DIGGY

Next-generation pipes inspection

5BIA
Stefano Perrucci · Melechì Giampaolo · Maria Giovanna Leo

Diggy

Next-generation pipes inspection

Nel contesto industriale e infrastrutturale moderno, la manutenzione preventiva e il monitoraggio degli impianti rappresentano elementi chiave per garantire efficienza, sicurezza e sostenibilità. Tuttavia, ispezionare tubazioni e condotti interni può essere complesso, costoso e, in alcuni casi, pericoloso per gli operatori.

Da questa esigenza nasce **Diggy**: un piccolo robot autonomo progettato per esplorare l'interno dei tubi, raccogliere dati ambientali come temperatura, umidità, stato delle superfici e trasmettere le informazioni in tempo reale. Il progetto unisce robotica, sensoristica e innovazione digitale per offrire una soluzione concreta e intelligente a un problema reale.

1.0 I problemi

Sia in ambito domestico che industriale, gli impianti costituiti da reti di tubazioni rappresentano una componente fondamentale per il corretto funzionamento di edifici, macchinari e sistemi energetici. Tuttavia, questi impianti sono soggetti a una serie di criticità che, se non identificate tempestivamente, possono comportare gravi conseguenze:

- Perdite invisibili: piccole crepe o guarnizioni danneggiate possono causare perdite d'acqua, gas o fluidi industriali, spesso senza segni evidenti all'esterno.
- Surriscaldamento o raffreddamento anomalo: variazioni di temperatura non controllate possono segnalare problemi strutturali o malfunzionamenti tecnici.
- Ostruzioni interne: accumuli di detriti, calcare, ruggine o materiale organico compromettono il flusso nei tubi e riducono l'efficienza degli impianti.
- Corrosione e degrado: nel tempo, l'umidità e i materiali corrosivi interni ai tubi possono deteriorare la struttura, causando rotture improvvise.
- Difficoltà di accesso: nella maggior parte dei casi, ispezionare l'interno di una tubazione richiede l'interruzione del servizio, lo smontaggio o l'impiego di strumenti ingombranti e costosi.

Queste problematiche non solo comportano elevati costi di manutenzione e riparazione, ma possono anche rappresentare un pericolo per la sicurezza e un danno ambientale. Per questo motivo, diventa fondamentale sviluppare soluzioni che permettano di monitorare lo stato delle tubazioni in modo continuo, sicuro ed efficace, senza interventi invasivi.

2.0 L’impatto ambientale

La scarsa ispezione e manutenzione degli impianti, in particolare delle reti di tubazioni, ha conseguenze dirette e gravi sull’ambiente. Perdite non rilevate di acqua, sostanze chimiche o gas contribuiscono ogni anno a un enorme spreco di risorse, oltre a generare inquinamento del suolo, dell’aria e delle falde acquifere.

Uno dei problemi più evidenti riguarda la dispersione di acqua potabile: nelle reti pubbliche e domestiche, una quantità significativa viene persa prima ancora di raggiungere l’utente finale, aggravando la crisi idrica in molte aree. A questo si aggiunge la questione delle emissioni di gas nocivi, che in ambito industriale possono essere rilasciati da fessure o guasti nei condotti, contribuendo all’inquinamento atmosferico e al peggioramento della qualità dell’aria. La contaminazione del suolo e delle falde è un’altra minaccia concreta: fuoriuscite di oli, solventi o sostanze tossiche da tubazioni interrate possono alterare in modo duraturo gli ecosistemi locali. Impianti danneggiati o ostruiti tendono a funzionare in modo inefficiente, consumando più energia per mantenere le stesse prestazioni e generando quindi un impatto ambientale maggiore.

In questo contesto, *Diggy* si propone come una soluzione concreta e sostenibile. In che modo? eccovelo spiegato..

L’introduzione di *Diggy* rappresenta un passo concreto verso una gestione più sostenibile e intelligente degli impianti, grazie alla sua capacità di monitorare l’interno delle tubazioni in modo costante, non invasivo e mirato. Questo si traduce in una serie di benefici ambientali reali e misurabili.

