



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

**SVILUPPO E ANALISI DI UN SISTEMA DI MISURA PER LA
LOCALIZZAZIONE DI PERSONE IN AMBIENTE INDOOR TRAMITE
SENSORI INSTALLATI SU ROBOT MOBILE**

**ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF A MEASURING SYSTEM FOR
PEOPLE LOCALIZATION IN INDOOR ENVIRONMENT VIA
SENSORS INSTALLED ON A MOBILE ROBOT**

Relatore: Chiar.mo
Prof. **Gian Marco Revel**

Tesi di Laurea di:
Lorenzo Recchi

Correlatori:
Prof. **Sara Casaccia**
Dott. **Ilaria Ciuffreda**

A.A. 2021 / 2022

Sommario

<i>Indice delle figure</i>	4
<i>Indice degli acronimi</i>	6
<i>Indice delle tabelle</i>	7
Capitolo 1: introduzione	8
1.1 Esposizione dei motivi	8
1.2 Obiettivo	9
1.2.1 Progetto GUARDIAN e come si struttura	9
1.3 Stato dell'Arte	11
1.3.1 Sistemi di localizzazione outdoor (GPS)	11
1.3.2 Sistemi di localizzazione indoor	12
1.3.2.1 Sensori già implementati sul robot: Passive Infrared Sensor (PIR)	13
1.3.2.1.1 Funzionamento dei sensori PIR	14
1.3.2.1.2 Limiti dei PIR	16
Implementazione di sensori da combinare ai PIR per il rilevamento della distanza	17
1.3.2.2 Sensore a ultrasuoni	17
1.3.2.3 Sensori di prossimità fotoelettrici	19
1.3.2.4 Telemetri laser	21
1.3.2.5 Sensori induttivi	22
Confronto tra i sensori di distanza e scelta	22
1.3.3 I vantaggi di un sistema multisensoriale	23
1.4 Elaborazione di dati multidimensionali	25
1.4.1 Data Integration	25
1.4.2 Data Fusion	26
Capitolo 2: materiali e metodi	28
2.1 Il robot Misty II	28
2.2 Sensori PIR	30
2.3 Sensori a ultrasuoni	31
2.3.1 Protocollo I2C	32
2.4 Sviluppo del progetto	33
2.4.1 Analisi dei dati sulla direzione di movimento	33
2.4.2 Progettazione CAD di un copricapo di supporto ai PIR e agli ultrasuoni	37
2.4.3 Protocolli di misura	40
2.4.4 Implementazione dei sensori a ultrasuoni	42
2.4.4.1 STEP 0	43
2.4.4.2 STEP 1	45
2.4.4.3 STEP 2	46
Capitolo 3: risultati e discussione	48

3.1 Risultati delle acquisizioni ottenute con i PIR	48
3.1.1 Risultati protocollo 1	48
3.1.2 Risultati protocollo 2	50
3.1.3 Risultati protocollo 3	52
3.2 Conclusioni	53
<i>Capitolo 4: sviluppi futuri</i>	55
<i>Bibliografia</i>	57

Indice delle figure

Figura 1: rappresentazione dell'eco-sistema GUARDIAN	10
Figura 2: rappresentazione 2D e 3D del concetto di trilaterazione.....	11
Figura 3: le 3 dimensioni considerate nello studio	12
Figura 4: spettro elettromagnetico	13
Figura 5: effetto piroelettrico	14
Figura 6: rilevazione di movimento da parte del PIR	15
Figura 7: elemento piroelettrico e PIR con lente di Fresnel	16
Figura 8: schema di funzionamento del sensore a ultrasuoni	18
Figura 9: fascio di impulsi meno o più concentrato.....	18
Figura 10: configurazione a fascio passante	20
Figura 11: configurazione a riflessione.....	20
Figura 12: configurazione a riflessione diffusa.....	20
Figura 13: implementazione di un telemetro laser per misure interferometriche della distanza	21
Figura 14: applicazione di un sensore induttivo	22
Figura 15: FOV+direzione di rilevazione del PIR; FOV+direzione di rilevazione dell'ultrasuono.	24
Figura 16: Data Integration	25
Figura 17: Data Fusion.....	27
Figura 18: sensori e caratteristiche di Misty II	29
Figura 19: sensore PIR HC-SR501	30
Figura 20: sensore a ultrasuoni SRF10	31
Figura 21: struttura del protocollo I2C	32
Figura 22: esempio di temporizzazione del segnale	33
Figura 23: alcune delle terne per allenare il robot	34
Figura 24: confusion matrix ottenuta dal Decison Tree.....	35
Figura 25: creazione del vettore activation a partire dal dataframe	36
Figura 26: mappatura del percorso ottenuta dall'elaborazione dei dati dell'acquisizione 1.1	37
Figura 27: file.par del copricapo di Misty.....	38
Figura 28: base per i portasensori	38
Figura 29: scatola porta-PIR in Solid Edge e stampata in 3D	39
Figura 30: scatola porta-ultrasuoni	39
Figura 31: protocollo di misura n.1	41

Figura 32: protocollo di misura n.2.....	41
Figura 33: protocollo di misura n.3.....	42
Figura 34: scheda Arduino Leonardo ETH e breadboard utilizzate per il test dei sensori	43
Figura 35: resistori da 1.8k Ω	44
Figura 36: diagramma di connessione scheda Arduino-sensore a ultrasuoni	44
Figura 37: sensore a ultrasuoni montato sulla breadboard con scheda Arduino esterna	44
Figura 38: diagramma di connessione scheda Arduino – PIR HC-SR501	45
Figura 39: collegamento completo PIR + ultrasuono e dettaglio del LED con la propria resistenza	46
Figura 40: indirizzi possibili degli ultrasuoni	47
Figura 41: schema di collegamento degli ultrasuoni alla scheda Arduino	47
Figura 42: plot del protocollo 1, test 1	49
Figura 43: plot del protocollo 2, test 3	51
Figura 44: plot del protocollo 3, test 2	52
Figura 45: portasensori completo con 4 PIR e 4 ultrasuoni	55

Indice degli acronimi

AAL: Active and Assisted Living

PIR: Passive Infrared sensor

GPS: Global Positioning System

IPS: Indoor Positioning System

HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning

LOS: Line of Sight

NIR: Near Infrared

SWIR: Short Wavelength Infrared

MWIR: Medium Wavelength Infrared

LWIR: Long Wavelength Infrared

FIR: Far Infrared

FET: Field Effect Transistor

FOV: Field of View

TOF: Time of Flight

SLAM: Simultaneous localization and mapping

Indice delle tabelle

Tabella 1: zone di differenziazione del campo infrarosso	14
Tabella 2: confronto sensori di distanza	22
Tabella 3: scheda tecnica del sensore HC-SR501	30
Tabella 4: scheda tecnica del sensore SRF10	31
Tabella 5: risultati del Decision Tree	34
Tabella 6: risultati del protocollo 1	49
Tabella 7: risultati del protocollo 2	51
Tabella 8: risultati del protocollo 3	52

Capitolo 1: introduzione

1.1 Esposizione dei motivi

Al giorno d'oggi più di 147 milioni di persone in tutto il mondo hanno un'età compresa tra 80 e 99 anni, pari all'1,9% della popolazione complessiva mondiale.

Entro il 2050, il numero di anziani oltre i 60 anni raddoppierà, raggiungendo i 2,1 miliardi.

Le ragioni dell'invecchiamento di massa sono note: progresso nella medicina e nella diffusione di strutture sanitarie hanno allungato l'aspettativa di vita e calo dei tassi di natalità [1].

Secondo le stime della Società Italiana di Geriatria e Gerontologia [2], gli anziani non autosufficienti, inabili, o bisognosi di monitoraggio medico continuo sono oltre 500.000. Il controllo tradizionale dei parametri vitali di un anziano non autosufficiente rappresenta per le strutture sanitarie uno sforzo considerevole, sia organizzativo che economico.

Nel 1997 si inizia a parlare di invecchiamento attivo, iniziando a tendere lo sguardo verso un nuovo modo di assistere la popolazione anziana in rapida crescita. L'invecchiamento attivo [3] può essere meglio descritto come un concetto che si applica sia agli individui che ai gruppi di popolazione. Permette alle persone di realizzare il loro potenziale di benessere fisico, sociale e mentale durante tutto il corso della vita e di partecipare alla società secondo i loro bisogni, desideri e capacità.

Questo può essere raggiunto attraverso una serie di interventi politici basati sulla prevenzione, la promozione e l'assistenza. In particolare, la prevenzione delle cadute e delle malattie infettive attraverso la vaccinazione, la promozione dell'attività fisica e dell'interazione sociale e l'assistenza quando necessario da parte di operatori sanitari sia formali che informali.

L'invecchiamento attivo è quindi uno strumento utile per risolvere le sfide legate all'invecchiamento della popolazione e ad oggi, oltre alle politiche di *welfare* si può contare anche sull'utilizzo della tecnologia. Per questo la Commissione Europea ha lanciato il programma noto come **Active and Assisted Living (AAL)** nell'ambito del programma per la ricerca e l'innovazione Horizon 2020. Il budget per il progetto è di 700 milioni di euro per il periodo 2014-2020.

Lo scopo del programma è quello di migliorare la qualità della vita degli anziani e dei disabili, investendo sulle nuove tecnologie digitali applicate alla salute e promuovendo l'e-health [4]. Il programma Active and Assisted Living (AAL) vuole sostenere una vita attiva, autonoma, indipendente e funzionale.

La realizzazione di questo programma prevede la fusione di soluzioni tecnologiche (grazie agli impianti domotici e di automazione) destinate a rendere attivo, intelligente e cooperativo l'ambiente nel quale viviamo. Esso deve essere efficace nel sostenere la vita indipendente e capace di fornire maggiore sicurezza e benessere nello svolgimento delle attività della vita quotidiana.

Da un punto di vista di benessere psicologico oltre che fisico, è indispensabile allungare il periodo in cui le persone possono vivere in autonomia o con un'assistenza domiciliare nel loro ambiente quotidiano. Lo è altrettanto poter eseguire compiti quotidiani in autonomia e sicurezza. L'AAL assicura infatti un migliore comfort abitativo per tutti, sia per impedimenti dovuti all'età, sia a quelli legati a specifiche disabilità o malattie. [5]

1.2 Obiettivo

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di realizzare una rete di sensori da integrare ad un robot sociale attraverso cui localizzare una persona in un ambiente indoor. La localizzazione della persona in un ambiente si verifica attraverso la rilevazione di distanza e direzione del movimento della persona rispetto al robot. La tesi è parte integrante del Progetto Guardian "The social robot to support the home care nurses". Il robot sociale utilizzato è Misty II (Enhanced Edition), prodotto dalla società americana Misty Robotics [6] nata nel 2014 come società spin-off del famoso produttore Sphero e gestita da Ian Bernstein e un team esperto con l'intento di *"rendere questi robot nostri amici, compagni di squadra o parte delle nostre famiglie – svolgeranno compiti garantendo affidabilità e interagendo con gli esseri umani in modo divertente e amichevole, cose che fin ad ora esistevano soltanto nella fantascienza"*.

