

Paper n° 18

TITOLO

"Robotica avanzata per la sicurezza negli ambienti di lavoro: il progetto HEiPS e il robot WatchMan"

Autore/autori

Dr. Riccardo Roggeri, Ing. Amir Parsafar

¹ società/dipartimento

Techinnova Spa, Dipartimento di robotica, Via Giovanni Durando 38, 20158, Milano

MTM Srl. Via Giovanni Durando 38, 20159, Milano

1. Introduzione

Il settore delle costruzioni sta adottando tecnologie intelligenti per migliorare la sicurezza e l'efficienza operativa, in particolare in contesti urbani complessi e cantieri **no-dig** (senza scavo). Nei lavori sotterranei e negli spazi confinati, come cantieri di posa di sottoservizi o gallerie, è fondamentale monitorare costantemente l'ambiente per rilevare condizioni pericolose (es. accumuli di gas tossici o infiammabili, scarsa qualità dell'aria) e proteggere gli operatori. I metodi tradizionali di sicurezza si basano spesso su sensori fissi o ispezioni manuali, che possono coprire solo parzialmente l'area e non sempre garantiscono un intervento tempestivo. In questo contesto, i robot mobili autonomi rappresentano una soluzione innovativa: possono muoversi nell'ambiente di lavoro, raccogliere dati in tempo reale e intervenire automaticamente in caso di emergenza, riducendo l'esposizione umana ai rischi.

Il presente lavoro introduce **WatchMan**, un robot mobile intelligente della linea HEiPS, progettato per il monitoraggio ambientale continuo e la gestione della sicurezza in ambienti difficili o pericolosi, con particolare riferimento a cantieri urbani sotterranei e applicazioni **no-dig**. WatchMan è sviluppato come piattaforma **IoT** autonoma su cingoli, capace di muoversi lungo percorsi sia predefiniti che non, e di sorvegliare costantemente l'area circostante. Grazie a un insieme di sensori avanzati e algoritmi embedded, il robot controlla sia le condizioni dell'ambiente di lavoro (ad esempio presenza di fumo o gas pericolosi, temperatura, umidità) sia la sicurezza di impianti e attrezzature (ad esempio rilevando incendi incipienti), fornendo un **monitoraggio ibrido** integrale. In caso di rilevamento di anomalie (ad esempio fumo o superamento di soglie di gas nocivi), WatchMan attiva allarmi locali (sirena, luci di segnalazione) per avvisare immediatamente gli operatori in loco e, se configurato, invia notifiche in remoto via cloud/app. Contestualmente, il robot è in grado di attivare automaticamente misure di mitigazione, come avviare la ventilazione filtrante integrata per depurare l'aria. Un altro aspetto chiave è la **mobilità continua**: a differenza di sistemi di monitoraggio fissi installati in punti specifici, WatchMan può pattugliare ampie aree e interagire anche con eventuali sensori fissi esistenti (ad esempio può attivarli o leggere i loro dati) per una copertura completa, risultando vantaggioso in cantieri estesi dove i sensori fissi non coprono ogni zona.

Secondo recenti ricerche di mercato, la domanda di robot di sicurezza è in rapida crescita. Si stima che il mercato globale dei robot per la sicurezza, valutato in circa 27,3 miliardi di dollari nel 2021, possa superare i 116 miliardi di dollari entro il 2030 [globalgrowthinsights.com](https://www.globalgrowthinsights.com). Tale crescita (CAGR ~17,6%) è trainata dalla crescente necessità di migliorare la sicurezza e dall'adozione di tecniche di automazione avanzate in diversi settori. Molte aziende stanno sviluppando robot mobili di sorveglianza e assistenza alla sicurezza, con l'obiettivo di **ridurre la necessità di intervento umano diretto** in ambienti ostili e di **abbattere i costi operativi**. Tuttavia, le soluzioni attualmente sul mercato presentano spesso costi elevati e sono pensate per applicazioni specifiche: ad esempio, robot di sorveglianza come il modello K5 di Knightscope (USA) operano in ambienti commerciali a un costo di servizio di circa 7 \$ all'ora en.wikipedia.org (pari a ~60 k\$ annui), mentre piattaforme quadrupedi come *Spot* di Boston Dynamics hanno capacità avanzate ma costi dell'ordine di decine di migliaia di euro. In questo scenario, WatchMan si distingue proponendo **funzionalità comparabili o superiori** in termini di sensoristica e autonomia decisionale, ma con una soluzione **economica e adattabile** su scala più piccola. Il prototipo descritto (WatchMan Beta v1.0) ha un costo stimato di soli ~7 k€ di vendita e di operatività annua di circa 1,1\$ all'ora (~10 k\$ annui). Inoltre è concepito per essere facilmente riproducibile e modificabile.

In questo paper vengono presentati la progettazione e le capacità tecniche di WatchMan, con particolare enfasi sulle soluzioni implementate per il **monitoraggio sicuro nei contesti cantieristici urbani**. Dopo un'overview della struttura

modulare del robot (Sezione 2), verranno descritti i sottosistemi principali: l'unità di controllo e navigazione (Sezione 3) comprensiva dei sensori di guida e ostacoli, l'unità di monitoraggio ambientale (Sezione 4) con i sensori di gas e parametri atmosferici, e l'unità di filtrazione aria (Sezione 5) per la depurazione locale. Seguiranno le sezioni dedicate al sistema di visione e sorveglianza video (Sezione 6) e alla piattaforma cloud IoT per il controllo remoto dei dati (Sezione 7). Si forniranno inoltre tabelle riassuntive della componentistica (Tabella 1) e un confronto qualitativo con alcune soluzioni esistenti (Tabella 2). Infine, verranno discusse le implicazioni e i benefici di WatchMan rispetto allo stato dell'arte (Sezione 8) e presentate brevi conclusioni sui possibili sviluppi futuri (Sezione 9).