Innanzitutto, la possibilità di rilevare in anticipo perdite o anomalie riduce drasticamente lo spreco di risorse come acqua, gas o sostanze chimiche. Intervenendo prima che il danno diventi critico, si evitano dispersioni invisibili che, nel tempo, possono accumularsi e causare gravi danni ambientali. Allo stesso modo, la raccolta continua di dati come temperatura e umidità consente di ottimizzare il funzionamento degli impianti, riducendo il consumo energetico legato a inefficienze o malfunzionamenti.

Diggy permette anche di ridurre la necessità di ispezioni invasive e interventi strutturali, che spesso comportano l’uso di mezzi pesanti, demolizioni parziali o trattamenti chimici. Meno interventi invasivi significa anche meno emissioni, meno produzione di rifiuti e minore uso di materiali da costruzione.

In un’ottica di economia circolare e prevenzione, Diggy non solo aiuta a mantenere in efficienza le strutture esistenti, ma promuove un approccio più consapevole e rispettoso dell’ambiente, in cui ogni intervento è motivato da dati precisi e non da ipotesi o urgenze.

Diggy trasforma la manutenzione da reattiva a preventiva, contribuendo a un futuro in cui la tecnologia lavora in silenzio per proteggere le risorse del pianeta.

3.0 Soluzioni esistenti

Negli ultimi anni sono stati introdotti diversi strumenti e metodi per l'ispezione delle tubazioni, pensati per migliorare la manutenzione di impianti domestici e industriali. Tuttavia, queste soluzioni si sono dimostrate spesso inefficaci, costose o inadatte a determinati contesti.

Una delle pratiche più comuni prevede l'intervento diretto di tecnici specializzati, che devono smontare parzialmente l'impianto per accedere ai punti critici. Questo approccio non solo comporta tempi lunghi e l'interruzione del servizio, ma espone anche a un alto margine di errore umano. Inoltre, la manutenzione manuale non consente di monitorare lo stato dei tubi in modo continuo, rendendo difficile la prevenzione dei guasti.

Sono diffuse anche le sonde con telecamere endoscopiche, utilizzate per visualizzare l'interno delle tubazioni. Tuttavia, queste offrono una visione limitata e spesso poco chiara, soprattutto in tratti curvi, scivolosi o in presenza di ostacoli. Inoltre, non sono in grado di raccogliere informazioni ambientali importanti come temperatura, umidità o condizioni delle superfici interne.

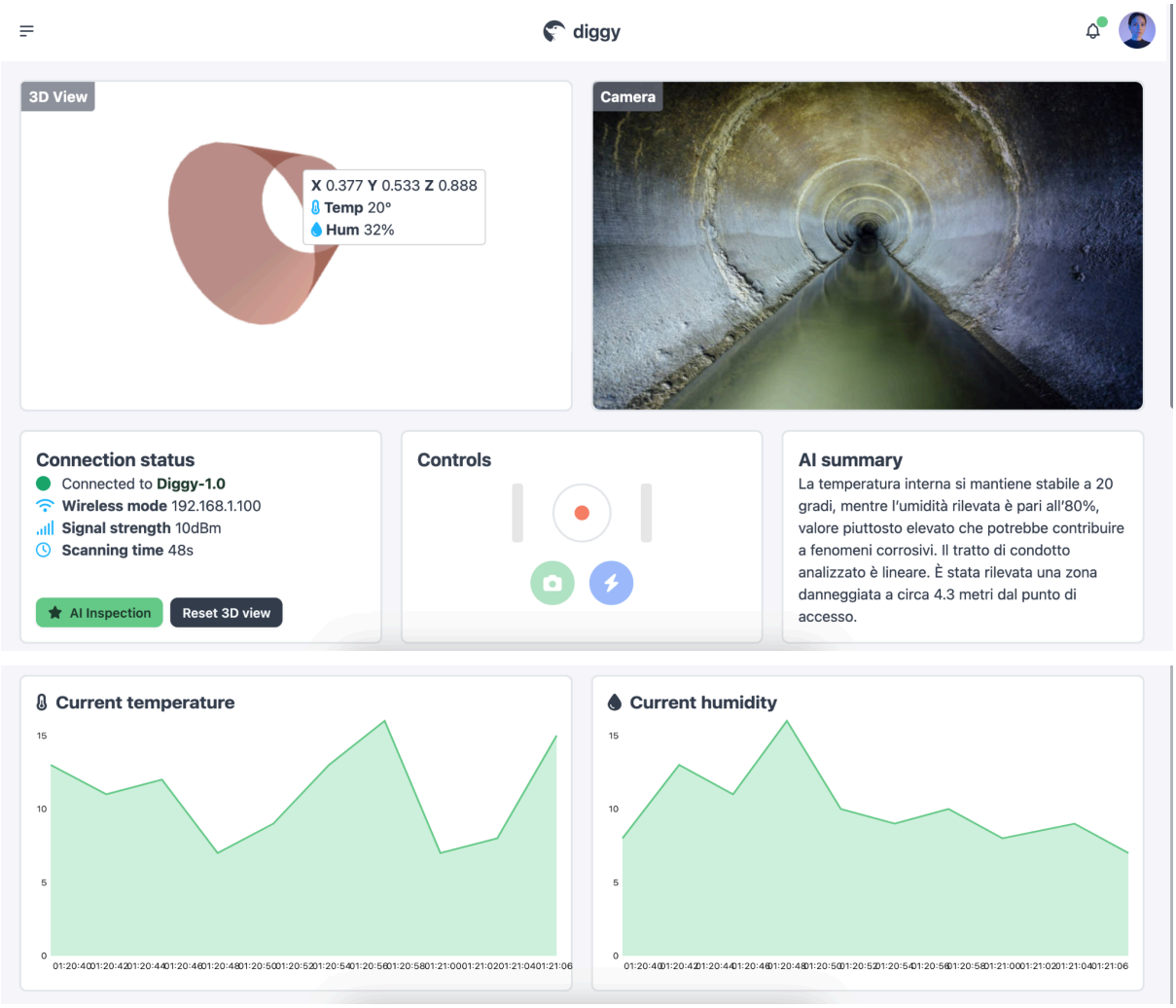
Esistono infine alcuni robot industriali pensati per grandi impianti, come oleodotti o sistemi fognari. Questi dispositivi, seppur più avanzati, sono generalmente molto costosi, ingombranti e progettati per un uso specifico. Risultano quindi poco adatti per ambienti ristretti, impianti domestici o piccole imprese, che necessitano di soluzioni più compatte e accessibili.