1.2.1 Progetto GUARDIAN e come si struttura

GUARDIAN [5] è un progetto di ricerca europeo che fornisce un approccio innovativo per supportare i caregiver per mezzo di un robot sociale che:

- Fornisce informazioni sulla situazione a casa ai caregiver attraverso il dialogo uomo-robot e attraverso il rilevamento;
- Fornisce all'anziano una struttura delle abitudini quotidiane dello stesso attraverso promemoria per mangiare o bere o prendere medicine.

L'invecchiamento della società, la diminuzione del numero di infermieri e l'aumento dei costi delle strutture sanitarie hanno incoraggiato le persone anziane a rimanere nelle proprie residenze il più a

lungo possibile con un conseguente bisogno di sostegno sempre crescente. Di contro, i caregiver sperimentano alti livelli di stress, affaticamento mentale e fisico, problemi sul lavoro, ritiro sociale e insonnia.

La sostenibilità dell'assistenza potrebbe essere garantita integrando l'assistenza umana con il supporto offerto da una tecnologia specializzata e intelligente. Tali tecnologie potrebbero aiutare gli anziani a rimanere più a lungo nella propria residenza con un certo grado di indipendenza, il che ridurrebbe il carico di lavoro dei caregiver.

GUARDIAN è una piattaforma che consiste in un robot sociale posto all'interno della casa degli anziani e collegato alle app dei caregivers. Il robot percepisce il benessere generale dell'anziano e fornisce feedback ai caregivers. Questi sono in grado di istruire il robot da remoto attraverso l'app per instaurare un dialogo con l'anziano o contattare direttamente la persona che ha bisogno di cure. Inoltre, con GUARDIAN, gli anziani hanno un compagno che:

- può assolvere i compiti dei caregiver
- li supporta con promemoria delle attività quotidiane
- consente sicurezza e contatti con gli altri per migliorare l'indipendenza e la connessione sociale.

Ciò permette agli anziani anche più fragili di vivere nella propria casa il più a lungo possibile. L'eco-sistema Guardian è rappresentato sinteticamente nella Figura 1.

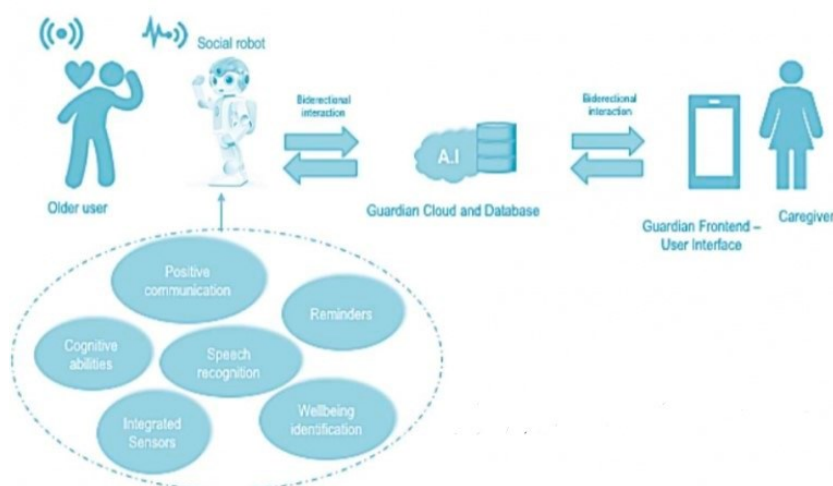


Figura 1: rappresentazione dell'eco-sistema GUARDIAN

1.3 Stato dell'Arte

1.3.1 Sistemi di localizzazione outdoor (GPS)

Il Global Positioning System è la tecnologia di riferimento per la geolocalizzazione di cose o persone in qualunque punto del suolo terrestre.

La localizzazione attraverso questa tecnologia è possibile solo se il dispositivo usato è in grado di stabilire un contatto con almeno quattro satelliti operativi operando sulla base del concetto della trilaterazione geometrica: dati tre punti fissi C_1, C_2, C_3 e conoscendo la distanza di un punto da ciascuno di questi punti fissi (rispettivamente R_1, R_2, R_3), è immediato trovare la posizione del punto in questione. Tracciando le 3 circonferenze di centro C_1, C_2, C_3 , l'intersezione di queste è proprio il punto P cercato, come mostrato in Figura 2.

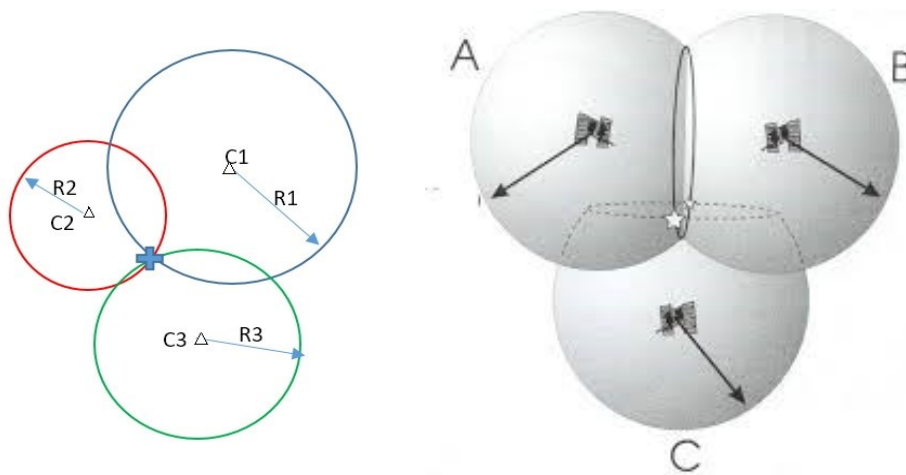


Figura 2: rappresentazione 2D e 3D del concetto di trilaterazione

Pensiamo ora di avere 3 posizioni nello spazio S_1, S_2, S_3 al di sopra della superficie terrestre (corrispondenti ai centri C_1, C_2, C_3 nel piano) e di essere in grado di misurare la distanza tra questi punti (satelliti) ed il luogo dove ci troviamo (R_1, R_2, R_3). Possiamo costruire 3 sfere di centro S_1, S_2, S_3 e raggio pari alle distanze misurate. Le tre sfere si incontrano in 2 punti ma solo uno di questi si troverà sulla superficie terrestre. Aggiungendo un'ulteriore sfera (cioè satellite) si riesce a correggere la scarsa precisione del ricevitore.

Limiti del GPS

Il limite più grande della tecnologia GPS riguarda l'impossibilità di funzionare adeguatamente in ambienti chiusi. Questo è dovuto agli effetti negativi della *multi-path propagation* (fenomeno dovuto alla presenza di ostacoli tra o intorno alle antenne trasmettenti/riceventi sulle quali i segnali wireless

si riflettono creando più percorsi di propagazione) di cui è vittima il segnale satellitare che attraversa le pareti degli edifici. La presenza di errori incontrollabili rende il sistema inutilizzabile ai dispositivi presenti in ambienti indoor. Da questo limite nasce la necessità di creare un sistema per la localizzazione indoor, progettando e sviluppando diversi sistemi alternativi in modo da realizzare quello che comunemente viene indicato come GPS indoor.

1.3.2 Sistemi di localizzazione indoor

Negli ambienti indoor le tecniche di misurazione dell'occupazione devono tener conto di diversi fattori e in questa sezione se ne evidenziano alcune [7]. Il termine "occupazione" è usato nel senso di rilevamento delle persone.

Melfi et al. [8] hanno sviluppato tecniche di rilevamento dell'occupazione considerando il concetto di presenza attraverso tre dimensioni (Figura 3).

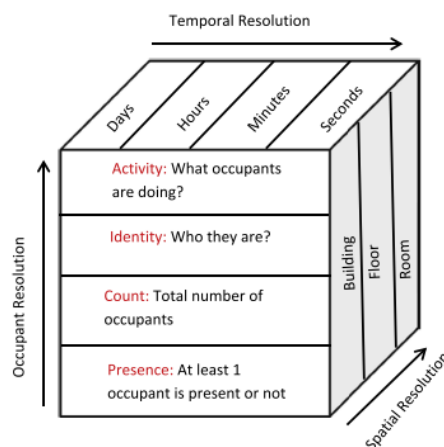


Figura 3: le 3 dimensioni considerate nello studio

Queste tre dimensioni sono: risoluzione occupanti, spaziale e temporale. Nella risoluzione degli occupanti, quando la risoluzione aumenta, aumenta la conoscenza dell'accuratezza e dei dettagli. Tuttavia, nel processo di ottimizzazione energetica HVAC, il numero totale delle informazioni sull'occupante è sufficiente [9].

1.3.2.1 Sensori già implementati sul robot: Passive Infrared Sensor (PIR)

I PIR sono sensori passivi a infrarossi. “Passivi” perché non emettono energia, ma captano quella degli oggetti da rilevare. “A infrarossi” perché captano le radiazioni elettromagnetiche tra 700 nm e 1 mm: alla lunghezza d’onda più bassa, 700 nm, la luce diventa visibile all’occhio umano, che percepisce il colore rosso. Le radiazioni in questa banda di frequenza vengono quindi dette “infrarosse”, “sotto il rosso”, come si evidenzia in Figura 4.

La radiazione infrarossa viene chiamata spesso anche radiazione termica perché viene emessa da ogni corpo (anche il ghiaccio) sotto forma di calore. Ogni corpo avente una temperatura maggiore dello zero assoluto (0 K) irradia dalla superficie una certa quantità di energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. Questa radiazione, che non necessita di un mezzo materiale di propagazione, è dovuta all’agitazione termica degli atomi e la sua intensità è legata proporzionalmente alla temperatura dell’oggetto considerato, ma anche alle caratteristiche del materiale di cui esso è costituito [10].

