizionali, che attingono da falde libere, la trivellazione in un acquifero artesiano permette all'acqua di risalire spontaneamente lungo la tubazione del pozzo per raggiungere l'equilibrio idrostatico. Qualora la pressione naturale della falda sia sufficientemente elevata da far sgorgare l'acqua direttamente sopra il livello del suolo senza l'ausilio di pompe, l'infrastruttura prende il nome di pozzo artesiano a flusso continuo [1].

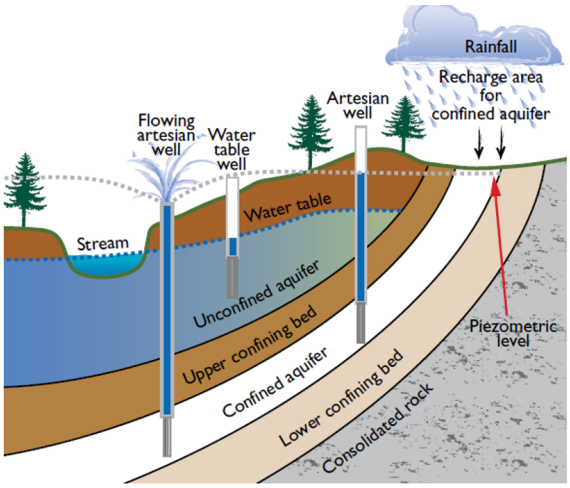


Figura 1.1: Rappresentazione geologica e topografica dei pozzi artesiani [1].

Sebbene i benefici in termini di efficienza siano innegabili, la natura morfologica di queste opere nasconde insidie drammatiche. Infatti, i diametri di perforazione variano tipicamente in un intervallo estremamente ristretto (spesso tra i 15 e i 30 centimetri) per ottimizzare la pressione di risalita, mentre le profondità possono superare ampiamente i 100 metri,

trasformando queste infrastrutture in trappole letali, in particolare per i bambini, quando vengono abbandonate senza l'applicazione di adeguate procedure di sigillatura. Il panorama internazionale è tristemente segnato da eventi che hanno dimostrato l'impreparazione logistica di fronte a questi scenari: dall'incidente spartiacque di Vermicino del 1981 in Italia, alle più recenti tragedie in Spagna (Julen, 2019), in Marocco (Rayan, 2022) e sempre in Italia (Vincenzo, 2024). Le cronache e le analisi statistiche internazionali delineano un quadro di estrema gravità. I dati documentati nelle Standard Operating Procedures (SOP) della National Disaster Response Force (NDRF) dell'India, ente pioniere per questa tipologia di disastri, confermano la drammaticità del fenomeno a livello sistemico. Tra il 2009 e il 2019, fonti enciclopediche basate sui dati del National Crime Records Bureau (NCRB) indiano hanno stimato e documentato oltre 40 incidenti infantili, la quasi totalità dei quali con esito fatale [2]. L'ostilità del microclima interno costituisce un ulteriore fattore di rischio. All'interno del condotto, la combinazione di elevata umidità, temperature estreme e la possibile stratificazione di gas nocivi (come monossido di carbonio, metano, butano e biossido di azoto) accelera i processi di ipotermia e asfissia. Tali condizioni ambientali determinano un rapido collasso dei parametri vitali, riducendo al minimo il tempo utile per l'estrazione [3].

1.1.1 I limiti intrinseci delle tecniche di estrazione tradizionali

Di fronte ad un'emergenza in un pozzo artesiano, l'impossibilità di calare un soccorritore a causa del diametro ridotto impone procedure indirette. L'utilizzo di strumentazioni come cappi e imbracature risulta spesso inefficace e "cieco", soprattutto se la vittima è incastrata o priva di sensi. Di conseguenza, la procedura operativa standard adottata dalle squadre di emergenza prevede quasi inevitabilmente lo scavo di un tunnel parallelo. Questa tecnica consiste nella trivellazione di un pozzo secondario di diametro sufficiente per la discesa dei soccorritori, seguita dallo scavo di un cunicolo orizzontale di collegamento [4]. L'analisi di questa procedura evidenzia due limitazioni:

1. **Inefficienza temporale:** La mobilitazione di macchine perforatrici pesanti e la resistenza geologica del terreno dilatano i tempi di scavo che possono superare le 30 ore. Una tempistica che eccede drasticamente la finestra di sopravvivenza umana.

2. **Cedimenti strutturali e vibrazioni:** Le potenti trivelle generano vibrazioni che destabilizzano le pareti del pozzo primario, causando micro-frane. Queste precipitazioni di detriti rischiano costantemente di provocare lo scivolamento della vittima verso il fondo o il suo fatale seppellimento [5].

1.1.2 Procedura di salvataggio tradizionale

In genere la procedura di salvataggio tradizionale si articola in 5 fasi:

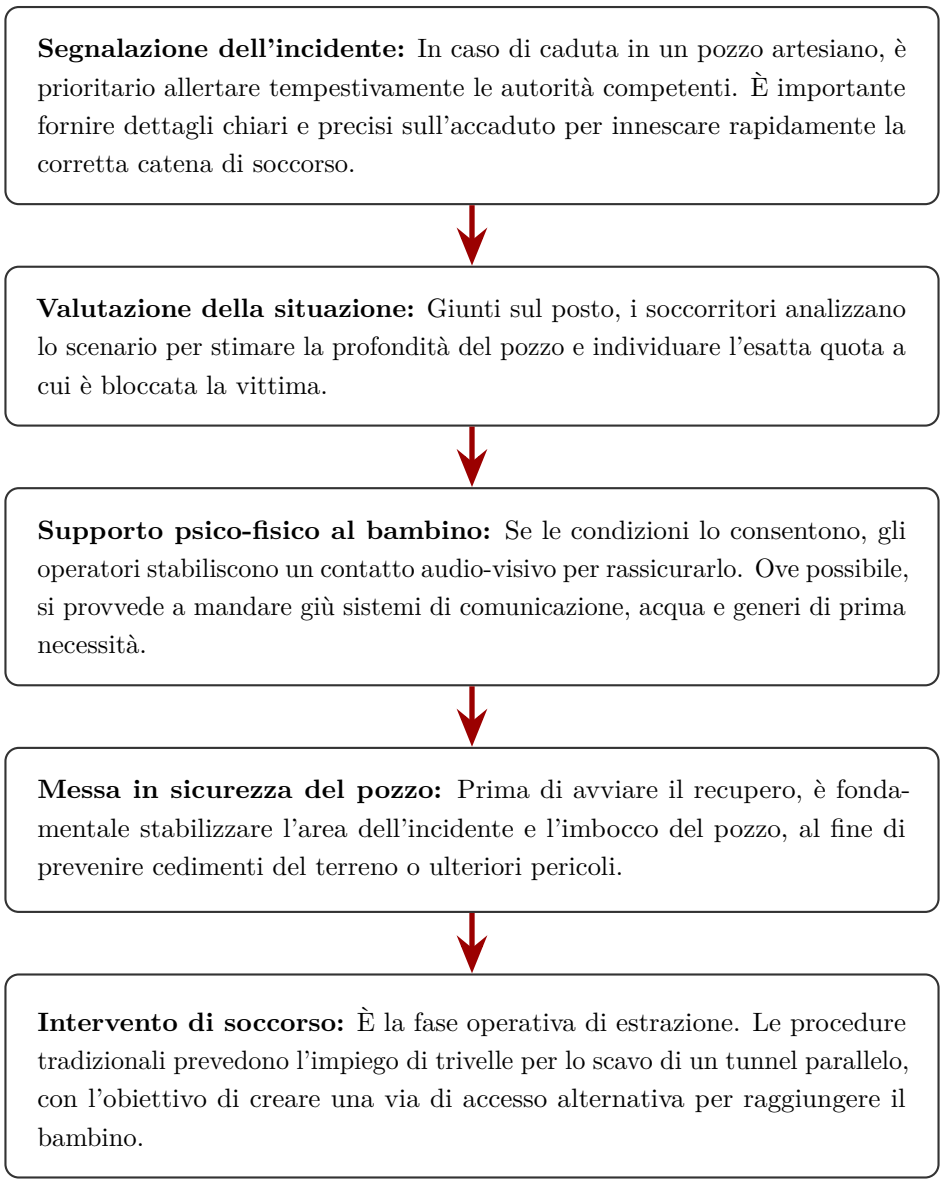


Figura 1.2: Flowchart dell'operazione di salvataggio tradizionale [6].

1.2 Tipologie di dispositivi di salvataggio teleoperati

L'inadeguatezza e i limiti intrinseci delle tecniche di soccorso tradizionali hanno catalizzato l'interesse della comunità scientifica verso lo sviluppo di sistemi meccatronici dedicati alla robotica di salvataggio in spazi confinati (Search and Rescue - SAR). Negli ultimi anni, l'evoluzione tecnologica ha segnato una transizione ingegneristica fondamentale: dai primi prototipi di manipolatori meccanici a bassa mobilità, concepiti prevalentemente per la mera ispezione visiva, si è giunti alla progettazione di architetture robotiche in-pipe complesse, progettate per la manipolazione attiva e la teleoperazione in ambienti estremi [7].

1.2.1 Sviluppi preliminari

I primissimi prototipi risalgono agli inizi del 2010 e consistevano in telecamere installate in parallelo a pinze meccaniche rigide [8]. Tuttavia, questi sistemi presentavano una scarsa efficacia non appena si interfacciavano con l'irregolarità morfologica delle pareti del pozzo. Perciò, la ricerca ha parzialmente spostato il proprio focus dall'estrazione immediata alla "messa in sicurezza" preventiva. Sono stati perciò proposti e validati diversi modelli di robotica iper-ridondante, in primo luogo, per bloccare lo scivolamento del corpo verso il fondo e per superare gli ostacoli naturali del sottosuolo. Sono emersi quindi i primi modelli concettuali e prototipi di Snake Robot, basati su segmenti snodati continui in grado di adattare dinamicamente la propria geometria alle curvature del condotto [9]. Un'altra applicazione di rilievo è l'Octobot che sostituisce i manipolatori rigidi con terminali cavi pneumatici garantendo un ancoraggio sicuro e atraumatico. Questo approccio integra anche cuscini gonfiabili inferiori anti-scivolamento e componenti per il supporto vitale (somministrazione di ossigeno e sensori ambientali) [10]. Tali architetture presentano ancora criticità legate all'eccessivo ingombro del cablaggio (alimentazione e dati) e alla mancanza di un feedback di forza aptico per l'operatore.

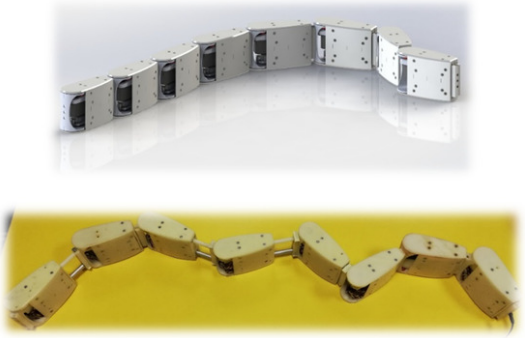


Figura 1.3: Esempio di Snake Robot [9].

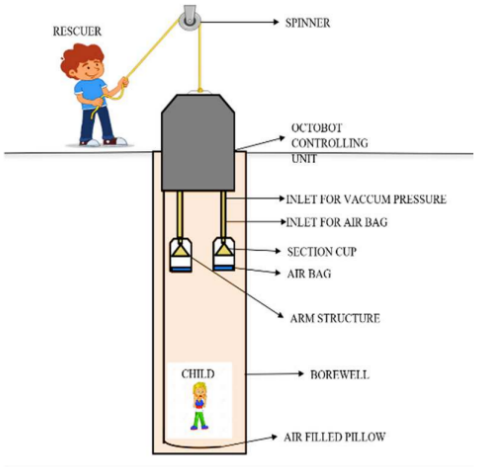


Figura 1.4: Schema dell'operazione di salvataggio tramite Octobot [10].

1.2.2 Transizione verso l'intelligenza artificiale e l'IoT

La ricerca negli ultimi anni si estesa anche verso l'integrazione di architetture Internet of Things (IoT) e algoritmi di Intelligenza Artificiale (IA), trasformando il manipolatore da semplice strumento meccanico a nodo sensoriale intelligente, capace di interpretare e fornire informazioni sulle condizioni dell'ambiente circostante, ma soprattutto assistere attivamente alle operazioni di salvataggio. L'impiego di microcontrollori installati a bordo del robot permette di elaborare in tempo reale i segnali provenienti da molteplici moduli, quali sensori di temperatura, umidità e rilevatori di gas nocivi. È stato dimostrato come l'implementazione di architetture IoT consenta

di monitorare costantemente i livelli di anidride carbonica all'interno del pozzo, permettendo al sistema logico di attivare automaticamente pompe di ossigeno qualora si superino specifiche soglie critiche. Questo approccio garantisce una trasmissione telemetrica continua alle stazioni di controllo in superficie, agevolando le squadre di soccorso [11]. Parallelamente, recenti sviluppi nella robotica ispettiva in-pipe dimostrano come l'applicazione di algoritmi di IA e di sensori avanzati possa incrementare sensibilmente la velocità di ispezione e il riconoscimento automatico dei difetti o delle geometrie supportando gli operatori tramite dati visivi [12]. Nel contesto specifico dei pozzi artesiani, questa tecnologia si traduce nella capacità del software di riconoscere in automatico la postura della vittima (separando visivamente gli arti dalle rocce incastrate), supportando l'operatore e prevenendo collisioni letali durante la manovra di aggancio.

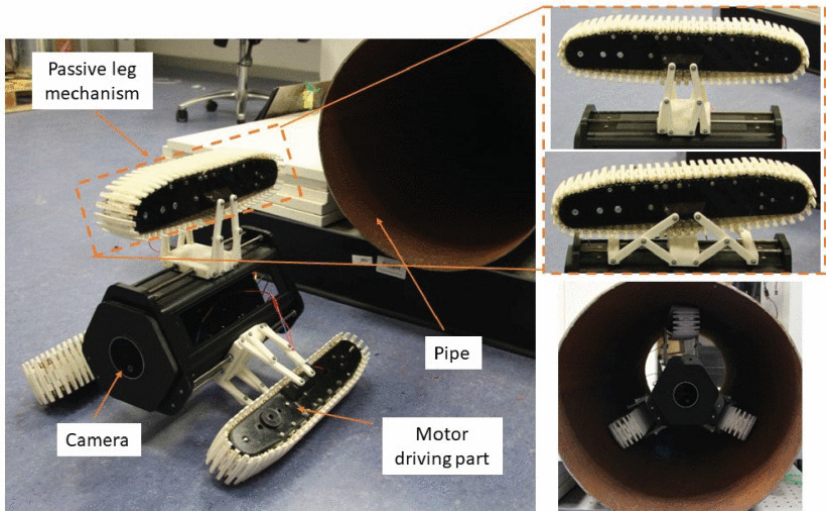


Figura 1.5: Prototipo sperimentale di robot con algoritmo di IA integrato [12].

1.2.3 Teleoperazione e feedback aptico nel soccorso

Un aspetto importante della robotica di soccorso riguarda l'interfaccia di controllo a disposizione dell'operatore umano. Nei contesti SAR avanzati, come i pozzi artesiani, la teleoperazione basata esclusivamente sul riscontro visivo, spesso compromesso da detriti e scarsa illuminazione, si dimostra inefficace. Per questo motivo, la letteratura scientifica meccatronica evidenzia l'indispensabilità dei sistemi HBTS (Haptic Bilateral Teleoperation System). L'implementazione di un'architettura Master-Slave bilaterale permette di trasdurre la percezione meccanica dell'ambiente remoto direttamente al soccorritore incrementando in modo sostanziale la "telepresenza" e permettendo all'operatore di percepire in tempo reale se l'attuatore sta incontrando la resistenza di un ostacolo roccioso o sta interagendo fisicamente con la vittima. La teleoperazione di manipolatori in spazi ristretti subisce un drastico calo di efficienza qualora ci si affidi a controllori di traiettoria standard (a posizionamento rigido), incapaci di ricalcolare istantaneamente percorsi liberi da collisioni. Una valida alternativa per risolvere

questo problema è la mappatura diretta dei movimenti umani sull'end-effector, assistita da controlli di cedevolezza come l'Admittance Control. Questi algoritmi permettono al robot di cedere dinamicamente quando la forza di contatto supera una soglia di sicurezza, evitando impatti fatali durante le manovre delicate [13]. La necessità di trasmettere il senso del tatto a distanza ha guidato l'innovazione in diversi settori caratterizzati da accessibilità limitata:

- **Robotica subacquea e manutenzione in-pipe:** La teleoperazione di veicoli sottomarini e braccia robotiche per la riparazione interna di tubazioni sfrutta la realtà virtuale e i feedback aptici. L'operatore riceve impulsi di forza che impediscono al robot di collidere violentemente contro le pareti del condotto, evitando potenziali errori durante le operazioni. [14].
- **Esplorazione spaziale:** La teleoperazione di rover per la raccolta di campioni richiede mappature ibride del movimento Master-Slave per gestire le latenze di segnale e riprodurre la resistenza meccanica di terreni incogniti sul joystick del pilota in stazione [15].

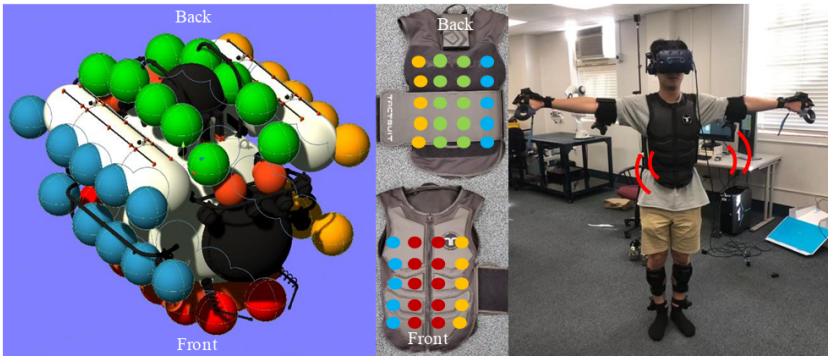


Figura 1.6: Tuta aptica utilizzata per la simulazione di operazioni sottomarine [14].

Nonostante la disponibilità di interfacce master industriali ad altissime prestazioni (come i sistemi Force Dimension), la loro trasposizione nello scenario di soccorso ipogeo non è immediata. L'accoppiamento di tali dispositivi con un manipolatore slave operante a decine di metri di profondità rende inadeguate le architetture tradizionali. Risulta pertanto indispensabile progettare un'infrastruttura a bassissima latenza, affiancata da azionamenti in grado di stimare le coppie applicate con estrema precisione, che sono il requisito fondamentale per garantire la stabilità dell'anello di controllo bilaterale in tempo reale, assicurando un'interazione sicura tra l'operatore e l'ambiente remoto [16].

1.2.4 Requisiti per un dispositivo di salvataggio robotico che opera in pozzi artesiani

Per operare efficacemente in un ambiente angusto come un pozzo artesiano, un sistema robotico deve soddisfare stringenti requisiti. L'obiettivo principale è quello di raggiungere, stabilizzare

ed estrarre la vittima nel minor tempo possibile, minimizzando il rischio di aggravare la situazione clinica o di innescare ulteriori cedimenti del terreno. I requisiti fondamentali si articolano nelle seguenti categorie:

- **Requisiti meccanici e di mobilità**
  - **Flessibilità:** Il dispositivo deve presentare dimensioni compatibili con i diametri ridotti dei pozzi, mantenendo la capacità di muoversi e adattarsi alle irregolarità e alle diverse morfologie delle pareti.
  - **Stabilità e scorrimento:** È essenziale integrare sistemi di ancoraggio o di scorrimento controllato che permettano di regolare la velocità di discesa e di mantenere la perfetta centratura lungo l'asse verticale.
  - **Resistenza strutturale:** I materiali impiegati devono essere leggeri ma in grado di resistere a urti, polvere, umidità e corrosione.
- **Teleoperazione e manipolazione**
  - **Controllo remoto affidabile:** Il sistema richiede una teleoperazione intuitiva e reattiva dalla superficie.
  - **Manipolazione avanzata:** Risulta indispensabile l'impiego di bracci meccanici o sistemi di presa progettati per interagire con l'ambiente, rimuovere ostacoli e agganciare o imbracare la vittima in totale sicurezza.
  - **Feedback sensoriale:** L'operatore deve disporre di un ritorno visivo e tattile/sensoriale costante per gestire le operazioni di precisione a distanza.
- **Sicurezza operativa**
  - **Controllo delle forze:** Tutte le parti mobili del robot devono applicare forze e muoversi a velocità controllate, per evitare pressioni eccessive o urti accidentali contro la vittima.
  - **Prevenzione delle cadute:** Il sistema deve prevedere meccanismi di blocco che impediscano lo scivolamento del bambino verso il fondo durante la procedura di recupero.
  - **Design sicuro:** L'involucro e i componenti esterni devono essere privi di spigoli vivi o elementi taglienti.
- **Percezione e sensoristica**
  - **Monitoraggio ambientale e vitale:** Il robot deve essere equipaggiato con sensori per l'analisi in tempo reale della qualità dell'aria (rilevatori di gas, polveri, ossigeno), della temperatura e dell'umidità. Deve inoltre poter rilevare parametri vitali come il battito cardiaco.

  - **Telemetria e visione:** L'orientamento e l'avvicinamento sono garantiti da telecamere ad alta risoluzione e sensori di distanza, che forniscono un flusso informativo continuo ai soccorritori.

- **Autonomia e supporto alla Vittima**

  - **Gestione energetica:** L'alimentazione deve garantire un'autonomia sufficiente per l'intera missione, idealmente combinando una batteria integrata ad alta densità con un cavo esterno che assicuri anche la trasmissione dati.
  - **Supporto psico-fisico:** Il robot deve integrare attrezzature per fornire generi di prima necessità (acqua, ossigeno) e un sistema audio (microfono/altoparlante) per mantenere il contatto e rassicurare il bambino [17].

1.3 Rassegna delle soluzioni attualmente disponibili

Di seguito si riporta un'analisi dei dispositivi realizzati nel corso degli anni.

1.3.1 Robot di salvataggio sviluppato dall'università di Scienza e Tecnologia di Shandong

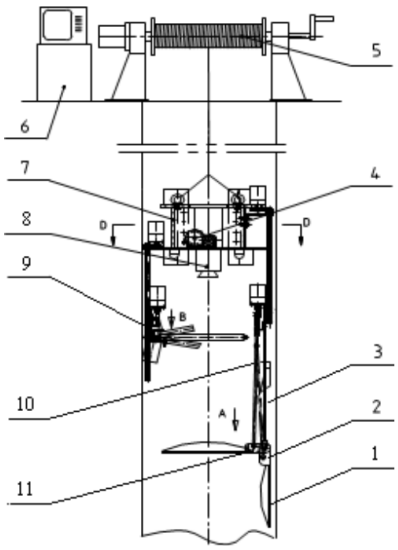
Il dispositivo, realizzato in lega di acciaio, consente il recupero di vittime intrappolate in pozzi di piccolo calibro, con un diametro variabile dai 30 cm a 1 m ed è dimensionato per sopportare un carico fino a 100 kg. È possibile suddividere il dispositivo in tre sottosistemi:

- **Sistema di soccorso:** Rappresenta l'elemento chiave del robot e sfrutta due bracci operanti in sinergia per la messa in sicurezza della vittima:

  - Braccio estendibile (2 GDL): Si estende al di sotto della persona e ruota un supporto di 90 gradi per sostenerne il peso, prevenendo ulteriori scivolamenti verso il fondo.
  - Braccio di presa (3 GDL): Si adatta alla postura del corpo, si abbassa e stringe saldamente la vittima tramite un tubo scorrevole interno, mantenendola in posizione eretta e al sicuro.

- **Sistema di ancoraggio:** Assicura la stabilità del dispositivo. Si avvale di pali appuntiti che fanno presa sulle pareti del pozzo e di ruote simmetriche che consentono movimenti verticali fluidi e controllati lungo la struttura cilindrica.

- **Sistemi ausiliari:** Il robot integra dispositivi di comunicazione audio e video, fondamentali per monitorare il fondo del pozzo e interfacciarsi con la vittima. A questi si aggiunge un sistema di ventilazione regolabile per immettere aria fresca e riscaldata, compensando la potenziale carenza di ossigeno e le basse temperature tipiche dell'ambiente sotterraneo.



1. supporting bracket 2. supporting bracket joint 3. stretching arm 4. anchorage set 5. hoist set 6. manipulator 7. frame work 8. control and communication system 9. clasp arm 10. connecting rod 11. connecting rod joint

Figura 1.7: Struttura del dispositivo di salvataggio [18].

Oltre al modello fisico è stato realizzato anche un modello virtuale per simulare l'operazione di soccorso che si articola nelle seguenti fasi:

1. Il robot viene calato nel pozzo e una volta raggiunta la posizione adeguata, si stabilizza attivando il sistema di ancoraggio.

2. Il braccio estendibile si posiziona sotto la vittima e ruota la staffa di supporto per sostenerne il carico.

3. Il braccio di presa si abbassa e avvolge saldamente il corpo.

4. Il sistema di ancoraggio viene rilasciato, consentendo il sollevamento del robot e l'estrazione in superficie della persona [18].

1.3.2 Robot di salvataggio sviluppato dal Priyadarshini College of Engineering

La macchina integra elementi meccanici, pneumatici, idraulici e sensoristici per garantire un intervento preciso e sicuro. Il sistema è composto da tre sezioni principali:

- **Veicolo di trasporto:** Un meccanismo a quattro barre articolate per tradurre la forza della molla di compressione sulle ruote di gomma. Questo permette al veicolo di aderire saldamente alle pareti del pozzo e di muoversi verticalmente, adattandosi dinamicamente al diametro del condotto.

- **Robot di soccorso:** Dotato di un braccio robotico flessibile a 6 gradi di libertà che può compiere movimenti complessi e monta organi di presa intercambiabili, come pinze flessibili con sensori di pressione e ventose a vuoto, per afferrare delicatamente la vittima senza ferirla.
- **Componenti ausiliari:** Telecamera, LED, speaker, sistema di ossigenazione.

Il telaio centrale costituisce l'asse portante del sistema, al quale sono fissati tutti gli elementi:

- **Elemento traslazionale e molla di compressione:** Consentono al robot di muoversi all'interno del pozzo. La molla genera la forza necessaria per far aderire il sistema alle pareti, assorbendo le vibrazioni e adattando la struttura alle variazioni di diametro del tubo.
- **Attuatori:** Il sistema utilizza dei servomotori per il controllo preciso della posizione angolare e degli attuatori lineari per generare movimenti rettilinei essenziali per la presa e il posizionamento.
- **Sistemi di visione e illuminazione:** Una telecamera wireless, supportata da un'illuminazione a LED ad alta intensità, trasmette in tempo reale le immagini in superficie, permettendo all'operatore di individuare la vittima e valutare la strategia di recupero.



Figura 1.8: Architettura del sistema di salvataggio [19].

L'operazione di recupero segue una procedura divisa in tre fasi: localizzazione, presa ed estrazione.

1. **Discesa e ispezione:** Il robot viene calato nel pozzo ancorato a una fune di sicurezza. La telecamera integrata localizza la posizione e la postura del bambino.
2. **Preparazione e supporto vitale:** In base ai dati visivi raccolti, il robot viene temporaneamente riportato in superficie per montare l'organo di presa più adatto allo

scenario (orizzontale o verticale). Viene contestualmente calato un tubo per l'erogazione di ossigeno.

3. **Recupero:** Il robot viene calato nuovamente. L'operatore in superficie manovra il braccio robotico per avvolgere la vittima e sollevarla in sicurezza tramite un sistema di pulegge esterne [19].