*Figura 1: La versione preindustriale **WatchMan** Beta v1.0 assemblato e pronto per i test, in vista frontale. Si notano il sistema a cingoli, la telecamera panoramica 2.4 GHz Wi-Fi installata sulla sommità e il lampeggiante di segnalazione frontale (condizione di sicurezza normale, luce arancione fissa).*

2. Progettazione modulare del robot

La struttura di WatchMan è stata progettata con il sistema brevettato HEIPS®, con un'attenzione particolare alla **modularità**, su due livelli, per facilitarne l'assemblaggio, la manutenzione e futuri upgrade. Al **primo livello**, il corpo meccanico del robot è costituito da più segmenti accoppiabili come un kit: le varie parti della scocca e del telaio sono state modellate in 3D e realizzate tramite stampa 3D (tecnologia FDM) in PLA, dimensionando ciascun pezzo in modo da poter essere stampato con stampanti desktop di piccole dimensioni. Alcune delle parti interne, così come delle coperture per la dispersione del calore delle componenti elettroniche sono invece state realizzate con la resina per stampa 3D brevettata **ROG REAL ORGANIC GENERATOR**, che garantisce una forte componente di **Eco circolarità** del progetto, in quanto è realizzata con miscele organico/inorganiche derivanti da sottoprodotti del processo di coltivazione acquaponica MyPonic® di Techinnova Spa e Ric3D Srl. I segmenti vengono poi uniti tra loro mediante viteria standard (viti e dadi), formando la struttura completa del robot. Questo approccio modulare consente di sostituire facilmente una parte in caso di rottura o di modificarne la geometria in fase di progettazione iterativa senza dover ricostruire l'intero chassis. Al **secondo livello**, le principali funzionalità del robot sono suddivise in unità separate, alloggiando sensori e dispositivi in moduli dedicati ("scatole" rimovibili) posizionati nel telaio. In particolare, il prototipo prevede un'**unità di monitoraggio ambientale**, un'**unità di filtrazione dell'aria** e moduli per la distribuzione dell'alimentazione elettrica, tutti integrati ma fisicamente separati. Questa suddivisione consente di rimuovere o sostituire facilmente un modulo (ad esempio per manutenzione o aggiornamento di un sensore) senza interferire con gli altri sistemi. Inoltre, semplifica la possibilità di riconfigurare il robot aggiungendo nuovi moduli o rimpiazzandone alcuni per adattare WatchMan a esigenze specifiche di una missione (ad esempio aggiungere un modulo per il rilevamento di radiazioni, etc.). Il telaio principale supporta due **cingoli** motorizzati che garantiscono al robot mobilità su terreni accidentati e stabilità. La scocca superiore ospita anteriormente il pannello sensori di navigazione (ultrasuoni e sensore IR per linee) e posteriormente l'alloggiamento della ventola e filtro aria. Sopra la scocca è montata una videocamera orientabile (sezione 6). All'interno trovano posto i circuiti elettronici di controllo e la batteria principale. La filosofia progettuale modulare ha permesso di valutare varie configurazioni geometriche e di componenti in fase di sviluppo. La **Figura 2** illustra un modello CAD esploso del robot, mostrando la separazione tra il telaio inferiore (che contiene motori e batteria) e la scocca superiore (che sostiene sensori e attuatori superiori), nonché i cingoli smontati e altri componenti strutturali. Questa visione evidenzia i punti di attacco tra le sezioni e la disposizione compatta dei sottosistemi.



*Figura 2: Modello 3D esploso di **WatchMan**, che evidenzia la progettazione modulare. Si distinguono la base con telaio inferiore (parte centrale, con supporti per i cingoli), la scocca superiore (con frontale arrotondato e vano per sensori), i **cingoli** laterali (separati ai lati) e altri componenti smontati (pannelli con griglie di aerazione, alloggiamenti sensori, etc.). Questa configurazione facilita l'accesso ai componenti interni e la sostituzione di parti in caso di upgrade o guasti.*

Dal concept iniziale alla realizzazione del prototipo sono state effettuate varie iterazioni progettuali, ottimizzando dimensioni e disposizione dei componenti. Tutte le fasi di costruzione del robot (dalla modellazione 3D, alla stampa delle parti, all'assemblaggio hardware e allo sviluppo del firmware) sono state svolte nei laboratori R&D di MTM S.r.l. e TechinnoVA Spa. Il prototipo Beta v1.0 finale ha superato con successo i primi test di funzionamento in laboratorio, e la sua architettura modulare permetterà rapide modifiche qualora emergano necessità di miglioramento durante le fasi di collaudo in scenari reali.

3. Unità di controllo, navigazione e rilevamento ostacoli

Il sistema di controllo di WatchMan è basato su un'architettura distribuita con **triplo processore**, in cui tre unità di elaborazione separate gestiscono diversi sottosistemi in parallelo. Ciascuna unità è basata su una differente scheda di controllo ed è dedicata a un insieme di funzionalità, operando in modo sincrono con le altre. Questa soluzione è stata adottata per ripartire il carico di lavoro computazionale, aumentare l'affidabilità del sistema ed evitare interferenze tra compiti eterogenei.