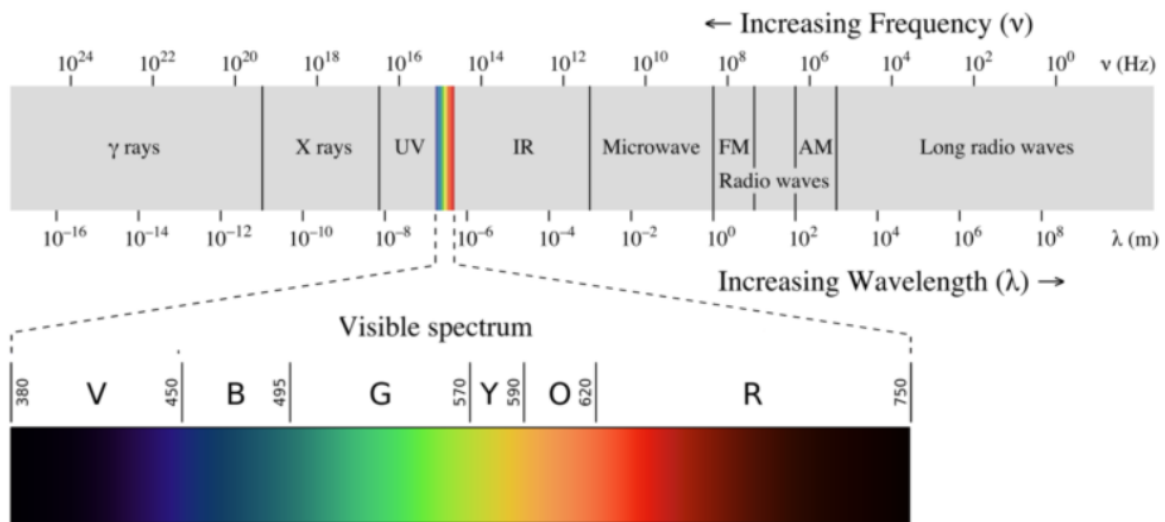


Figura 4: spettro elettromagnetico

Il campo dell’infrarosso (IR) si divide in cinque zone, da quella più vicina (in termini di lunghezza d’onda) al campo del visibile a quella più lontana.

Nella tabella 1 le rispettive lunghezze d'onda λ e frequenze ν :

	Limite inferiore	Limite superiore
Vicino (NIR)	1,4 μm – 214 THz	0,75 μm – 400 THz
Onda corta (SWIR)	3 μm – 100 THz	1,4 μm – 214 THz
Onda media (MWIR)	8 μm – 37,5 THz	3 μm – 100 THz
Onda lunga (LWIR)	15 μm – 20THz	8 μm – 37,5 THz
Lontano (FIR)	1000 μm – 300 GHz	15 μm – 20 THz

Tabella 1: zone di differenziazione del campo infrarosso

1.3.2.1.1 Funzionamento dei sensori PIR

I sensori piroelettrici non sono in grado di effettuare misure statiche. Il sensore rileva l'oggetto caldo solo quando questo, muovendosi all'interno del FOV del sensore, produce una variazione del campo di temperatura e di conseguenza causa una variazione della quantità di energia infrarossa che arriva sull'elemento sensibile. Il sensore PIR è quindi adatto a rilevare i movimenti di un corpo che emette radiazione infrarossa, senza però fornire informazioni in merito a chi o cosa si è mosso [11]. Ad esempio, se il corpo caldo rimane fermo per un dato intervallo di tempo, il dispositivo memorizza quello stato come normale e rimane disattivato finché quello stato non viene nuovamente alterato.

Per spiegare il funzionamento di questi sensori bisogna partire dalla descrizione delle proprietà fisiche dei materiali impiegati, chiamati piroelettrici. La *piroelettricità* è la proprietà di alcuni cristalli isolanti di polarizzarsi in seguito a una variazione della loro temperatura, generando perciò una temporanea differenza di potenziale, (Figura 5), tra le facce opposte dell'elemento piroelettrico [12].

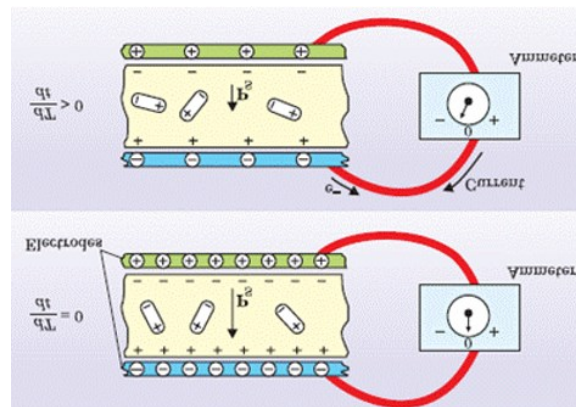


Figura 5: effetto piroelettrico

Le cariche di segno opposto si accumulano su facce parallele tra loro e ortogonali a un asse di simmetria del cristallo (*asse termico*): la faccia carica positivamente è detta *polo analogo*, quella carica negativamente *polo antilogo* [9]. Nei PIR la variazione di temperatura percepita è legata alla radiazione infrarossa incidente sulla lente del dispositivo che proviene dal target in movimento. L'output che restituiscono è un segnale elettrico.

Un sensore PIR per poter percepire la variazione del livello di radiazione IR che incide su di esso dispone tipicamente di due elementi piroelettrici [13], (Figura 7). Gli elettrodi dei due elementi sensibili sono collegati in opposizione di fase. Se la stessa radiazione arriva in ingresso su entrambi gli elementi, i due segnali elettrici si sottraggono e l'output complessivo che ne deriva è una tensione nulla: quindi non c'è alcun movimento da rilevare, ma sul PIR arriva comunque il calore irraggiato dall'ambiente circostante. Se invece un oggetto caldo si muove entrando nel FOV del sensore, ha luogo una repentina variazione dell'energia infrarossa che incide sul trasduttore. La radiazione arriverà prima su un elemento, che ne vedrà di più, e in seguito sull'altro: da ciò deriva un segnale in uscita diverso da zero, il quale viene misurato dal transistor a effetto di campo, integrato nel dispositivo (FET).

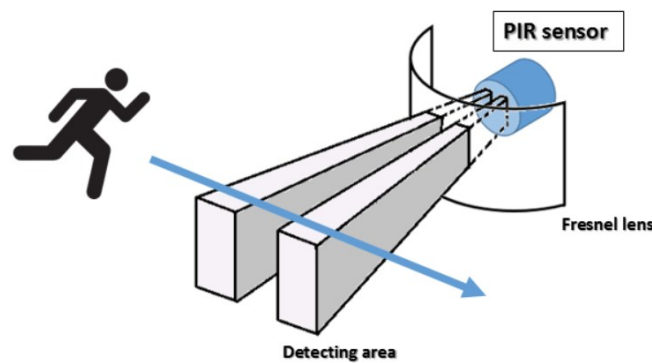


Figura 6: rilevazione di movimento da parte del PIR

1.3.2.1.2 Limiti dei PIR

- posizionamento lontano da fonti di calore o da oggetti che possano produrre variazioni di temperatura;
- incline a errori di false on/off, cioè l'errata segnalazione di presenza in caso di assenza di occupanti e viceversa;



Figura 7: elemento piroelettrico e PIR con lente di Fresnel

Implementazione di sensori da combinare ai PIR per il rilevamento della distanza

1.3.2.2 Sensore a ultrasuoni

Sebbene disponibili sul mercato da parecchi decenni, i sensori a ultrasuoni continuano a detenere una quota significativa del mercato dei dispositivi di rilevamento grazie alle loro caratteristiche, all'elevata flessibilità e al basso costo. Nel momento in cui un numero sempre maggiore di dispositivi acquisisce doti di autonomia, sensori di questo tipo vengono impiegati in misura crescente in robot, veicoli autonomi e droni.

1.3.2.2.1 Funzionamento dei sensori a ultrasuoni

I sensori a ultrasuoni emettono un chirp (un segnale nel quale la frequenza varia linearmente con il tempo) compreso tra 23 e 40 kHz, valori più elevati rispetto a quelli percepibili dall'orecchio umano (che può udire frequenze fino a circa 20 kHz, da cui il termine ultrasuoni). Grazie al chirp, questi sensori possono misurare il tempo impiegato dal suono per rimbalzare su un oggetto (stesso principio dell'ecolocalizzazione utilizzata dai pipistrelli). Questo tempo può essere facilmente convertito in distanza, tenendo presente che il chirp percorre il viaggio di andata e ritorno tra sensore e oggetto rilevato nell'aria alla velocità di 343m/s [14].

L'equazione è dunque la seguente:

$$D = \frac{1}{2} \cdot (t \cdot c)$$

D=distanza percorsa [m]

t = tempo di volo [s]

c= velocità della luce = 343 [m/s]

Sono necessari due componenti: un trasmettitore e un ricevitore, posizionati il più possibile l'uno vicino all'altro in modo che il suono viaggi seguendo una traiettoria più rettilinea dal trasmettitore all'oggetto che deve essere rilevato per poi tornare al ricevitore, per ridurre gli errori (Figura 8).

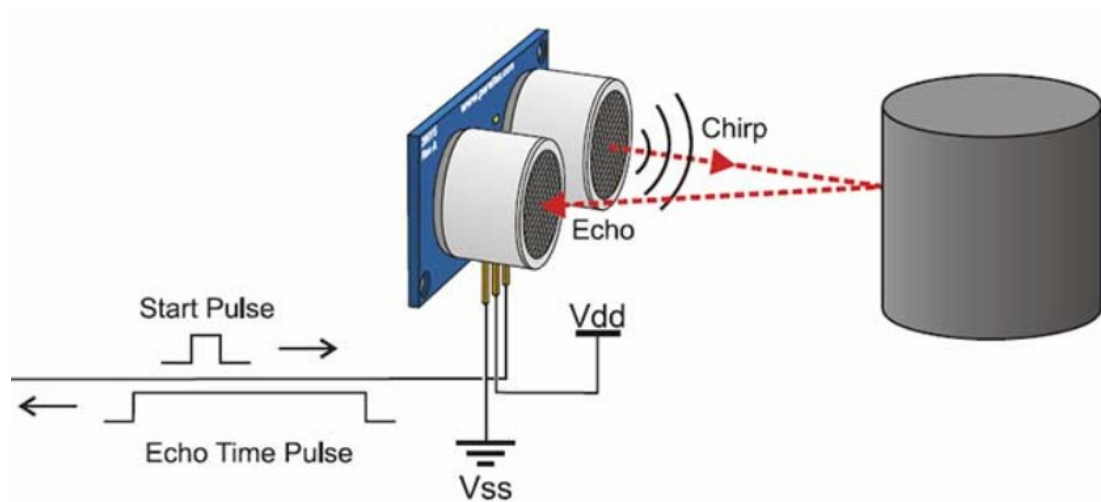


Figura 8: schema di funzionamento del sensore a ultrasuoni

E' necessario prendere in considerazione la dispersione e l'angolo di apertura del fascio (beam angle) che influenzano la distanza di rilevamento del dispositivo. Man mano che le onde sonore si allontanano dal trasmettitore, l'area di rilevamento aumenta in direzione sia laterale sia verticale.