1.3.3 Robot di salvataggio sviluppato dall'Indian Institute of Information Technology

Il robot si basa su un'architettura compatta strutturata su due piastre circolari sovrapposte ed è progettato per l'esecuzione di operazioni di recupero in teleoperazione completa. I componenti hardware e strutturali che caratterizzano il dispositivo sono:

- **Piastra superiore:** Dove risiedono le unità di attuazione lineare che, spingendo contro le pareti del pozzo, bloccano e stabilizzano il robot all'altezza necessaria per il recupero.
- **Piastra inferiore e bracci pneumatici:** Un sistema di ingranaggi gestisce la rotazione indipendente di questa piastra, garantendo l'allineamento planare ottimale con la vittima. A essa sono fissati due bracci pneumatici teleoperati.
- **Sistema di estrazione:** L'aggancio avviene tramite un'imbracatura toracica standard, collaudata per sollevare carichi equivalenti al peso di un ragazzo di 15 anni.
- **Visione multi-livello:** Oltre a un impianto di illuminazione integrato, il robot è equipaggiato con quattro fotocamere e due sensori ad alta risoluzione che forniscono la panoramica ambientale; inoltre, altre due fotocamere, montate sulle estremità dei bracci, forniscono la visuale ravvicinata, essenziale per teleoperare i bracci anche nel caso in cui la vittima sia incosciente o non collaborativa.
- **Teleconferenza integrata:** Un modulo di comunicazione dotato di schermo LCD e audio ad alta definizione instaura una connessione bidirezionale. I familiari possono monitorare il recupero in tempo reale e interfacciarsi con la vittima, un supporto psicologico cruciale per tranquillizzarla durante l'estrazione.
- **Supporto vitale:** Il robot integra condotti per il ricambio dell'ossigeno e una maschera di emergenza che può essere manipolata e applicata dai bracci robotici sul viso della vittima in caso di attacchi di panico o marcata ipossia.



Figura 1.9: Layout strutturale del dispositivo di salvataggio [20].

La procedura di estrazione è caratterizzata dai seguenti passaggi:

1. **Discesa e posizionamento:** Il dispositivo è calato tramite funi fino al raggiungimento della distanza di sicurezza dalla vittima, per consentire agli operatori in superficie di valutare visivamente lo scenario ed elaborare i punti di presa.

2. **Stabilizzazione:** Gli attuatori lineari superiori ancorano saldamente il robot, mentre la piastra inferiore viene ruotata per posizionare i bracci in asse con il paziente.

3. **Manipolazione:** Avvalendosi delle fotocamere, i bracci robotici vengono teleoperati per avvolgere il torace della vittima con le cinghie dell'imbracatura.

4. **Recupero:** Verificato il corretto inserimento dell'imbracatura toracica, l'ancoraggio viene disattivato per procedere al sollevamento congiunto del robot e della persona [20].

Un ulteriore studio condotto da un team di ricercatori del Paavai Engineering College ha proposto un'evoluzione di questa tipologia di robot per superare le limitazioni legate all'inserimento di un'imbracatura e arginare il rischio di scivolamento della vittima. Questo aggiornamento introduce un sistema che presenta un livello di sicurezza più elevato, sostituendo le classiche prese toraciche con supporti pneumatici e gonfiabili. Le innovazioni ingegneristiche principali apportate in questa versione includono:

- **Ancoraggio a depressione:** La stabilizzazione del robot all'interno del pozzo non si affida più a bracci meccanici spingenti, ma utilizza valvole pneumatiche collegate a ventose. Questo sistema sfrutta l'aria compressa per far aderire il dispositivo alle pareti verticali, garantendo un bloccaggio rapido e sicuro della piastra.

- **Rilevamento ibrido di precisione:** Oltre alla videocamera, il sistema integra un sensore a infrarossi per misurare con esattezza la distanza della vittima, permettendo un avvicinamento più cauto e preciso.
- **Stabilizzazione cranica:** Per evitare urti o lesioni durante le manovre, il braccio robotico principale è progettato esclusivamente per cingere e stabilizzare delicatamente la testa del bambino.
- **Base d'appoggio gonfiabile:** La piastra rotante individua lo spazio vuoto tra il corpo del bambino e la parete del pozzo, consentendo l'inserimento di un sottile cavo in fibra che trasporta un airbag sgonfio fin sotto la vittima.
- **Recupero:** Una volta posizionato, l'airbag viene gonfiato tramite un compressore. Questo crea un vero e proprio cuscino rigido che funge da pavimento artificiale per il bambino, impedendogli fisicamente di scivolare più a fondo durante il tiro del sistema di carrucole verso la superficie [21].

1.3.4 Robot di salvataggio sviluppato dalla VIT University

Il Robot in esame mira a recuperare la vittima in tempi brevi e senza causare lesioni, minimizzando i rischi tecnici dell'operazione. Lo sviluppo del robot ha seguito un flusso di progettazione rigoroso fortemente incentrato sull'ergonomia, al fine di armonizzare il funzionamento della macchina con le esigenze della vittima. La struttura è stata ingegnerizzata per soddisfare tre criteri fondamentali:

- Fornire un supporto vitale continuo, garantendo l'erogazione di ossigeno alla persona intrappolata.
- Assicurare una presa e un sollevamento stabili, scongiurando il rischio di cadute o scivolamenti del robot durante l'estrazione.
- Completare il recupero nel minor tempo possibile.

Il dispositivo è caratterizzato da una struttura leggera che viene calata nel pozzo sostenuta da un cavo, a sua volta gestito in superficie da un gruppo motoriduttore, un supporto e i relativi accessori. Il sistema è equipaggiato con una videocamera che permette agli operatori di monitorare la situazione da vicino e di mantenere un'interazione continua con la vittima. Il protocollo operativo prevede un funzionamento parzialmente autonomo del dispositivo:

1. L'operatore specializzato posiziona il supporto sul foro e inserisce i parametri operativi, ovvero la profondità e il diametro del pozzo.
2. Il robot avvia la discesa autonomamente. Un sensore a infrarossi, combinato con la telecamera inferiore, rileva la distanza esatta della vittima dal fondo.

3. Raggiunta la quota operativa, il dispositivo si stabilizza all'interno del condotto e avvia l'erogazione di ossigeno tramite un condotto speciale.

4. Il robot rileva la postura della persona e cala un lungo tubo di assistenza sul quale la vittima può aggrapparsi.

5. La struttura meccanica, dotata di tre gradi di libertà, si adatta dinamicamente per massimizzare la sicurezza e il comfort del bambino.

6. Verificato che la vittima sia posizionata in sicurezza sulle tre gambe del robot, i motori entrano in funzione trainandola verso l'alto nel minor tempo possibile [22].



(a) Dispositivo principale.

(b) Struttura di supporto.

Figura 1.10: Componenti del sistema di salvataggio [22].

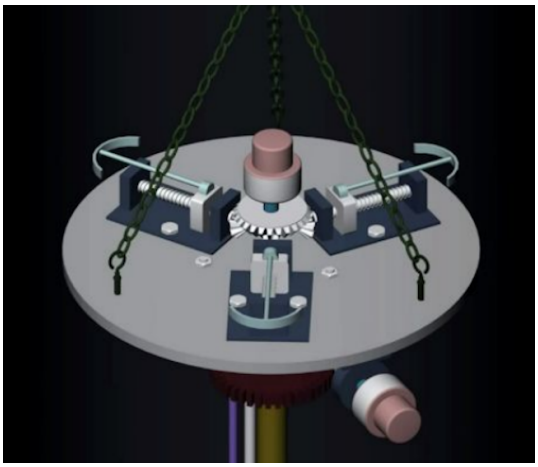
1.3.5 Robot di salvataggio sviluppato dall'IIT Madras

Il dispositivo di soccorso ha attraversato tre fasi di sviluppo iterativo (Alpha, Beta, Gamma), affinando progressivamente la sicurezza, la cinematica e l'affidabilità dei sistemi di controllo. La struttura di tale dispositivo è divisa in:

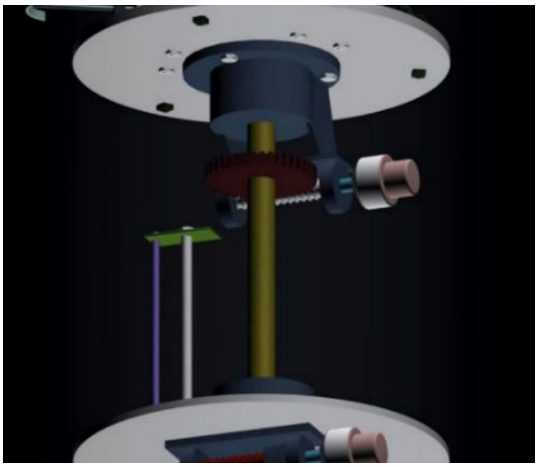
- **Meccanismo di ancoraggio:** Costituito da tre ganasce disposte a 120°, azionate da un motore DC tramite ingranaggi conici e un sistema a vite. Il modulo stabilizza il robot al centro del pozzo prevenendo le oscillazioni. Per garantire l'estrazione d'emergenza in caso di blocco, i giunti sono progettati per collassare strutturalmente se la fune viene tirata con una forza superiore a 50 N.

- **Meccanismo di posizionamento:** Un azionamento a vite senza fine gestisce la rotazione del modulo inferiore. Un sistema a cremagliera garantisce la traslazione radiale del braccio, permettendo l'adattamento a pozzi di diametro variabile tra 25.4 e 45.72 cm.

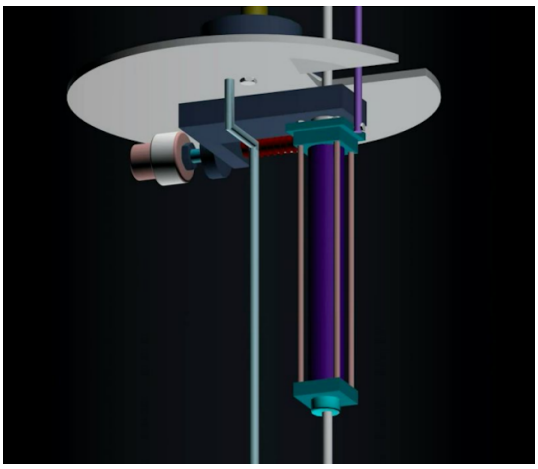
- **Meccanismo di sollevamento:** Un tubo sottile (1 *cm* di diametro) viene fatto scorrere sotto la vittima da cui fuoriesce una sacca in nylon che, gonfiandosi, dispiega una piattaforma metallica a ventaglio in grado di sostenere fino a 30 *kg*. L'elevazione operativa è affidata a un pistone pneumatico.
- **Sistema di controllo:** L'elettronica di bordo impiega FPGA e comunica tramite protocollo CAN. La stazione base, operata via joystick, utilizza un driver EPOS per la gestione dei motori. Un circuito di bypass hardware indipendente garantisce il controllo manuale diretto dalla superficie in caso di guasto dell'elettronica di bordo.



(a) Meccanismo di ancoraggio.



(b) Meccanismo rotazionale.



(c) Meccanismo di posizionamento radiale.



(d) Meccanismo di sollevamento.

Figura 1.11: Meccanismi del dispositivo di salvataggio [23].

È interessante notare le differenze fra le tre fasi di sviluppo del dispositivo:

- **Versione Alpha:** Prototipo in acciaio dolce, caratterizzato da cablaggio fisico per evitare interferenze wireless, telecamera singola e attuatori lineari per il sollevamento..
- **Versione Beta:** Revisione focalizzata sull'ottimizzazione cinematica. Il sistema di sollevamento è passato dall'utilizzo di attuatori lineari ad una tecnologia pneumatica per migliorare il rapporto potenza/peso. Inoltre è stata introdotta una gabbia di sicurezza separata dai motori. Il sistema è stato testato in un pozzo simulato con una profondità di 6 metri, recuperando un manichino di 15 kg (con collaudo statico della piattaforma metallica a 50 kg).
- **Versione Gamma:** Progettata per azzerare i rischi operativi. La gabbia di sicurezza è ora sospesa direttamente alla fune di recupero. Il meccanismo di ancoraggio è dotato di cerniere a collasso unidirezionale che si chiudono a cono se tirate verso l'alto, garantendo un rilascio d'emergenza infallibile. È stato integrato l'imaging termico/IR e aggiunto un secondo tubo dotato di airbag laterali che permette di spostare e riallineare dolcemente la postura del bambino, facilitando l'inserimento della piattaforma principale indipendentemente dalla posizione in cui è incastrato.

L'operazione di salvataggio prevede le seguenti fasi:

1. Discesa del dispositivo all'interno del pozzo.
2. Stabilizzazione della propria posizione geometrica attraverso l'attuazione del meccanismo di ancoraggio, dopo l'intercettazione della quota d'interesse.
3. Intervento del modulo di posizionamento per la correzione dell'orientamento angolare ed inquadramento dell'assetto ideale.
4. Dispiegamento del sistema di sollevamento per l'estrazione della vittima [23].

Gli studi successivi si sono concentrati sull'aggiornamento della logica di controllo. In particolare un gruppo di ricercatori del Rao Bahadur Y. Mahabaleshwarappa Engineering College ha pubblicato un'analisi che riprende integralmente la struttura meccanica del dispositivo e che mira a sostituire l'elettronica originale con un'infrastruttura avanzata governata da un controller NI myRIO. Questa variante si concentra su due ottimizzazioni principali:

- **Elaborazione centralizzata ad alte prestazioni:** L'architettura NI myRIO permette un'elaborazione in tempo reale molto più rapida e robusta dei feed provenienti dalla telecamera, riducendo la latenza del dispositivo.
- **Gestione ibrida della stabilizzazione:** Pur mantenendo l'airbag inferiore come piattaforma di sicurezza passiva, il nuovo sistema di controllo ottimizza la gestione attiva dei servomotori superiori. Questo permette al braccio meccanico di intervenire dall'alto in maniera sincronizzata con il gonfiaggio dell'airbag dal basso [24].

1.3.6 Robot di salvataggio sviluppato dalla METS School of Engineering

Il dispositivo è progettato per superare la necessità di scavi paralleli nei pressi dei pozzi artesiani, focalizzandosi su un'ispezione immediata e su manovre di recupero dirette all'interno dello stesso condotto. L'harware del sistema presenta dei componenti modulari che possono essere pilotati tramite wireless:

- **Unità di elaborazione centrale:** Il modulo calato nel pozzo è governato da un microcontrollore a 8 bit ATmega8.
- **Infrastruttura di comunicazione:** La trasmissione bidirezionale dei comandi e dei dati telemetrici tra il robot e la stazione PC di superficie avviene tramite moduli wireless standard ZigBee operanti sulla banda ISM a $2.4\,GHz$.
- **Apparato sensoristico:** Il monitoraggio ambientale è affidato a un sensore di temperatura di precisione, mentre il calcolo dell'altitudine e della distanza rispetto alla vittima avviene tramite un modulo ad ultrasuoni.
- **Sistema di visione:** L'ispezione visiva è garantita da telecamere a infrarossi impermeabili accoppiate a matrici di LED ad alta luminosità.
- **Attuazione meccanica:** I bracci robotici di presa sono movimentati tramite servomotori controllati in PWM.
- **Modulo di interazione audio:** Il robot integra un registratore audio digitale in grado di riprodurre tracce acustiche, consentendo al bambino di ascoltare la voce dei genitori.

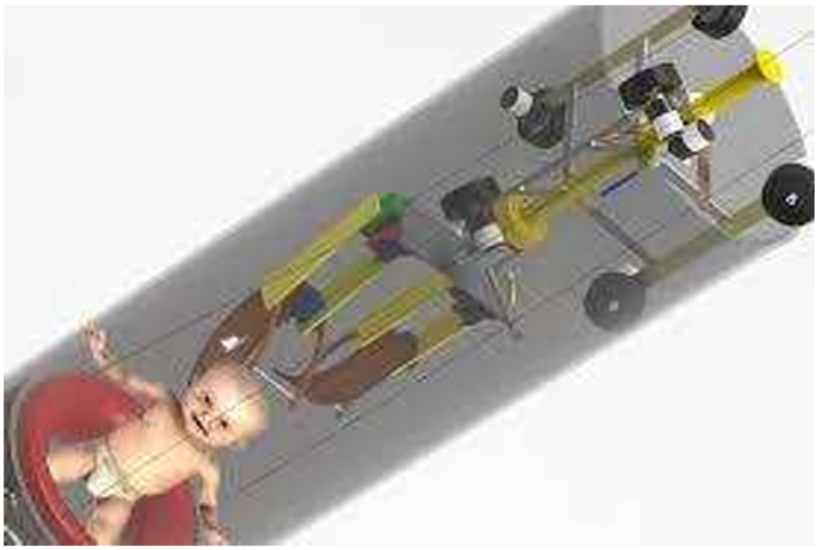


Figura 1.12: Configurazione del prototipo di salvataggio [25].

L'intervento è suddiviso nelle seguenti fasi:

1. Il robot viene calato lentamente all'interno della tubazione mediante un cavo d'acciaio supportato in superficie da un telaio con gruppo motoriduttore e pulegge.
2. Durante la discesa, l'operatore monitora il feed video su uno schermo TV ad alta definizione e analizza la distanza fornita dal sensore per localizzare l'esatta quota della vittima.
3. Contestualmente, viene attivato il modulo audio per trasmettere messaggi vocali di conforto atti a tranquillizzare il bambino.
4. Raggiunta la quota target, l'operatore comanda i servomotori per chiudere i bracci meccanici attorno al corpo della vittima, mettendola in sicurezza.
5. Verificato l'aggancio, il sistema di sollevamento di superficie recupera il robot e la vittima scongiurando lesioni secondarie [25].

Un successivo studio ha sviluppato un'evoluzione del modello METS, analizzandone i limiti strutturali legati all'assenza di monitoraggio dei gas tossici e alla mancanza di un sistema attivo di ossigenazione. Il prototipo risultante introduce sostanziali modifiche hardware attraverso l'introduzione di nuovi moduli:

- **Miglioramento del controllore:** La logica programmabile è stata trasferita su una scheda Arduino Uno, ottimizzando la gestione dei registri di input/output tramite l'IDE dedicato.
- **Rilevamento ambientale avanzato:** Il sistema integra ora un sensore di gas MQ2 ad alta sensibilità per rilevare accumuli di sostanze nocive infiammabili o tossiche.
- **Verifica dello stato vitale:** Per monitorare lo stato di incoscienza o i movimenti della vittima in tempo reale, è stato installato un sensore a infrarossi passivi (PIR) con un raggio d'azione fino a 10 metri.
- **Modulo di supporto vitale attivo:** Parallelamente alla struttura del braccio robotico è stata aggiunta una linea dedicata per l'erogazione di ossigeno, la cui attivazione viene decisa dagli operatori in base alla concentrazione di gas nocivi rilevata dal sensore MQ2 [26].

1.3.7 Robot di salvataggio sviluppato dal Chennai Ramapuram SRM Institution of Science and Technology

Questo dispositivo meccanico, si propone come un'alternativa leggera, a basso costo e facilmente trasportabile. La sua caratteristica principale risiede nell'utilizzo di componenti pneumatici per il sollevamento, evitando del tutto l'impiego di bracci meccanici di presa. Il sistema è costituito da un'unità in superficie e da un modulo operativo calato all'interno del pozzo:

- **Unità superficiale:** consiste in una struttura esterna dotata di un rullo che avvolge una robusta fune in nylon flessibile, ideale per adattarsi a diverse profondità.
- **Modulo a doppio Disco:** La struttura che viene calata è formata da due dischi paralleli con un diametro di circa 28 cm. Il disco superiore è fisso ed è collegato alla fune di calata, mentre il disco inferiore è in grado di ruotare indipendentemente.
- **Meccanismo di ancoraggio:** Situato sul disco superiore, questo sistema utilizza un motore DC da 12 V a 30 rpm per azionare degli ingranaggi conici accoppiati ad un meccanismo a vite. L'espansione del meccanismo blocca saldamente il robot contro le pareti del pozzo.
- **Meccanismo di orientamento:** Un secondo motore DC da 12 V a 10 rpm aziona degli ingranaggi cilindrici per ruotare il disco inferiore e orientare l'apparato pneumatico sottostante nella posizione ottimale.
- **Cilindro pneumatico e airbag:** Sul disco inferiore è montato un cilindro pneumatico che posiziona un airbag sgonfio. L'aria è fornita da un compressore esterno e gestita da un'elettrovalvola a solenoide. L'airbag impiegato è dimensionato per sostenere carichi fino a 50 kg, garantendo un altissimo margine di sicurezza rispetto al peso medio di un bambino.
- **Sistema di visione:** Il robot è equipaggiato con una telecamera ad alta definizione che trasmette in tempo reale il video dell'ambiente sotterraneo al PC dell'operatore.

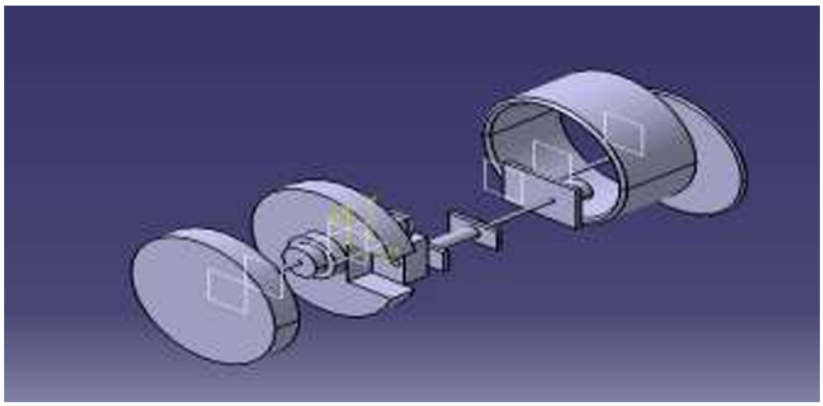


Figura 1.13: CAD del dispositivo di salvataggio [27].

L'operazione di salvataggio si articola in cinque fasi:

1. **Discesa e localizzazione:** Il robot viene calato srotolando la fune dal telaio esterno. L'operatore sfrutta il feed della telecamera per individuare l'esatta posizione della vittima e arresta la discesa all'altezza più appropriata.

2. **Ancoraggio al Pozzo:** Viene attivato il motore del disco superiore. Gli ingranaggi conici espandono il sistema a vite contro le pareti del tubo, bloccando del tutto la macchina per impedire le oscillazioni.

3. **Inserimento del supporto:** Utilizzando il motore inferiore, l'operatore ruota il cilindro pneumatico per infilare l'asta e l'airbag sgonfio nell'eventuale spazio vuoto al di sotto del corpo del bambino.

4. **Messa in sicurezza:** L'elettrovalvola viene aperta per immettere aria compressa nell'airbag. Gonfiandosi, il cuscino si espande riempiendo il diametro del pozzo e crea una base d'appoggio stabile su cui la vittima può comodamente sedersi.

5. **Estrazione:** Una volta verificato il posizionamento, l'operatore inverte la polarità della batteria per ritrarre le viti e sbloccare l'ancoraggio parietale. Il processo si conclude azionando l'argano in superficie, che solleva verso l'alto l'intero dispositivo con il bambino messo in sicurezza sull'airbag [27].

1.3.8 Robot di salvataggio sviluppato dall'Amrita School of Engineering

Il dispositivo sfrutta un Raspberry Pi che funge da web server per rendere la teleoperazione accessibile via browser da un'unica dashboard remota ed è caratterizzato da un'architettura strutturata su due livelli:

- **Unità di superficie:** costituita da un laptop per il comando remoto e da un motore DC da 12 V accoppiato ad una puleggia per la movimentazione verticale. Il senso di rotazione è gestito fisicamente e in sicurezza tramite un interruttore DPDT.

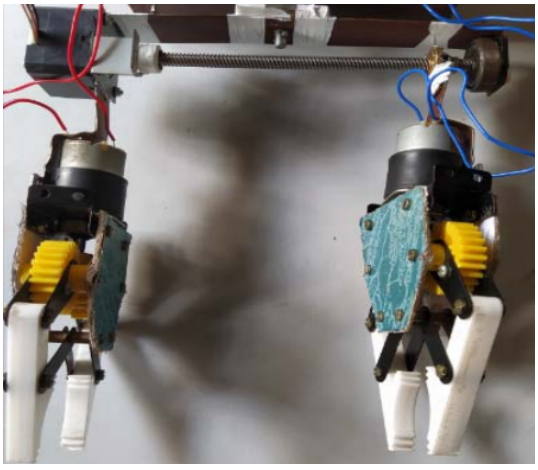
- **Modulo sotterraneo:** inserito in un box metallico isolato elettricamente in PVC. Il nucleo di calcolo è un Raspberry Pi che raccoglie la telemetria e comanda l'attuazione tramite driver L298N. L'apparato sensoristico comprende: Pi Camera, LED, un sensore DHT11 Per il campionamento in tempo reae di temperatura e umidità e un sensore a ultrasuoni per il rilevamento della distanza della vittima.



Figura 1.14: Dispositivo di salvataggio complessivo [28].

I bracci robotici sono progettati per due scenari d'emergenza:

- **Vittima con braccia alzate:** Il recupero avviene afferrando i polsi. La chiusura delle pinze è governata da un motore DC collegato a una trasmissione con vite senza fine e ingranaggi cilindrici, che convertono il moto rotatorio in un serraggio autobloccante.
- **Vittima con braccia abbassate:** Il recupero avviene afferrando il capo. Si utilizza un motore passo-passo collegato a una vite di manovra con filettatura trapezoidale. La vite aziona due supporti concavi che si chiudono delicatamente attorno alla testa del bambino.



(a) Configurazione per afferare i polsi.



(b) Configurazione per afferare il capo.

Figura 1.15: Configurazioni dei bracci robotici [28].

Il protocollo di salvataggio si articola nelle seguenti fasi:

1. **Discesa e ispezione:** Il robot viene calato all'interno del pozzo, dove avvia il monitoraggio continuo delle condizioni ambientali.
2. **Localizzazione:** Attraverso la sensoristica integrata, il sistema rileva l'esatta profondità e la posizione assunta dal bambino.
3. **Messa in sicurezza:** Successivamente all'allineamento, le pinze robotiche vengono azionate per afferrare saldamente la vittima.
4. **Estrazione:** Dopo che è stato effettuato correttamente l'aggancio, il motore principale situato in superficie avvia il sollevamento, consentendo la risalita del robot e del bambino [28].

1.3.9 Robot di salvataggio sviluppato da diverse università in Chennai

Questo dispositivo introduce tecnologie di interfaccia avanzate per ottimizzare la percezione spaziale dell'operatore e il monitoraggio dei parametri vitali del bambino, unendo una presa robotica a un sistema di supporto pneumatico. L'hardware del sistema è costituito da un microcontrollore PIC16F877A e comunica tramite wireless ZigBee, permettendo il controllo sia tramite PC sia tramite applicazione mobile. Le particolarità del dispositivo includono:

- **Movimentazione omnidirezionale:** Il robot si muove all'interno del pozzo tramite ruote azionate da motori DC e ingranaggi omnidirezionali, capaci di regolare il proprio assetto per adattarsi dinamicamente alle pareti del foro.
- **Visione in realtà aumentata:** Il feed della telecamera viene elaborato utilizzando la realtà aumentata, sovrapponendo informazioni e modelli generati al computer in tempo reale sulle immagini fisiche, aiutando i soccorritori a valutare meglio distanze e ingombri.
- **Rilevamento biometrico:** Oltre ai classici sensori di gas, di temperatura e a ultrasuoni, il sistema è equipaggiato con un sensore acustico ad alta sensibilità che capta e isola il suono del respiro del bambino, confermandone lo stato in vita anche in assenza di feedback visivo .
- **Sistema ibrido di presa:** Il recupero è affidato a due bracci robotici flessibili, supportati da un airbag gonfiato tramite un compressore integrato per sollevare la vittima comodamente. È presente anche un erogatore di ossigeno e uno speaker per comunicare con il bambino.



Figura 1.16: Composizione del dispositivo di salvataggio [29].

L'operazione di soccorso è suddivisa nelle seguenti fasi:

1. **Discesa e valutazione ambientale:** Il robot viene calato e adatta l'estensione delle ruote al diametro del pozzo. Contemporaneamente, i sensori mappano la qualità dell'aria, attivando l'erogatore di ossigeno se vengono rilevati gas nocivi.