In dettaglio, la **prima scheda di controllo** è un microcontrollore *Arduino Mega 2560* installato nel pianale inferiore del robot, incaricato della locomozione e della navigazione di base. Esso gestisce i due motori a corrente continua che muovono i cingoli (attraverso driver motori ponte-H) e raccoglie i dati dai sensori frontali di prossimità (sensori a ultrasuoni) e dal sensore IR di linea. Questo controllore esegue gli algoritmi predefiniti di movimento: guida manuale da remoto, **modalità line-follower** (seguimento di una linea tracciata sul pavimento) e **modalità autonoma** di esplorazione evitando ostacoli. In pratica, l'Arduino Mega elabora i segnali dell'array di sensori IR a 8 canali posto sotto la parte anteriore (line tracker): a differenza di semplici sensori IR a singolo canale, il modulo ad 8 canali fornisce un'indicazione più precisa della posizione relativa della linea rispetto al robot, consentendo correzioni più fini di traiettoria. Allo stesso tempo, i 5 sensori a ultrasuoni disposti sul frontale (a varie altezze) rilevano ostacoli immediatamente davanti al robot. Questa ridondanza su due livelli (linea e ultrasuoni) assicura una navigazione fluida lungo percorsi segnalati e il rilevamento di oggetti anche piccoli o bassi sul tragitto.

La **seconda scheda di controllo** è un modulo *ESP32-WROOM-32* situato nell'unità di monitoraggio ambientale (descritta in sezione 4). Questo microcontrollore si occupa di raccogliere i dati dai sensori ambientali (gas, temperatura, ecc.) e gestire il sistema di allarme e filtrazione. Inoltre, l'ESP32 cura la connettività di rete: stabilisce la connessione Wi-Fi e invia periodicamente i dati rilevati al cloud (piattaforma IoT) o a un'app mobile. In parallelo, è in grado di ricevere comandi in remoto (ad esempio dall'operatore su app) come l'attivazione manuale di allarmi o modalità operative. Essendo dotato di doppio core e connettività integrata, l'ESP32 svolge efficacemente sia il compito di *data logger* ambientale sia di *gateway* di comunicazione.

La **terza scheda di controllo** è un secondo Arduino Mega 2560, dedicato esclusivamente al sensore **LiDAR** (Light Detection and Ranging) installato sulla sommità del robot. WatchMan utilizza un sensore LiDAR 360° (modello *Slamtec RPLIDAR A1*) come principale sistema di percezione per la **rilevazione di ostacoli** nell'ambiente circostante. Per massimizzare le prestazioni, il LiDAR è gestito da un microcontrollore dedicato: questo Arduino raccoglie in tempo reale le misure del telemetro laser (fino a 8000 campioni al secondo) e costruisce una mappa locale degli ostacoli a 360 gradi. I dati filtrati vengono poi trasmessi alla prima unità di controllo (movimentazione) tramite segnali digitali dedicati: il processore di navigazione riceve indicazioni sintetiche sul libero spazio circostante e su eventuali ostacoli, così da adattare la rotta. Delegare il LiDAR a un controller separato allevia significativamente il carico computazionale sul primo Arduino, evitando ritardi nell'esecuzione dei comandi motore dovuti all'elaborazione intensiva dei dati



LiDAR. In pratica, i due microcontrollori (movimento e LiDAR) operano **senza un clock interno condiviso**: si sincronizzano attraverso segnali di I/O digitali e algoritmi cooperativi (ad esempio, il controller LiDAR invia un segnale quando rileva un ostacolo entro una certa distanza, il controller motori in base a ciò decide di fermarsi o deviare). Questa architettura elimina potenziali conflitti di temporizzazione e riduce i disturbi elettromagnetici incrociati. Nel complesso, l'approccio a triplo processore ha incrementato la stabilità e reattività del sistema, garantendo che ogni sottosistema (movimento, sensori ambientali, LiDAR) funzioni in modo ottimale senza interferenze.

Meccanismi di navigazione e avoidance: WatchMan implementa una strategia avanzata di **evitamento ostacoli su due livelli**. Nel *primo livello*, il LiDAR ruotante individua qualsiasi ostacolo attorno al robot (campo visivo 360°) fino a diversi metri, creando una "mappa" di punti ostacolanti; appena un oggetto viene rilevato entro la soglia di sicurezza, il terzo processore segnala la presenza dell'ostacolo e il robot può arrestare la marcia prima della collisione. Nel *secondo livello*, i sensori a ultrasuoni frontali coprono gli angoli ciechi o oggetti a breve distanza (ad esempio un ostacolo molto vicino che il LiDAR potrebbe non aver campionato in tempo): se un ultrasuono rileva un impedimento entro ~50 cm, il robot effettua uno stop immediato. In pratica, durante lo spostamento autonomo, alla rilevazione di un ostacolo WatchMan si ferma per ~2 secondi; se l'ostacolo viene rimosso (es. una persona di passaggio si allontana), il robot riprende il percorso originale, altrimenti, se il passaggio risulta ancora bloccato, il sistema calcola una *direzione alternativa* basandosi sullo spazio libero circostante (derivato dai dati combinati di LiDAR e ultrasuoni) e prosegue deviando il tragitto. Questo comportamento conferisce al robot la capacità di aggirare autonomamente intralci sul cammino e continuare la missione senza intervento umano.