Un fascio più stretto assicura una distanza di rilevamento maggiore in quanto l'energia dell'impulso risulta più focalizzata. Per contro, un fascio più ampio diffonde quella stessa energia in un arco più grande, riducendo in tal modo l'intervallo di rilevamento (Figura 9). La scelta dell'ampiezza ideale dell'apertura del fascio dipende dai requisiti dell'applicazione: si può affermare che fasci più ampi sono adatti per coprire aree di maggiori dimensioni.

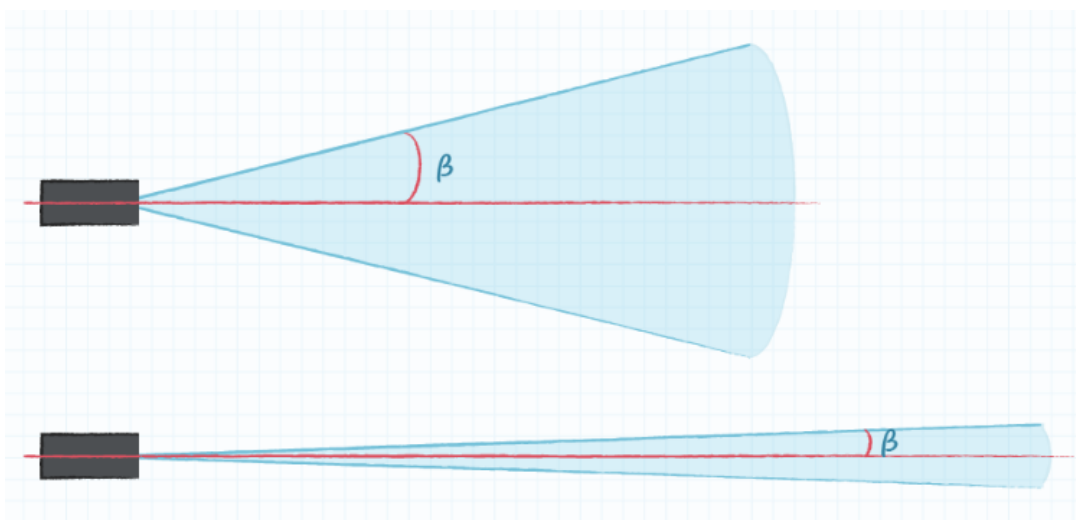


Figura 9: fascio di impulsi meno o più concentrato

Vantaggi

- non influenzati dal colore né dalla trasparenza degli oggetti che vengono rilevati
- rilevazioni di oggetti posti a distanze comprese tra pochi centimetri e 5m circa.
- risultati relativamente precisi, con tolleranze dell'ordine dell'1%.
- parecchie misure/s, garantendo in tal modo un'elevata velocità di aggiornamento.
- relativamente economici
- resistenti sia al rumore elettrico sia alla maggior parte dei rumori acustici.

Svantaggi

- le condizioni ambientali possono alterare la precisione delle misure
- non forniscono la posizione dell'oggetto all'interno dell'area di rilevamento e neppure altre informazioni quali ad esempio forma o colore.
- suscettibili a sporcarsi, bagnarsi o congelarsi
- non possono essere usati nel vuoto.

1.3.2.3 Sensori di prossimità fotoelettrici

I sensori fotoelettrici sono particolarmente efficaci per la rilevazione dell'assenza o della presenza di persone. Vengono infatti impiegati in ambito commerciale e residenziale in applicazioni quali porte per garage o conteggio delle persone [15].

Possibili configurazioni

La configurazione a raggio passante (*through- beam*) prevede un emettitore da un lato e un ricevitore dall'altro lato dell'oggetto e la rilevazione è determinata da un'interruzione del fascio (Figura 10). Nella configurazione a riflessione (Figura 11), emettitore e ricevitore sono affiancati mentre un riflettore posto sul lato opposto dell'oggetto fa rimbalzare il fascio. Una terza configurazione (Figura 12) prevede invece la presenza di emettitore e ricevitore affiancati ma, in questo caso, la luce emessa è riflessa da qualsiasi superficie vicina, in modo analogo a quello che avviene per i sensori a ultrasuoni, ma senza la possibilità di calcolare la distanza.

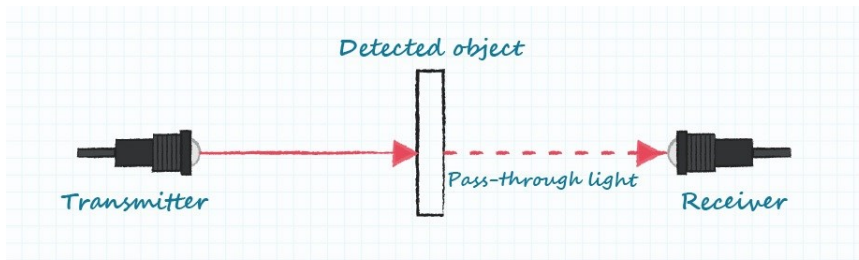


Figura 10: configurazione a fascio passante

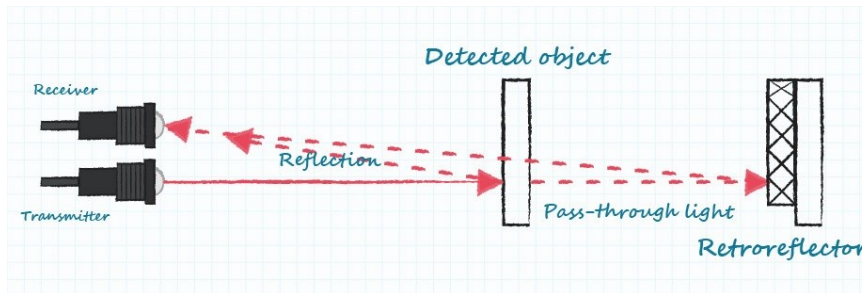


Figura 11: configurazione a riflessione

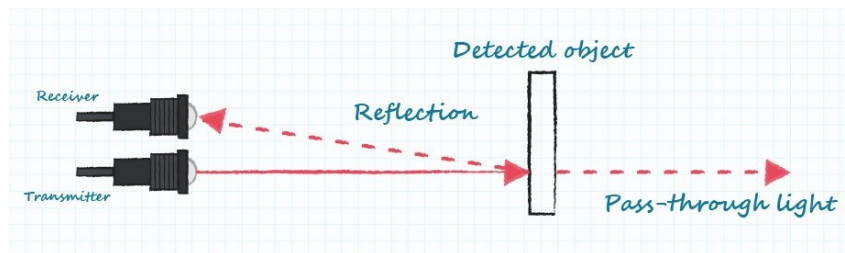


Figura 12: configurazione a riflessione diffusa

Vantaggi

- lunga durata grazie all'assenza di parti in movimento
- rilevano una vasta gamma di materiali
- le configurazioni a fascio passante e a riflessione sono caratterizzate da lunghe distanze di rilevamento e tempi di risposta veloci.
- la configurazione a riflessione diffusa è in grado di rilevare oggetti di piccole dimensioni e può essere utilizzata su rilevatori mobili.

Svantaggi

- problematiche con i materiali trasparenti e con l'acqua
- capacità di misurare la distanza da un oggetto è molto limitata
- e possono sorgere problemi con il colore e la riflettività dell'oggetto
- nelle configurazioni a fascio passante e a riflessione è necessario procedere al montaggio e all'allineamento

1.3.2.4 Telemetri laser

La telemetria laser è una tecnologia che solo in tempi recenti è diventata un'alternativa valida, in termini di costi, per molte applicazioni. La telemetria laser è basata sugli stessi principi dei sensori a ultrasuoni e utilizza un fascio elettromagnetico invece di onde sonore. A causa della velocità notevolmente superiore della luce, il calcolo del tempo di volo richiede una notevole precisione per cui a volte si ricorre ad altri metodi, come l'interferometria (Figura 13), al fine di ridurre i costi pur mantenendo un'elevata accuratezza.

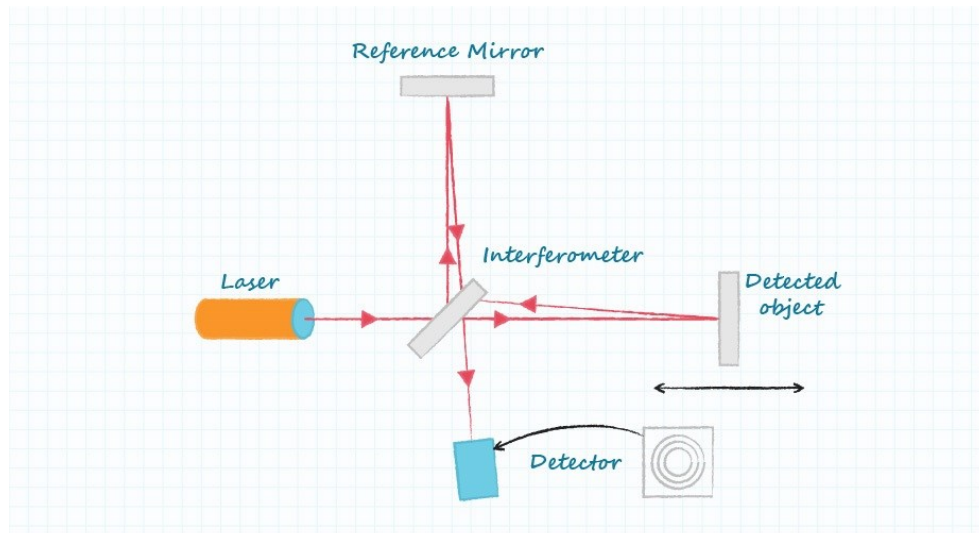


Figura 13: implementazione di un telemetro laser per misure interferometriche della distanza

Vantaggi

- eseguono misure su distanze dell'ordine delle centinaia o migliaia di metri
- garantiscono tempi di risposta estremamente ridotti
- elevata accuratezza

Svantaggi

- costi elevatissimi
- potenza richiesta elevata e quindi durata minore nelle applicazioni portatili
- problemi per la sicurezza degli occhi
- il laser si disperde all'aumentare della distanza e comunque l'area di rilevamento è ridotta
- non adatti all'uso con acqua e vetro

1.3.2.5 Sensori induttivi

I sensori induttivi vengono utilizzati per creare un campo magnetico e quindi rilevare le variazioni nello stesso nel momento in cui un oggetto metallico vi passa attraverso (Figura 14).