Le tecnologie attualmente disponibili non soddisfano pienamente il bisogno di un'ispezione efficace, economica e continua. È proprio in questa lacuna che si inserisce il valore di Diggy.

4.0 Software & Hardware

Ciò che contraddistingue "diggy" dalle soluzioni tradizionali è l'impiego di tecnologie avanzate non tanto nella meccanica, ma soprattutto dal punto di vista informatico.
Durante un'ispezione di un impianto industriale è fondamentale raccogliere quante più informazioni possibile. Noi facciamo questo nel modo più efficiente, semplice ed economico possibile. Come? Scegliendo il miglior tech stack del momento: NodeJS, Python e GPT o3.
Il prototipo è stato realizzato utilizzando hardware economico e un Raspberry PI 5 preso in prestito dalla scuola. Il board computer connette il sistema di analisi, i sensori ed il driver dei motori alla dashboard, occupandosi di fornire un'esperienza intuitiva ed accessibile.
Il prodotto consiste in un piccolo robot da utilizzare per l'ispezione ed una comoda dashboard con la quale interagire per monitorare e controllare il sistema.
Nella dashboard si distinguono 3 sezioni principali:

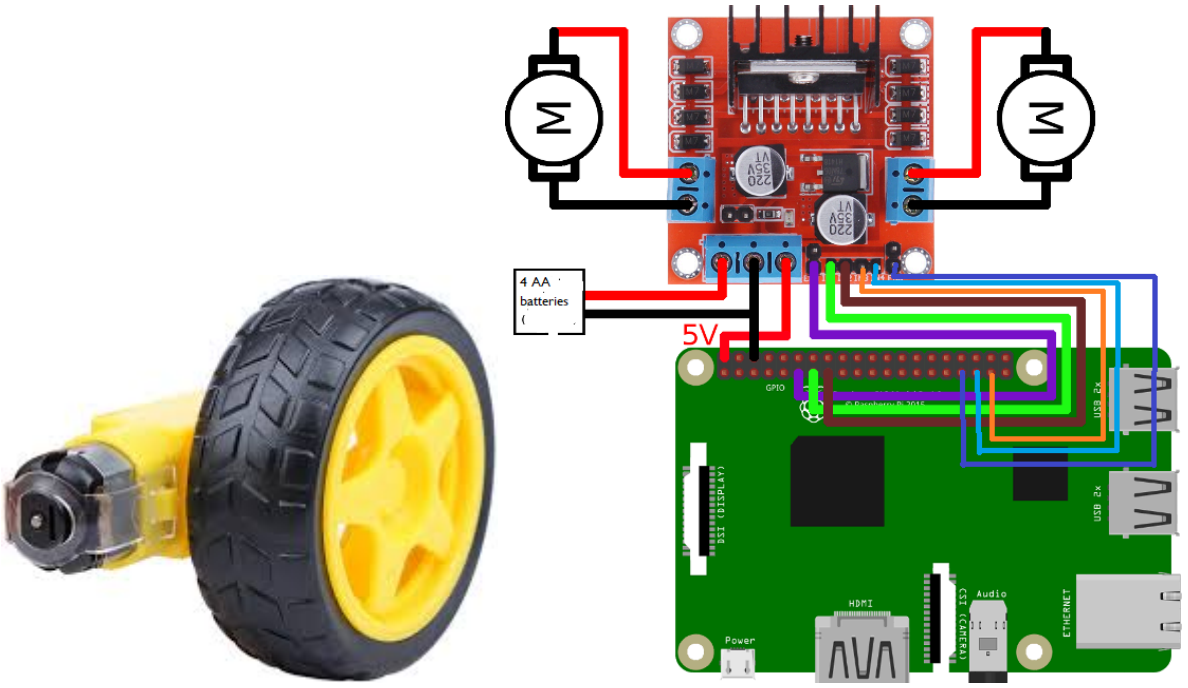
- Mappatura 3D del tubo in tempo reale e streaming dalla videocamera
- Status del robot, visualizzatore dell'input, commento AI
- Grafici temperatura ed umidità



4.1 Hardware

L298N · Motor Driver

Questo componente permette al Raspberry Pi di controllare i due motori con i quali è possibile il movimento. Fornisce l'alimentazione corretta e i PWM adatti alla velocità selezionata dall'utente.



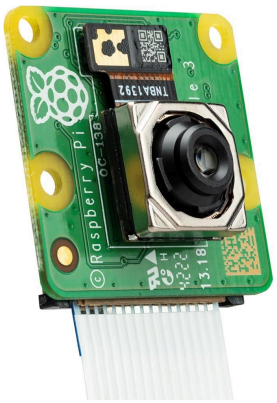
Tutti i pin della board sono collegati secondo l'immagine a destra, ed entrambi i jumper (A e B) sono abilitati (in quanto sono collegati entrambi i motori).