La movimentazione prevede tre modalità selezionabili dall'utente o dall'operatore: (a) **Manuale** – il robot è telecomandato via radiocomando RF a distanza (utile in fase di ispezione iniziale o posizionamento); (b) **Seguimento linea** – il robot segue autonomamente un percorso segnato da una linea a terra (tipicamente nastro adesivo nero), utile ad esempio in gallerie o depositi dove le aree di interesse sono collegate da guide visive; (c) **Autonomo libero** – il robot esplora l'area definita evitando ostacoli, secondo una logica di pattugliamento programmata o casuale controllata. Queste modalità rendono WatchMan adattabile a diversi scenari: in un cantiere no-dig, si potrebbe far seguire al robot le condotte appena posate (linea tracciata) per ispezionarle periodicamente, oppure lasciarlo muovere autonomamente nell'area di scavo monitorando la qualità dell'aria ovunque.

4. Unità di monitoraggio ambientale

Per tenere sotto controllo la sicurezza del personale, WatchMan è dotato di un'unità dedicata al **monitoraggio continuo dell'ambiente**. Questo modulo, collocato nella parte centrale del robot, alloggia una serie di **sensori ambientali** collegati alla scheda ESP32. In totale, il prototipo integra **10 sensori distinti** per misurare parametri atmosferici e di movimento, tra cui:

- un modulo combinato temperatura/umidità/pressione/altitudine (sensore digitale di atmosfera),
- un modulo IMU (Inertial Measurement Unit) con accelerometro triassiale e giroscopio triassiale (per rilevare l'assetto del robot e vibrazioni/movimenti bruschi),
- **cinque sensori di gas** differenti (elettrochimici/catalitici tipo MQ) tarati per rilevare rispettivamente monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), propano, e idrogeno,
- **tre sensori di fiamma/UV** per la rilevazione precoce di fuoco o scintille.

Ogni 30 secondi circa, l'ESP32 acquisisce un **pacchetto di dati ambientali** comprendente: temperatura e umidità dell'aria, pressione atmosferica, altitudine relativa, orientamento (angoli di **rollio** e **beccheggio** del robot rispetto al terreno), concentrazione di metano, propano, CO, CO₂, idrogeno e livello di radiazione infrarossa (indicatore di fiamma). Questi dati vengono inviati immediatamente al back-end remoto (cloud IoT) e contemporaneamente registrati localmente per analisi. Per ogni grandezza monitorata sono impostate soglie di sicurezza: ad esempio, concentrazione di CO oltre il limite, o temperatura superiore a X °C, ecc. Se uno qualsiasi dei parametri esce dal range di sicurezza predefinito, WatchMan interviene in tempo reale attivando procedure di allarme. Un **display LCD** montato sul retro del robot mostra in tempo reale gli ultimi valori misurati e può evidenziare con un messaggio qualsiasi anomalia (ad esempio "CO livello ALTO!"). Inoltre, un sistema di allarme multicanale entra in azione: il robot emette un segnale acustico (buzzer/sirena), lampeggia il segnalatore luminoso frontale e accende una luce di stato rossa sul retro, e invia una notifica di emergenza tramite la piattaforma di monitoraggio remoto. Questo permette di allertare istantaneamente sia gli operatori presenti nell'area (che vedono e sentono l'allarme) sia eventuali supervisori collegati da remoto. Allo stesso tempo, l'unità di controllo ambientale può attivare autonomamente l'**unità di filtrazione dell'aria** (descritta in sezione successiva) per mitigare il pericolo, ad esempio avviando la depurazione in presenza di gas tossici. L'approccio seguito è quindi **proattivo**: WatchMan non si limita a segnalare il problema, ma avvia anche azioni correttive per ridurre il rischio immediato.

Infine, per proteggere l'elettronica e garantire misure affidabili, l'unità ambientale è isolata quanto possibile dalle vibrazioni del movimento tramite supporti elastici, e l'ESP32 è programmato con algoritmi di filtraggio software (media mobile, filtraggio di spike) per evitare falsi allarmi dovuti a letture anomale momentanee. Nei test di laboratorio, questa unità ha dimostrato di rilevare efficacemente variazioni rapide nelle concentrazioni di gas (ad esempio emissione controllata di CO in ambiente) e di attivare l'allarme in meno di 2 secondi dal superamento soglia, un tempo più che adeguato per permettere agli operatori di mettersi in sicurezza.

Tabella 1. Principali componenti hardware del prototipo *WatchMan Beta v1.0*, suddivisi per categoria.

Categoria	Componenti principali (quantità)
Unità di controllo	Microcontrollori Arduino Mega 2560 (2); Microcontrollore Wi-Fi ESP32 (1)
Sensori di navigazione	Sensore LiDAR 360° RPLIDAR A1 (1); Sensori a ultrasuoni HC-SR04 (5); Sensore IR segu 8-canali (1)
Sensori ambientali	Sensore atmosfera BMP280 (1); IMU 3-assi MPU-6050 (1); Sensori gas MQ (5: CO, CO ₂ , C ₃ H ₈ , H ₂); Sensori fiamma IR (3)
Attuatori e motori	Motori elettrici 12V cc con riduttore (4, per cingoli); Driver motori doppio H-bridge (2); Ver di aerazione 80 mm (2) e 40 mm (2)
Alimentazione	Batteria principale Li-Po 14.8V 10Ah (1); Batteria ausiliaria 9V 1Ah (1); Modulo protezione batteria; Convertitori DC-DC step-down (5)
Altri dispositivi	Telecamera Wi-Fi 2K pan-tilt (1); Sirena/Buzzer (1); Pulsante emergenza (1); Display LCD 12C (1); Strisce LED e indicatori luminosi (vari)