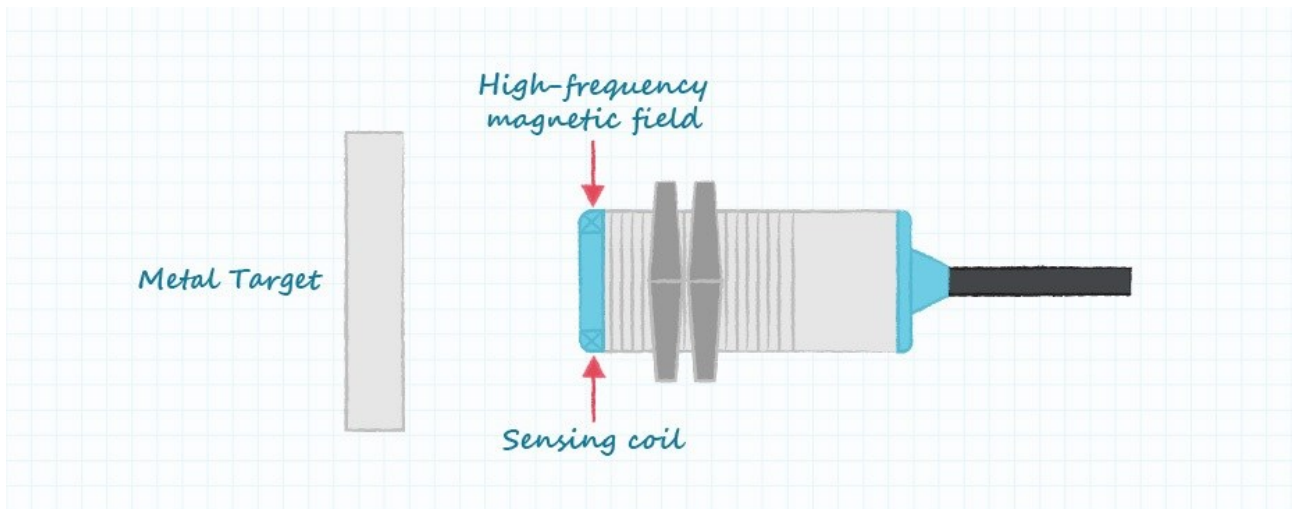


Figura 14: applicazione di un sensore induttivo

Vantaggi

- intervalli di distanza dal millimetro al metro
- velocità di aggiornamento elevata
- relativamente poco costosi

Svantaggi

- operano solo in presenza di materiali ferrosi
- sensibili alle interferenze prodotte da una vasta gamma di sorgenti

Confronto tra i sensori di distanza e scelta

	Costo	Range	Dimensioni	Velocità di refresh	Effetto del materiale
A ultrasuoni	Basso	Medio	Piccole	Medio	Nessuno
Fotoelettrici	Basso	Medio	Piccole	Alto	Moderato
Telemetri laser	Alto	Alto	Grandi	Medio	Moderato
Induttivi	Medio	Medio	Piccole	Medio	Alto

Tabella 2: confronto sensori di distanza

Delle numerose opzioni esistenti nell'ambito di sensori di distanza, quelle esaminate e confrontate sono le più diffuse per range di misura medio-grandi.

Da un'immediata analisi preliminare si possono escludere subito gli induttivi che rilevano solamente le variazioni del campo magnetico generato dovute all'attraversamento di un oggetto metallico.

Di conseguenza la persona dovrebbe essere costantemente munita di un dispositivo rilevabile dal sensore.

In secondo luogo anche i telemetri laser devono essere scartati. Il problema fondamentale è il costo molto elevato (nell'ordine delle centinaia di euro) e anche le dimensioni (i più piccoli sono circa di 30x30x100mm) superano di gran lunga quelle degli altri sensori.

Tra le altre due tipologie rimaste, la scelta è ricaduta sull'unica a non essere influenzata dal colore né dalla trasparenza degli oggetti né dai rumori elettrici e acustici, quella a ultrasuoni. Queste caratteristiche sono fondamentali all'interno di un ambiente domestico in quanto gli arredi, le finestre e i rumori (es. tv accesa) comportano notevoli disturbi alle rilevazioni, specialmente se il sensore è posto su un robot in movimento.

1.3.3 I vantaggi di un sistema multisensoriale

Fondere dati provenienti da molteplici sensori fornisce vantaggi rispetto a dati ricavati da un singolo sensore.

Innanzitutto, se vengono utilizzati più sensori identici (ad esempio si utilizzano più radar identici per rilevare un oggetto in movimento), combinando le osservazioni si ricaveranno valutazioni di posizionamento e velocità del target più precise.

Un ulteriore vantaggio deriva dall'utilizzo di un diverso posizionamento relativo dei sensori così da migliorare il processo di osservazione.

Per esempio, due sensori che misurano la direzione angolare di un oggetto vengono utilizzati unitamente per acquisire dati i quali verranno elaborati per determinare la posizione del medesimo attraverso triangolazione.

Nel caso in cui i dati acquisiti risultino sovrapponibili (ad esempio nel caso in cui due sensori misurino lo stesso fenomeno fisico) allora i dati primari potranno essere combinati direttamente.

Tecniche di fusione di dati primari coinvolgono tipicamente metodi di valutazione classici come l'utilizzo del Filtro di Kalman.

Al contrario, se i dati del sensore non sono sovrapponibili debbono essere fusi a livello di *feature/state* o decisionale. La fusione a *feature-level* coinvolge l'estrazione di *feature* rappresentative dai dati dei sensori. Nel caso di fusione a livello di *feature* di multisensori, queste sono estratte dalle rilevazioni e combinate in una singola e concatenata *feature*, la quale sarà il dato in ingresso per le tecniche di riconoscimento di *pattern* come le reti neurali, algoritmi di raggruppamento, o metodi di *template*. La fusione a livello decisionale combina informazioni acquisite da sensori successivamente alla preliminare determinazione di caratteristiche dell'entità in oggetto come la sua locazione o i suoi attributi.

Per quanto riguarda il caso specifico in esame, nei sistemi di rilevamento della presenza è di uso comune l'accoppiamento tra i PIR e i sensori ToF (Time of Flight), ovvero sensori che sfruttano il tempo di volo tra andata e ritorno del segnale che parte dall'emettitore e torna al ricevitore.

La combinazione serve sia a rendere capace il sistema di rilevare la distanza della persona in movimento (oltre alla "semplice" presenza e direzione date dai PIR) sia a ridurre il numero di *false detections*.

L'informazione basata su un singolo sensore è spesso grossolana e inaffidabile. L'utilizzo di più sensori aumenta l'accuratezza superando gli svantaggi del singolo, con, di conseguenza, un costo più elevato.

Nella Figura 15 si evidenziano i campi visivi dei due sensori con le relative direzioni preferenziali e non di rilevazione.

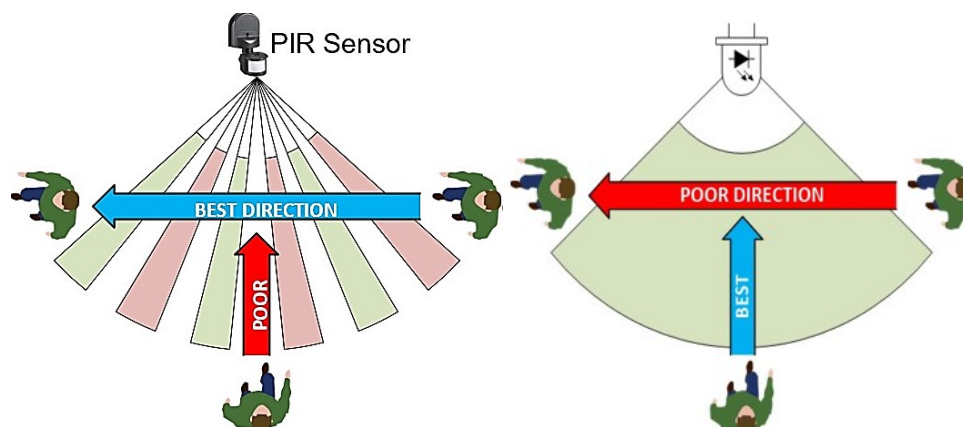


Figura 15: FOV+direzione di rilevazione del PIR; FOV+direzione di rilevazione dell'ultrasuono

La presenza della persona è rilevata quando il moto è in direzione laterale piuttosto che longitudinale rispetto al PIR per la maggior sensibilità di quest'ultimo in una direzione piuttosto che nell'altra dato il funzionamento precedentemente esposto.

La distanza è invece rilevata dal sensore ToF ad ultrasuoni che calcola il tempo tra l'emissione e la riflessione dell'onda. Al contrario del PIR, la misurazione ottimale è fatta dal sensore quando la persona si muove in direzione longitudinale rispetto al sensore piuttosto che laterale.

1.4 Elaborazione di dati multidimensionali

1.4.1 Data Integration

Ci sono, in generale, due possibilità di estrarre informazioni da rumorose misurazioni multidimensionali. Il primo, chiamato *Data Integration*, utilizza ogni insieme di dati raccolti da un singolo sensore, per ottenere una stima ottimale di qualche stato desiderato. Poiché ci sono più sensori, e quindi più set di dati, si potrebbero usarli per aumentare la conoscenza dello stato e per fornire una stima migliore. Tuttavia, Data-Integration ignora questa possibilità ed elabora da solo ogni set di dati del sensore. Nella Figura 16 viene illustrato il flusso di informazioni, tipico dell'integrazione dei dati [16].

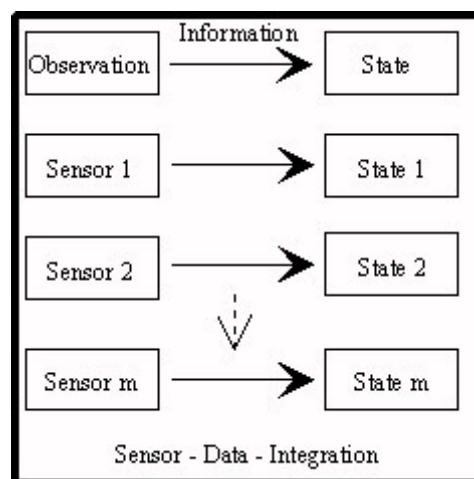


Figura 16: Data Integration

Riassumendo per punti principali la *Data Integration*:

- ogni set di dati dei sensori viene elaborato da solo
- ulteriori informazioni provenienti da altri sensori vengono rifiutate
- il guasto del sensore porta alla perdita della stima dello stato appartenente a queste misurazioni
- estrazione non ottimale di informazioni dalle misurazioni disponibili

Questo concetto di elaborazione dei dati, sebbene applicato in molti casi pratici, non fornisce stime ottimali, a causa dello spreco di informazioni aggiuntive nelle misurazioni in più.

1.4.2 Data Fusion

Il concetto di *Data Fusion* attraverso l'utilizzo di multisensori è molto recente.