2. **Localizzazione visiva e biometrica:** La telecamera e il sensore a ultrasuoni misurano la distanza dal fondo, mentre il sensore sonoro rileva il ritmo respiratorio per accertare le condizioni della vittima.

3. **Posizionamento del supporto pneumatico:** Il compressore aziona l'airbag posizionandolo sotto o in prossimità del bambino, creando una barriera morbida per assorbire il peso ed evitare cadute ulteriori.

4. **Afferraggio ed estrazione:** Tramite i comandi PC/Mobile, i bracci vengono orientati per avvolgere in modo sicuro la vittima. Una volta bloccata tra i bracci robotici e il cuscino ad aria, il sistema viene trainato in superficie [29].

1.3.10 Robot di salvataggio sviluppato dal Mangalam College of Engineering

Questo progetto, introduce un approccio ingegneristico di tipo biomimetico per il superamento degli ostacoli nei pozzi artesiani. La struttura si ispira all'anatomia e al comportamento del pangolino, il quale impiega una lingua estremamente flessibile ed estensibile per insinuarsi in

cunicoli ristretti e catturare in modo saldo la propria preda. L'architettura del dispositivo traspone questo principio biologico in un sistema meccatronico composto da tre elementi fondamentali:

- **Sistema di estensione meccanica:** Emulando la dinamica della lingua dell'animale, il robot è equipaggiato con un modulo di estensione lineare capace di penetrare agilmente all'interno della cavità, raggiungendo profondità elevate mantenendo un ingombro laterale minimo.
- **End-effector biomimetico:** A differenza dei tradizionali gripper a pinza, il dispositivo adotta come organo di presa una mano robotica animatronica consentendo una presa articolata e antropomorfa, capace di conformarsi all'anatomia del bambino per avvolgerlo in maniera sicura, salda e adattiva, riducendo drasticamente il rischio di applicare pressioni lesive localizzate.
- **Modulo di supporto inferiore bilanciato:** Per ovviare alla problematica dello sforzo di trazione concentrato (tipico dei robot che agganciano la vittima solo per le braccia o il torace), il sistema integra un meccanismo di appoggio aggiuntivo dal basso. Questa soluzione permette di distribuire uniformemente la forza di sollevamento su tutta l'area del corpo della vittima, prevenendo lussazioni e traumi articolari.



Figura 1.17: Design del dispositivo di salvataggio [30].

La sequenza di estrazione si basa sulle seguenti fasi:

1. **Discesa e avvicinamento:** Il sistema di estensione meccanica cala progressivamente il dispositivo all'interno del foro artesiano fino a posizionarsi in prossimità del target.
2. **Manipolazione animatronica:** L'operatore teleopera le dita dell'end-effector animatronico per eseguire una presa sicura attorno al busto o agli arti superiori esposti, bloccando stabilmente il bambino.
3. **Posizionamento del supporto inferiore:** Contestualmente alla presa, viene interposto il meccanismo di supporto alla base del corpo della vittima, creando una base che blocca fisicamente ogni possibilità di ulteriore scivolamento.
4. **Estrazione:** Inizia la fase di recupero. Grazie all'azione coordinata della mano animatronica, il bambino viene sollevato e riportato in superficie in totale sicurezza [30].

1.3.11 Robot di salvataggio sviluppato dall'Adhiyamaan College of Engineering

Questo dispositivo propone un'architettura compatta focalizzata sull'integrazione di sensori ambientali e biometrici gestiti tramite una piattaforma hardware open-source, con l'obiettivo di eseguire un recupero mirato e monitorato riducendo al minimo la complessità meccanica. La struttura del sistema è ingegnerizzata per operare all'interno del condotto e si compone dei seguenti moduli chiave:

- **Unità di controllo:** L'intero apparato elettronico e la logica di attuazione sono governati da una scheda Arduino, che si occupa di ricevere i comandi dalla superficie e coordinare i movimenti e i sensori in tempo reale.
- **Organo di presa:** Il recupero della vittima è affidato a un braccio robotico articolato, i cui movimenti sono calibrati per afferrare e stabilizzare il bambino in modo sicuro all'interno della sezione ristretta del pozzo.
- **Monitoraggio della qualità dell'aria:** Il robot integra un sensore di gas specifico per rilevare tempestivamente la presenza di miscele tossiche o asfissianti che tendono ad accumularsi nei condotti sotterranei, permettendo di valutare l'immediatezza del supporto vitale.
- **Sensori ausiliari e visione:** Il monitoraggio è completato da un sensore di temperatura per tenere traccia delle condizioni termiche ambientali e da una telecamera in miniatura che trasmette in streaming continuo lo stato visivo e posturale della vittima alla stazione di controllo esterna.



Figura 1.18: Robot durante una simulazione di soccorso [31].

Il protocollo d'intervento segue una sequenza logica controllata da remoto dagli operatori di superficie:

1. **Discesa e analisi ambientale:** Il robot viene calato nel pozzo artesiano. Durante la discesa, il sistema analizza continuamente la temperatura e la concentrazione di gas tossici, mentre l'operatore guida il posizionamento sfruttando il feed live della telecamera in miniatura.

2. **Rilevamento del target e approccio:** Una volta intercettata la quota della vittima, il dispositivo arresta la discesa e si posiziona in modo da allineare il braccio robotico rispetto alla postura rilevata visivamente.

3. **Presa e stabilizzazione:** L'operatore aziona i servomotori del braccio robotico tramite l'interfaccia Arduino, chiudendo le pinze attorno alla vittima per garantirne un aggancio saldo che ne impedisca lo scivolamento.

4. **Estrazione:** Completata e verificata la stabilità della presa sotto costante monitoraggio video, il sistema di sollevamento principale recupera l'intera struttura verso la superficie, portando in salvo il bambino [31].

1.3.12 Robot di salvataggio sviluppato dal Gurudeva Institute of Science and Technology

Questo prototipo nasce con l'obiettivo di superare i limiti dei robot a singola funzione, integrando un approccio multi-metodo, attraverso diverse tecnologie, per garantire il successo dell'estrazione indipendentemente dalla postura della vittima. L'architettura del robot privilegia la realizzazione di una piattaforma di sicurezza al di sotto del bambino:

- **Adattabilità:** La struttura esterna del robot è dotata di un meccanismo pignone e cremagliera azionato da motori passo-passo. Questo permette al telaio di espandersi o contrarsi radialmente per ancorarsi e adattarsi a pozzi con diametri variabili.
- **Pallone pneumatico:** Il sistema cala un pallone pneumatico che, una volta gonfiato, va a sigillare il fondo del pozzo impedendo cadute.
- **Supporto vitale e visione:** Il dispositivo è equipaggiato con telecamere supportate da luci a LED per l'ispezione visiva, sensori di profondità e un condotto dedicato per l'erogazione diretta di ossigeno.



Figura 1.19: Rappresentazione del dispositivo durante l'estrazione [32].

La procedura di intervento è caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. **Discesa e ispezione:** Il dispositivo viene calato nel pozzo. Sfruttando la telecamera, gli operatori localizzano il bambino e valutano gli spazi vuoti presenti tra il corpo e la parete del condotto.
2. **Stabilizzazione:** Raggiunta la quota operativa, i motori passo-passo azionano la cremagliera, allargando il telaio fino a bloccare saldamente il robot contro le pareti del pozzo.
3. **Creazione della base d'appoggio:** Il modulo inferiore viene fatto scivolare delicatamente nello spazio vuoto a lato del bambino. Una volta che il modulo si trova al di sotto della vittima viene attivato il compressore per gonfiare il pallone.

4. **Estrazione:** I morsetti laterali vengono sbloccati e il sistema viene sollevato lentamente finché il bambino non si trova completamente all'interno dell'involucro protettivo, al riparo da graffi o urti contro le pareti. L'intera struttura, sostenendo il bambino dal basso, viene sollevata in superficie [32].

1.3.13 Robot di salvataggio sviluppato dal NIT Tiruchirappalli

Molti dei dispositivi di soccorso calati tramite un sistema a fune e puleggia soffrono di una marcata instabilità durante il tentativo di afferrare la vittima, con il rischio di provocare cedimenti delle pareti del pozzo. Per risolvere questa criticità, è stato sviluppato un modello robotico caratterizzato da un'architettura modulare impilata, focalizzata sulla stabilizzazione e sulla precisione della manovra. Il dispositivo si sviluppa in verticale ed è suddiviso in quattro moduli indipendenti progettati per evitare fenomeni di retroazione indesiderata sui motori:

- **Modulo di ancoraggio:** È l'elemento chiave per la stabilizzazione. Impiega tre piastre di ancoraggio distanziate di 120°. Il loro dispiegamento è gestito da un meccanismo a parallelogramma azionato da una vite guida, che costringe i pad a muoversi verticalmente verso l'alto e verso l'esterno fino a bloccarsi saldamente contro le pareti del pozzo, azzerando le oscillazioni.
- **Modulo traslazionale:** Una volta ancorato il robot, questo modulo permette all'intera struttura di sollevarsi o abbassarsi con precisione millimetrica rispetto al punto di ancoraggio fisso.
- **Modulo rotazionale:** Un motore accoppiato a un cuscinetto reggispinta fa ruotare la sezione inferiore del robot lungo il piano orizzontale, permettendo di allineare gli organi di presa all'esatta postura assunta dal bambino.
- **Sistema di presa e attuazione:** L'estremità operativa utilizza una vite guida bidirezionale per regolare la distanza reciproca tra due bracci di presa principali. Il sistema è completato da pinze secondarie aggiuntive che, una volta attivata la presa, creano uno scudo protettivo attorno al corpo della vittima.



Figura 1.20: Struttura del robot [33].

L'operazione di soccorso è caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. **Discesa e stabilizzazione:** Il dispositivo viene calato nel foro e giunto in prossimità del target, il modulo di ancoraggio viene attivato: i pad premono contro le pareti, trasformando il robot in una piattaforma rigida e stabile.

2. **Allineamento di precisione:** Tramite i moduli traslazionale e rotazionale, gli operatori aggiustano l'assetto del sistema di presa compensando eventuali disallineamenti posturali del bambino.

3. **Presa:** Le pinze principali vengono avvicinate gradualmente fino ad afferrare in modo saldo il bambino all'altezza delle scapole.

4. **Messa in sicurezza:** Le pinze secondarie vengono chiuse attorno al bambino, inglobandolo in uno spazio protetto per evitare urti accidentali con le pareti del pozzo.

5. **Risalita:** Solo quando l'area di presa è in totale sicurezza, le piastre di ancoraggio vengono ritratte, e l'intera struttura viene trainata verso la superficie [33].

1.3.14 Robot di salvataggio sviluppato dal Sri Krishna College of Technology

Questo dispositivo rivoluziona l'approccio alla teleoperazione introducendo un sistema di controllo basato sul riconoscimento dei gesti. L'obiettivo è superare la rigidità delle classiche

pinze meccaniche pilotate tramite joystick, dotando l'operatore di una mano robotica capace di replicare fedelmente i movimenti della mano umana per adattarsi dinamicamente alla postura della vittima. L'architettura del sistema si divide in un modulo trasmettitore indossabile e un modulo ricevitore operativo:

- **Guanto sensorizzato:** L'interfaccia di controllo è un guanto indossato dall'operatore, equipaggiato con sensori di flessione su ogni dito e sensori accelerometrici. La variazione di resistenza elettrica generata dalla flessione delle dita viene campionata da una scheda Arduino integrata sul guanto.
- **Mano robotica:** L'organo di presa è una mano robotica antropomorfa realizzata tramite stampa 3D, all'interno della quale sono alloggiati servomotori indipendenti per l'attuazione delle dita.
- **Comunicazione wireless zigBee:** Per evitare l'ingombro e il rischio di tranciamento dei cavi di controllo durante la discesa, la trasmissione dei dati telemetrici tra il guanto e la mano robotica avviene interamente in modalità wireless tramite moduli ZigBee.
- **Supporto vitale e comunicazione:** Il robot è dotato di un tubo dedicato per l'erogazione tempestiva di ossigeno, di una telecamera accoppiata a un sensore a ultrasuoni per il calcolo della distanza, e di un sistema audio bidirezionale per mantenere il contatto psicologico con il bambino.

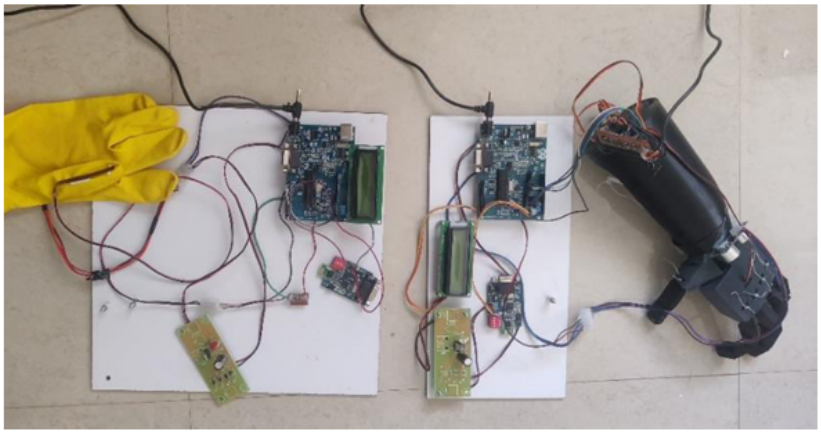


Figura 1.21: Moduli del sistema di salvataggio [34].

La procedura di intervento è caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. **Discesa e monitoraggio:** La mano robotica viene calata nel pozzo artesiano tramite un cavo portante ad alta resistenza. Nel frattempo, l'operatore monitora il video in streaming e i dati del sensore a ultrasuoni sul display di superficie.

2. **Assistenza immediata:** Raggiunta la prossimità della vittima, si valuta la necessità di pompare ossigeno attraverso il condotto integrato e si instaura un dialogo tramite l'altoparlante per tranquillizzare il bambino.

3. **Avvolgimento:** L'operatore in superficie muove le proprie dita indossando il guanto sensorizzato. I segnali vengono trasmessi in tempo reale ai servomotori della mano robotica, che si chiude replicando l'esatta angolazione e forza impartita dall'operatore, avvolgendo il bambino in totale sicurezza.

4. **Recupero:** Una volta confermata la stabilità della presa tramite il feedback visivo, il sistema viene trainato verso l'alto estraendo la vittima.

1.3.15 Robot di Salvataggio Sviluppato dal Govt. Model Engineering College

Questo dispositivo si concentra sull'ottimizzazione della sicurezza biomeccanica durante la delicata fase di presa, integrando un sistema a doppio braccio robotico, un modulo di supporto pneumatico e un sistema di sensibilità alla pressione per prevenire i traumi da schiacciamento. L'architettura del robot, racchiusa in un telaio cilindrico compatto di soli 6 pollici di diametro, si basa sull'interazione in tempo reale di diversi sottosistemi meccatronici:

- **Sicurezza attiva:** L'innovazione di spicco del dispositivo risiede nell'installazione di resistori sensibili alla forza sulle estremità dei bracci robotici. Questi sensori campionano continuamente la pressione esercitata sul corpo del bambino e interrompono automaticamente l'azione dei servomotori nel momento in cui viene superata una specifica soglia critica di forza, azzerando il rischio di lesioni.

- **Organi di presa:** Il sistema di recupero utilizza due bracci manipolatori attivati da servomotori ad alta coppia, che sono in grado di ruotare sul piano orizzontale per adattarsi dinamicamente all'orientamento e alla postura della vittima.

- **Supporto pneumatico:** Sotto il telaio è integrato un modulo per il dispiegamento di un airbag, gonfiato tramite un mini-compressore e monitorato da un sensore di pressione dell'aria, con l'obiettivo di fornire una piattaforma morbida di stabilizzazione dal basso.

- **Visione e controllo IoT:** L'unità di elaborazione centrale (Arduino UNO) comunica via Bluetooth con un'applicazione mobile dedicata. Il monitoraggio visivo in tempo reale è affidato a un modulo ESP32-CAM che trasmette lo streaming video tramite rete Wi-Fi.

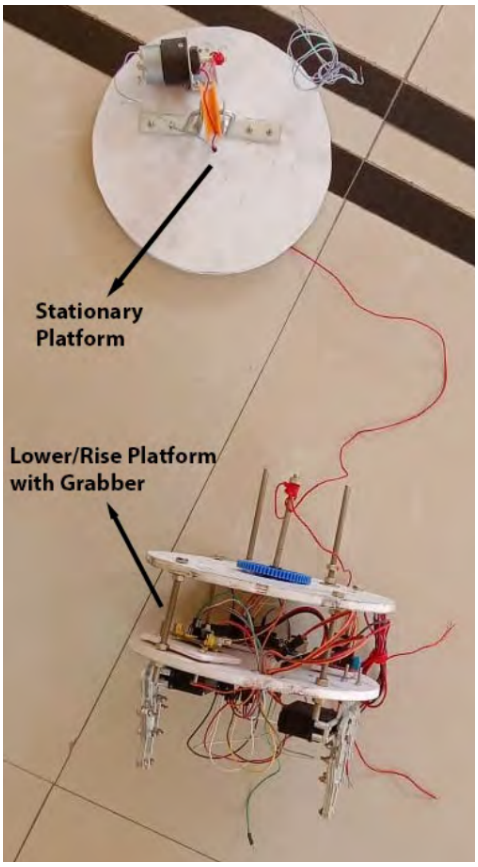


Figura 1.22: Piattaforme del robot [35].

L'intera operazione è teleoperata tramite l'interfaccia dell'applicazione mobile, sfruttando cicli di feedback incrociato:

1. **Discesa e ispezione:** Il robot viene calato all'interno del pozzo sospeso a un cavo e guidato da un motore DC di superficie ad alta coppia. L'operatore valuta lo scenario in tempo reale sfruttando il feed video in streaming generato dall'ESP32-CAM.

2. **Allineamento e base d'appoggio:** Una volta raggiunta la quota della vittima, i bracci rotanti vengono allineati alla sua posizione; contemporaneamente, l'airbag viene gonfiato al di sotto della persona per creare un pavimento di sicurezza anti-scivolamento.

3. **Presa intelligente:** L'operatore invia il comando di serraggio delle pinze. L'azione meccanica di avvolgimento procede in modo autonomo fino a quando i sensori FSR non rilevano un contatto ottimale, bloccando ulteriori chiusure del motore non appena la pressione è sufficiente per trattenere il bambino.

4. **Estrazione:** Avuta la conferma informatica del bloccaggio in sicurezza, il dispositivo e la vittima vengono sollevati congiuntamente azionando il sistema di avvolgimento di superficie.

1.3.16 Robot di salvataggio sviluppato dall'Acharya Institute of Technology

Questo dispositivo si caratterizza per un'architettura cilindrica estremamente compatta e per l'integrazione di moduli IoT associati a un'interfaccia di teleoperazione semplificata basata su un'applicazione mobile Android. Lo scopo principale è ridurre i costi e i tempi di dispiegamento, permettendo l'utilizzo del sistema anche a personale non altamente specializzato. Il sistema sfrutta un microcontrollore centrale Arduino Uno e presenta le seguenti peculiarità:

- **Interfaccia wireless:** La teleoperazione favoreggia una comunicazione wireless. L'operatore invia i comandi ai motori tramite uno smartphone Android collegato via Bluetooth.
- **Monitoraggio cloud:** Sensori ambientali di gas, fumo, temperatura e umidità analizzano costantemente l'aria del pozzo, trasmettendo la telemetria in tempo reale a una piattaforma cloud per la valutazione istantanea dei rischi.
- **Sistema di traslazione a rullo:** Il dispositivo è calato tramite una fune. La discesa e la risalita sono pilotate da un argano in superficie azionato da un motore DC interfacciato ad un driver L298N.
- **Stabilizzazione e supporto vitale:** Il telaio cilindrico integra bracci espandibili che premono contro le pareti del pozzo per azzerare le rotazioni indesiderate. L'apparato è completato da linee per la fornitura di ossigeno e un sistema audio bidirezionale per dialogare con la vittima.
- **Pinze a superficie curva:** L'organo di presa, comandato da un servomotore di precisione, è dotato di pinze progettate per distribuire uniformemente la pressione sul corpo del bambino e scongiurare lesioni localizzate durante la fase di sollevamento.



Figura 1.23: Telaio del dispositivo [36].

La procedura di soccorso è caratterizzata dalle seguenti fasi:

1. **Discesa e telemetria:** Il motore DC aziona il rullo di superficie, srotolando la fune e calando il robot nel foro. Durante questa fase, i dati IoT confermano la respirabilità dell'ambiente.

2. **Allineamento e contatto:** Avvicinatosi alla vittima, il robot espande i bracci stabilizzatori per bloccarsi. Tramite l'audio integrato si stabilisce un contatto con il bambino.

3. **Presa:** Tramite i comandi intuitivi dell'applicazione Android, l'operatore attiva i servomotori inferiori. Le pinze a superficie curva avvolgono delicatamente ma saldamente il torace o gli arti superiori del bambino.

4. **Recupero:** Verificata la stabilità dell'aggancio, il motore di superficie inverte il proprio moto, riavvolgendo la fune sul rullo ed estraendo il dispositivo in superficie con la vittima in totale sicurezza [36].

1.3.17 Sintesi e analisi comparativa dello stato dell'arte

Dall'analisi delle diverse soluzioni robotiche proposte in letteratura, emergono molteplici approcci strutturali e funzionali, concepiti per affrontare le fasi delle operazioni di salvataggio. Risulta interessante comparare sinteticamente tutti i dispositivi trattati evidenziandone le logiche di presa, i principali punti di forza e le vulnerabilità intrinseche.

Istituto di Ricerca	**Meccanismo di Presa e Supporto**	**Punti di Forza**	**Punti di Debolezza**
Shandong University	Braccio di presa (3 GDL) e supporto inferiore (2 GDL).	Elevata capacità di carico; previene scivolamenti dal basso.	Sistema di ancoraggio invasivo con potenziale danneggiamento delle pareti del pozzo.
Priyadarshini College	Braccio flessibile (6 GDL) con end-effector intercambiabili.	Adattamento dinamico del telaio; efficace assorbimento delle vibrazioni.	Necessità di recupero del robot per la sostituzione dell'end-effector.
IIIT	Bracci pneumatici e imbracatura toracica / Base gonfiabile passiva [Versione aggiornata].	Sensori e fotocamere ad alta risoluzione / ancoraggio rapido e sicuro [Versione aggiornata].	Inserimento dell'imbracatura complesso in caso di vittime non collaborative.
VIT University	Tubo di aggancio per la vittima.	Discesa autonoma assistita da sensori IR; struttura leggera e compatta.	Richiede la cooperazione attiva e lo stato di coscienza del bambino.

IIT Madras	Piattaforma metallica espandibile supportata da airbag.	Architettura robusta; sgancio d'emergenza; hardware avanzato [Versione aggiornata].	Struttura a più stadi cinematicamente complessa e potenzialmente ingombrante.
METS School of Engineering	Bracci robotici semplici azionati tramite servomotori.	Controllo wireless; monitoraggio dei parametri vitali [Versione aggiornata].	Assenza di un sistema di supporto passivo in caso di guasto agli attuatori.
Chennai Ramapuram SRM	Esclusivo impiego di airbag inferiore.	Estremamente economico e leggero; azzera i rischi di traumi da schiacciamento.	Assenza di stabilizzazione per il busto; versatilità operativa limitata.
Amrita School of Engineering	Pinze rigide ad attuazione specifica.	Dashboard remota web-based; logica d'intervento schematizzata.	La presa concentrata su polsi o testa comporta dei rischi di lesioni articolari.
Chennai University	Bracci flessibili e airbag inferiore.	Utilizzo della Realtà Aumentata; isolamento acustico del respiro.	Elevato carico computazionale; software complesso.
Mangalam College of Engineering	Mano animatronica biomimetica e supporto inferiore rigido.	Presa antropomorfa adattiva; ingombro laterale minimizzato.	Cinematica complessa; tendini soggetti ad usura.
Adhiyamaan College of Engineering	Singolo braccio robotico articolato.	Piattaforma elettronica open-source; architettura meccanica compatta.	Capacità di manipolazione limitata.
Gurudeva Institute	Pallone pneumatico per sigillatura totale del fondo.	Creazione di un pavimento artificiale che inibisce ogni ulteriore scivolamento.	Rischio di foratura e mancato gonfiaggio in presenza di detriti taglienti.
NIT Tiruchirappalli	Sistema a doppia pinza (presa principale e scudo secondario).	Ancoraggio rigido alle pareti; protezione totale dagli urti in estrazione.	Struttura caratterizzata da un notevole ingombro longitudinale.
Sri Krishna College	Mano robotica stampata in 3D teleoperata via guanto sensorizzato.	Teleoperazione estremamente intuitiva basata sui movimenti umani.	Assenza di sistemi di supporto passivi in caso di cedimento della presa.
Govt. Model Engineering College	Doppio manipolatore con sensori di forza (FSR) e airbag inferiore.	Sicurezza attiva anti-schiacciamento.	Portata del segnale Bluetooth/Wi-Fi limitata nel sottosuolo.
Acharya Institute	Pinze a superficie curva combinate con bracci stabilizzatori.	Interfaccia di comando mobile; telemetria IoT integrata in piattaforma cloud.	Estrema dipendenza dall'infrastruttura di rete per il monitoraggio operativo.

Tabella 1.1: Analisi comparativa dei dispositivi di salvataggio.

Struttura del sistema

In questo capitolo viene illustrato il dispositivo realizzato in collaborazione con il DIMEAS del Politecnico di Torino e l'Università dell'Aquila. Vengono quindi descritti la struttura generale del dispositivo, i suoi componenti principali e la logica di funzionamento globale. Viene inoltre approfondito il sottosistema dei bracci robotici teleoperati. Infine, vengono definiti gli obiettivi di questo lavoro di tesi all'interno del progetto generale.

2.1 Descrizione del dispositivo

Il progetto del robot di soccorso per interventi in pozzi artesiani nasce con l'obiettivo di realizzare un sistema meccatronico operante in ambienti angusti, in grado di eseguire in sicurezza tutte le fasi dell'operazione di salvataggio. Nello specifico, tali fasi comprendono: la discesa, il monitoraggio ambientale e delle condizioni del bambino, la messa in sicurezza per evitare ulteriori sprofondamenti e il tentativo di recupero mediante imbracatura. Affinché l'esecuzione di queste fasi sia possibile, l'attività di ricerca e sviluppo si è focalizzata sulla progettazione e realizzazione di un sistema robotico teleoperato che deve possedere le seguenti caratteristiche funzionali:

- **Discesa e adattamento geometrico:** Eseguire la discesa all'interno del condotto, presentando un elevato grado di conformabilità a diametri ridotti e a pareti strutturalmente irregolari.
- **Stabilizzazione dinamica:** Assicurare la stabilità e la centratura assiale dell'intera piattaforma durante tutte le fasi critiche dell'operazione.
- **Interazione e manipolazione remota:** Interagire in sicurezza con la vittima e con l'ambiente circostante mediante l'impiego di bracci robotici comandati a distanza.
- **Percezione e feedback real-time:** Fornire all'operatore in superficie un flusso informativo visivo e sensoriale continuo, indispensabile per il monitoraggio in tempo reale dello scenario d'intervento.

Il design del sistema mira a garantire un ottimale compromesso tra compattezza strutturale, affidabilità della movimentazione e precisione operativa. In particolare il robot è dimensionato per essere calato in pozzi con diametri nominali di circa 30 cm. L'intera struttura è predisposta per essere calata e recuperata tramite sistemi di sollevamento operanti in superficie, sia manuali che motorizzati.