5. Unità di filtrazione dell'aria

Una delle caratteristiche distintive di WatchMan è l'inclusione di un sistema integrato di **filtrazione/purificazione dell'aria**, che consente al robot non solo di rilevare ma anche di reagire attivamente a condizioni atmosferiche pericolose. L'unità di filtrazione è costituita da due ventole elettriche, un contenitore di filtri intercambiabile e una serie di **filtri multistrato**. Nel prototipo sono stati impiegati **9 strati filtranti** combinati: filtri HEPA ad alta efficienza per particolato, filtri a carbone attivo per sostanze chimiche e odori, e filtri in fibra/cotone per polveri grossolane e aerosol. Le ventole sono montate ai lati delle aperture di aerazione della scocca posteriore del robot: una ventola funge da aspiratore, l'altra da espulsore.

Quando l'unità di monitoraggio ambientale rileva un superamento delle soglie (ad esempio concentrazione di gas infiammabili oltre il limite), invia un segnale di attivazione all'unità di filtrazione. A questo punto, le ventole si accendono immediatamente creando un flusso d'aria attraverso il tunnel di filtrazione: l'aria circostante viene aspirata all'interno del robot, fatta passare attraverso il contenitore dove sono inseriti i filtri a strati, e infine reimpressa nell'ambiente dopo la depurazione. In questo modo, eventuali contaminanti (fumo, polveri sottili, gas tossici in concentrazione moderata) vengono almeno in parte rimossi localmente, mitigando il rischio per il personale in attesa di ventilazione forzata generale o altri interventi. Il processo di filtrazione rimane attivo finché i sensori non registrano il rientro dei parametri nella norma; una volta che, ad esempio, il livello di gas torna sotto soglia, le ventole si spengono automaticamente per risparmiare energia. Sul retro del robot è presente una **spia luminosa di stato ambientale** a LED bicolore: verde quando la qualità dell'aria è nei limiti di sicurezza, rossa quando è in atto una condizione di pericolo. Durante la filtrazione, la spia lampeggia in rosso. Questo fornisce un riscontro visivo immediato anche da lontano sul fatto che l'aria sia sicura o meno.

Nei test eseguiti in laboratorio, l'unità di filtrazione ha dimostrato di poter abbassare sensibilmente concentrazioni elevate di fumo in un ambiente ristretto (simulando un principio di incendio) nel giro di pochi minuti. Chiaramente il sistema non ha la portata né l'intento di sostituire sistemi di ventilazione industriali, ma rappresenta un ulteriore livello di protezione locale. In uno scenario reale, ad esempio in uno scavo di posa cavi dove si accumulano vapori, WatchMan potrebbe intervenire tempestivamente filtrando l'aria intorno ai lavoratori finché questi non abbandonino l'area, riducendo l'esposizione acuta. Una volta normalizzata la situazione, il robot segnala la condizione sicura riaccendendo il LED di stato verde.

6. Monitoraggio visivo e sorveglianza video

Oltre ai sensori ambientali, WatchMan è equipaggiato con un sistema di **video-sorveglianza in tempo reale** per il monitoraggio visivo del cantiere. Sul tetto del robot è installata una videocamera digitale *Wi-Fi* ad alta risoluzione (2K) montata su un meccanismo **pan-tilt** motorizzato, che le consente una rotazione panoramica di 360° orizzontali e un'inclinazione verticale. Questa telecamera fornisce al supervisore la possibilità di osservare da remoto l'area circostante il robot come se fosse una telecamera mobile. La videocamera integra funzionalità smart come visione notturna a infrarossi, **rilevamento di persone/movimento** e tracciamento automatico dei soggetti in movimento.

Dispone inoltre di microfono e altoparlante integrati, permettendo comunicazione audio bidirezionale: un operatore remoto può ascoltare suoni nell'area e parlare attraverso un altoparlante del robot (funzione utile ad esempio per fornire istruzioni a operai sul campo o per scoraggiare intrusi).

Tramite l'app dedicata, l'utente può controllare l'orientamento della videocamera con un semplice joystick virtuale, ottenendo una copertura completa a 360° dell'ambiente senza spostare il robot. Il flusso video in **alta definizione** (risoluzione 2K) e audio viene trasmesso in streaming via Wi-Fi all'operatore. In parallelo, il video può essere registrato su una scheda microSD a bordo camera per archivio locale. È prevista inoltre l'opzione di **cloud storage** del video, per analisi forense o documentazione. La qualità delle immagini (colore, 4× zoom digitale, lente grandangolare 110°) assicura che nessun dettaglio critico sfugga all'osservazione. Durante le ore notturne o in ambienti bui (es. gallerie non illuminate), la visione notturna IR permette di continuare a sorvegliare efficacemente. L'algoritmo di *motion detection* a bordo camera può inviare notifiche istantanee se rileva movimenti sospetti nell'inquadratura, fungendo da sentinella attiva.