Le tecniche di *Data Fusion* combinano dati e informazioni provenienti da molteplici sensori per ottenere valutazioni più specifiche rispetto a quelle ottenibili usandone uno singolo. Per capire cosa si intende si può pensare a come gli umani e animali, con l'evoluzione, hanno sviluppato abilità che gli permettano di utilizzare molteplici sensi per ottenere un'informazione completa. Per esempio per valutare la qualità di una sostanza e la sua commestibilità, utilizzare solo la vista non permette una accurata valutazione, ma combinando vista, tatto, odore, e sapore la valutazione sarà molto più precisa.

La tecnologia del *Data Fusion* è rapidamente avanzata da una raccolta non omogenea di metodi differenti ad una vera e propria disciplina ingegneristica con una standardizzazione della terminologia, un insieme di tecniche matematiche robuste e principi di progettazione di sistema stabiliti.

Le informazioni raccolte possono essere in parte ridondanti ma certamente non superflue. La strategia principale è quella di elaborare i dati di misura multidimensionali effettivi, forniti nel vettore di misurazione, in una sola volta, e trovare la combinazione ottimale per produrre la migliore stima dello stato possibile. Pertanto, è necessario combinare le misurazioni e le variabili di stato a causa delle leggi fisiche [16].

La Figura 17 mostra il flusso di informazioni, molto maggiore rispetto al *Data Integration*.

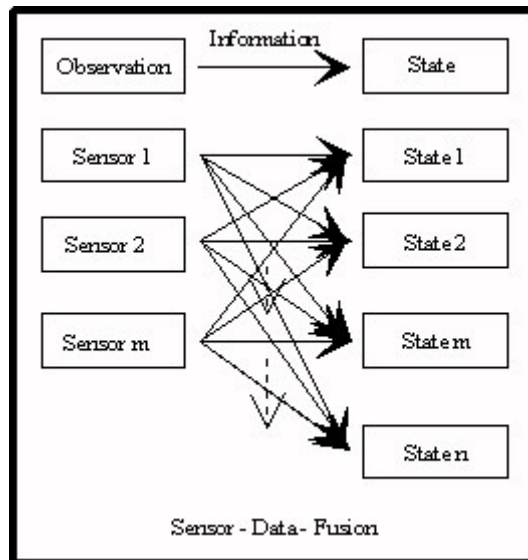


Figura 17: Data Fusion

Riassumendo i punti principali del *Data Fusion*:

- il vettore di misura completo viene elaborato contemporaneamente
- ulteriori informazioni (parzialmente ridondanti) provenienti da altre misurazioni vengono utilizzate per:
 - migliorare le stime dello stato
 - aumentare la dinamica delle stime dello stato

Capitolo 2: materiali e metodi

2.1 Il robot Misty II

Per la realizzazione del progetto GUARDIAN, di cui si è già parlato nel capitolo 1 (paragrafo 1.2 Obiettivo), il robot scelto è Misty II (Enhanced Edition), un robot sociale dotato di numerose funzioni e sensori con la possibilità di essere costantemente aggiornato e migliorato con ulteriori software, in modo da potenziarne la capacità di elaborare e registrare dati, e hardware, ad esempio sensori non presenti sul robot o accessori per aggiungere funzionalità pratiche (braccio di presa personalizzato stampato in 3D, carrello da porre sul retro di Misty II per il trasporto di “merci” di piccole-medie dimensioni...).

L'azienda produttrice fornisce modelli CAD per il guscio del robot, così come per diverse parti "vuote" che possono essere facilmente costruite per molti dei suoi punti di attacco (come le prese del braccio, il pannello della testa e l'attacco del rimorchio).

Attualmente la versione Enhanced di Misty II è contraddistinta dalle caratteristiche principali riassunte nei seguenti punti e nella Figura 18:

- fotocamera ad alta risoluzione centrata nella visiera per scattare foto e registrare video e con la funzionalità integrata di rilevamento facciale. Utile per creare una varietà di abilità di saluto, conversazione e sicurezza;
- 3 microfoni a campo lontano per registrare l'audio e ottenere informazioni posizionali sui suoni nel suo ambiente. Inoltre, si può codificare Misty II per rispondere alla parola di attivazione "Hey, Misty" e far partire l'acquisizione vocale;
- 6 pannelli tattili capacitivi intorno alla testa: quattro nei quadranti della parte superiore, uno nel mento e uno nella maniglia sul retro. Misty II offre ampi pacchetti di espressioni e suoni per aggiungere personalità alle sue abilità. La personalità programmabile è una capacità indispensabile per il contatto con l'utente;
- 2 altoparlanti per riprodurre la voce o ascoltare musica;

- 8 sensori di prossimità (3 per la ricerca del tempo di volo davanti, 4 laterali rivolti verso il basso per rilevare ostacoli e bordi, 1 posteriore) + 4 sensori meccanici che si attivano quando Misty II urta un oggetto;
- facilmente espandibile, sia dal punto di vista meccanico che elettrico. Elettricamente, si possono espandere le sue capacità tramite le connessioni seriali USB e UART oppure si può utilizzare il *Misty Backpack* per Arduino;
- trasmissibilità dei dati acquisiti dai sensori a un dispositivo remoto;
- SLAM migliorata: capacità di mappare e navigare in uno spazio molto più ampio (150÷185mq) di quanto fosse possibile con la versione precedente.



Figura 18: sensori e caratteristiche di Misty II

2.2 Sensori PIR

Per la realizzazione del sistema di localizzazione passiva di persone integrato sul robot Misty II è stato scelto, in una precedente implementazione di sensori sul robot, il sensore piroelettrico HC-SR501 (Figura 19). Si tratta di un sensore digitale economico e semplice da interfacciare con la piattaforma di sviluppo hardware/software Arduino. Ne sono stati utilizzati 4, posti sulla testa del robot (1 frontale, 2 laterali e 1 posteriore) con un supporto provvisorio.

Quando viene rilevato il movimento all'interno del campo visivo del sensore, l'output è alto e fornisce una tensione pari a 3.3 V, quando invece non c'è movimento l'output rimane al livello basso corrispondente a 0 V. Le specifiche tecniche del sensore HC-SR501 sono riportate in Tabella 3.

Tensione operativa	5 ÷ 20 V
Tensione di output	0 ÷ 3.3 V
Campo visivo	110°
Diametro lente di Fresnel	23 mm
Sensibilità in profondità	3 ÷ 7 m
Tempo di warm-up	60 s
Tempo di delay	2.5 s ÷ 5 min
Temperatura di lavoro	-15 ÷ 70 °C
Arduino compatibile	SI

Tabella 3: scheda tecnica del sensore HC-SR501



Figura 19: sensore PIR HC-SR501

2.3 Sensori a ultrasuoni

Tra i possibili modelli di sensore a ultrasuoni presenti sul mercato, dopo un confronto tra le schede tecniche (soprattutto l'attenzione è stata posta sull'ampiezza del FOV e sulla tensione operativa di 5V disponibile sul robot) e tra i prezzi dei sensori che rispondevano alle necessità del progetto, il sensore scelto è stato l'SRF10 (Figura 20).

L'SRF10 è un sensore ad ultrasuoni miniaturizzato che nonostante le sue ridotte dimensioni ha delle prestazioni eccellenti, riesce ad individuare ostacoli fino ad una distanza di 11m (regolando il campo visivo si può aumentare/diminuire la distanza di rilevamento massima a seconda delle proprie necessità in termini di ampiezza del FOV).

Grazie alla presenza di un potente microcontrollore, tutte le funzioni di rilevamento e calcolo sono gestite direttamente dal sensore. Le specifiche tecniche dell'SRF10 sono riportate nella Tabella 4:

Tensione operativa	5 V
Corrente operativa	15 mA ÷ 3 mA Standby
Frequenza	40 kHz
Portata	3cm ÷ 11m
Campo visivo	Max 72°
Max analogue gain	Variabile da 40 a 700 in 16 steps
Unità	Distanza in μ S, mm o pollici
Comunicazione	Protocollo I2C
Dimensioni	32 x 15x H 10mm
Arduino compatibile	SI

Tabella 4: scheda tecnica del sensore SRF10

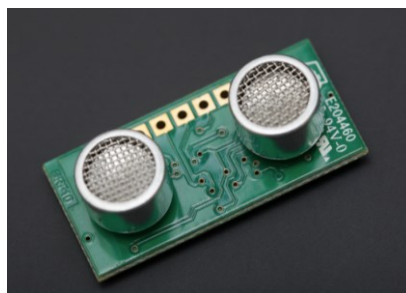


Figura 20: sensore a ultrasuoni SRF10

2.3.1 Protocollo I2C

I²C, abbreviazione di Inter Integrated Circuit, è un sistema di comunicazione seriale bifilare utilizzato tra circuiti integrati.

Il classico bus I²C è composto da almeno un *master* ed uno *slave*, come in Figura 21

Trattandosi di un protocollo seriale i vantaggi che offre sono quelli di impegnare solo due linee (e quindi due pin dei dispositivi che lo usano).

Il protocollo hardware dell'I²C richiede due linee seriali di comunicazione:

- **SDA** (*Serial DATA*) per i dati
- **SCL** (*Serial CLOCK*) per il clock

Vanno aggiunte una connessione di riferimento detta GND e una linea di alimentazione, V_{cc} , a cui sono connessi i resistori di *pull-up*.

L'I²C ha 7 bit di indirizzo (B1 è il bit più significativo, B7 il meno significativo) e quindi 128 possibili indirizzi diversi (detti nodi) [17].



Figura 21: struttura del protocollo I2C

Esempio di trasferimento dati (Figura 22):

S è lo START bit (la linea SDA viene forzata bassa dal *master* mentre il clock SCL è a livello logico alto). Segue, quando SCL è basso il settaggio del primo bit B_1 (in blu) la commutazione di SCL indica che il dato è stabile e può essere letto (verde). La stessa procedura prosegue fino all'ultimo bit B_N . La transazione termina con lo STOP bit (P) in giallo in cui SDA viene commutato da basso ad alto quando SCL è alto.

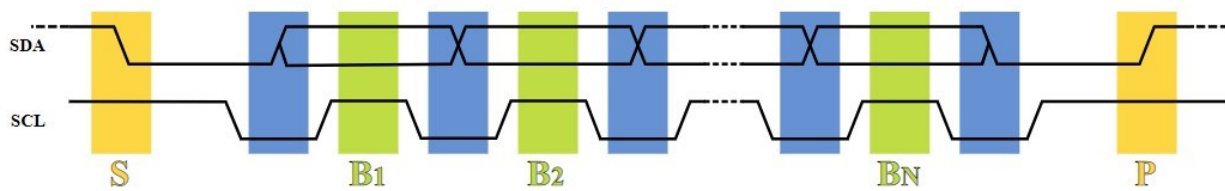


Figura 22: esempio di temporizzazione del segnale

2.4 Sviluppo del progetto

Il lavoro svolto in questa tesi parte da un progetto già avviato per rendere Misty II capace di localizzare e captare i movimenti e la distanza di una persona in un ambiente chiuso. L'obiettivo è quello di proseguire e completare l'analisi sfruttando le implementazioni fatte precedentemente, andando ad ampliare le possibilità del robot con nuovi sensori e nuovi algoritmi di apprendimento.