La gestione e la logica del movimento sono gestiti dal Raspberry grazie alla classe `MotorDriver`, la quale è così definita:

MotorDriver
- IN1 - IN2 - ENA - IN3 - IN4 - ENB - PWM_FACTOR - STEERING_FACTOR - LED
- stop_motors - forward - backward - set_pwm + handle_buttons + move

La maggior parte degli attributi definisce i pin a cui il driver è collegato al RPi, mentre `PWM_FACTOR` e `STEERING_FACTOR` trovano utilità per la configurazione del movimento a destra e sinistra che è definito nel metodo pubblico move. L'algoritmo è il seguente (pseudocodice):

```
  def move(self, controls):
      // Trova il massimo tra i due trigger del controller, se il massimo è 0 allora sono entrambi fermi
      higher_val = massimo(trigger_l, trigger_r)
      se higher_val == 0: # No trigger pressed, stop motors
          self.stop_motors()
      altrimenti:
          // Imposta la velocità massima in maniera proporzionale al fattore PWM (Pulse Width Modulation)
          base_speed = higher_val * self.PWM_FACTOR # Set max speed

          // Ottieni il valore rispettivo all'asse x dell'analogico sinistro
          x_axis = arrotonda(asse_x)

          // Regola la potenza dei motori in base a quanto la cordinata x sia orientata più verso destra o
sinistra
          // Formula : max_speed * (max_pwm - steering_factor * x_axis)
          mL = base_speed * (1.0 - self.STEERING_FACTOR * massimo(0, -x_axis)) // Sinistra
          mR = base_speed * (1.0 - self.STEERING_FACTOR * massimo(0, x_axis)) // Destra

          self.set_pwm(mL, mR) // Imposta PWM ai motori

          se trigger_l < trigger_r: // Vai avanti
              self.forward()
          altrimenti:
              self.backward() // Vai indietro
```