2.1.1 Architettura e progettazione funzionale

Il dispositivo si configura come un dispositivo cilindrico multi-livello (diametro esterno 200 mm, altezza 600 mm), una scelta che ottimizza gli spazi interni e agevola le operazioni di manutenzione o sostituzione della componentistica. È realizzato prevalentemente in lega di alluminio 6061-T6 per massimizzare il rapporto rigidezza/peso. La struttura si articola su tre moduli principali:

- **Modulo superiore:** Ospita l'ancoraggio per la fune di calata e un sistema di ruote folli disposte a 90°. Questo sistema è dotato di un meccanismo anti-impuntamento azionabile a cavo, progettato per forzare il rientro delle ruote in caso di blocco contro le pareti irregolari del pozzo.
- **Modulo centrale:** Costituisce il cuore cinematico del robot. Un motore brushless, accoppiato tramite pignone e ruota condotta ad una ralla di base, consente la rotazione a 360° dell'intera porzione centrale, garantendo l'orientamento azimutale del sistema.
- **Modulo inferiore:** Integra un sistema di pattini stabilizzatori e, soprattutto, l'interfaccia meccanica flangiata predisposta per il futuro alloggiamento delle braccia robotiche teleoperate [17].

Il sistema di scorrimento è stato ingegnerizzato per essere solidale alla rotazione del modulo centrale e si compone di tre elementi fondamentali:

- **Base strutturale:** Realizzata in alluminio, presenta un foro passante per la camicia ed è ancorata ad un sistema di guide lineari che ne consente un movimento radiale di compensazione, fondamentale per assistere l'orientamento guidato dei bracci robotici.
- **Gruppo di trazione motorizzato:** Costituito da una ruota gommata ad alto attrito (Ø 28 mm), azionata da un motore DC (6 V) per gestire attivamente il rilascio della camicia.
- **Elemento scorrevole e pressore:** Integra due rulli passivi in silicone montati su un carrello mobile regolabile tramite vite. Questo sistema consente di impostare il precarico ottimale della camicia contro la ruota motrice [37].



Figura 2.1: Dispositivo completo [17].

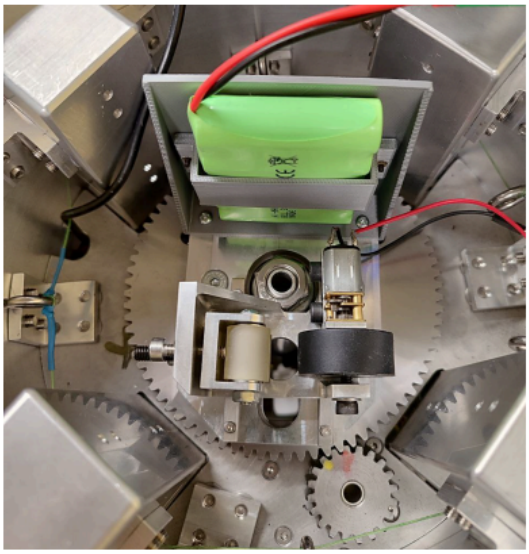
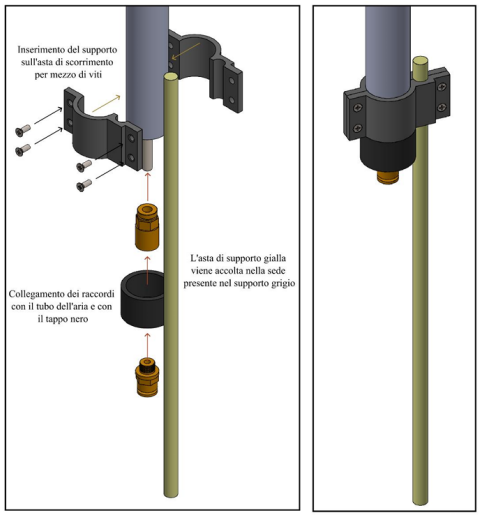
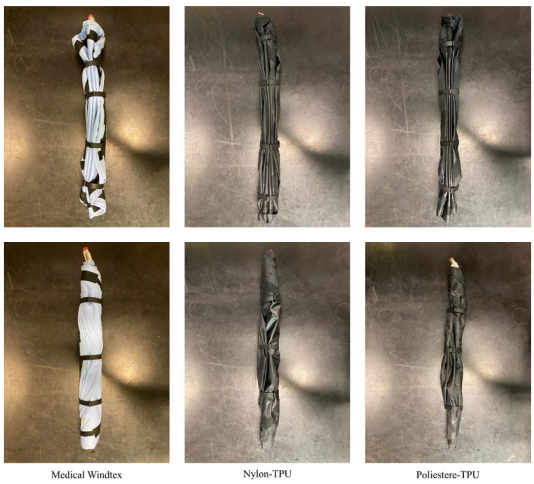


Figura 2.2: Sistema di scorrimento [37].

Il robot possiede inoltre un dispositivo di sicurezza che consiste in un pallone gonfiabile che una volta posizionato al di sotto della vittima, si apre moderatamente, costituendo una piattaforma di sostegno strutturale. In presenza di condotti a diametro ridotto, l'apertura radiale si arresta a contatto con le pareti interne, adattandosi passivamente alla geometria del pozzo. La sua funzione primaria è quella di arrestare un'ulteriore caduta del bambino, stabilizzandolo prima della fase di estrazione [38].



(a) Supporto del dispositivo dispiegabile.



(b) Tipologie di gonfiabili impacchettati.

Figura 2.3: Dispositivo di sicurezza [38].

2.1.2 Architettura elettronica e di controllo

Il sottosistema elettronico e di controllo è progettato per garantire l'attuazione coordinata dei motori, della telemetria e della teleoperazione. L'architettura è stata concepita con un approccio modulare, permettendo future integrazioni sensoriali e manipolative. L'alimentazione primaria del sistema fisso è fornita da un pacco batterie al piombo da 12 V, opportunamente protetto da fusibili e affiancato da filtri RC per attenuare i disturbi elettromagnetici indotti dalla commutazione dei motori. L'unità logica centrale è rappresentata da un microcontrollore Raspberry Pi Pico, il quale svolge la duplice funzione di elaborazione dati e controllo assi. Il pilotaggio del motore principale è affidato a un driver integrato TB6612FNG, governato dalla Pico tramite un algoritmo di controllo in catena chiusa con regolatore PID. Il sistema integra funzioni di sicurezza attiva, tra cui procedure di soft-start per mitigare gli stress meccanici e la disattivazione automatica in caso di sovracorrente. Il cablaggio interno è stato razionalizzato mediante canaline stampate in 3D e connettori standardizzati (XT30 per la potenza, JST-PH per i segnali). Tale infrastruttura prevede già la predisposizione logica (tramite bus I²C/SPI) e fisica (interfaccia a 10 pin) per l'installazione di un "piatto sensori" estraibile, dedicato al monitoraggio ambientale (gas, ossigeno, temperatura) e visivo (telecamera e sensore a ultrasuoni). Per preservare la libertà di rotazione a 360° svincolandosi dall'impiego di cablaggi striscianti, l'architettura è stata suddivisa in due domini galvanicamente e fisicamente isolati, interconnessi tramite un ponte ottico a infrarossi a 433 MHz.

- **Nodo trasmettitore (Statore):** Condivide l'alimentazione a 12 V e l'unità Raspberry Pi Pico principale. I comandi direzionali generati dall'operatore vengono convertiti in un segnale logico che pilota il modulo di trasmissione IR.
- **Nodo ricevitore (Rotore):** È un circuito completamente autonomo, alimentato da una batteria dedicata da 6 V. Due convertitori Buck stabilizzano la tensione a 5 V per alimentare una seconda Raspberry Pi Pico locale e il modulo ricevitore IR. Il microcontrollore locale interpreta il segnale ottico e comanda l'attuazione del motore DC di scorrimento avvalendosi di un transistor BJT (2N2222A) operante in regime di commutazione.

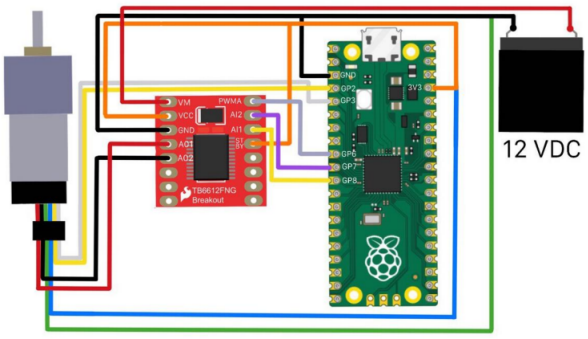


Figura 2.4: Schema collegamenti controllo motore [17].

Il coordinamento dell'intera architettura è affidato a uno stack software distribuito su tre livelli comunicanti, sviluppato in Python e MicroPython:

1. **Interfaccia di Superficie (GUI):** Un'applicazione PC (basata su Tkinter e PySerial) acquisisce gli input dell'operatore da tastiera e li trasmette via seriale UART (115200 bps) all'unità trasmittente del robot.

2. **Routine di Trasmissione (TX):** Il firmware sulla Pico principale riceve i comandi seriali e genera un segnale PWM a 1 kHz destinato al LED infrarosso. È implementato un controllo di integrità che interrompe la trasmissione se non si registrano nuovi input per oltre 10 s.

3. **Routine di Ricezione (RX):** Il firmware sulla Pico rotante rileva i fronti di salita/discesa del segnale PWM tramite interrupt hardware, abilitando il transistor di potenza. Per garantire la massima sicurezza in caso di occlusione ottica o guasto, è implementato un timer di watchdog: se il microcontrollore non rileva variazioni di stato sul pin ricevitore per più di 150 ms, l'alimentazione al motore viene istantaneamente tagliata, arrestando la discesa del dispositivo di sicurezza [17][37].

2.2 Logica di funzionamento generale

La missione di salvataggio del robot si suddivide in quattro fasi operative:

1. **Avvio operazione e monitoraggio ambientale:** Il robot viene calato nel pozzo tramite un argano esterno. Durante la discesa, la telemetria fornisce dei dati visivi e ambientali in tempo reale per verificare le condizioni operative.

2. **Orientamento e allineamento:** Raggiunta la quota target, il motore BLDC aziona la rotazione del corpo centrale. L'operatore orienta il dispositivo per allineare l'asola di scorrimento allo spazio utile per superare la vittima.

3. **Posizionamento del dispositivo di sicurezza:** Mediante il sistema di scorrimento lineare e le braccia robotiche, il dispositivo viene calato oltre la vittima. Rilasciato, si espande radialmente contro le pareti creando una piattaforma di blocco.

4. **Fase di recupero:** Successivamente alla messa in sicurezza, si procede all'estrazione. L'approccio attuale supporta lo scavo tradizionale parallelo; l'obiettivo di sviluppo futuro mira ad un'imbracatura da inserire tramite i bracci per un'estrazione verticale diretta [37].

2.3 Braccia robotiche tele-operate

Le braccia robotiche comandate da remoto rappresentano uno dei sottosistemi tecnologicamente più complessi del robot. I loro obiettivi principali consistono nel consentire il posizionamento del dispositivo di sicurezza al di sotto della vittima, agevolare le manovre di imbracatura e movimentare in modo preciso la sensoristica necessaria per la misurazione dei parametri vitali del bambino. Il progetto trae le sue origini da uno studio preliminare condotto presso l'Università dell'Aquila. Il concept iniziale è stato riprogettato in ambiente CAD per garantire la piena compatibilità con i vincoli geometrici e operativi del robot sviluppato dal Politecnico di Torino [37].

2.3.1 Architettura meccanica

Il sistema si basa su una configurazione accoppiata in cui un braccio di comando (Master), manovrato dall'operatore, trasmette i riferimenti di posizione a un braccio attuatore (Slave) montato a bordo del robot. Entrambi i sistemi presentano 6 gradi di libertà e sono strutturati in tre macro-segmenti: spalla, gomito e polso.

- **Il Sistema Slave (Attuatore):** La struttura sfrutta elementi in alluminio e componenti in PLA, questi ultimi realizzati tramite stampa 3D.
  - **Spalla (1° DoF)**: Sfrutta una trasmissione a cinghia dentata accoppiata a una guida lineare a ricircolo di sfere; questo cinematismo converte il moto rotatorio generato dal singolo motore GIM3505-8 in un'escursione lineare estremamente fluida e compatta.
  - **Gomito (2° e 3° DoF)**: Realizzato tramite accoppiamenti diretti ai 2 motori GIM4310-10, ottimizzando la distribuzione delle masse per non sovraccaricare il giunto precedente.
  - **Polso (4°, 5° e 6° DoF)**: Configurazione seriale compatta di tre motori GIM3505-8 per l'orientamento fine dell'end-effector.
- **Il Sistema Master (Interfaccia Uomo-Macchina):** Progettato come replica cinematica dello Slave, opera in modalità passiva. Ciascun giunto meccanico non ospita attuatori, bensì un albero rotante calettato su cuscinetti a basso attrito e interfacciato con un encoder rotativo assoluto (AMT102V). L'operatore manovra un pomello terminale, e l'architettura rileva istantaneamente le rotazioni naturali del braccio umano [37].



Figura 2.5: Slave [37].

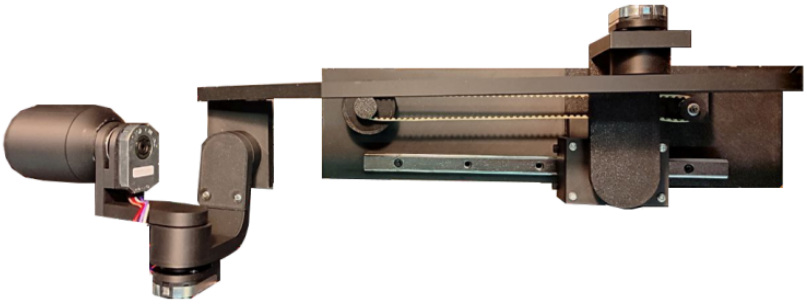


Figura 2.6: Master [37].

2.3.2 Architettura elettronica e di controllo

L'infrastruttura di controllo adotta un approccio decentralizzato e modulare. Ogni singolo grado di libertà del sistema dispone di un anello di regolazione hardware/software indipendente.

Il flusso dei segnali si articola come segue:

1. **Acquisizione:** L'encoder AMT102V sul giunto Master campiona la posizione angolare imposta dall'operatore.
2. **Elaborazione:** Il segnale viene elaborato da un microcontrollore Arduino UNO R3 equipaggiato con una SimpleFOC Shield v2.0.4.
3. **Attuazione:** Sfruttando la libreria open-source SimpleFOC, viene eseguito un controllo vettoriale a orientamento di campo (FOC). L'algoritmo opera in modalità torque control: non forza un setpoint di posizione rigido, ma genera una coppia motrice proporzionale all'errore di tracciamento tra l'angolo del Master e l'angolo reale letto dall'encoder magnetico (AS5048A) posto sul motore Slave.

Questo paradigma a doppio sensing (incrementale in superficie, magnetico in profondità) garantisce movimenti morbidi, fluidità a basse velocità e un'elevata sensibilità durante le fasi critiche di manipolazione . L'anello di controllo master-slave presenta una latenza di risposta trascurabile e un'ottima reiezione ai disturbi [37].

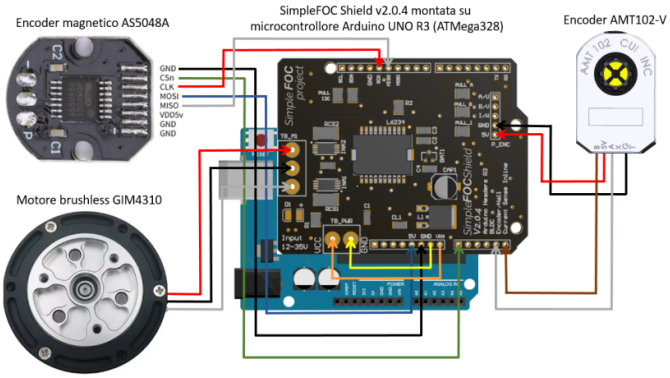


Figura 2.7: Schema sistema di controllo Master - Slave [37].

2.4 Stato iniziale del manipolatore robotico e Obiettivi della tesi

Il punto di partenza del presente lavoro si colloca in ideale continuità con i risultati delle precedenti attività di ricerca e sviluppo sperimentale, focalizzandosi in particolare sull'analisi e sul perfezionamento del sistema Master-Slave.

2.4.1 Stato iniziale e criticità riscontrate

Nella sua configurazione di partenza, il manipolatore robotico presentava un'architettura elettromeccanica già definita nelle sue linee geometriche ed essenziali. Tuttavia, l'analisi preliminare del sistema ha evidenziato ampi margini di ottimizzazione, riconducibili principalmente a due macro-ambiti:

- **Sottosistema elettronico e di comunicazione:** Necessità di garantire un'infrastruttura di trasmissione dei segnali stabile su lunghe distanze, ovviando ai limiti delle soluzioni preesistenti attraverso una radicale riduzione, razionalizzazione e semplificazione dei cablaggi interni per mitigare l'insorgenza di disturbi elettromagnetici.
- **Sottosistema meccanico e integrazione:** Esigenza di ingegnerizzare un sistema di accoppiamento che consenta l'alloggiamento stabile e sicuro dei bracci robotici dello Slave all'interno delle cavità dedicate del dispositivo principale.

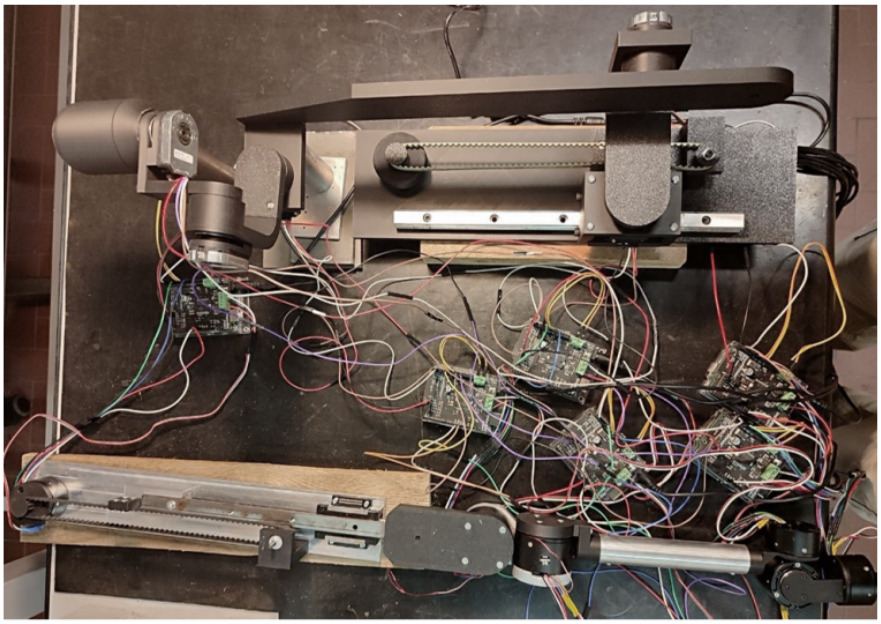


Figura 2.8: Sistema Master - Slave di partenza [37].

2.4.2 Obiettivi della tesi

Avendo descritto le criticità emerse nello stato iniziale del dispositivo, il presente lavoro di tesi si propone di ingegnerizzare e ottimizzare l'intera architettura hardware e software del sistema di manipolazione. L'obiettivo è di ridefinire il sistema, evolvendolo da un livello di prototipazione logica preliminare ad una versione prototipale avanzata.". Parallelamente, lo studio si è focalizzato sulla sintesi e sulla realizzazione fisica di componenti d'interfaccia meccanica atti a integrare i bracci Slave a bordo del dispositivo principale. Nello specifico, gli obiettivi prefissati, capisaldi della trattazione sviluppata nei capitoli successivi, riguardano:

1. **Validazione elettromeccanica degli attuatori:** Verifica sperimentale della capacità di carico dei motori nella configurazione nativa, al fine di dimostrare il corretto sostentamento e la movimentazione del peso complessivo del braccio robotico senza l'impiego di masse di bilanciamento.

2. **Integrazione strutturale dello Slave:** Progettazione, modellazione e validazione di staffe di interfaccia meccanica dedicate al collegamento rigido delle braccia robotiche al corpo del dispositivo principale.

3. **Ottimizzazione della logica di controllo:** Migrazione dall'originaria logica di controllo decentralizzata verso un'architettura centralizzata basata su un singolo microcontrollore ad alte prestazioni.

4. **Riprogettazione dello stadio di potenza:** Integrazione e configurazione dei driver di potenza avanzati, installati direttamente nei motori GIM3505-8 e GIM4310-10 per massimizzare l'efficienza di attuazione.

5. **Implementazione di un protocollo di comunicazione robusto:** Sostituzione delle linee di comunicazione seriale standard con un protocollo di rete industriale basato sul CAN bus, orientato a garantire un'elevata immunità ai disturbi e la massima affidabilità nel transito dei dati.

6. **Ingegnerizzazione del cable management:** Sviluppo di un layout di cablaggio a cascata (daisy-chain) per connettere i moduli elettronici in modo snello, sistematico e pulito, riducendo drasticamente gli ingombri geometrici all'interno della carcassa cilindrica.

Validazione Elettromeccanica e Architettura di Controllo

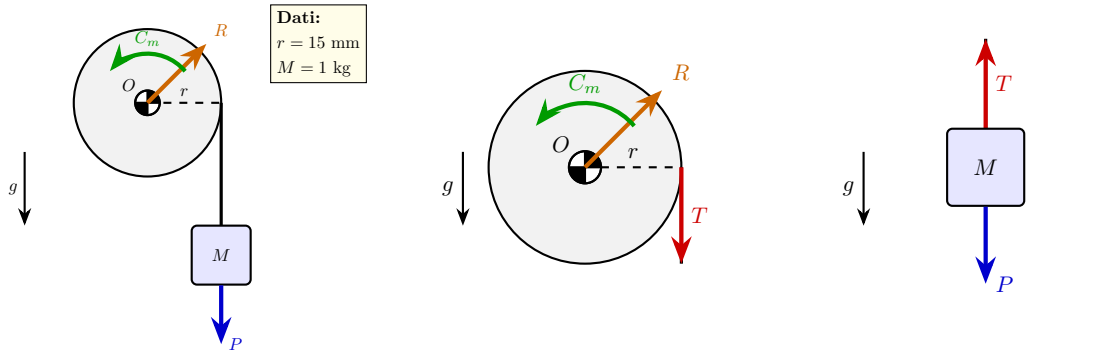
Nel presente capitolo vengono trattati gli obiettivi della tesi, che consistono nella progettazione, validazione e implementazione della nuova infrastruttura di controllo del sistema robotico. Viene descritta quindi la transizione del sistema ad un'architettura elettronica e di comunicazione capace di garantire alte prestazioni in tempo reale. Nella prima parte del capitolo, l'attenzione è posta sulla validazione elettromeccanica degli attuatori: partendo da un'analisi teorica dei carichi che i motori dei manipolatori devono sostenere, vengono presentati i risultati dei test sperimentali di sollevamento. Accertata la validità degli attuatori, la trattazione si sposta sul nucleo dell'architettura di controllo. Viene introdotto il microcontrollore che costituisce il cervello del sistema, analizzandone l'architettura hardware e l'ecosistema di sviluppo software. Successivamente, vengono descritti i driver di potenza, analizzandone il layout interno e il softaware proprietario distribuito per la loro configurazione. Infine, l'ultima sezione esplora l'infrastruttura di rete che interconnette l'unità di calcolo ai driver di potenza.

3.1 Validazione degli attuatori

Prima di procedere con lo sviluppo e l'integrazione dell'infrastruttura di controllo, è stato ritenuto fondamentale verificare sperimentalmente le reali capacità di carico dei motori scelti per i giunti dello Slave. Questa fase di validazione elettromeccanica ha lo scopo di confermare che gli attuatori siano in grado di sostenere e movimentare il peso complessivo del braccio in totale autonomia, garantendo la stabilità durante le operazioni di soccorso.

3.1.1 Analisi dei carichi del manipolatore

La prima verifica effettuata consiste nel valutare che l'attuatore sia in grado di erogare in modo continuo la coppia di tenuta necessaria a bilanciare il peso dello Slave. Con riferimento allo schema a corpo libero illustrato in Figura 3.1, dove M è la massa del braccio ed r è il raggio della puleggia, è possibile formalizzare il problema calcolando le reazioni e i momenti in condizioni di equilibrio statico.



(a) Sistema generale (b) Puleggia (c) Massa mobile

Figura 3.1: Diagrammi di corpo libero della spalla dello Slave.

L'equilibrio alla traslazione verticale per la massa equivalente M del braccio impone che la tensione T della fune eguagli la forza peso:

$$\sum F_y = 0 \quad \Rightarrow \quad T - M \cdot g = 0 \quad \Rightarrow \quad T = M \cdot g$$

Traslando questa tensione sulla puleggia, l'equilibrio alla rotazione attorno al polo O richiede che la coppia motrice C_m erogata dall'attuatore bilanci esattamente il momento ribaltante generato dal carico:

$$\sum M_O = 0 \quad \Rightarrow \quad C_m - T \cdot r = 0$$

Sostituendo l'espressione della tensione T nell'equazione del momento, si ottiene la coppia:

$$C_m = M \cdot g \cdot r$$

Inserendo i dati nominali del sistema in esame, ovvero $M = 1\ kg$ e $r = 15\ mm = 0.015\ m$, e assumendo l'accelerazione di gravità $g = 9.81\ m/s^2$, si ottiene:

$$C_m = 1 \cdot 9.81 \cdot 0.015 = 0.147\ Nm$$

Il valore ottenuto rappresenta la coppia di tenuta strettamente necessaria per mantenere il sistema in equilibrio statico. Confrontando questo risultato con le specifiche tecniche degli attuatori scelti, cioè i motori GIM3505-8, emerge che la coppia resistente richiesta ($C_m \approx 0.15\ Nm$) risulta ampiamente inferiore alla coppia nominale continuativa a disposizione ($0.43\ Nm$), quindi si dimostra analiticamente che l'attuatore è in grado di sostenere il peso.

3.1.2 Test sperimentale di sollevamento e banco prova

Per validare funzionalmente le stime teoriche e testare la tenuta dei motori, si è proceduto all'allestimento di un banco di prova dedicato. L'obiettivo del setup è stato quello di simulare i vincoli meccanici reali a cui la base del manipolatore sarà sottoposta una volta integrata nel dispositivo mobile principale. A tale scopo, l'infrastruttura di test è stata costruita attorno a una trave rigida ancorata saldamente al banco da lavoro, facente funzione di colonna portante centrale del robot. Il test di sollevamento si è articolato nelle seguenti fasi operative:

- **Fissaggio:** Ancoraggio saldo del braccio Slave alla trave tramite due viti inserite nella base di supporto.
- **Verifica della coppia di tenuta statica:** A seguito dell'attivazione degli attuatori con il braccio in configurazione completamente contratta, è stata verificata visivamente l'assenza di cedimenti o scorrimenti. Questa fase ha confermato, su base qualitativa, che la coppia di tenuta erogata è sufficiente a bilanciare in modo efficace l'azione della forza peso del manipolatore.
- **Test dinamico di sollevamento:** Al fine di verificare la capacità del sistema di vincere le forze d'inerzia e sollevare il proprio carico, sono state eseguite manovre ripetute di posizionamento, quantificabili in 5 cicli completi di sollevamento e discesa. Tali manovre sono state effettuate mediante la rotazione manuale dell'encoder AMT102V. L'osservazione diretta del moto ha evidenziato una traiettoria fluida e l'assenza di blocchi operativi durante le manovre. Questa prova ha validato qualitativamente l'adeguatezza del motore scelto nella movimentazione dinamica del braccio.

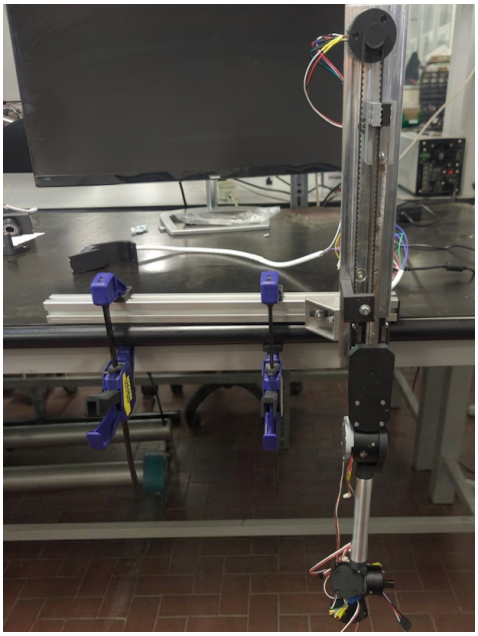


Figura 3.2: Banco prova per il test di sollevamento.