2.4.1 Analisi dei dati sulla direzione di movimento

Il problema dell'analisi dei dati dei PIR sta principalmente nel distinguere le attivazioni corrette da quelle errate. Queste ultime sono frequenti nei sensori piroelettrici e rappresentano il loro principale punto debole. Sono dovute generalmente a flussi d'aria o a riflessioni della luce sulle superfici attorno al robot che rappresentano dei gradienti termici capaci di far attivare il PIR quando la persona non è presente. Questo genera sequenze di attivazione spesso apparentemente insensate, specialmente se si conosce a priori il percorso della persona ma dai dati non si riesce ad evincerlo.

Da qui la necessità di trovare la maniera migliore di affrontare tale problematica. La soluzione, almeno in parte, è rappresentata dall'algoritmo di apprendimento *Decision Tree* che, se ben impostato, rende il robot capace di compiere scelte sulla veridicità o meno di ciò che i suoi sensori rilevano in base all'allenamento fornitogli dall'algoritmo stesso.

Nella pratica è stato realizzato un file .csv nel quale sono state riportate terne di sequenze di attivazione possibili (alle quali è stato assegnato un valore 100) e terne sicuramente impossibili (in quanto per verificarsi la persona avrebbe dovuto scavalcare il robot, alle quali è stato assegnato il valore 1000). I valori 100 e 1000 non hanno un significato specifico ma servono solo a distinguere i due casi in termini numerici senza utilizzare 0 e 1 che avrebbero provocato confusione.

In Figura 23 un esempio di alcune delle terne scritte.

current	neighborhood1	neighborhood2	Result
2	2	2	100
2	3	3	100
2	2	3	100
2	4	4	100
2	2	4	100
2	1	1	1000
2	2	1	1000
2	1	2	1000
3	3	3	100
3	1	1	100
3	3	1	100
3	2	2	100
3	3	2	100
3	4	4	1000
3	3	4	1000
3	4	3	1000
1	1	1	100

Figura 23: alcune delle terne per allenare il robot

Le terne sono poi state date all’algoritmo come allenamento, che poi, in base ai dati ricavati dalle acquisizioni, potrà riuscire a distinguere se una sequenza non facente parte di quelle scrittegli è corretta o meno.

La prima parte del codice seleziona automaticamente e casualmente un 75% di sequenze da usare come allenamento e un 25% da usare come verifica.

Da questa elaborazione si è ottenuto che su 10 test, 8 predetti corrispondono al vero e solo 2 non sono stati previsti in maniera esatta, ottenendo appunto l’88% di accuratezza.

In Tabella 5 si riportano i risultati dell’algoritmo *Decision Tree*.

	Precision	Recall	F1-score
Accuracy			0.88
Macro avg	0.83	0.92	0.85
Weighted avg	0.92	0.88	0.88

Tabella 5: risultati del *Decision Tree*

La Figura 24 mostra la matrice dei risultati predetti dall’algoritmo in confronto con quelli corretti. Solo 1 volta su 8 l’algoritmo prevede in modo errato (il termine in posizione [1,2]).

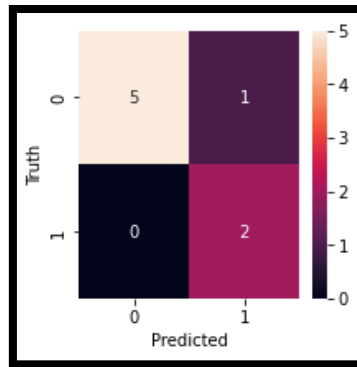


Figura 24: confusion matrix ottenuta dal Decision Tree

Una volta allenato l’algoritmo si è passati allo studio delle acquisizioni precedentemente realizzate, partendo dalla ricerca della corretta modalità di filtraggio delle false attivazioni causate dall’elevata sensibilità dei PIR.

Osservando i dati e naturalmente conoscendo a priori il percorso fatto dal soggetto durante i test (giro completo attorno al robot), si è notata la presenza di PIR attivi sicuramente impossibili all’interno di sequenze di attivazione di uno stesso PIR correttamente in funzione.

Per “PIR attivi impossibili” si intende che nella sequenza si presentava un sensore attivo dalla parte opposta rispetto a quella corretta in quel momento, come se il soggetto avesse scavalcato il robot.

Per semplificare e diminuire la mole di dati è stato creato un vettore, chiamato *activation*, che contenesse un’unica volta i PIR attivi (scegliendo come PIR attivo quello maggiormente presente) all’interno dello stesso secondo.

Dalla Figura 25 si può notare come al secondo 47 fossero attivi ben 3 PIR diversi contemporaneamente, dunque l’algoritmo ha selezionato quello maggiormente presente (in questo caso l’1) un’unica volta e lo ha posizionato al corrispondente secondo nel vettore *activation*.

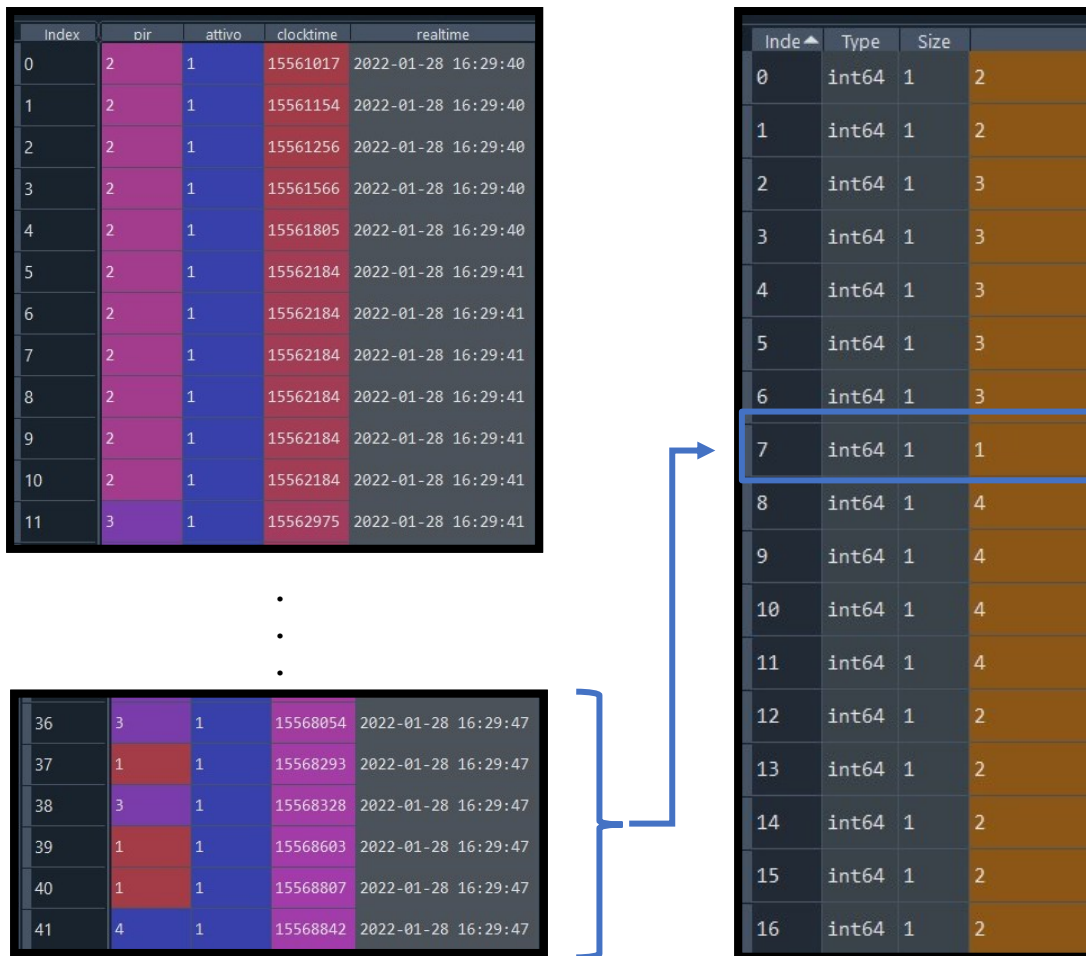


Figura 25: creazione del vettore activation a partire dal dataframe

Con questo meccanismo di filtraggio si sono ottenuti vettori con sequenze di attivazioni che ben corrispondevano ai tragitti effettuati attorno al robot in fase di testing.

Ora utilizzando l'allenamento impostato inizialmente e facendo in modo che l'algoritmo prendesse di 3 secondi in 3 secondi le sequenze dal vettore *activation*, attraverso un *ciclo for* sono stati plottati i percorsi con delle frecce su mappe create appositamente.

In Figura 26 si riportano le mappe ottenute da una delle acquisizioni. La sequenza di attivazione inizia dal plot in basso a destra e si conclude, andando in senso antiorario, nel plot in basso a sinistra.

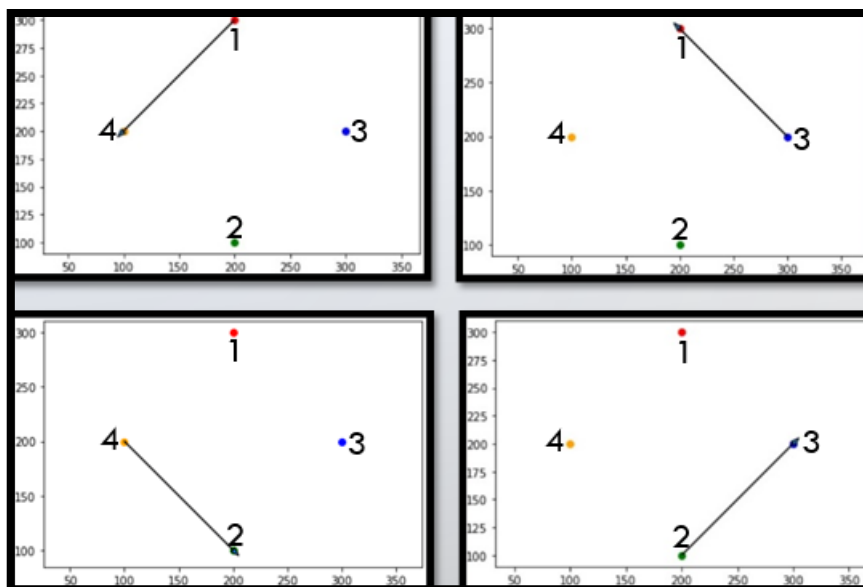


Figura 26: mappatura del percorso ottenuta dall'elaborazione dei dati dell'acquisizione 1.1

2.4.2 Progettazione CAD di un copricapo di supporto ai PIR e agli ultrasuoni

Come già detto, Misty II non è dotato di sensori PIR e di conseguenza questi sono stati implementati sulla testa del robot utilizzando un supporto realizzato in cartone che potesse sostenerli.