PI Camera Module V2

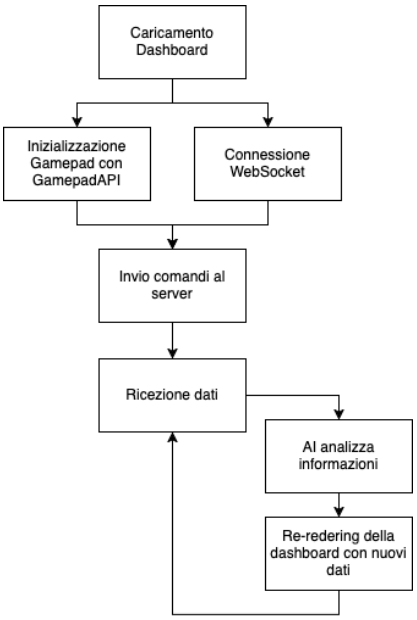


Il modulo seguente è una videocamera (compatibile con il Pi 5) collegata direttamente al socket CAM0 (già presente sulla board). La documentazione di Raspberry fornisce diversi metodi per lo streaming video, noi abbiamo scelto il più moderno e robusto: WebRTC (lo stesso che utilizzano applicazioni come Google Meet). Installando `mediamtx` e configurandolo opportunamente, la board avvia uno streaming (di default) su questo URI `http://<ip-addr>:8889/cam`. Nella dashboard è presente un banale `iframe` che contiene la pagina sulla quale avviene lo streaming da parte del Raspberry Pi

Raspberry Pi 5

La nostra board monta Ubuntu LTS 22.04 minimizzato senza desktop environment, il modo tale da avere un ambiente pulito e leggero, solido e pronto all'uso ma allo stesso tempo molto potente. E' alimentata da un power bank 5V - 2A. La comunicazione tra la dashboard e prototipo avviene tramite web socket. Il Raspberry (che in questo caso svolge il compito di server) presenta un implementazione in Python dei vari moduli (in modo da interfacciarsi direttamente con i pin, sensori e driver).

4.2 Sito Web



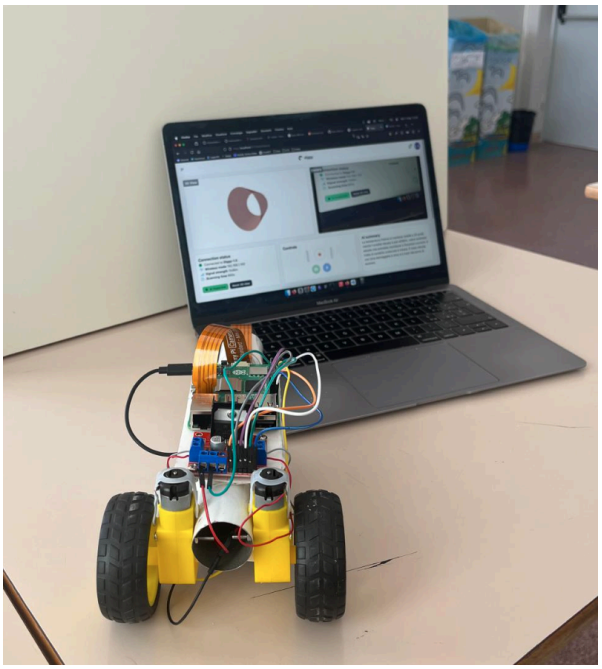
Le tecnologie web che abbiamo utilizzato sono Javascript, SvelteKit, DaisyUI e Three.JS.
Sveltekit è il framework front end con il quale abbiamo realizzato l'interfaccia grafica, grazie ai componenti di DaisyUI. Abbiamo fatto questa scelta poiché al giorno d'oggi è una prassi suddividere la parte grafica da quella implementativa, SvelteKit ci permette di farlo in un modo tanto semplice quanto scrivere HTML nativo. La mappatura in tempo reale del tubo è possibile grazie alla libreria Three.JS, la quale ci permette di manipolare oggetti 3D in JavaScript, i settings sono definiti secondo la classe `3DScene` che oltre ad occuparsi di strutturare la scena, abilita l'input e i tooltip sul modello 3D.