3.2 Il microcontrollore STM32G474RET6

In questa sezione viene effettuata un'analisi dettagliata del microcontrollore STM32G474RET6, selezionato come unità di calcolo e di coordinamento centrale per l'intera architettura dello Slave. Nei paragrafi successivi verranno dapprima introdotte le specifiche generali del microcontrollore e le motivazioni alla base di tale scelta progettuale, si procederà poi con l'esplorazione della sua architettura hardware, ponendo particolare enfasi sulle periferiche integrate fondamentali per il controllo dei motori e per la gestione del traffico dati, concludendo con la descrizione dell'ecosistema di sviluppo software impiegato per la configurazione hardware.

3.2.1 Introduzione

Il microcontrollore STM32G474RET6, sviluppato da STMicroelectronics e ospitato sulla scheda di prototipazione NUCLEO-G474RE, rappresenta il centro computazionale dell'architettura di controllo dello Slave. Rispetto alla logica decentralizzata utilizzata nelle precedenti configurazioni del prototipo, l'adozione di questo componente segna un passaggio fondamentale verso un sistema centralizzato, in cui un'unica unità intelligente coordina interamente l'assieme robotico. Le principali motivazioni alla base di questa scelta progettuale risiedono, in primo luogo, nella capacità del microcontrollore di interfacciarsi simultaneamente con tutti i sei encoder AMT102V, acquisendo le posizioni angolari su un'unica scheda logica. In secondo luogo, la presenza di periferiche CAN bus integrate nativamente sul chip permette di strutturare una rete di comunicazione robusta e snella. A queste caratteristiche si sommano l'elevata rapidità di elaborazione e trasmissione dei dati, e le avanzate capacità di debugging in tempo reale offerte dall'ecosistema software.

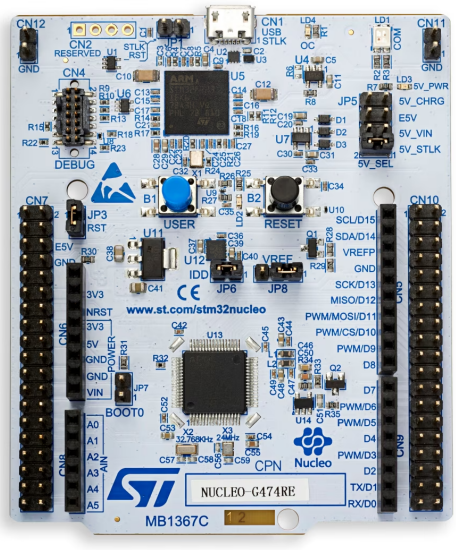


Figura 3.3: Scheda STM32 Nucleo-G474RE [39].

3.2.2 Architettura e periferiche integrate

L'architettura hardware dell'STM32G474RET6 è arricchita da una dotazione di memoria e da un set di periferiche altamente specializzate che supportano le operazioni di automazione. Il chip dispone di 512 *kb* di memoria Flash e 128 *kb* di SRAM, offrendo ampio margine per l'implementazione del firmware di teleoperazione. Dal punto di vista computazionale e di interfacciamento, i punti di forza sfruttati in questo progetto includono:

- **Acceleratori matematici hardware:** La presenza del co-processore CORDIC è di fondamentale importanza per le computazioni robotiche. A questo si affianca l'acceleratore FMAC, utile per l'eventuale filtraggio digitale ad alta velocità.
- **Gestione avanzata dei timer e interfacciamento Hardware:** Il microcontrollore è dotato di timer hardware avanzati, il cui scopo principale è gestire i segnali a basso livello in totale autonomia. Nel caso specifico, la lettura dei 6 encoder in quadratura AMT102V avviene sfruttando la modalità Encoder Mode integrata nei timer: il conteggio degli impulsi e la determinazione del verso di rotazione vengono risolti direttamente dai registri hardware periferici, aggiornando il valore di posizione senza la necessità di generare continue interruzioni software. Questo approccio azzera il carico sulla CPU per l'acquisizione dei sensori, lasciandola libera di concentrarsi sul ciclo di controllo.
- **Gestione del Bus CAN:** L'integrazione di tre interfacce FDCAN. Nel layout del manipolatore, l'STM32 sfrutta questa periferica per fungere da nodo Master: gestisce il traffico della linea CAN bus per inviare i riferimenti di posizione ai driver di potenza distribuiti sui giunti [40] [39].

3.2.3 Ecosistema di sviluppo software

L'efficienza nella stesura, nel collaudo e nel debugging del firmware è garantita dall'ecosistema software offerto da STMicroelectronics. L'intero sviluppo software si fonda su due strumenti principali:

1. **STM32CubeMX:** Un potente strumento grafico di configurazione che semplifica e velocizza la delicata fase di setup iniziale del microcontrollore. Oltre a consentire la progettazione visiva dell'albero di clock e l'assegnazione delle funzionalità ai pin fisici, permette di parametrizzare nel dettaglio le periferiche complesse, quali l'interfaccia FDCAN e i timer ad alta risoluzione. Il software si occupa di generare automaticamente lo scheletro del codice C nativo d'inizializzazione, strutturandolo in modo da isolare le sezioni scritte dall'utente tramite appositi blocchi di codice dedicati. L'infrastruttura generata garantisce la corretta interfaccia con i registri hardware sfruttando le librerie standardizzate HAL (Hardware Abstraction Layer) e quelle maggiormente ottimizzate LL (Low-Layer), assicurando portabilità e compatibilità con i principali IDE disponibili [41].

2. **STM32CubeIDE:** L'ambiente di sviluppo integrato ufficiale di STMicroelectronics, costruito sulla consolidata infrastruttura Eclipse e supportato dalle toolchain C/C++ GCC (GNU Compiler Collection). Questo strumento racchiude in un'unica interfaccia l'intero flusso di lavoro, integrando nativamente il configuratore STM32CubeMX. Le sue caratteristiche di punta risiedono nell'analisi statica del codice e, soprattutto, negli strumenti di debugging in tempo reale: interfacciandosi con il programmatore ST-LINK/V3E a bordo della scheda Nucleo, l'IDE permette l'ispezione diretta dei registri di memoria, la gestione dei breakpoint hardware e il monitoraggio dinamico delle variabili di controllo (Live Expressions) [42].

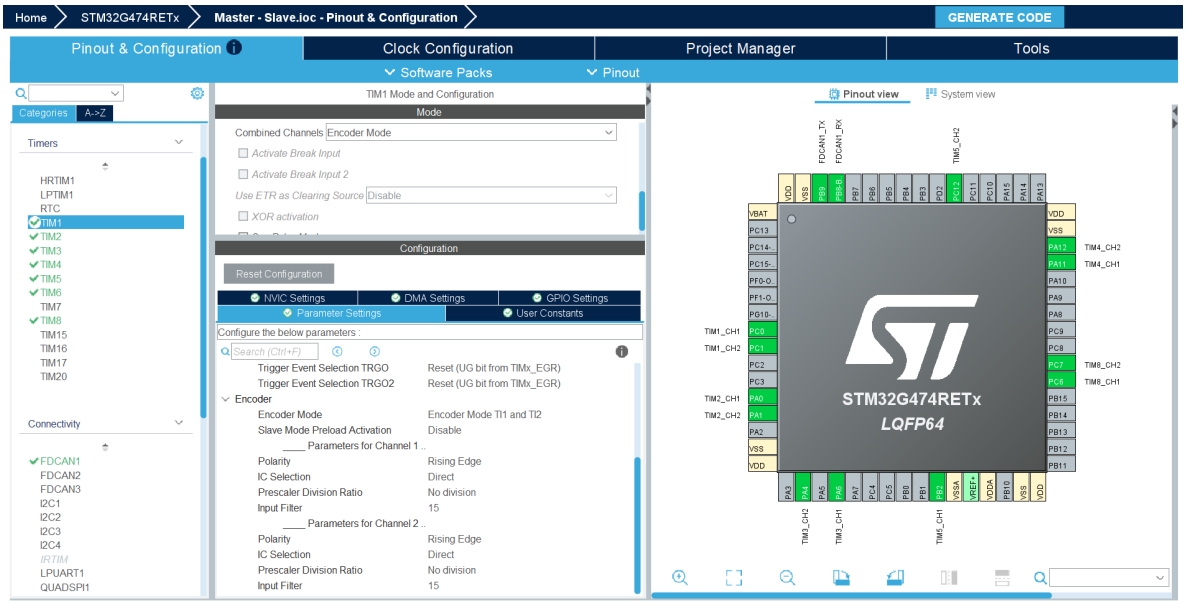


Figura 3.4: Schermata di configurazione dei pin nel software STM32CubeMX.

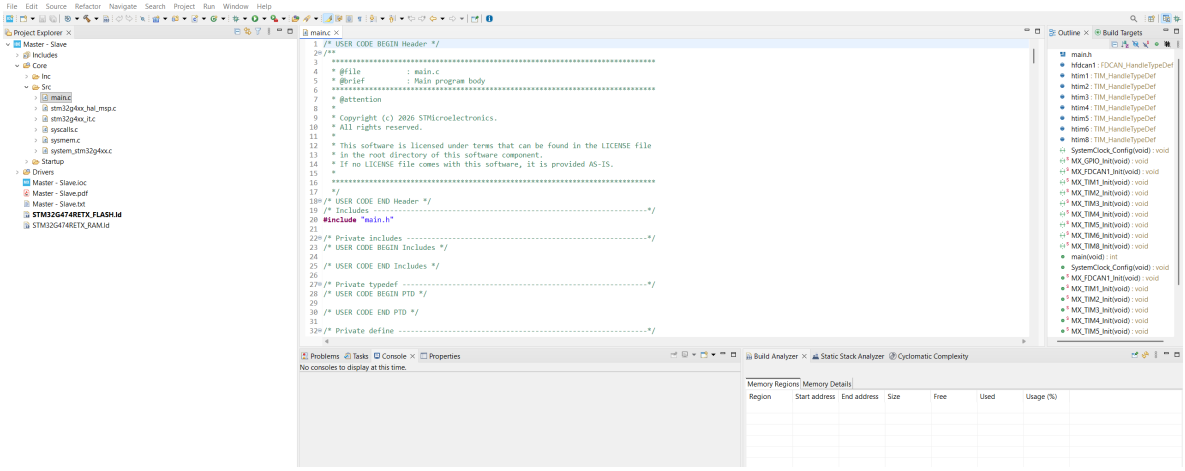


Figura 3.5: Ambiente di sviluppo integrato STM32CubeIDE.

3.2.4 Organizzazione dei file di progetto

L'organizzazione dei file all'interno del progetto segue l'architettura standard generata dal software STM32CubeMX. Tale struttura separa nettamente i driver hardware di basso livello, il codice di inizializzazione automatica e lo strato applicativo sviluppato dall'utente. Di seguito viene analizzata l'organizzazione dell'albero di progetto:

- **Core:** Costituisce il nucleo operativo dell'applicazione personalizzata ed è strutturato in due sottocartelle principali:
  - **Inc**: Contiene i file di intestazione (header files, .h). Tra i più rilevanti si distinguono il main.h, in cui vengono definite le costanti globali e la mappatura dei pin del microcontrollore, e stm32g4xx_it.h, che si occupa della gestione delle interruzioni.
  - **Src**: Ospita i file sorgente (.c). Il file fondamentale è il main.c, all'interno del quale risiede l'entry point del programma e la logica ciclica principale. Sono inoltre presenti stm32g4xx_it.c contenente le routine di servizio degli interrupt e stm32g4xx_hal_msp.c dedicato all'inizializzazione hardware a basso livello delle periferiche, come il setup del clock e dei GPIO).
- **Startup**: Contiene il codice di boot scritto in linguaggio assembly, nello specifico all'interno del file startup_stm32g474retx.s. Questo modulo è responsabile delle operazioni critiche post-reset: esegue il setup dello Stack Pointer, inizializza i vettori di interrupt, azzera la memoria BSS, copia i dati inizializzati nella RAM ed effettua infine il salto verso la funzione main().
- **Drivers**: Racchiude l'insieme di librerie software necessarie al corretto funzionamento del microcontrollore, organizzate in due livelli di astrazione:
  - **CMSIS** (Cortex Microcontroller Software Interface Standard): Uno strato di astrazione indipendente dal fornitore di silicio che definisce l'interfaccia software standard per il core ARM Cortex-M4.
  - **STM32G4xx_HAL_Driver**: Il pacchetto di driver HAL specifici per la famiglia STM32G4, che implementa le funzioni API hardware per il controllo dei moduli periferici quali timer, FDCAN, GPIO e convertitori.
- **File di configurazione e script di linker**:
  - **Master - Slave.ioc**: Il file di configurazione grafica che memorizza i parametri di pinout, l'albero di distribuzione delle frequenze di clock e le impostazioni specifiche delle periferiche.
  - **STM32G474RETX_FLASH.ld** e **STM32G474RETX_RAM.ld**: I file di linker script che indicano al compilatore l'esatta allocazione delle sezioni di codice e dati all'interno delle mappe di memoria Flash e RAM del dispositivo.

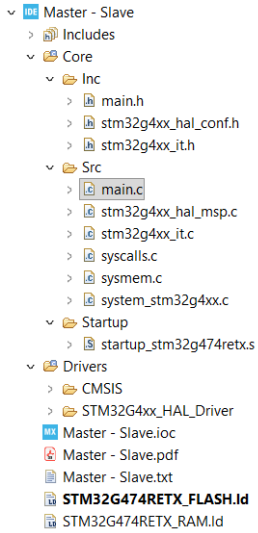


Figura 3.6: Organizzazione dei file del progetto.

3.2.5 Sviluppo del codice

Lo sviluppo del codice che permette il corretto funzionamento del sistema è stato effettuato principalmente nel file main.c. Il codice è stato strutturato in apposite sezioni delimitate, in modo tale che le costanti operative possano essere modificate dall'utente senza rischiare di alterare le routine di basso livello generate dal software di configurazione grafica. Lo sviluppo si articola in diverse fasi fondamentali, partendo dalla definizione delle variabili globali fino all'inizializzazione del bus di comunicazione e dei timer. Nella zona dedicata alle Private Variables, sono state allocate le strutture necessarie per l'interfaccia FDCAN1 (header di trasmissione e array di payload) e gli array di stato per i sei gradi di libertà del braccio robotico. Tali vettori memorizzano i conteggi grezzi degli encoder, le posizioni calcolate, i riferimenti di posizione e velocità (espressi in radianti e radianti al secondo), nonché i guadagni proporzionali (K_p) e derivativi (K_d) specifici per l'ottimizzazione della risposta dinamica di ciascun giunto del manipolatore. All'interno della funzione principale "main()", successivamente al setup hardware automatico eseguito dalle librerie HAL, è stata implementata una routine di inizializzazione per preparare il sistema in tempo reale:

1. **Mappatura e avvio degli encoder:** I sei timer hardware configurati in modalità Encoder Mode (TIM1, TIM2, TIM3, TIM4, TIM5, TIM8) vengono mappati su un array di puntatori per consentirne la gestione iterativa tramite cicli software, venendo poi avviati simultaneamente su tutti i canali utili.

2. **Configurazione e attivazione del bus FDCAN:** Viene impostato un filtro di ricezione hardware globale per consentire la corretta gestione dei pacchetti sul bus. Successivamente, viene inizializzata la struttura dell'header di trasmissione, impostando i parametri per un *Data Frame* in modalità Classic CAN a lunghezza fissa (8 byte).

3. **Abilitazione sequenziale dei driver motore:** Prima di avviare il ciclo di controllo, viene eseguito il broadcast dello specifico payload di accensione associato al comando applicativo "Enter Motor Mode". L'invio avviene in modo sequenziale per tutti e 6 i nodi, interponendo un ritardo di 5 ms per evitare una saturazione iniziale del bus.

4. **Attivazione del timer di controllo:** Al termine di una pausa di assestamento hardware di 100 ms, viene avviato il timer di base TIM6 in modalità interrupt, configurato con una frequenza di 1 kHz, con lo scopo di scandire in modo deterministico il tempo di campionamento dell'intero sistema.

Poiché l'elaborazione e lo scambio dati avvengono interamente su base temporizzata tramite interrupt, il loop principale all'interno del "main()" è mantenuto volutamente vuoto, demandando l'intera computazione alle routine di servizio dedicate.

3.2.6 Analisi della logica di controllo

L'algoritmo di controllo viene eseguito all'interno della callback del timer TIM6. Per ottimizzare le risorse computazionali, il codice implementa una logica di time-multiplexing: ad ogni interruzione (ogni 1 ms) il sistema elabora e aggiorna un singolo asse alla volta sfruttando un indice rotativo. Per il giunto selezionato, il sistema acquisisce il valore istantaneo del contatore hardware associato all'encoder a quadratura. Un aspetto critico affrontato in questa fase ha riguardato l'affidabilità del dato grezzo: micromovimenti meccanici attorno alle posizioni di equilibrio o interferenze elettromagnetiche captate dai cavi di segnale possono generare transizioni fittizie sui canali. Per ovviare a questo problema, è stato sfruttato un meccanismo di debounce hardware integrato nei timer. In fase di inizializzazione, i canali di Input Capture sono stati configurati con un filtro digitale passa-basso (impostato ad un valore di 15). Tale filtro convalida una transizione di stato logico solo se il segnale si mantiene stabile per un numero consecutivo di cicli di campionamento interni, scartando le letture spurie ad alta frequenza. Una volta acquisito il dato pulito, il sistema gestisce i fenomeni di overflow e underflow dei registri a 16 bit sfruttando l'aritmetica modulare in complemento a due, ricavando la variazione discreta di posizione (Δ). A livello cinematico, è stata inoltre implementata un'inversione logica via software per la variazione angolare del Motore 3, necessaria per compensare il senso di montaggio meccanico del giunto rispetto al sistema di riferimento globale. I conteggi vengono successivamente convertiti in grandezze fisiche. La posizione angolare viene ricavata dividendo per la risoluzione effettiva dell'encoder (pari a 8192 impulsi per giro) e moltiplicando per il fattore di conversione geometrico (2π). Per garantire l'integrità meccanica del manipolatore, il riferimento di posizione calcolato viene sottoposto a una saturazione software di sicurezza all'interno del range operativo definito in ± 12.0 radianti. Oltre alla posizione, la routine calcola la velocità angolare istantanea. Sebbene il controllo primario sia di posizione, il calcolo della velocità del Master risulta fondamentale per le prestazioni dinamiche della teleoperazione bilaterale. I driver degli attuatori Slave

eseguono infatti una legge di controllo di impedenza Proporzionale-Derivativa (PD), in cui il termine smorzante dipende dall'errore di velocità. Inviando la velocità del nodo Master come riferimento di feedforward cinematico, si impedisce che l'azione derivativa del driver freni il movimento voluto. Questo approccio riduce drasticamente l'errore di inseguimento e incrementa la reattività e fluidità del braccio robotico durante le transizioni dinamiche. I parametri così calcolati in virgola mobile devono essere convertiti e impacchettati in un payload compresso di 8 byte per poter essere trasmessi sul bus. A tale scopo è stata implementata la funzione ausiliaria "float_to_uint", che esegue una mappatura lineare del valore float (inserito in un range fisico noto) trasformandolo in un intero senza segno a risoluzione specifica. La funzione "Send_Motor_Command" riceve tali parametri quantizzati, esegue le necessarie operazioni di scorrimento logico e assembla gli 8 byte del pacchetto dati. Infine, per garantire l'affidabilità della comunicazione ed evitare la corruzione dei pacchetti dovuta a buffer overflow, la routine implementa un controllo condizionale (non bloccante) sullo stato della periferica FDCAN. Sfruttando la funzione "HAL_FDCAN_GetTxFifoFreeLevel", il microcontrollore immette il pacchetto sul bus solo se rileva almeno uno slot libero nella coda hardware di trasmissione, assicurando un traffico fluido senza bloccare l'esecuzione in tempo reale del timer. Per il listato completo del codice sviluppato nel file main.c, si rimanda all'Appendice A.

3.3 Driver di potenza GDS34

Il driver di potenza GDS34, impiegato in abbinamento agli attuatori della serie GIM4310 e GIM3505, rappresenta l'unità di controllo locale responsabile dell'attuazione dei singoli giunti del braccio robotico. Questo dispositivo compatto è progettato per implementare internamente complessi algoritmi di controllo vettoriale (FOC) e si interfaccia in modo nativo con la rete FDCAN gestita dal microcontrollore STM32.

3.3.1 Introduzione

Il modulo è progettato per operare con una tensione di alimentazione nominale compresa tra 12 V e 36 V , garantendo una corrente continua nominale di 3 A e tollerando picchi di erogazione fino a 6 A. A livello logico, il driver supporta nativamente il protocollo di comunicazione MIT e lo standard proprietario CyberBeast, permettendo al nodo Master di inoltrare comandi per il controllo di coppia, velocità e posizione.

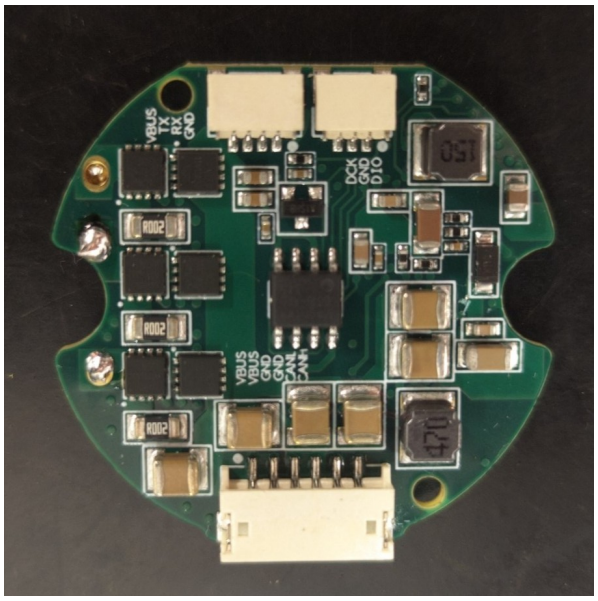


Figura 3.7: Driver GDS34.

3.3.2 Architettura Hardware

Dal punto di vista costruttivo, il driver GDS34 è realizzato su un circuito stampato circolare estremamente compatto, caratterizzato da un diametro di 34 mm e uno spessore massimo di 4.0 mm. Questa morfologia ne consente l'installazione coassiale direttamente sul retro dei motori brushless, riducendo al minimo l'ingombro meccanico e la complessità del cablaggio. La scheda espone una serie di interfacce dedicate alla gestione della potenza, all'acquisizione dei sensori e alla comunicazione con l'esterno:

- **Alimentazione e potenza:** L'ingresso in corrente continua (VBAT) viene fornito tramite un apposito connettore, mentre tre piazzole di saldatura dedicate (U, V, W) consentono il collegamento diretto delle tre fasi del motore.
- **Sensori integrati ed encoder:** Il driver è equipaggiato con un encoder magnetico ad alta risoluzione (14 bit) per la chiusura retroazionata degli anelli di controllo. È inoltre predisposto un bus secondario con pin SCL e SDA per il collegamento di un secondo encoder ausiliario, utile qualora fosse richiesta la lettura della posizione assoluta. Un sensore di temperatura NTC integrato monitora costantemente lo stato termico, intervenendo con lo spegnimento preventivo dell'attuatore in caso di surriscaldamento.
- **Comunicazione logica:** L'interfacciamento con il bus di campo avviene tramite un connettore a 6 pin che espone i terminali differenziali CANH e CANL. Sulla faccia posteriore è presente una porta seriale a 4 pin (RX, TX, GND, 5V) destinata alle operazioni di configurazione e debugging [43].

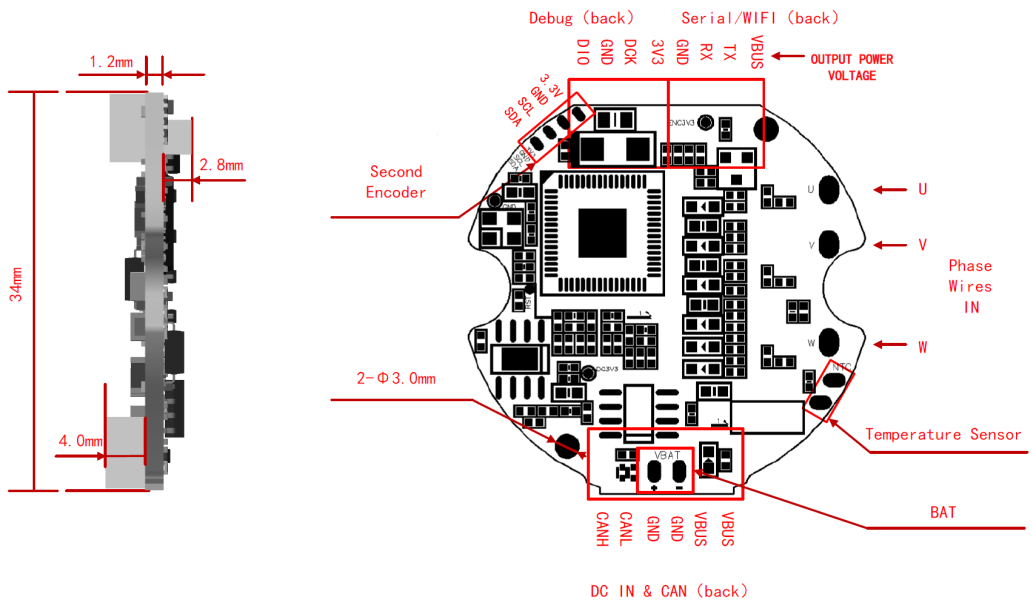


Figura 3.8: Layout del driver GDS34 [43].

3.3.3 Software di configurazione

La fase di inizializzazione, calibrazione e ottimizzazione dei parametri di controllo del driver viene eseguita tramite l'applicazione SteadyWin Motor Wizard. L'interfacciamento tra il computer host e il driver GDS34 avviene sfruttando la porta di debug seriale, avvalendosi di un convertitore USB-TTL come il modulo CP2102. Il software fornisce un ambiente grafico completo per la parametrizzazione dell'azionamento, mettendo a disposizione le seguenti funzionalità essenziali:

- **Calibrazione e setup elettromeccanico:** Il software consente di definire le specifiche del sistema, tra cui il numero di coppie interpolari, il rapporto di riduzione meccanico, e i limiti di soglia per tensione e corrente. Il sistema integra routine automatiche per la rilevazione della corretta sequenza delle fasi e per la calibrazione fine dell'encoder.

- **Tuning dei loop di controllo:** L'interfaccia offre un accesso diretto per la sintonizzazione dei guadagni proporzionali e integrali associati agli anelli di corrente, di velocità e di posizione..

- **Diagnostica e data logging:** L'ambiente software implementa uno strumento per l'acquisizione in tempo reale delle grandezze di stato, potendo campionare variabili quali le correnti di fase, la posizione angolare, la velocità e la coppia erogata con periodi di campionamento fino a 500 µs. I dati registrati possono essere esportati in formato CSV per successive analisi approfondite, facilitando la fase di debug sistemistico [44].

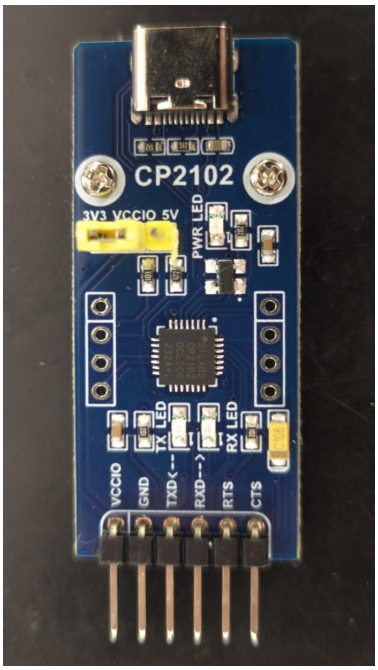


Figura 3.9: Modulo CP2102.