In un contesto come **ITALIA NO DIG LIVE 2025**, dove potrebbero essere dimostrate tecnologie per cantieri non invasivi, questa funzionalità di telecamera mobile consente di monitorare ad esempio lo stato di avanzamento di una perforazione orizzontale in una strada urbana stando a distanza di sicurezza, oppure tenere sotto controllo più punti di un cantiere lineare muovendo il robot lungo di esso. L'operatore, dal suo smartphone, può "patrollare" visivamente l'intero cantiere virtualmente a bordo di WatchMan.



Figura 3: Monitoraggio visivo remoto. A sinistra, il robot WatchMan durante una prova di navigazione indoor su linea guida (visibili i fari LED frontali accesi e la telecamera Wi-Fi 2.4 GHz montata sulla sommità). A destra, schermate dell'app mobile che mostrano il feed video in tempo reale della telecamera: in alto un fotogramma della ripresa frontale del robot in un corridoio, in basso l'interfaccia dell'app WatchMan durante lo streaming (con comandi di controllo e timeline di registrazione).

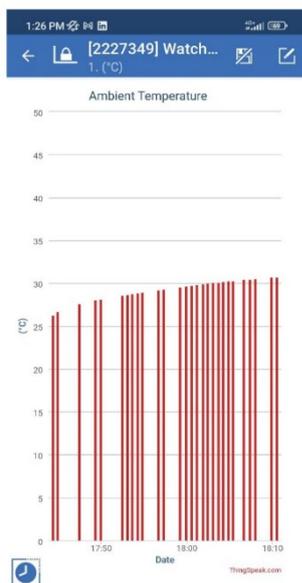
Durante le sperimentazioni, il sistema video si è rivelato prezioso anche per documentare condizioni rischiose rilevate dagli altri sensori: ad esempio, al rilevamento di fumo, il robot può inviare sia l'allarme sensoristico sia uno **snapshot fotografico** dell'area affetta, aiutando i responsabili a valutare la gravità dell'evento prima di intervenire. La presenza della telecamera non influisce sulle funzioni autonome di WatchMan, in quanto il robot può essere programmato per dirigere automaticamente la telecamera verso un punto di interesse (ad esempio ruotarla verso la direzione da cui proviene un suono anomalo rilevato da un microfono). Si ottiene quindi una fusione di monitoraggio: ambientale e visivo, per una **sorveglianza completa** a 360 gradi del luogo di lavoro.

7. Piattaforma cloud e gestione dei dati

WatchMan è concepito come dispositivo **IoT** e sfrutta una piattaforma cloud per la raccolta, visualizzazione e archiviazione dei dati in tempo reale. Tramite il modulo Wi-Fi dell'ESP32, il robot invia periodicamente tutti i dati acquisiti dai sensori ambientali a un servizio cloud (nel prototipo si è utilizzata la piattaforma **ThingSpeak di MathWorks**). I dati sono organizzati in canali e campi corrispondenti a ciascun sensore. Ad esempio, si hanno campi per temperatura, umidità, concentrazione di CO, ecc., aggiornati ogni 30 s con i nuovi valori. Gli utenti autorizzati possono accedere al canale WatchMan via web o app mobile per **visualizzare i dati in tempo reale** sotto forma di grafici, indicatori o altre visualizzazioni personalizzate. Ciò permette un monitoraggio remoto continuo: il responsabile sicurezza può controllare da PC o smartphone l'andamento dei parametri ambientali durante il turno di lavoro, ovunque si trovi.

La piattaforma IoT utilizzata consente anche di definire soglie di allarme software: ad esempio, generare un avviso push/email se un campo supera una certa soglia, aggiungendo un ulteriore livello di allerta oltre a quello gestito localmente dal robot. I dati inviati da WatchMan vengono memorizzati nel cloud e restano disponibili per **analisi storica**: si possono scaricare log completi in formati CSV, JSON o XML per elaborazioni successive, ad esempio analizzare l'andamento della qualità dell'aria in un cantiere nel tempo o confrontare misure di diversi siti.

Un altro vantaggio del cloud IoT è la possibilità di **condividere i dati** con altri sistemi o utenti: ad esempio il canale di WatchMan può essere reso pubblico o condiviso con l'ente di controllo sicurezza, permettendo trasparenza e supervisione esterna. L'interfaccia consente inoltre di aggiungere facilmente nuovi campi se sul robot vengono integrati nuovi sensori, rendendo la soluzione scalabile. L'utente può personalizzare nomi dei campi, unità di misura, frequenza di aggiornamento e grafici (linee temporali, gauge, mappe se georeferenziati, ecc.) senza modificare nulla a bordo robot. Nel nostro prototipo, abbiamo configurato dashboard in tempo reale: ad esempio un grafico per la temperatura ambientale, uno per ciascun gas, ecc., aggiornati continuamente. In **Figura 4** è mostrato un esempio di grafico generato sulla piattaforma cloud per la temperatura ambiente rilevata dal robot durante una sessione di prova. Si può notare come, grazie al caricamento continuo dei dati da WatchMan, il supervisore ottenga una panoramica aggiornata istante per istante e possa individuare eventuali trend anomali (ad esempio un graduale aumento di temperatura che potrebbe segnalare un problema agli impianti di ventilazione del cantiere).