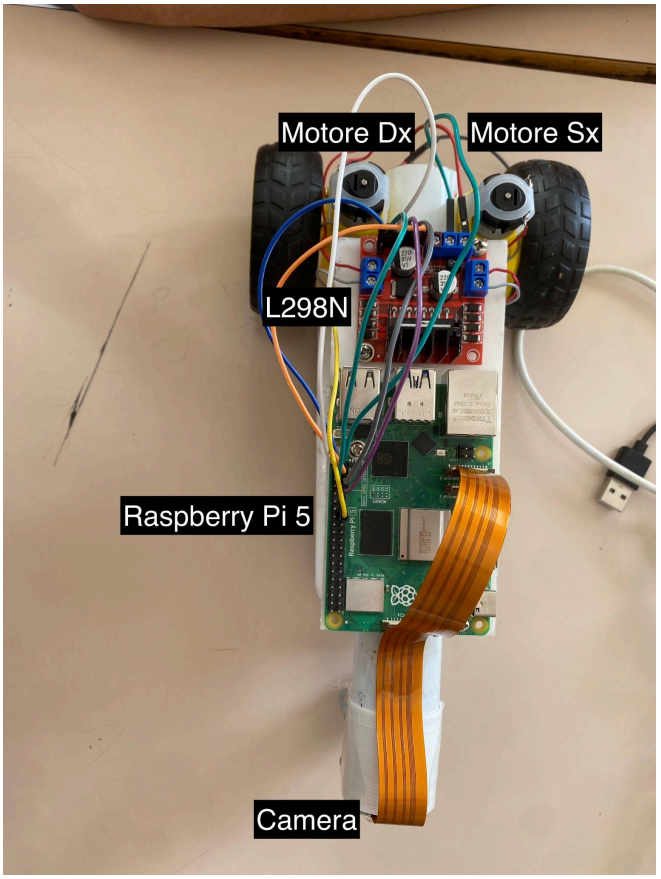
4.3 WebSocket

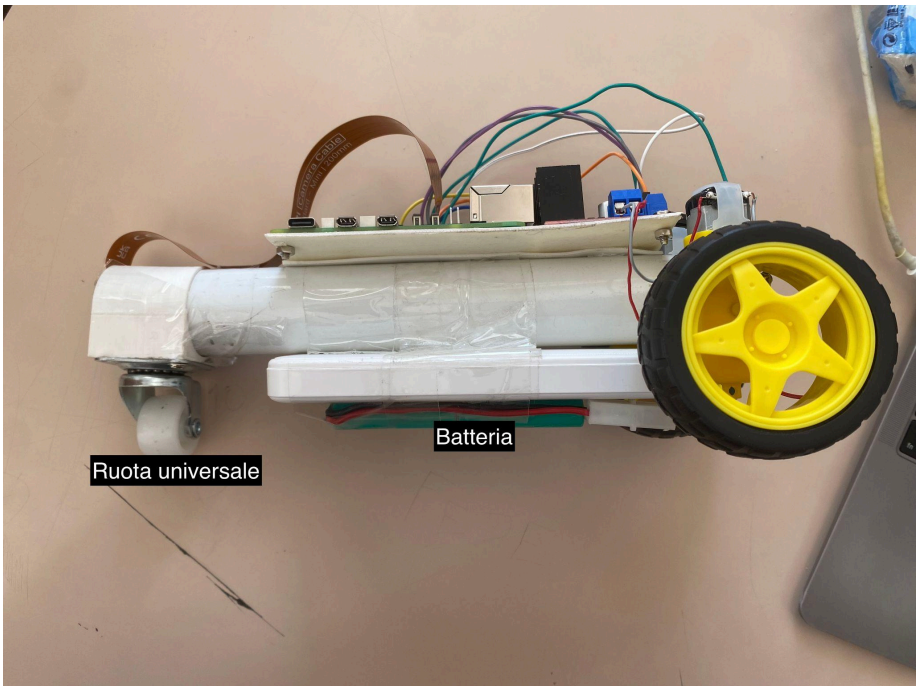
La comunicazione tra dashboard e prototipo, come annunciato prima, avviene tramite websocket. Una volta collegato alla rete locale, il prototipo avvia un server in Python.