Figura 3.10: Software SteadyWin Motor Wizard.

3.3.4 Configurazione e Inizializzazione degli Attuatori

Prima di poter integrare i motori all'interno della rete di controllo, è stata necessaria una fase operativa preliminare dedicata alla parametrizzazione individuale di ciascun driver GDS34. Il processo di configurazione si è articolato nei seguenti passaggi fondamentali:

1. **Identificazione dei parametri elettromeccanici (Auto Identify):** Come prima operazione, è stata avviata l'auto-identificazione. Questa funzione permette al driver di misurare autonomamente e mappare i parametri fisici del motore, quali la resistenza di fase, l'induttanza e il corretto ordine delle fasi (ad esempio U/W/V), salvandoli nella memoria non volatile.

2. **Calibrazione dell'encoder (Calibration):** Successivamente all'identificazione elettrica, è stata eseguita la calibrazione dell'encoder integrato. Questo passaggio è permette di allineare il campo magnetico del rotore con lo zero elettrico letto dal sensore ad alta risoluzione, condizione indispensabile per il corretto funzionamento dell'algoritmo di controllo vettoriale FOC.

3. **Definizione dello zero meccanico (Set Zero):** A calibrazione ultimata, il giunto è stato portato manualmente nella sua posizione di riposo nominale. Tramite il comando di Set Zero, l'angolo corrente è stato imposto come origine (0.00 rad) del sistema di riferimento locale, garantendo la coerenza cinematica tra lo stato reale del braccio robotico e i riferimenti software calcolati dalla logica di teleoperazione.

4. **Impostazione dell'interfaccia di comunicazione (Interfaces):** Per consentire il dialogo con l'architettura centrale, i parametri relativi al bus FDCAN sono stati modificati per allinearsi al setup hardware del microcontrollore. Nello specifico, il parametro CAN Baud Rate è stato impostato al valore 10 che, con moltiplicatore $\times$ 100 $Kbps$, corrisponde a una velocità di trasmissione di 1 $Mbps$.

5. **Assegnazione degli identificativi di rete:** Il parametro CAN MASTER ID è impostato a 0 su tutti i driver, designando il microcontrollore STM32 come nodo master da cui ricevere i dati. Il parametro CAN ID, corrispondente al nodo Slave, è stato invece assegnato in modo univoco con un valore intero compreso tra 1 e 6, a seconda del giunto specifico del manipolatore in fase di configurazione.

6. **Selezione del protocollo logico:** Infine, come standard di comunicazione è stato selezionato il CAN Protocol: MIT. Questa scelta rende il driver compatibile con il set di istruzioni impiegato dal firmware della STM32, permettendo l'invio e la ricezione di frame contenenti i riferimenti di posizione, velocità, coppia e i guadagni dinamici necessari per il controllo di impedenza.

Al termine di questi passaggi, le configurazioni sono state sincronizzate, tramite il pulsante Sync, sulla memoria del driver, rendendo l'attuatore pronto per ricevere i comandi ad alta frequenza dal ciclo di controllo principale.



Figura 3.11: Interfaccia di configurazione del software SteadyWin Motor Wizard.

3.4 Protocolli di comunicazione

3.4.1 Protocollo CAN Bus

Il Controller Area Network (CAN) è un protocollo di comunicazione seriale sviluppato originariamente da Bosch per l'industria automobilistica e successivamente standardizzato a livello internazionale dalla norma ISO-11898. Progettato per operare in ambienti caratterizzati da forti disturbi elettromagnetici, il bus CAN adotta una trasmissione di tipo differenziale su una coppia di conduttori, denominati CANH e CANL, garantendo un'elevata immunità al rumore di modo comune e un'ottima tolleranza ai guasti. Per prevenire fenomeni di riflessione del segnale, la topologia della rete richiede che le due estremità fisiche del bus siano terminate con resistori da 120 Ω. A livello architetturale, la rete opera come un sistema multi-master di tipo broadcast: i nodi non si scambiano grandi blocchi di dati in modalità punto-punto, bensì diffondono brevi messaggi a tutta la rete. Questo approccio assicura che tutti i dispositivi connessi dispongano di dati sempre coerenti e aggiornati. La gestione dell'accesso al mezzo condiviso è regolamentata dal protocollo CSMA/CD+AMP (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection and Arbitration on Message Priority). Qualora due o più nodi tentino di trasmettere simultaneamente, la potenziale collisione viene risolta attraverso un'arbitrazione di tipo non distruttivo. A differenza della logica digitale standard, sul bus CAN il livello logico basso è associato a uno stato elettrico dominante, mentre il livello logico alto a uno stato recessivo. Poiché uno stato dominante sovrascrive fisicamente uno stato recessivo, durante l'arbitrazione il nodo che trasmette il messaggio con l'identificativo binario più basso mantiene il controllo del bus e prosegue con la trasmissione senza che il pacchetto venga corrotto o distrutto. Le informazioni vengono incapsulate in specifici pacchetti definiti Data Frame. Nello standard CAN, l'intestazione del messaggio comprende un campo identificatore a 11 bit, il quale definisce la priorità e permette di gestire fino a 2048 messaggi differenti. All'identificativo segue il campo dati (Data Field), il quale può trasportare un payload compreso tra 0 e 8 byte, e un campo CRC a 16 bit incaricato del rilevamento degli errori di trasmissione. Questa struttura estremamente compatta, unita a una velocità di segnalazione (baud rate) che può raggiungere 1 Mbps, rende il CAN Bus ideale per i sistemi di controllo real-time [45] [46].



Figura 3.12: Sezione di un cavo per bus CAN [46].

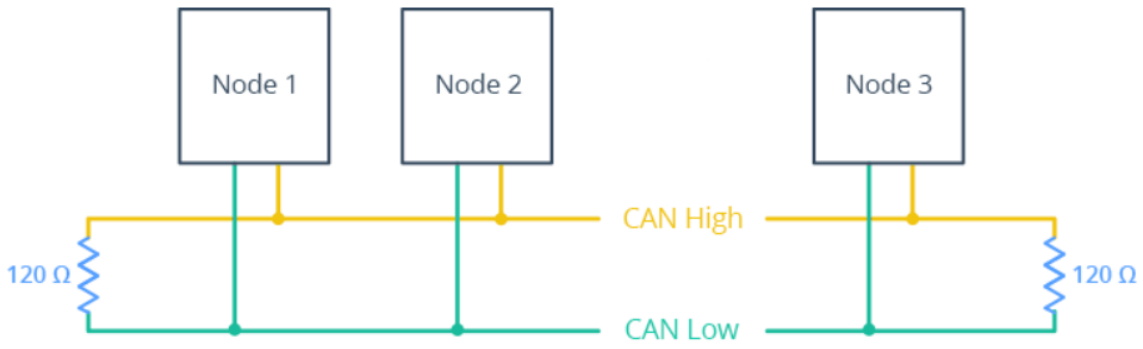


Figura 3.13: Architettura di una rete CAN con nodi interconnessi [46].

3.4.2 Protocollo MIT

Il Protocollo MIT è ottimizzato per il controllo dell'impedenza e permette di gestire un'intera legge di controllo Proporzionale-Derivativa con feedforward di coppia inviando un singolo frame dati. La legge di controllo applicata localmente dall'elettronica del driver è descritta dalla seguente equazione:

$$\tau = K_p(p_{ref} - p_{enc}) + K_d(v_{ref} - v_{enc}) + \tau_{ff}$$

dove τ è la coppia finale erogata dal motore, p_{ref} e v_{ref} sono rispettivamente i riferimenti target di posizione e velocità, p_{enc} e v_{enc} sono i valori misurati dall'encoder, K_p e K_d rappresentano le costanti di rigidità e smorzamento virtuali imposte via software, e τ_{ff} è la coppia di feedforward. Per garantire comunicazioni ad alta frequenza senza saturare la banda del bus, il protocollo MIT condensa tutti e cinque i parametri di controllo all'interno del Data Frame del CAN Classic, la cui lunghezza massima è di 8 byte. Questo risultato è ottenuto mediante tecniche di quantizzazione e bit-packing: i valori a virgola mobile vengono scalati linearmente all'interno del loro range fisico operativo e mappati in numeri interi senza segno a risoluzione fissa. Il payload di trasmissione, inviato dal microcontrollore Master al nodo Slave, è così ripartito:

- **Posizione (p_{des}):** 16 bit
- **Velocità (v_{des}):** 12 bit
- **Guadagno Proporzionale (K_p):** 12 bit
- **Guadagno Derivativo (K_d):** 12 bit
- **Coppia di Feedforward (τ_{ff}):** 12 bit

La somma esatta di queste lunghezze ammonta a 64 bit, consentendo uno sfruttamento integrale e senza overhead del pacchetto di comunicazione. In risposta a ciascun comando

di attuazione, il driver del nodo Slave trasmette immediatamente al Master un pacchetto di feedback, anch'esso racchiuso in 8 byte, contenente lo stato istantaneo dell'attuatore:

- **ID del Motore e Stato Logico** (8 bit)
- **Posizione Attuale misurata (p_{act}):** 16 bit
- **Velocità Attuale derivata (v_{act}):** 12 bit
- **Coppia Errogata Attuale (τ_{act}):** 12 bit

Questa architettura di comunicazione bidirezionale sincrona è fondamentale per l'implementazione del sistema Master-Slave. Condensando rigidità, smorzamento e riferimenti in un singolo invio, il manipolatore è in grado di modificare la propria cedevolezza meccanica istante per istante, che è un requisito tecnico per garantire operazioni di teleoperazione bilaterale [47].

Sistema finale

Nel corso di questo capitolo si analizzerà l'integrazione complessiva del manipolatore. La trattazione è suddivisa in due sezioni: la prima analizza l'architettura elettronica e i cablaggi, sia di potenza che di segnale; la seconda espone le fasi di assemblaggio meccanico e l'integrazione fisica dei componenti appositamente progettati. Nello specifico, verranno illustrate le soluzioni adottate per vincolare il manipolatore al dispositivo mobile principale, ottimizzare il layout dei cablaggi e alloggiare i driver di potenza direttamente sui motori.

4.1 Configurazione elettronica

L'architettura elettronica del sistema è stata progettata seguendo un approccio di controllo centralizzato basato sul microcontrollore STM32G474RET6. In questa configurazione, l'unità centrale acquisisce le posizioni angolari dei giunti lato Master e gestisce i riferimenti per gli attuatori dello Slave attraverso il bus CAN, garantendo una sincronizzazione ottimale dei movimenti. La struttura circuitale può essere logicamente divisa in due sottosistemi: l'architettura del Master, dedicata all'acquisizione e all'elaborazione dei dati, e l'architettura dello Slave, dedicata all'azionamento di potenza.

4.1.1 Architettura del Master

L'architettura del Master rappresenta il nodo coordinatore del sistema di controllo. Come illustrato in Figura 4.2, i collegamenti principali di questa sezione riguardano l'acquisizione dei segnali provenienti dagli encoder e l'interfacciamento con la rete di comunicazione differenziale.

- **Interfaccia di supervisione e alimentazione logica:** La scheda di sviluppo NUCLEO-G474RE è connessa a un PC host tramite interfaccia USB. Questa connessione assolve a una duplice funzione: fornisce l'alimentazione a 5 V necessaria al funzionamento della logica di bordo e instaura un canale di comunicazione seriale per il debugging, il monitoraggio della telemetria e la configurazione in tempo reale dei parametri di controllo.

- **Acquisizione della posizione angolare:** Per rilevare la posizione cinematica del manipolatore operato dall'utente, il Master è interfacciato con sei encoder incrementali AMT102-V (uno per ciascun giunto). Ogni sensore è alimentato dai pin a 5 V e GND della scheda. I segnali digitali in quadratura, generati sui canali A e B, vengono inviati direttamente ai pin GPIO del microcontrollore, i quali sono mappati sui timer hardware interni configurati in modalità Encoder Mode. Ciò consente una lettura rapida e del tutto priva di latenze software.

- **Interfaccia di comunicazione:** Per dialogare con i driver di potenza, l'STM32 sfrutta la propria periferica CAN interna. I segnali logici di trasmissione (TX) e ricezione (RX) vengono inviati ad un transceiver CAN esterno (SN65HVD230), alimentato a 3.3 V, il quale si occupa di tradurli nel formato differenziale standard CANH e CANL.

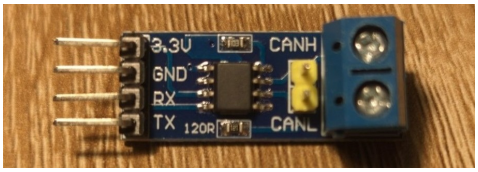


Figura 4.1: Modulo transceiver CAN SN65HVD230.

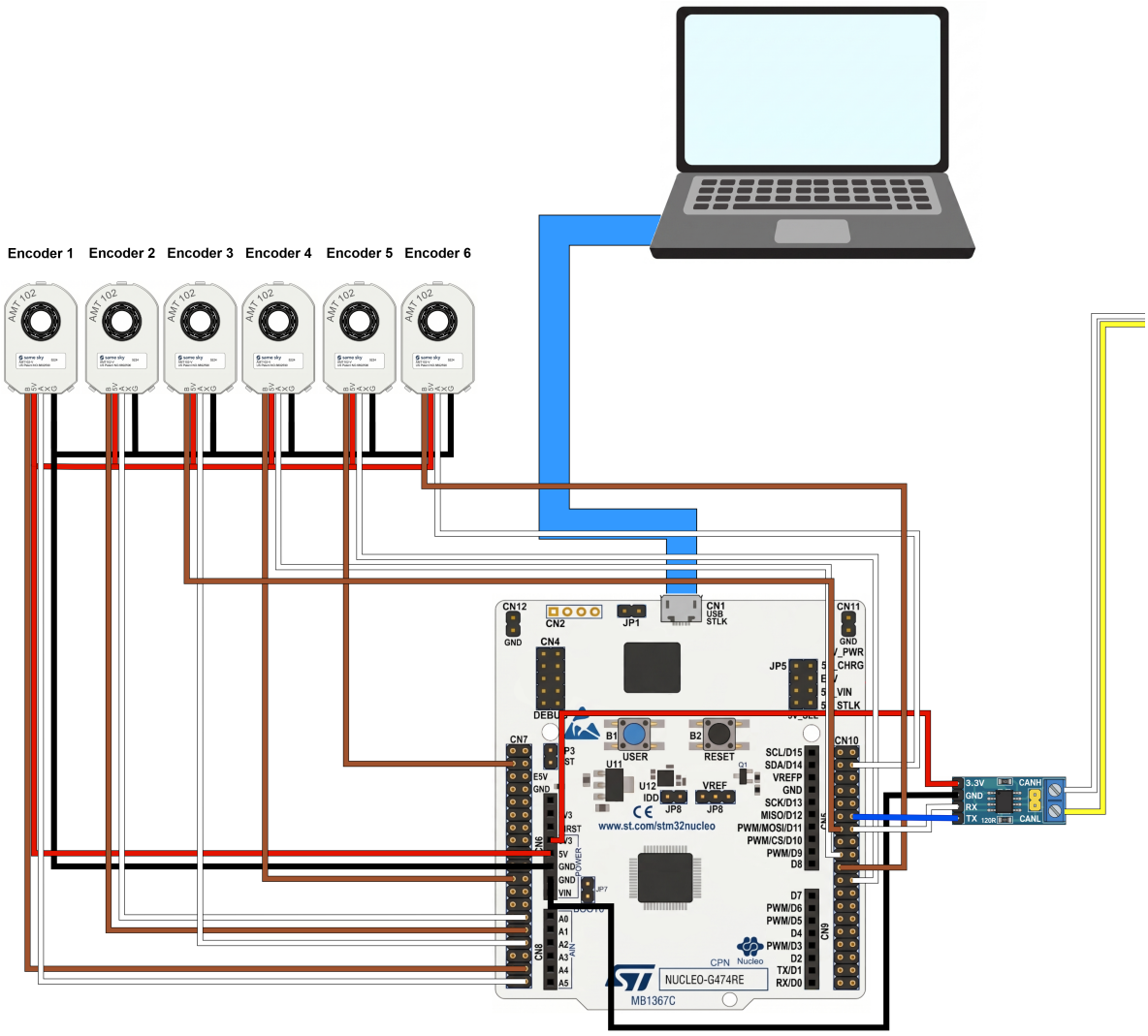


Figura 4.2: Layout del Master.

4.1.2 Architettura dello Slave

L'architettura dello Slave racchiude la sezione di potenza e attuazione del sistema. È composta dall'insieme dei driver di controllo motore e dai rispettivi attuatori brushless (modelli GIM3505-8 e GIM4310-10), configurati per ricevere ed eseguire in anello chiuso i comandi di spostamento generati dal Master, come rappresentato in Figura 4.3.

- **Distribuzione dell'alimentazione:** A differenza della logica del Master, la sezione Slave richiede un trasferimento di potenza nettamente superiore. L'energia è infatti fornita da un alimentatore DC stabilizzato, tarato a 24 V. I cavi di potenza (V+ e GND) si diramano dall'alimentatore e vengono connessi in parallelo a ciascuno dei sei driver GDS34, garantendo a ogni nodo la medesima tensione di alimentazione per il pilotaggio del rispettivo motore.
- **Rete di comunicazione CAN bus:** La ricezione dei dati è affidata al bus CAN differenziale proveniente dal transceiver SN65HVD230. Il cablaggio segue una disposizione in linea con l'alimentazione. I cavi CANH e CANL entrano nel primo driver della catena, poi entrano nel secondo e proseguono in modo sequenziale fino al sesto driver.
- **Terminazione della linea:** Al fine di prevenire fenomeni di riflessione del segnale, che causerebbero la corruzione dei pacchetti dati ad alta frequenza, il bus CAN è stato correttamente bilanciato inserendo una resistenza di terminazione da 120 Ω in parallelo tra i terminali CANH e CANL dell'ultimo driver della catena.
- **Azionamento dei motori:** Ciascun driver, una volta elaborato il pacchetto CAN a esso indirizzato, inietta le correnti di fase appropriate nei tre cavi di potenza collegati agli avvolgimenti dello statore del rispettivo attuatore.

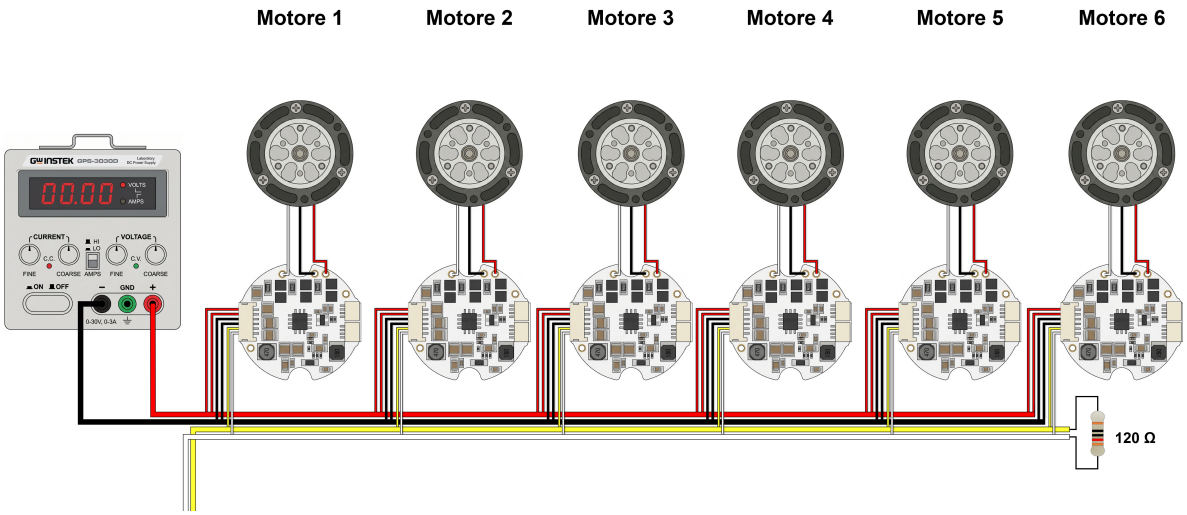


Figura 4.3: Layout dello Slave.

4.1.3 Schema complessivo

L'unione dei sottosistemi Master e Slave delinea l'architettura meccatronica completa del dispositivo. Il layout complessivo descrive un flusso informativo e di potenza circolare e continuo: il PC host avvia e supervisiona il nodo Master; parallelamente, l'STM32 legge costantemente le variazioni angolari indotte dall'operatore sui sei encoder AMT102-V in tempo reale. Contestualmente, il microcontrollore elabora e impacchetta i riferimenti di posizione per trasmetterli sul bus CAN. I sei driver in cascata demodulano i comandi dal bus differenziale e pilotano i rispettivi motori brushless al fine di replicare accuratamente i movimenti imposti. Tale architettura centralizzata fornisce una potenza di calcolo e una flessibilità tale da permettere una teleoperazione con tempi di latenza minimi e un'ottima affidabilità nella trasmissione dei segnali.

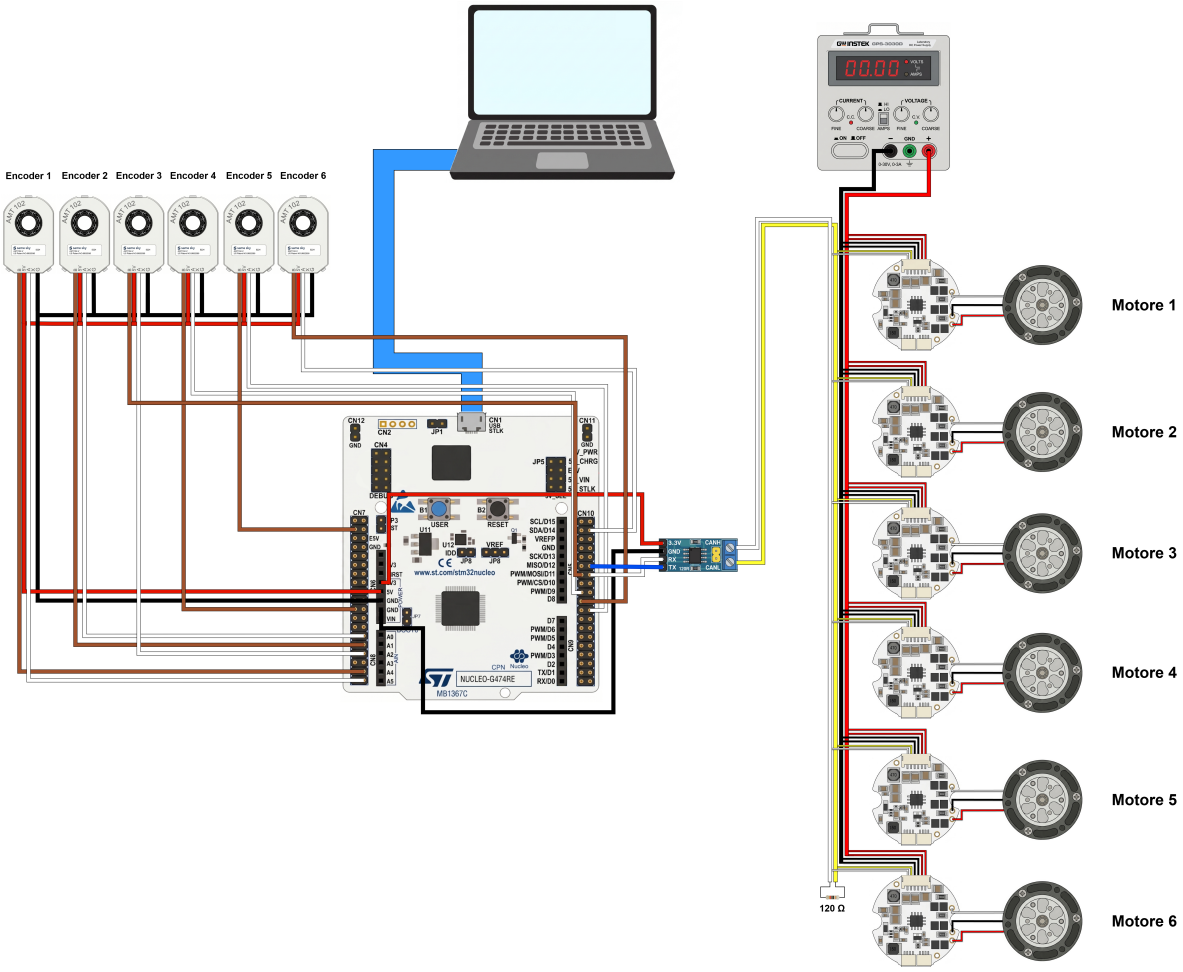


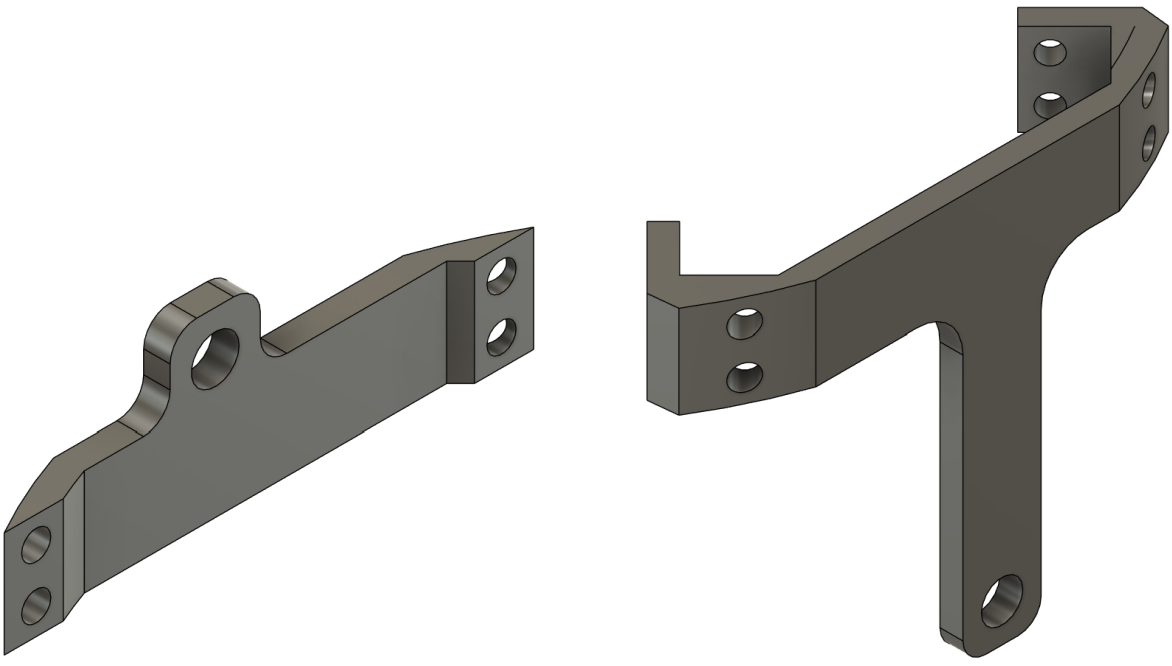
Figura 4.4: Layout complessivo.

4.2 Integrazione meccanica del manipolatore

La transizione dall'architettura elettronica al prototipo fisico ha richiesto un'attenta fase di progettazione meccanica. L'implementazione di una logica di controllo centralizzata, unitamente alla necessità di integrare l'elettronica di potenza direttamente a bordo dei motori, ha imposto la realizzazione di componenti customizzati. Tutte le interfacce, i giunti e i supporti descritti di seguito sono stati modellati in ambiente CAD e successivamente realizzati tramite stampa 3D, garantendo un compromesso ottimale tra leggerezza, facilità di realizzazione e resistenza strutturale.