*Figura 4: Esempio di visualizzazione cloud dei dati di **WatchMan** – Grafico in tempo reale della temperatura ambientale (°C) misurata dal robot nell'arco di alcuni minuti, attraverso la piattaforma IoT (ThingSpeak). I dati vengono aggiornati automaticamente dal robot ogni 30 secondi, consentendo di monitorare costantemente le condizioni.*

L'uso del cloud rende inoltre più semplice aggiornare il robot: in futuro si potrebbe implementare la ricezione di comandi remoti via cloud (ad esempio modificare la frequenza di campionamento, o attivare modalità diverse) o l'integrazione con sistemi di gestione del cantiere più ampi (BIM, gestione emergenze, etc.). La sicurezza della trasmissione è garantita dal protocollo HTTPS e da API Key uniche per il dispositivo. In scenari dove non fosse disponibile connettività Internet (es. galleria molto profonda), l'ESP32 può funzionare in modalità access point locale e conservare dati fino al ristabilimento del collegamento.

8. Benefici e confronto con soluzioni esistenti

La soluzione proposta con WatchMan si pone all'avanguardia rispetto allo stato dell'arte, combinando funzionalità di sicurezza tipiche di sistemi diversi in un'unica piattaforma mobile. In **Tabella 2** sono riassunti alcuni confronti chiave tra WatchMan e tipologie di robot di sicurezza attualmente in uso.

Tabella 2. Confronto qualitativo tra il robot *WatchMan* e tipici robot di sorveglianza industriale esistenti.

Caratteristica	Robot sicurezza convenzionali (es. sistemi fis robot commerciali)	WatchMan Beta v1.0
Parametri ambientali monitorati	Limitati (< 5 tipi, spesso solo fumo o temperatura)	Estesi (\geq 10 tipi, gas multipli, T/UR, ϵ)
Modalità di funzionamento	Statico o solo teleoperato	Multimodale: manuale, seguimiento lir autonomo
Design modulare e aggiornabilità	No – struttura monolitica, upgrade difficili	Sì – struttura modulare, sostituzione componenti facile
Sistema di filtrazione aria	Assente	Integrato (ventilazione con filtri HEPA/carbone)
Costo indicativo	Alto (\gg 50 k€ acquisto o canone elevato)	Basso (~1–2 k€ di componenti, open source)

Come si può notare, WatchMan enfatizza la **polivalenza**: molti robot di sicurezza attuali sono progettati per compiti specifici (ad esempio la sorveglianza perimetrale con telecamere, oppure il rilevamento di gas in impianti petrolchimici) e non offrono una copertura completa di situazioni. Il nostro prototipo, invece, unisce in un solo dispositivo compatto: un sistema di monitoraggio gas completo simile a quelli utilizzati in impianti industriali, una videocamera mobile di sorveglianza, un'unità di filtraggio attivo (caratteristica praticamente assente nei competitor), e capacità autonome di movimento e avoidance tipiche della robotica mobile avanzata.

Dal punto di vista **tecnologico**, alcune innovazioni introdotte da WatchMan includono:

- **Algoritmo di rilevamento ostacoli su microcontrollore Arduino** per il LiDAR: solitamente la gestione di un LiDAR 2D e la navigazione SLAM richiedono single-board computers (Raspberry Pi, Nvidia Jetson) o piattaforme computazionali costose. Noi abbiamo implementato un metodo ottimizzato che esegue su Arduino Mega, riducendo costi e consumi. In particolare, anziché effettuare scansioni LiDAR complete a 360° ad alta frequenza, il nostro algoritmo effettua **scansioni mirate** su angoli/distanze selezionati necessari per la manovra del robot. Ciò riduce i dati da elaborare del ~50% mantenendo comunque efficace l'evitamento ostacoli, come verificato sperimentalmente.
- **Architettura a basso consumo e doppia alimentazione**: l'adozione di microcontrollori al posto di PC embedded riduce i consumi di un fattore 4–10× rispetto a soluzioni con CPU avanzate (un Arduino Mega consuma pochi mA rispetto ai ~2 A di un Raspberry Pi). Inoltre, WatchMan impiega un sistema ibrido di alimentazione: una batteria principale Li-Po 14.8V 10Ah che alimenta tutto il robot e una batteria secondaria ricaricabile 9V dedicata ai picchi di carico. Un **processo di controllo del carico** monitora l'assorbimento e inserisce la batteria ausiliaria quando richiesto (ad es. all'avvio dei motori o all'accensione simultanea di più dispositivi) per prevenire cadute di tensione. Questo accorgimento ha permesso di evitare di dover utilizzare batterie industriali molto più costose (es. batterie LiFePO4 24V 100Ah) e allo stesso tempo di garantire stabilità di tensione ai componenti sensibili.
- **Riduzione dei disturbi EM**: in un sistema con vari motori, microcontrollori e trasmettitori, i disturbi elettromagnetici e campi magnetici possono causare malfunzionamenti. Abbiamo implementato sia misure passive (isolamento e schermatura di cavi e componenti con materiali speciali stampati in 3D con resine conduttive brevettate per MTM) sia attive (gestione separata dei clock, comunicazione inter-processore sincrona via GPIO anziché bus condivisi) per eliminare interferenze. Nei test, WatchMan non ha risentito di disturbi neanche in presenza di segnali radio esterni o accensione contemporanea di tutti i motori.

Dal punto di vista **operativo**, un beneficio notevole è la **facilità d'uso e manutenzione**. Un operatore non esperto può interagire con WatchMan tramite l'app intuitiva o un semplice radiocomando, senza necessità di programmazione. La manutenzione è semplificata dalla modularità: ad esempio, i filtri aria sono accessibili aprendo un vano e possono essere sostituiti o puliti in pochi minuti; i sensori e le schede sono montati con connettori standard che ne permettono la rimozione rapida. Ciò riduce i tempi di fermo macchina.