Quando l'utente carica la dashboard, essa verifica prima il collegamento di un controller tramite `GamepadAPI` (integrata in tutti i browsers ormai da diversi anni), successivamente si connette al websocket.
L'input del controller viene mappato su un oggetto di tipo writable definito da SvelteKit, quindi, quando si avverte un input che corrisponde ad accelerazione o decelerazione, vengono inviati dei dati seguendo un determinato oggetto JSON definito all'interno del codice sorgente.

4.4 Prototipo







5.0 IA e hardware economico

Un aspetto chiave dell'innovazione proposta da *Diggy* è l'integrazione tra intelligenza artificiale e componenti hardware a basso costo. Questa scelta non solo rende il progetto economicamente accessibile, ma dimostra anche come tecnologie avanzate possano essere utilizzate in contesti reali senza richiedere infrastrutture costose o risorse industriali.

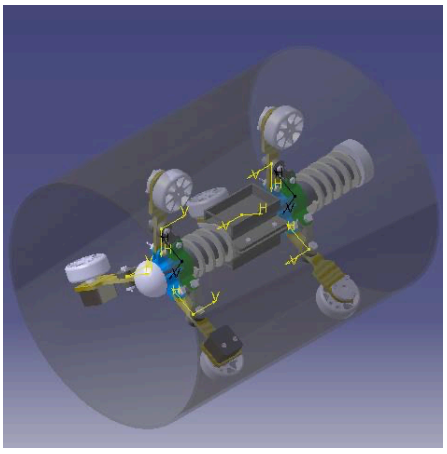
Dal punto di vista software, l’intelligenza artificiale gioca un ruolo fondamentale nella gestione dei dati raccolti durante le ispezioni. Diggy è in grado di interpretare in autonomia le informazioni provenienti dai suoi sensori: ad esempio, può riconoscere immagini che indicano la presenza di corrosione o ostruzioni, oppure analizzare le variazioni di temperatura o umidità per individuare potenziali perdite. Questo processo avviene in tempo reale, direttamente a bordo del dispositivo o, in caso di limiti computazionali, tramite trasmissione a un server remoto. L’obiettivo è permettere al robot di "capire" ciò che osserva o rileva, e agire di conseguenza, ad esempio rallentando in zone sospette o segnalandole per una futura ispezione più approfondita.

L'utilizzo dell'intelligenza artificiale a bassissimo consumo si adatta perfettamente alle esigenze di un microrobot come Diggy. Questo consente non solo di mantenere contenuti i costi di produzione, ma anche di aumentare la portabilità e la scalabilità del sistema, rendendolo adatto a essere replicato in larga scala.

Questa combinazione tra IA e hardware economico rappresenta uno dei punti di forza del progetto. Permette infatti di offrire uno strumento tecnologicamente avanzato ma economicamente accessibile anche a piccole realtà: comuni, aziende locali, impianti agricoli o scolastici. Inoltre, abbattendo le barriere d’ingresso legate al costo, Diggy può favorire un’adozione più estesa di tecnologie di monitoraggio predittivo in settori in cui, fino ad ora, questi strumenti erano riservati solo alle grandi aziende.

6.0 Obiettivi futuri

Il prototipo per ora presenta ovviamente caratteristiche che non vanno bene in un contesto reale. E’ troppo grande, poco adattabile e non resistente all’acqua e alle alte temperature. Saranno prodotte delle PCB board custom che si adattano perfettamente al telaio, migliorando aspetti come dimensione e portabilità. Per garantire una migliore efficienza è obbligatorio cambiare anche il funzionamento meccanico della parte in movimento con qualcosa di simile a questo modello 3D



In questo modo il robot aderisce perfettamente alla superficie del tubo ed è anche in grado di mappare le irregolarità utilizzando tecnologie laser o AR, garantendo una precisione millimetrica e una mappatura nei minimi dettagli. Nel tubo strutturale del telaio inoltre, verrà inserito il pacco batterie, il quale riuscirà a dare a Diggy

un'autonomia di molte ore. Ciò non compromette il costo del software ma solo un leggero cambiamento alla produzione dell'hardware per renderlo più adatto all'obiettivo.

6.0 Bibliografia

https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/camera_software.html
https://svelte.dev
https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Gamepad_API
https://threejs.org/

Link esterni:

Sito web: https://diggy.stepperr.cc
Presentazione: https://diggy.stepperr.cc/slides.pdf
Abstract: https://diggy.stepperr.cc/abstract.pdf
Codice sorgente: https://github.com/stepperr27/diggy