4.2.1 Sistemi di ancoraggio al dispositivo principale

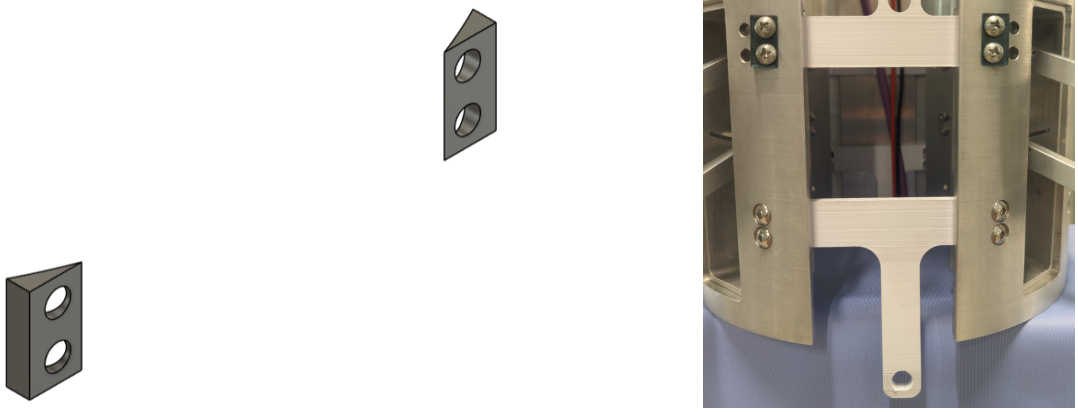
Il vincolo meccanico fondamentale per l'operatività del sistema ha riguardato il fissaggio del manipolatori Slave al corpo cilindrico del robot di salvataggio. Per garantire la massima stabilità strutturale, sono state progettate due componenti di ancoraggio principali: una staffa superiore e una inferiore. Essendo l'interfaccia di montaggio costituita dalla superficie curva del telaio, un serraggio diretto avrebbe provocato un disallineamento della testa delle viti. Per ovviare a questa criticità geometrica, sono stati progettati degli adattatori che si interpongono tra la superficie curva e la testa della vite, compensando l'angolo di curvatura e fornendo un piano di battuta ortogonale all'asse di serraggio. Si ottiene così un incastro rigido e meccanicamente ottimizzato che vincola la base dei bracci in modo permanente e sicuro.



(a) Staffa superiore.

(b) Staffa inferiore.

Figura 4.5: Staffe di ancoraggio principali.



(a) Adattatori per staffa superiore.

(b) Montaggio sul dispositivo cilindrico.

Figura 4.6: Dettaglio degli adattatori e dell'assemblaggio sul telaio.

4.2.2 Progettazione delle interfacce per i driver di potenza

Una successiva fase di progettazione ha riguardato l'alloggiamento dei driver GDS34 sui singoli attuatori. Poiché i motori brushless GIM3505-8 V1.0 risultano sprovvisti di interfacce meccaniche per l'elettronica di controllo adottata, è stato sviluppato un sistema di montaggio modulare customizzato, costituito da tre elementi sovrapponibili:

- **Supporto magnete:** Un cilindro distanziale progettato per essere calettato sull'albero posteriore del motore. Il suo scopo è ospitare il magnete diametrale alla corretta distanza di lettura dal sensore, garantendo un'elevata coassialità per prevenire errori di eccentricità nella rilevazione dell'angolo.
- **Interfaccia driver:** Una struttura di supporto sagomata per alloggiare il PCB del driver. È provvista di apposite sedi per l'inserimento di inserti filettati, necessari al fissaggio del coperchio protettivo superiore e di fori per il montaggio sul motore tramite le apposite viti. Sono state inoltre ricavate delle asole laterali per consentire il passaggio agevole dei cavi di fase dallo statore alla scheda elettronica.
- **Coperchio motore:** Un guscio protettivo progettato per chiudere e isolare l'intero pacchetto elettronico. Oltre a riparare il driver e l'encoder dalla polvere e da urti accidentali, presenta ulteriori fori predisposti per il fissaggio sul motore e per l'inserimento di inserti filettati, destinati al vincolo meccanico tra il motore e il rispettivo giunto. Il design include infine feritoie per i cablaggi, in particolare per le linee di alimentazione e del bus CAN e per l'interfaccia di debug.



Figura 4.7: Supporto magnete.

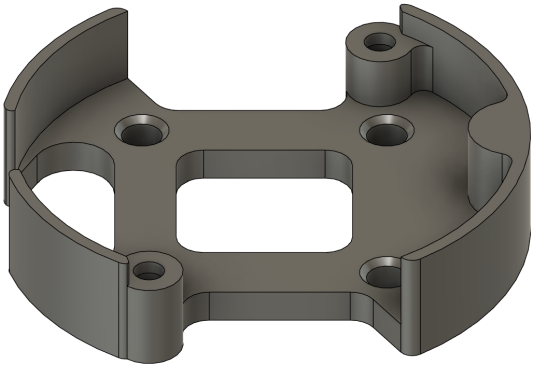


Figura 4.8: Interfaccia driver.

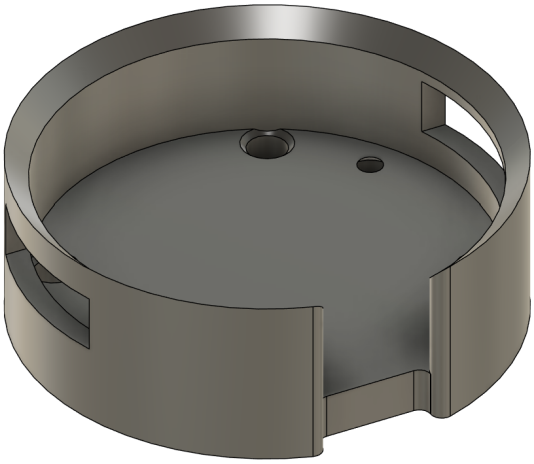
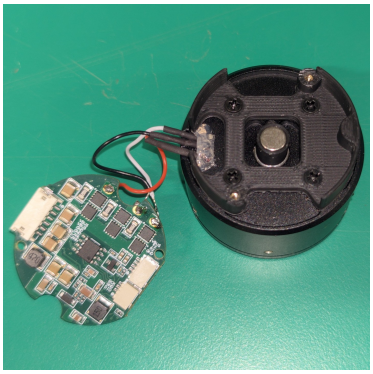


Figura 4.9: Coperchio motore.



(a) Montaggio interfaccia e supporto magnete.



(b) Alloggiamento del driver nell'interfaccia.



(c) Installazione del coperchio sul motore.

Figura 4.10: Assemblaggio dei componenti sul motore.

Parallelamente all'interfacciamento dei motori GIM3505-8 V1.0, è stato progettato un adattatore specifico per i motori GIM4310-10. Questo componente permette di vincolare gli attuatori ai giunti sfruttando la foratura preesistente, eliminando così la necessità di apportare modifiche alla geometria dei fori dei giunti stessi.

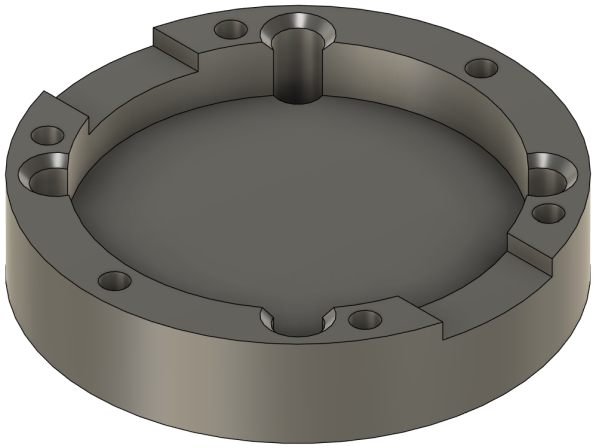


Figura 4.11: Adattatore per motori GIM4310-10.

4.2.3 Ottimizzazione strutturale dei giunti e supporti per il cablaggio

L'adozione di un'architettura elettronica centralizzata ha semplificato notevolmente la logica di controllo, ma ha richiesto una gestione oculata del cablaggio fisico. Per scongiurare il rischio di aggrovigliamenti o interferenze con la cinematica del manipolatore durante le fasi di teleoperazione, la struttura del braccio è stata ottimizzata. Sono stati progettati dei componenti per l'ancoraggio dei morsetti di distribuzione (alimentazione e bus differenziale CAN) e per garantire un routing ordinato dei cablaggi. Al fine di vincolare i cavi nelle diverse zone dello Slave, sono state realizzate le seguenti interfacce meccaniche:

- **Staffa per i morsetti della spalla:** Viene montata sul retro della base dello Slave, ancorandosi saldamente attraverso le sedi delle viti preesistenti destinate al fissaggio del motore di attuazione della spalla.
- **Staffa per i morsetti del gomito:** Ricavata modificando il design del supporto originale, integra apposite forature che consentono non solo il fissaggio meccanico dei morsetti, ma anche il passaggio guidato dei cavi all'interno della struttura.
- **Anello per i morsetti del polso:** Elemento progettato per abbracciare la sezione tubolare del braccio che collega il gomito al polso. Fissato tramite apposite viti, fornisce un ancoraggio stabile per i morsetti e assicura che il fascio di cavi scorra costantemente parallelo al link, evitando la formazione di spire o aggrovigliamenti.

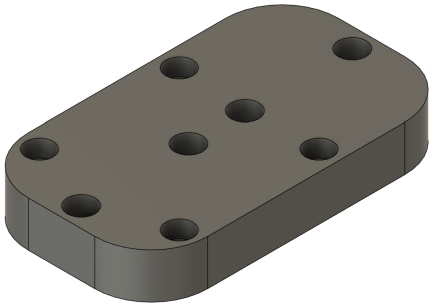


Figura 4.12: Staffa per i morsetti della spalla.

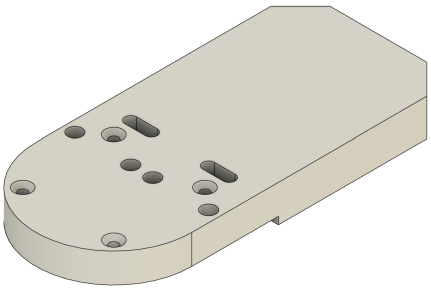


Figura 4.13: Staffa per i morsetti del gomito.

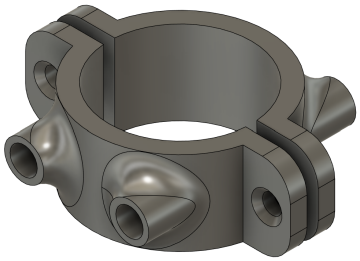
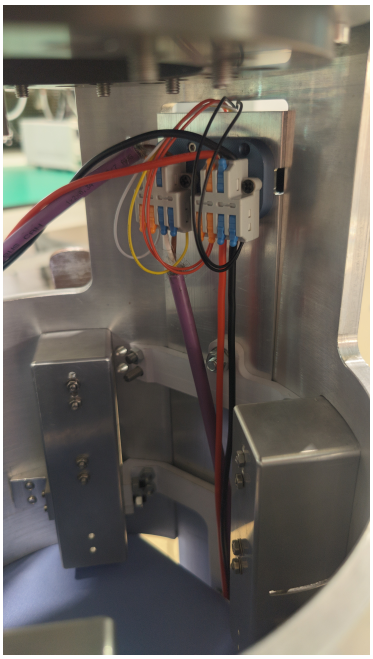
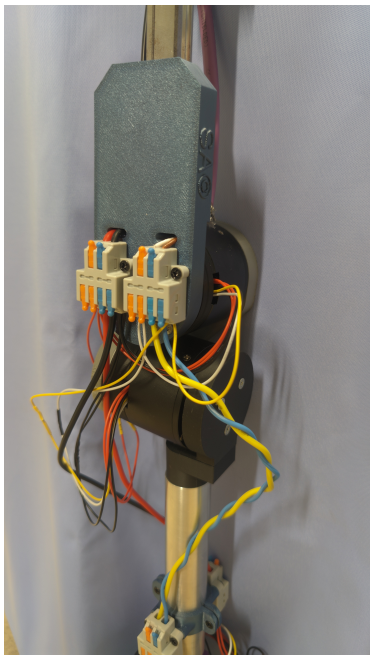


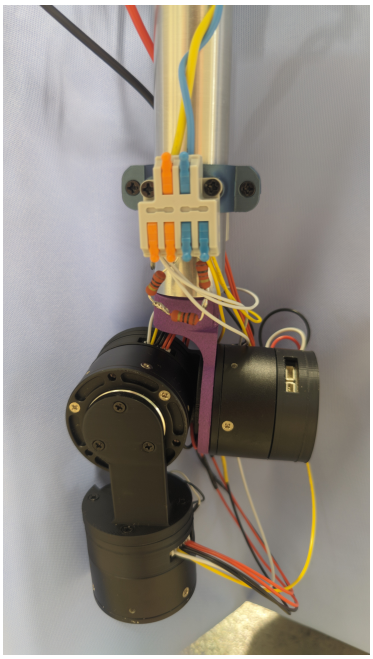
Figura 4.14: Anello per i morsetti del polso.



(a) Montaggio della staffa della spalla.



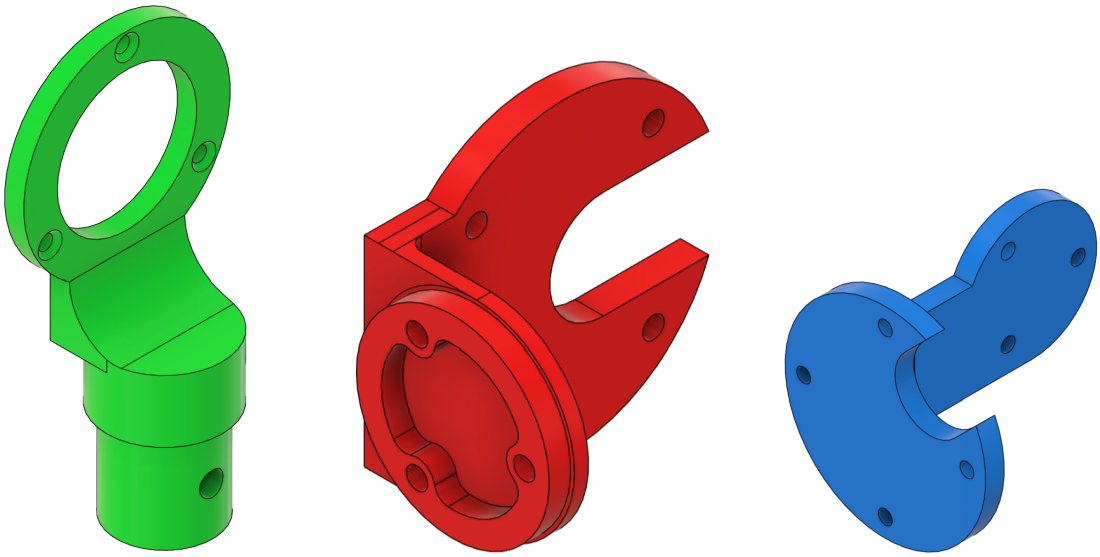
(b) Montaggio della staffa del gomito.



(c) Montaggio dell'anello per i morsetti del polso.

Figura 4.15: Assemblaggio dei componenti per il fissaggio dei morsetti.

Infine, per incrementare l'affidabilità meccanica complessiva del sistema, i giunti terminali del polso (in particolare i giunti 4, 5 e 6) sono stati sottoposti a una revisione strutturale. Lo spessore generale delle pareti è stato maggiorato per incrementare la resistenza agli sforzi, prevenendo così il rischio di cedimenti o rotture durante l'impiego operativo del braccio.



(a) Giunto 4. (b) Giunto 5. (c) Giunto 6.

Figura 4.16: Giunti del polso con spessore strutturale maggiorato.

Conclusioni e sviluppi futuri

Questo capitolo conclude il lavoro di tesi, analizzando i risultati ottenuti sull'intero processo di ottimizzazione e integrazione dei manipolatori robotici sul dispositivo mobile progettato per le operazioni di soccorso. Nella prima parte verranno riassunti i risultati concreti ottenuti sul prototipo fisico, descrivendo la strumentazione impiegata e il comportamento del sistema finale. La seconda parte sarà invece dedicata all'analisi delle criticità emerse e proporrà una serie di sviluppi futuri volti a perfezionare la piattaforma, sia dal punto di vista hardware che software.

5.1 Risultati ottenuti

La fase di testing ha permesso di validare le scelte architetturali descritte nei capitoli precedenti, dimostrando la fattibilità del controllo centralizzato. Di seguito si analizzano i dettagli della strumentazione utilizzata per la messa in opera e si riportano le considerazioni finali sul comportamento del manipolatore.

5.1.1 Strumentazione utilizzata

Per l'implementazione pratica del sistema meccatronico e il suo successivo collaudo, è stata selezionata una componentistica adatta a gestire in sicurezza le potenze in gioco e a garantire l'integrità dei segnali di comunicazione. Il cablaggio è stato realizzato impiegando cavi con sezioni differenziate in base alla funzione: per la rete di comunicazione CAN bus sono stati utilizzati cavi AWG22, ideali per i segnali differenziali, mentre per la linea di potenza sono stati scelti cavi AWG18, in grado di sopportare le correnti assorbite dai motori senza incorrere in surriscaldamenti o cadute di tensione eccessive. Le prove sperimentali sono state effettuate impiegando cavi con una lunghezza di circa 3 m.

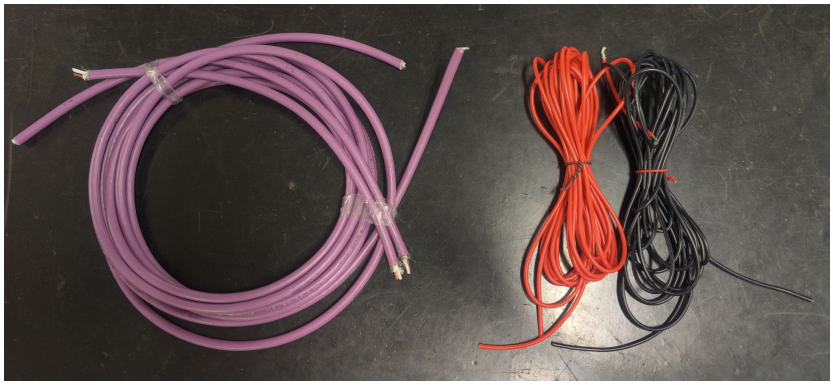


Figura 5.1: Cavi AWG22 e AWG18.

L'energia primaria è stata fornita tramite un alimentatore da banco stabilizzato, essenziale per garantire i 24 V nominali richiesti dalla linea di potenza. Le diramazioni del cablaggio, sia per l'alimentazione che per la trasmissione del segnale CAN bus verso i vari giunti dello Slave, sono state realizzate avvalendosi di morsetti a due ingressi e quattro uscite. Questa scelta ha facilitato notevolmente la stesura e la manutenzione dei cavi lungo i link del braccio.



Figura 5.2: Alimentatore da banco stabilizzato.

Il setup finale si compone quindi del dispositivo cilindrico completo con il braccio robotico integrato, situato in prossimità della postazione Master. Quest'ultima include, oltre al manipolatore di comando, anche la scheda NUCLEO-G474RE e il PC host, impiegato principalmente per alimentare la scheda stessa e per l'eventuale monitoraggio.

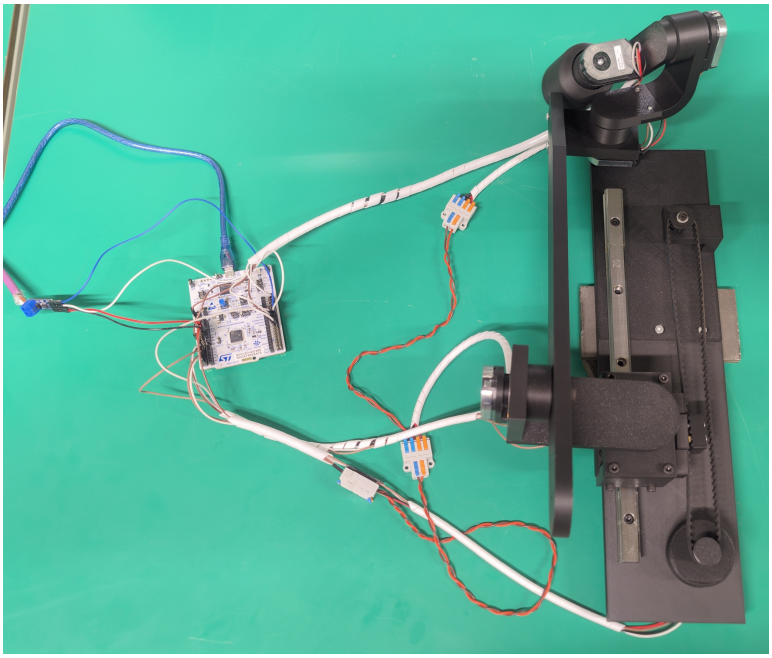


Figura 5.3: Setup dell'unità Master.

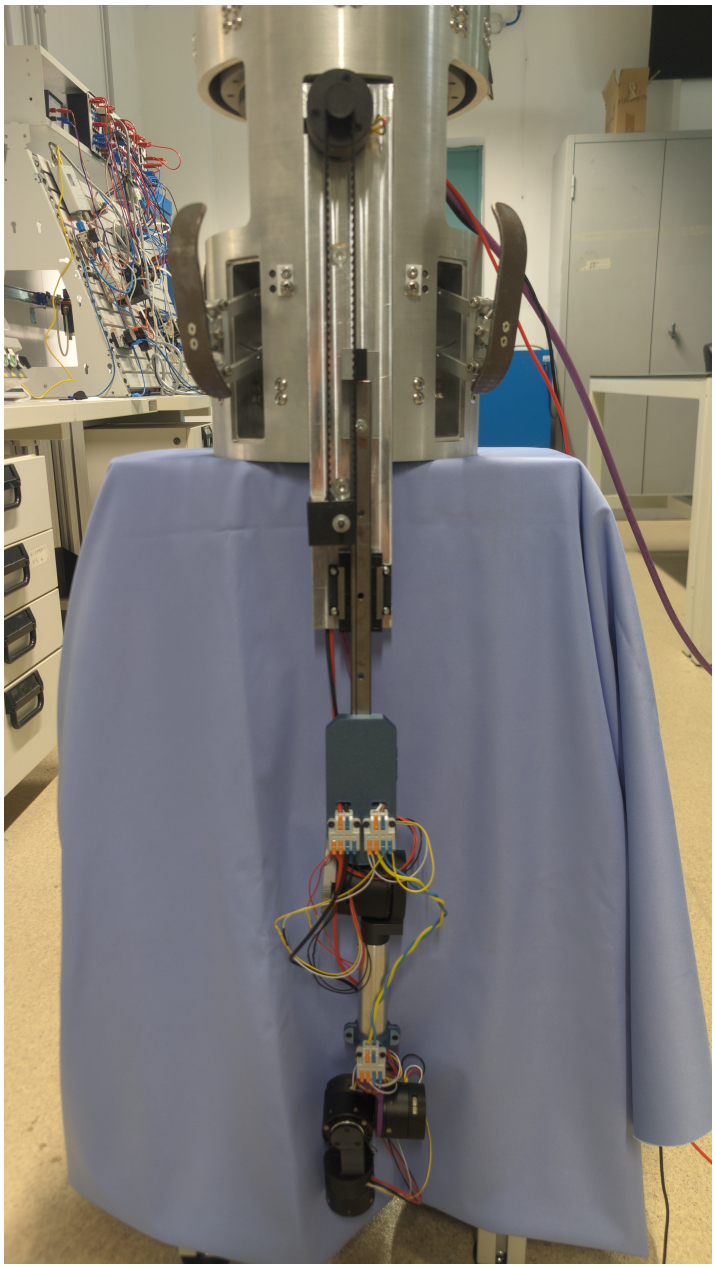


Figura 5.4: Dispositivo Slave integrato.

5.1.2 Commenti sul sistema finale

Il collaudo del prototipo ha confermato la solidità dell'infrastruttura di controllo e di comunicazione. Il robot risponde in modo coerente e continuo ai comandi di posizione imposti dall'operatore tramite la stazione Master, dimostrando l'efficacia del firmware implementato. Dal punto di vista prettamente numerico e prestazionale, il sistema operativo a bordo del microcontrollore STM32G474RET6 garantisce una sensibilità cinematica elevata, campionando i segnali degli encoder AMT102-V a una risoluzione di 8192 step per giro. Il cuore dell'algorit-

mo di teleoperazione è cadenzato da un timer hardware inizializzato per generare routine di interrupt con una frequenza esatta di 1 kHz (un ciclo di elaborazione ogni millisecondo). Per ottimizzare il carico di trasmissione sul bus CAN ed evitare saturazioni della banda o collisioni di pacchetti, il firmware implementa una strategia di trasmissione a time-multiplexing. A ogni ciclo di clock di 1 ms, il Master elabora la variazione angolare e invia il pacchetto dati a un singolo attuatore, ruotando sequenzialmente l'indice del motore. La scelta di accentrare il calcolo sull'STM32, unita a limitazioni di sicurezza imposte a livello software, si è rivelata vincente. Questa architettura permette al manipolatore di inseguire fluidamente i riferimenti, gestendo l'anello chiuso in tempo reale senza colli di bottiglia computazionali e garantendo margini di stabilità hardware eccellenti.

5.2 Sviluppi futuri

Nonostante i traguardi raggiunti, l'analisi del prototipo ha fatto emergere alcune limitazioni tecniche. Questa sezione illustra le criticità riscontrate e traccia le linee guida per i futuri sviluppi del progetto, mirati a elevare le prestazioni dinamiche e la compattezza del sistema.

5.2.1 Miglioramento del controllo PD

Durante le sessioni di teleoperazione, è stata osservata una risposta dinamica disomogenea tra i diversi attuatori. Nello specifico, i giunti attuati dai motori GIM3505-8 presentano un comportamento eccessivamente reattivo, mentre i giunti attuati dai motori GIM4310-10 mostrano una risposta più lenta. Questa discrepanza è imputabile in prima analisi ad una taratura non ottimale dei guadagni proporzionale e derivativo (PD) negli anelli di controllo locali dei driver. Per mitigare il problema, gli sviluppi futuri dovranno prevedere una campagna di tuning sperimentale dedicata per ogni singolo giunto, possibilmente supportata da tecniche di auto-tuning. Inoltre, occorrerà indagare ulteriori cause, come la presenza di tolleranze o lievi imprecisioni nei componenti stampati in 3D utilizzati per adattare i driver GDS34 ai motori GIM3505-8.

5.2.2 Impiego dei motori GIM3505-8 V1.1

La progettazione meccanica ha richiesto la realizzazione di numerosi adattatori e coperchi stampati in 3D per accoppiare la versione V1.0 dei motori GIM3505-8 con i driver esterni GDS34. È già presente sul mercato la versione V1.1 di tali attuatori, la quale integra l'elettronica di azionamento direttamente all'interno della cassa del motore. Tale soluzione nativa annullerebbe la necessità dei componenti customizzati, riducendo i tempi di assemblaggio e le potenziali criticità strutturali. L'adozione di questa versione non è stata possibile nell'attuale iter di tesi a causa di una temporanea carenza di fornitura sul mercato dei motori in questione e

di tempistiche di consegna incompatibili con le scadenze accademiche, ma rappresenta uno sviluppo obbligatorio per le future revisioni del robot.

5.2.3 Integrazione del feedback aptico

L'attuale sistema implementa una teleoperazione basata su un controllo di posizione. Il passaggio a un'architettura che preveda la restituzione di un feedback di forza all'operatore incrementerebbe esponenzialmente la precisione e la sicurezza delle manovre di soccorso. Per realizzare un controllo di coppia, sarà necessario sostituire gli encoder AMT102-V presenti sulla struttura Master con motori attivi identici a quelli montati sullo Slave. Avvalendosi del software SteadyWin Motor Wizard, sarà possibile mappare e coniugare univocamente ogni motore del Master con il rispettivo omologo dello Slave. La comunicazione avverrà sempre tramite bus CAN; in questa architettura potenziata, il microcontrollore STM32 assumerà il ruolo di coordinatore del protocollo, gestendo il flusso bidirezionale dei riferimenti e delle coppie di reazione tra la postazione di comando e l'ambiente confinato.