In confronto a tecnologie alternative, come sensori fissi cablati in galleria (che richiedono installazione e spostamento man mano che avanza lo scavo) o droni (che hanno autonomia limitata e non possono operare bene in spazi confinati o senza GPS), WatchMan rappresenta una **soluzione pratica e robusta**. La mobilità su cingoli lo rende adatto a terreni



accidentati e a superare piccoli ostacoli sul fondo di scavi. Inoltre, il costo contenuto apre la strada a possibili flotte di robot, dove più WatchMan cooperano per coprire aree estese o per avere ridondanza in caso di guasto di un'unità. In sintesi, l'introduzione di WatchMan in cantieri urbani, lavori no-dig e ambienti industriali confinati può elevare significativamente il livello di sicurezza. Il robot funge da "sentinella" instancabile che pattuglia l'ambiente 24/7, rilevando condizioni anomale e intervenendo in autonomia, con un costo operativo irrisorio (il consumo energetico è basso, e non richiede presidio umano continuo). Questo consente di concentrare le risorse umane su compiti specialistici mentre il robot si occupa della sorveglianza di routine.

Naturalmente, vi sono margini di miglioramento e non tutte le problematiche sono risolvibili con un singolo robot: ad esempio, in caso di incendi di grande entità o crolli strutturali, WatchMan fornirebbe un allarme precoce ma non potrebbe intervenire oltre (non è un robot pompieristico né un supporto fisico strutturale). Tuttavia, integrato in un piano di sicurezza globale, il robot rappresenta un elemento innovativo che **supera i limiti** delle soluzioni attuali in termini di *copertura dei rischi, flessibilità d'impiego e economicità*.

9. Conclusioni

Il progetto WatchMan dimostra come sia possibile realizzare un robot mobile intelligente capace di aumentare la sicurezza nei cantieri urbani e nelle opere senza scavo, integrando in un unico sistema compatto funzioni di monitoraggio ambientale, ispezione visiva e intervento automatico. La versione prototipale Beta v1.0, frutto di collaborazione tra industria e ricerca, ha validato in laboratorio l'efficacia dell'approccio: il robot può muoversi autonomamente evitando ostacoli, rilevare una vasta gamma di potenziali pericoli (gas, fumo, fuoco, ecc.), allertare immediatamente gli operatori e persino mitigare temporaneamente situazioni critiche (ventilando l'aria). Tutto ciò con un impiego minimo di risorse e a costi accessibili.

Per il pubblico di **ITALIA NO DIG LIVE 2025**, WatchMan rappresenta un esempio concreto di applicazione di *tecnologie intelligenti* alla sicurezza nei cantieri di urbanizzazioni senza scavo: immaginando la posa di nuove condotte fognarie con metodo trenchless, il robot potrebbe seguire la testa di perforazione nel sottosuolo monitorando la presenza di gas pericolosi e verificando l'integrità della condotta appena posata, inviando dati in tempo reale alla sala controllo in superficie. In futuro, l'adozione di soluzioni simili potrebbe diventare prassi per migliorare la sicurezza nei cantieri, riducendo gli incidenti dovuti a condizioni insalubri non rilevate per tempo.

Come sviluppi futuri, il nostro team prevede di testare WatchMan direttamente su campi prova di cantieri no-dig, per valutare le prestazioni in ambienti reali (gallerie sotterranee, pozzi di spinta, etc.) e raccogliere feedback dagli operatori. Inoltre, sono allo studio migliorie come l'integrazione di sensori aggiuntivi (es. rilevatori di H₂S, sensori di vibrazione per instabilità strutturali), l'implementazione di una navigazione autonoma avanzata basata su SLAM (mappatura simultanea) su hardware potenziato, e l'impiego di rete mesh tra più robot per coprire aree molto vaste in coordinamento. Si valuterà anche la robustezza del sistema in condizioni ambientali estreme (alte temperature, polveri dense) tipiche di alcuni cantieri e la necessità di eventuali accorgimenti (materiali diversi, protezioni IP66, ecc.).

In conclusione, l'esperienza maturata con WatchMan evidenzia il potenziale dei robot autonomi nel settore delle costruzioni e della manutenzione urbana: essi possono aumentare la sicurezza dei lavoratori e la qualità del monitoraggio, fornendo allo stesso tempo dati preziosi per ottimizzare i processi. L'innovazione tecnologica proposta è in linea con la tendenza verso cantieri **smart** e interconnessi, e costituisce un passo verso il futuro in cui compiti rischiosi saranno affidati a macchine intelligenti, con l'uomo in un ruolo di supervisione e controllo. WatchMan, in particolare, offre una soluzione pratica e adattabile che potrebbe trovare applicazione non solo nei cantieri no-dig ma in qualunque ambiente confinato o potenzialmente pericoloso (industrie chimiche, ispezione di reti fognarie, sicurezza in metropolitana, ecc.), contribuendo all'obiettivo ultimo di **zero infortuni** sul lavoro attraverso la prevenzione attiva.

Riferimenti

- Ackerman, E. (2020). *Boston Dynamics' Spot Robot Dog Now Available for \$74,500*. IEEE Spectrum, 16 giugno 2020.
- Knightscope Inc. (2022). *K5 Autonomous Security Robot – Product Overview*. Knightscope, scheda tecnica.
- Polaris Market Research (2023). *Security Robots Market Size, Share & Trends Analysis Report*.