5.2.4 Aggiornamento del Digital Twin del sistema

Attualmente, il progetto è supportato da una replica virtuale realizzata tramite il software Coppelia, che modella il dispositivo principale, i bracci robotici e una sezione del pozzo. Nelle condizioni attuali, solo i bracci possono essere movimentati tramite i rispettivi Master, interfacciati con le schede STM32 collegate al PC host da cui viene avviata la simulazione. Il sistema rileva inoltre eventuali collisioni con il pozzo o tra i componenti stessi del robot.

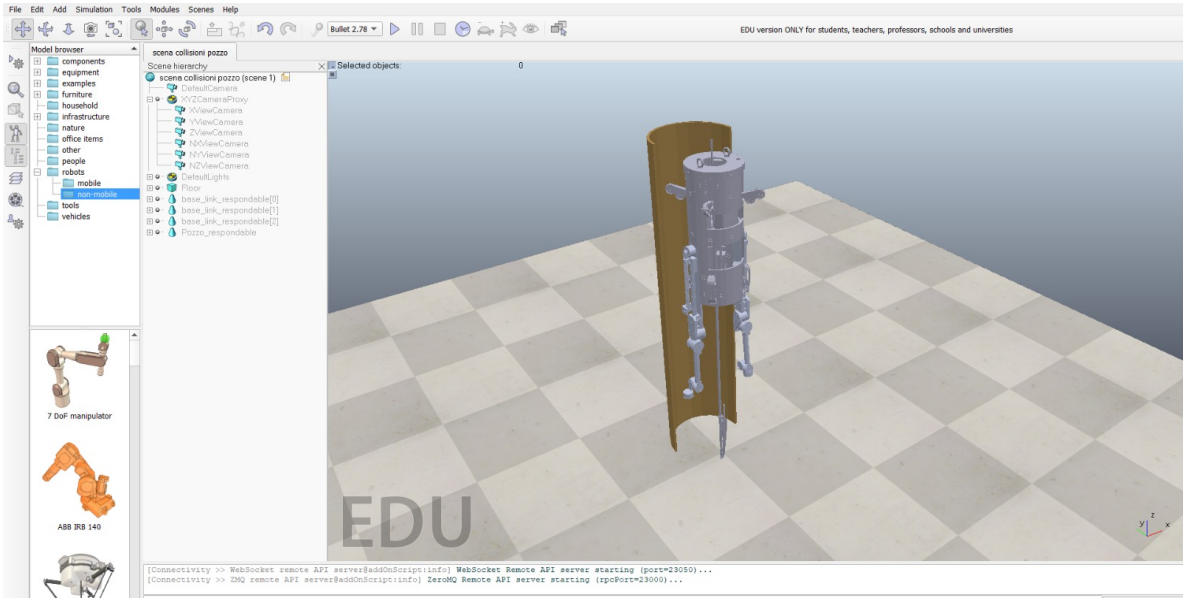


Figura 5.5: Interfaccia di Coppelia.

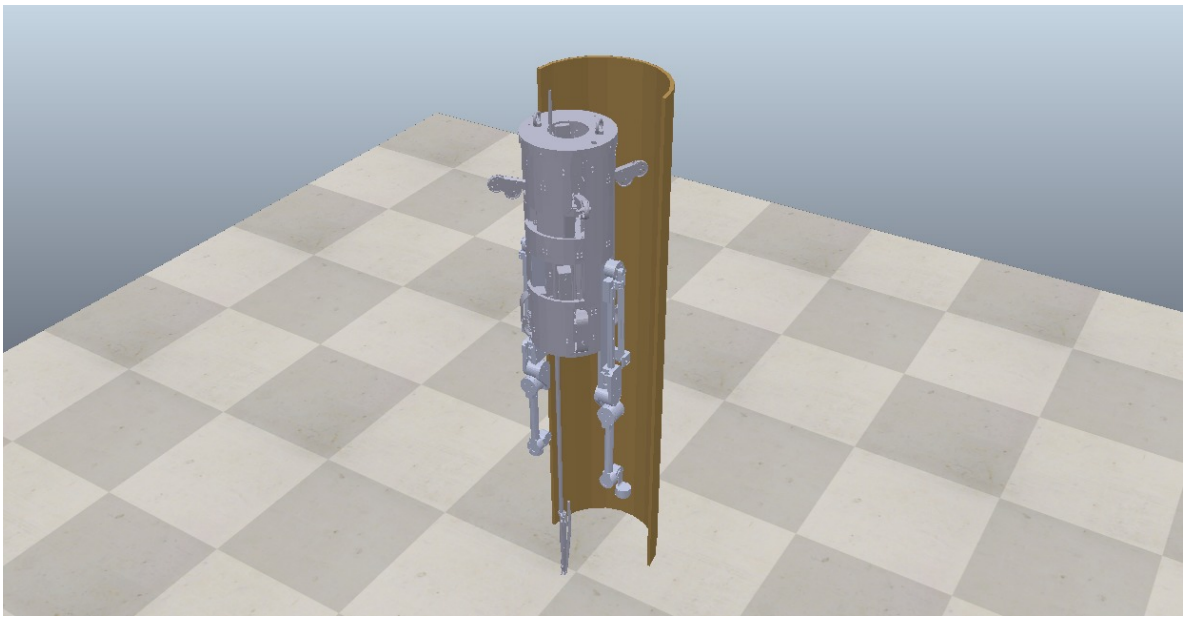


Figura 5.6: Dettaglio del *Digital Twin* nel condotto.

Il potenziamento di questo Digital Twin prevede l'espansione della simulazione per includere la gravità, la geometria variabile dell'ambiente sotterraneo e le movimentazioni dell'intero apparato robotico, quali la calata del dispositivo cilindrico e il dispiegamento dei sistemi di bloccaggio gonfiabili. Inoltre, l'interfaccia di simulazione potrà essere accoppiata ai nuovi motori del Master, fornendo un feedback aptico virtuale generato direttamente dal motore fisico di Coppelia durante le fasi di addestramento degli operatori.

5.2.5 Ottimizzazione degli ingombri

L'ultimo limite evidenziato in fase di integrazione riguarda gli ingombri spaziali. A causa dei coperchi protettivi aggiuntivi necessari per alloggiare i driver, lo spessore complessivo dei giunti supera marginalmente il diametro massimo nominale stabilito per la discesa del robot nei pozzi artesiani. Negli sviluppi futuri, sarà necessario riprogettare alcuni componenti dello Slave, per ridurre l'altezza del pacchetto di attuazione. L'obiettivo sarà quello di ottimizzare i volumi, permettendo al manipolatore di rientrare all'interno del diametro operativo (circa 30 cm) senza alcun rischio di interferenza meccanica con le pareti del pozzo durante le fasi di inserimento ed estrazione.

Appendice A

In questa appendice viene riportato il listato completo del codice sorgente relativo al file main.c. Il testo include la configurazione delle periferiche hardware e l'implementazione dell'algoritmo di controllo temporizzato a 1 kHz sviluppato per il microcontrollore STM32G474RET6, evidenziando le sezioni dedicate alla manipolazione dei dati degli encoder e all'impacchettamento dei frame per il bus FDCAN.

```
#include "main.h"

/* Private variables ---------------------------------------------------------*/
FDCAN_HandleTypeDef hfdcan1;
TIM_HandleTypeDef htim1;
TIM_HandleTypeDef htim2;
TIM_HandleTypeDef htim3;
TIM_HandleTypeDef htim4;
TIM_HandleTypeDef htim5;
TIM_HandleTypeDef htim6;
TIM_HandleTypeDef htim8;

/* USER CODE BEGIN PV */
FDCAN_TxHeaderTypeDef TxHeader;
uint8_t TxData[8];

/* Variabili Globali e Setup Motori */
FDCAN_HandleTypeDef hfdcan1;
TIM_HandleTypeDef htim1, htim2, htim3, htim4, htim5, htim6, htim8;
FDCAN_TxHeaderTypeDef TxHeader;
uint8_t TxData[8];

#define NUM_MOTORS 6
#define ENCODER_RES 8192.0f

// Array dei puntatori ai Timer
TIM_HandleTypeDef* encoder_timers[NUM_MOTORS];

// Array di memoria per le posizioni e velocita' dei 6 assi
volatile uint16_t last_raw_counts[NUM_MOTORS] = {0};
volatile int32_t accumulated_counts[NUM_MOTORS] = {0};
volatile float target_radians[NUM_MOTORS] = {0.0f};
volatile float target_velocities[NUM_MOTORS] = {0.0f};
volatile uint8_t current_motor_index = 0;

// Parametri di controllo (Kp e Kd) di ciascun motore
float kp_array[NUM_MOTORS] = {0.1f, 10.0f, 10.0f, 0.1f, 0.1f, 0.1f};
float kd_array[NUM_MOTORS] = {3.0f, 5.0f, 5.0f, 3.0f, 3.0f, 3.0f};

/* Private function prototypes -----------------------------------------------*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_TIM6_Init(void);
```

```
44 static void MX_FDCAN1_Init(void);
45 static void MX_TIM5_Init(void);
46 static void MX_TIM8_Init(void);
47 static void MX_TIM1_Init(void);
48 static void MX_TIM2_Init(void);
49 static void MX_TIM3_Init(void);
50 static void MX_TIM4_Init(void);
51
52 /* USER CODE BEGIN PFP */
53 int float_to_uint(float x, float x_min, float x_max, int bits);
54 void Send_Motor_Command(uint32_t motor_id, float p_des, float v_des, float kp, float
       kd, float t_ff);
55 /* USER CODE END PFP */
56
57 int main(void)
58 {
59     HAL_Init();
60     SystemClock_Config();
61
62     /* Initialize all configured peripherals */
63     MX_GPIO_Init();
64     MX_TIM6_Init();
65     MX_FDCAN1_Init();
66     MX_TIM5_Init();
67     MX_TIM8_Init();
68     MX_TIM1_Init();
69     MX_TIM2_Init();
70     MX_TIM3_Init();
71     MX_TIM4_Init();
72
73     /* USER CODE BEGIN 2 */
74
75     // 1. Mappatura dei Timer agli Indici dell'Array
76     encoder_timers[0] = &htim1;  // Motore 1
77     encoder_timers[1] = &htim2;  // Motore 2
78     encoder_timers[2] = &htim3;  // Motore 3
79     encoder_timers[3] = &htim4;  // Motore 4
80     encoder_timers[4] = &htim5;  // Motore 5
81     encoder_timers[5] = &htim8;  // Motore 6
82
83     // 2. Avvia tutti gli Encoder
84     for(int i = 0; i < NUM_MOTORS; i++) {
85         HAL_TIM_Encoder_Start(encoder_timers[i], TIM_CHANNEL_ALL);
86     }
87
88      // 3. Configura il Filtro CAN
89     FDCAN_FilterTypeDef sFilterConfig;
90     sFilterConfig.IdType = FDCAN_STANDARD_ID;
91     sFilterConfig.FilterIndex = 0;
92     sFilterConfig.FilterType = FDCAN_FILTER_MASK;
93     sFilterConfig.FilterConfig = FDCAN_FILTER_TO_RXFIFO0;
94     sFilterConfig.FilterID1 = 0x000;
95     sFilterConfig.FilterID2 = 0x000;
96     HAL_FDCAN_ConfigFilter(&hfdcan1, &sFilterConfig);
97
98     // 4. Avvia il CAN
99     HAL_FDCAN_Start(&hfdcan1);
```

```
100
101     // 5. Configurazione base dell'Header CAN
102     TxHeader.IdType = FDCAN_STANDARD_ID;
103     TxHeader.TxFrameType = FDCAN_DATA_FRAME;
104     TxHeader.DataLength = FDCAN_DLC_BYTES_8;
105     TxHeader.ErrorStateIndicator = FDCAN_ESI_ACTIVE;
106     TxHeader.BitRateSwitch = FDCAN_BRS_OFF;
107     TxHeader.FDFormat = FDCAN_CLASSIC_CAN;
108     TxHeader.TxEventFifoControl = FDCAN_NO_TX_EVENTS;
109     TxHeader.MessageMarker = 0;
110
111     // 6. Payload per comando "Enter Motor Mode"
112     TxData[0] = 0xFF; TxData[1] = 0xFF; TxData[2] = 0xFF; TxData[3] = 0xFF;
113     TxData[4] = 0xFF; TxData[5] = 0xFF; TxData[6] = 0xFF; TxData[7] = 0xFC;
114
115     // 7. Accendi tutti e 6 i motori (ID da 1 a 6)
116     for(uint32_t id = 1; id <= NUM_MOTORS; id++) {
117         TxHeader.Identifier = id;
118         HAL_FDCAN_AddMessageToTxFifoQ(&hfdcan1, &TxHeader, TxData);
119         HAL_Delay(5); // Breve pausa per non intasare il bus
120     }
121
122     // Pausa lunga per permettere a tutti i driver di calibrarsi
123     HAL_Delay(100);
124
125     // 8. AVVIA IL TIMER DI CONTROLLO (TIM6 a 1kHz)
126     HAL_TIM_Base_Start_IT(&htim6);
127     /* USER CODE END 2 */
128     /* Infinite loop */
129     while (1) {
130         // Main loop vuoto, il controllo e' gestito dagli interrupt
131     }
132 }
133
134 /* ... [Definizioni delle funzioni SystemClock_Config e MX_Init omesse] ... */
135
136 /* USER CODE BEGIN 4 */
137
138 int float_to_uint(float x, float x_min, float x_max, int bits) {
139     float span = x_max - x_min;
140     float offset = x_min;
141     if(x > x_max) x = x_max;
142     else if(x < x_min) x = x_min;
143     return (int) ((x - offset) * ((float)((1 << bits) - 1)) / span);
144 }
145
146 void Send_Motor_Command(uint32_t motor_id, float p_des, float v_des, float kp, float
        kd, float t_ff) {
147     uint16_t p_int  = float_to_uint(p_des, -12.5f, 12.5f, 16);
148     uint16_t v_int  = float_to_uint(v_des, -30.0f, 30.0f, 12);
149     uint16_t kp_int = float_to_uint(kp, 0.0f, 500.0f, 12);
150     uint16_t kd_int = float_to_uint(kd, 0.0f, 5.0f, 12);
151     uint16_t t_int  = float_to_uint(t_ff, -12.0f, 12.0f, 12);
152
153     TxData[0] = p_int >> 8;
154     TxData[1] = p_int & 0xFF;
155     TxData[2] = v_int >> 4;
```

```
156     TxData[3] = ((v_int & 0xF) << 4) | (kp_int >> 8);
157     TxData[4] = kp_int & 0xFF;
158     TxData[5] = kd_int >> 4;
159     TxData[6] = ((kd_int & 0xF) << 4) | (t_int >> 8);
160     TxData[7] = t_int & 0xFF;
161 
162     TxHeader.Identifier = motor_id;
163     HAL_FDCAN_AddMessageToTxFifoQ(&hfdcan1, &TxHeader, TxData);
164 }
165 
166 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
167 {
168     if(htim->Instance == TIM6)
169     {
170         // 1. Prendi solo il motore che tocca elaborare in questo microsecondo
171         uint8_t i = current_motor_index;
172 
173         // 2. Lettura e calcolo delta
174         uint16_t raw_count = (uint16_t)__HAL_TIM_GET_COUNTER(encoder_timers[i]);
175         int16_t delta = (int16_t)(raw_count - last_raw_counts[i]);
176         last_raw_counts[i] = raw_count;
177 
178         // ============================================================
179         // INVERSIONE DI DIREZIONE PER IL MOTORE 3 (Indice 2)
180         // ============================================================
181         if (i == 2) {
182             delta = -delta;
183         }
184 
185         // Accumulo posizione
186         accumulated_counts[i] += delta;
187 
188         // 3. Calcoli geometrici
189         target_radians[i] = ((float)accumulated_counts[i] / ENCODER_RES) * 6.283185f;
190 
191         target_velocities[i] = ((float)delta / ENCODER_RES) * 6.283185f * 1000.0f;
192 
193         // Clamp di sicurezza
194         if (target_radians[i] > 12.0f) target_radians[i] = 12.0f;
195         if (target_radians[i] < -12.0f) target_radians[i] = -12.0f;
196 
197         // 4. Invia al bus
198         if (HAL_FDCAN_GetTxFifoFreeLevel(&hfdcan1) > 0) {
199             Send_Motor_Command(i + 1, target_radians[i], target_velocities[i],
    kp_array[i], kd_array[i], 0.0f);
200         }
201 
202         // 5. Passa al motore successivo
203         current_motor_index++;
204         if (current_motor_index >= NUM_MOTORS) {
205             current_motor_index = 0;
206         }
207     }
208 }
209 /* USER CODE END 4 */
```

Listing A.1: Estratto del file main.c

Bibliografia

[1] U.S. Geological Survey. *Artesian Water and Artesian Wells*. https://www.usgs.gov/water-science-school/science/artesian-water-and-artesian-wells.

[2] Harinee Shanmuganathan, DM Deepak, Animesh Choudhury, M Priyadarshini, BS Mayura e K Yamini Reddy. «An investigation of the intelligent and secure child rescue system from borewell». In: *2024 11th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. IEEE. 2024, pp. 1296–1301.

[3] KP Sridhar, CR Hema e S Deepa. «Design of a wireless sensor fusion system to analyze conditions inside bore wells». In: *Wireless Personal Communications* 94.4 (2017), pp. 1951–1962.

[4] Badri N Sahu e Manoj Ojha. «Kid rescue system in open Bore-Well». In: *Materials Today: Proceedings* 81 (2023), pp. 477–480.

[5] National Disaster Response Force. *Borewell Rescue Precis*. Rapp. tecn. Ministry of Home Affairs, Government of India, 2026. URL: https://ndrf.gov.in/sites/default/files/Borewell%20Rescue%20Precis.pdf.

[6] Sole Manuely Teran Plasencia. «Progetto di dispositivo robotico di ispezione e salvataggio in pozzi artesiani= Design of robotic device for inspection and rescue operation in artesian wells». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2024.

[7] R Nithyaprakash, S Shankar, R Naveen Kumar, S Praveen Kumar, R Seenivasa e S Naveen Prasath. «Semi-Automatic Child Rescuing BOT in Deep Borewell». In: *E3S Web of Conferences*. Vol. 453. EDP Sciences. 2023, p. 01056.

[8] Palwinder Kaur, Ravinder Kaur e Gurpreet Singh. «Pipeline inspection and borewell rescue robot». In: *International journal of research in engineering and technology* 3.4 (2014), pp. 726–729.

[9] Ivan Virgala, Michal Kelemen, Pavol Božek, Zdenko Bobovskỳ, Martin Hagara, Erik Prada, Petr Oščádal e Martin Varga. «Investigation of snake robot locomotion possibilities in a pipe». In: *Symmetry* 12.6 (2020), p. 939.

[10] A Devi, K Dhivya, C Srivani, S Senthilnayaki e P Dharanyadevi. «Octobot for child rescue from open bore well». In: *2023 Third International Conference on Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR)*. Vol. 1. IEEE. 2023, pp. 1–5.

[11] L Abhishek e J Kathirvelan. «Design and development of IoT enabled gas sensing system for remote monitoring of air quality in borewell rescue operations». In: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2115. 1. IOP Publishing. 2021, p. 012012.

[12] Darkhan Zholtayev, Daniyar Dauletiya, Aisulu Tileukulova, Dias Akimbay, Manat Nursultan, Yersaiyn Bushanov, Askat Kuzdeuov e Azamat Yeshmukhametov. «Smart pipe inspection robot with in-chassis motor actuation design and integrated AI-powered defect detection system». In: *IEEE Access* 12 (2024), pp. 119520–119534.

[13] Lorenzo Pagliara, Enrico Ferrentino, Andrea Chiacchio e Giovanni Russo. «Safe haptic teleoperations of admittance controlled robots with virtualization of the force feedback». In: *2024 IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE. 2024, pp. 1574–1579.

[14] Fang Xu, Qi Zhu, Shuai Li, Zhuoyuan Song e Jing Du. «Vr-based haptic simulator for subsea robot teleoperations». In: *Computing in Civil Engineering 2021*. 2021, pp. 1024–1032.

[15] LIU Guanyang, Geng Xuda, Liu Lingzhi e Wang Yan. «Haptic based teleoperation with master-slave motion mapping and haptic rendering for space exploration». In: *Chinese Journal of Aeronautics* 32.3 (2019), pp. 723–736.

[16] Linping Chan. «Adaptive observer-based haptic control of nonlinear bilateral teleoperation». Tesi di dott. University of Wollongong, 2016.

[17] Simone Astuti. «Robot mobile per operazioni di soccorso in pozzi artesiani= Mobile robot for rescue operations in artesian wells». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2024.

[18] Wang Chuanjiang, Sun Xiujuan, Zhang Zhixian e Zou Jixiang. «Virtual Prototype Realization and Simulation for Small-Caliber Deep Well Rescue Robot». In: *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Vol. 3. 2011, pp. 1128–1130. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.850.

[19] CN Sakhale, DM Mate, Subhasis Saha, Tomar Dharmpal, Pranjit Kar, Arindam Sarkar, Rupam Choudhury e Shahil Kumar. «An approach to design of child saver machine for child trapped in borehole». In: *International Journal of Research in Mechanical Engineering* 1.2 (2013), pp. 26–38.

[20] Manish Raj, Pavan Chakraborty e Gora Chand Nandi. «Rescue robotics in bore well Environment». In: *arXiv preprint arXiv:1406.2134* (2014).

[21] VS SK e MJ Louis. «Bore Well Rescue Robot». In: *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering* 2.4 (2014), p. 6180.

[22] Gaddam Nithin, G. Gowtham, G. Venkatachalam e Syama Narayanan. «Design and simulation of bore well rescue robot - advanced». In: 9 (gen. 2014), pp. 608–611.

[23] John Jose Pattery, Niveditha Kalavakonda, Jittu Verghese Kurian, Lekha Mohan e Jippu Jacob. «Design and Development of a Borewell Rescue Robot». In: *Proceedings of the 14th IFToMM World Congress* 14th-4 (nov. 2015), pp. 288–293. DOI: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS13.103.

[24] S. Prabhavathi, Pallavi Nayaka B, Nagarathna, Shobha e Sneha Tambekar. «Child Rescue System from Open Borewell using Robot». In: *2022 4th International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*. 2022, pp. 257–260. DOI: 10.1109/ICIRCA54612.2022.9985595.

[25] Simi Simon, MINNA Jose, MARIYA JESSY Gogy, KD Vismaya e SWATHI Mukundan. «Borewell rescue robot». In: *IRJET* 3.3 (2016), pp. 140–144.

[26] Pratha A Garg, P Rishabh Kumar, Dr D Jayadevappa et al. «Development of robo child rescue system from borewell». In: *Proceedings of the Second International Conference on Emerging Trends in Science & Technologies for Engineering Systems (ICETSE-2019)*. 2019.

[27] M. Sai Teja, P.V. Kalyan Sreenivas, N.S.V.S. Arun Kumar e M.V. Sri Ram Kumar. «Design and Fabrication of Mechanical Device for Lifting Child from Bore Well». In: *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 5.10 (ott. 2018), p. 1571. ISSN: 2395-0056. URL: www.irjet.net.

[28] B. Akash, K. Kanisha, Saumya Ranjan e M. Jayakumar. «Design And Development Of Robot For Rescue Operations For Bore-Well Victims». In: *2020 International Conference on Futuristic Technologies in Control Systems Renewable Energy (ICFCR)*. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICFCR50903.2020.9249982.

[29] KH Shakthi Murugan, A Jasmine Vijithra, B Padmavathi, V Jacintha e K Sumathi. «A novel rescuebot for borehole accidents». In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 872. 1. IOP Publishing. 2020, p. 012044.

[30] Sen K Varghese, Tom Joseph, Sandra Ann Varughese, Lakshmi Anil e Reneesh C Zacharia. «"Pangolin"-Animatronic Based Robotic Hand System for Human Rescue in Deep Mine Hole and Bore Well Accidents». In: *2020 IEEE Bangalore Humanitarian Technology Conference (B-HTC)*. 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/B-HTC50970.2020.9297864.

[31] L. David William Raj, R. Abinaya, A. Brundha, N. Durga Lakshmi e S. Geethapriya. «Robotic Arm for Extricate Operation in Bore well». In: *2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*. 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICSCAN49426.2020.9262297.

[32] Aravind N Kaimal, PB Bijith, Midhun C Baiju e Muhammed Suhail KS. «Borewell child rescue system». In: *Int. Res. J. Eng. Technol* 7 (2020), pp. 2673–2677.

[33] Adithya Kameswara Rao, Harikrishna K, Jayendran R, Meenatchi L S, Sudarsana Jayandan J, Niranjan Kumar P e Saimothish R. «Conceptual model for improving maneuverability in borewell rescue devices». In: *2021 9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*. 2021, pp. 439–444. DOI: 10.1109/ICRoM54204.2021.9663477.

[34] S Malathy, M Jaipriya, M Thenmozhi e M Priyanka. «WIRELESS CONTROLLED HAND GESTURE BASED BORE WELL VICTIMS RESCUE ROBOT WITH VIDEO STREAMING». In: *NeuroQuantology* 20.8 (2022), p. 5990.

[35] Afthab Ibrahim, N V Abin, M D Harinandan, A K Mohammed Hinan, Dinu Paul e P J Shaija. «Design Implementation of Bore-well Rescue Robot». In: *2025 11th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)*. 2025, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICSCC66177.2025.11233548.

[36] B Manjunatha. «Design and Fabrication of Borewell Child Rescue Robot». In: (2025).

[37] Raffaele Sanchirico. «Robotics for Life: Sviluppo di Dispositivi di Sicurezza e di Manipolazione per Robot di Salvataggio Tele-operato= Robotics for Life: Development of Safety and Manipulation Devices for Teleoperated Rescue Robots». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2025.

[38] Giorgio Soli. «Dispositivo pneumatico dispiegabile per la messa in sicurezza di persone cadute in ambienti angusti= Deployable pneumatic device for rescue operations in narrow Artesian boreholes». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2026.

[39] *UM2505 User manual: STM32G4 Nucleo-64 boards (MB1367)*. UM2505. Rev 3. STMicroelectronics. 2020. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2505-stm32g4-nucleo64-boards-mb1367-stmicroelectronics.pdf.

[40] *STM32G474xB/xC/xE Datasheet - Mainstream Arm Cortex-M4 MCU 170 MHz with FPU*. DS12288. Rev 6. STMicroelectronics. 2023. URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g474re.pdf.

[41] *UM1718 User manual: STM32CubeMX for STM32 configuration and initialization C code generation*. UM1718. STMicroelectronics. 2024. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um1718-stm32cubemx-for-stm32-configuration-and-initialization-c-code-generation-stmicroelectronics.pdf.

[42] *UM2609 User manual: STM32CubeIDE user manual*. UM2609. STMicroelectronics. 2023. URL: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2609-stm32cubeide-user-guide-stmicroelectronics.pdf.

[43] Skyline Innovation Co., Limited (SteadyWin). *GDS34 Motor Driver Layout and Specifications*. https://14180476.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAgkfLvpAYoz6y4oAU.pdf. SteadyWin. 2021.

[44] Skyline Innovation Co., Limited (SteadyWin). *SteadyWin® Motor Driver APP User Manual*. Ver. 1.6. https://14180476.s21i.faiusr.com/61/ABUIABA9GAAg16WiuAYo6N7wigI.pdf. SteadyWin. 2023.

[45] Steve Corrigan. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. Application Report SLOA101B. Texas Instruments, mag. 2016.

[46] Last Minute Engineers. *Interfacing MCP2515 CAN Bus Module with Arduino*. https://lastminuteengineers.com/mcp2515-can-module-arduino-tutorial/. 2023.

[47] Benjamin G Katz. *A low cost modular actuator for dynamic robots*. 2018. URL: http://hdl.handle.net/1721.1/118671.