Accorgimento necessario alla migliore riuscita delle acquisizioni è stato il restringimento del FOV dei PIR da 110° a 94° in modo da allontanare il punto di intersezione tra i campi visivi di due PIR contigui.

Tuttavia la soluzione provvisoriamente utilizzata, essendo precaria, doveva essere sostituita con un supporto più robusto e stabile.

Dunque a partire dalla forma della testa di Misty II, resa disponibile sul sito in formato .par (Figura 27), è stato realizzato, mediante l'utilizzo del software di progettazione ibrida 2D/3D Solid Edge, un copricapo che si adattasse alla particolare curvatura del robot che potesse poi fare:

- da supporto alle scatole appositamente disegnate per i PIR e per gli ultrasuoni;
- da contenitore per la *breadboard* e per i relativi cavi di collegamento a tutti i sensori e all'alimentazione.

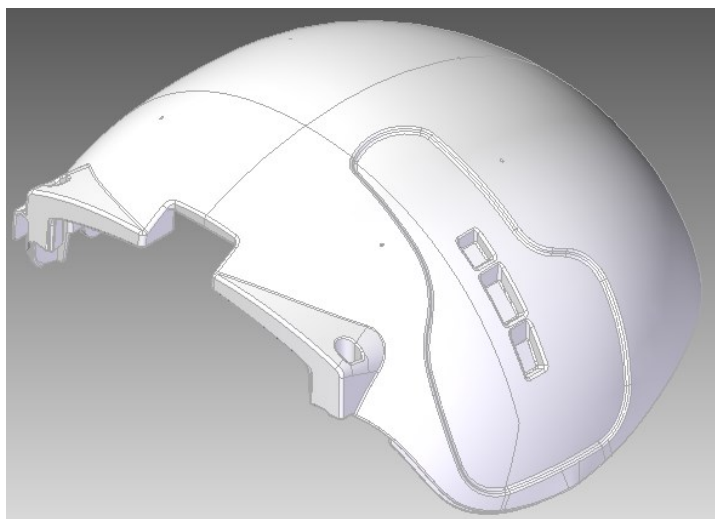


Figura 27: file.par del copricapo di Misty

La forma della testa è stata necessaria per ricavare la superficie con la stessa specifica curvatura dalla quale partire per il disegno del sostegno.

In Figura 28 la base per i portasensori da porre sulla testa del robot. Il pianale esterno serve da appoggio alle scatole porta-PIR e lo spazio interno è lasciato libero per ospitare la breadboard e i relativi cavi di collegamento.

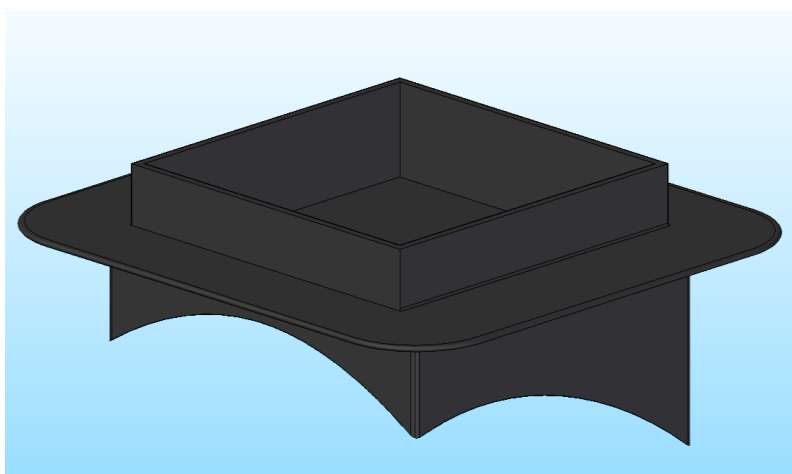


Figura 28: base per i portasensori

Al centro di ogni lato si posizionano le scatole porta-PIR (Figura 29) e al di sopra quelle porta-ultrasuoni (Figura 30). In questo modo ogni ultrasuono è riferito al PIR sottostante; il fatto che il contenitore dell'ultrasuono sia centrato rispetto al PIR fa sì che i campi visivi partano dallo stesso punto (seppur ad altezze leggermente differenti) e quindi che il FOV di 72° del sensore ToF sia contenuto simmetricamente all'interno del FOV di 94° del PIR.

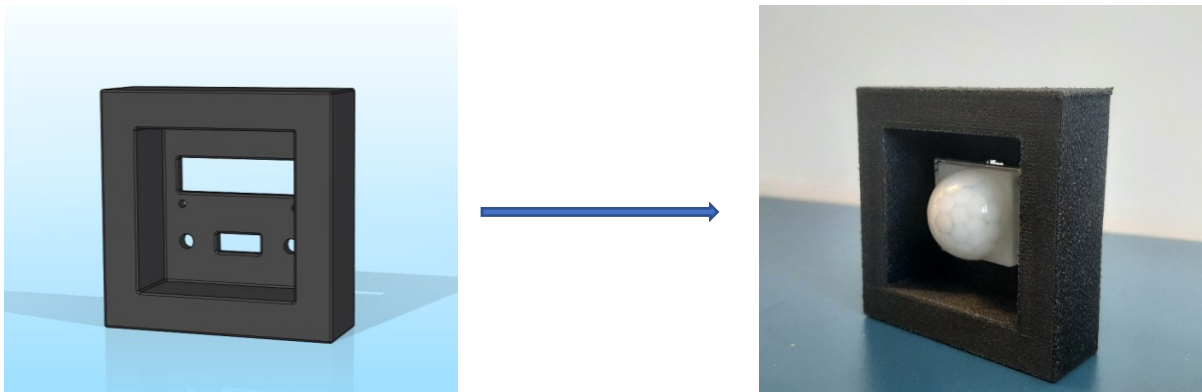


Figura 29: scatola porta-PIR in Solid Edge e stampata in 3D

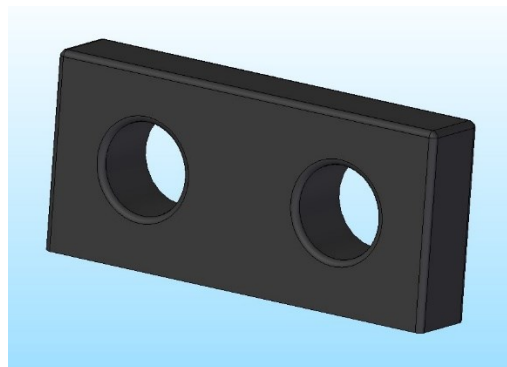


Figura 30: scatola porta-ultrasuoni

2.4.3 Protocolli di misura

Come già detto, i dati di cui si disponeva all'inizio derivavano da precedenti acquisizioni fatte con un unico protocollo di misura (giro completo attorno al robot) che mettesse in evidenza l'attivazione di tutti i PIR.

Una volta scritto e verificato il codice in funzione di questi dati era necessario validarlo anche per movimenti che fossero diversi dal solo giro attorno al robot in modo da simulare il più possibile il comportamento di una persona all'interno del proprio ambiente domestico.

Per l'acquisizione si è sfruttato il *database* MySQL nel quale andare a stoccare i dati provenienti dai sensori. Grazie alla rete Wi-Fi infatti, Misty può inviare le informazioni al database in tempo reale.

Dunque una volta creata un'apposita tabella per ogni PIR all'interno del *database*, si è passati all'effettuazione dei protocolli, premettendo che:

- per realizzare le prove sono stati tracciati i confini della stanza(2,40m x 3,30m) col nastro adesivo, mentre il robot è stato posto al centro della stessa;
- per i 3 protocolli le traiettorie (Figure 31,32,33) da seguire non sono state tracciate a terra col nastro appositamente, in modo da rendere libero il moto della persona e simulare una situazione reale;
- il test su ogni protocollo è stato effettuato 3 volte;
- il tempo e la data erano rilevati da un sensore “real time clock DS1307” in formato “year/month/day hour/minute/second”
- la velocità di camminata adottata era di circa 1Hz.

Protocollo n.1:

La persona si muove dall'angolo in alto a destra lungo tutta la parete finestrata, si ferma per 5 secondi, torna indietro fino al punto di partenza seguendo lo stesso percorso.

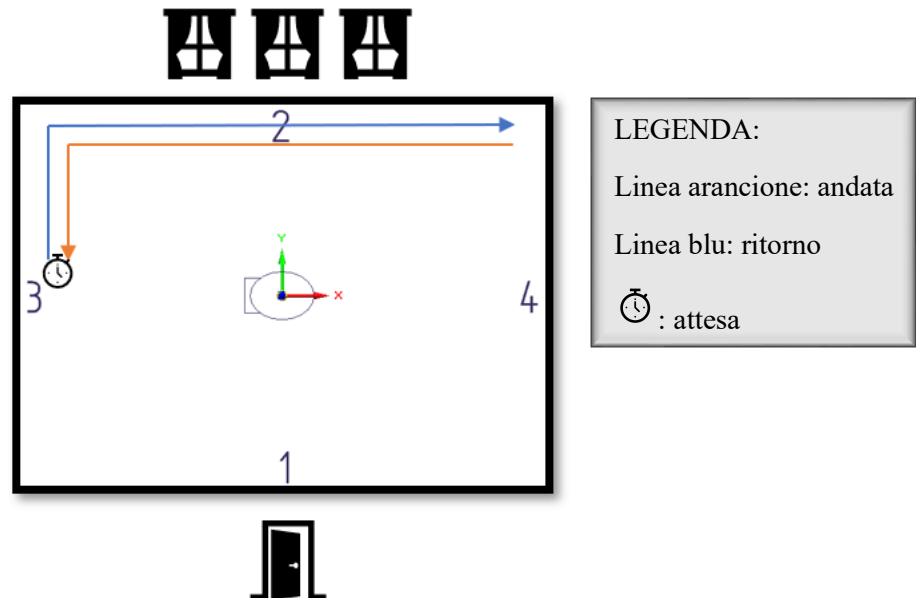


Figura 31: protocollo di misura n.1

Protocollo n.2:

La persona trascorre 3 min a sbrigare una faccenda (es. riporre i piatti in lavastoviglie) di fronte al PIR 2 e, terminata l'attività, percorre i due lati opposti alle pareti vetrate ed esce.

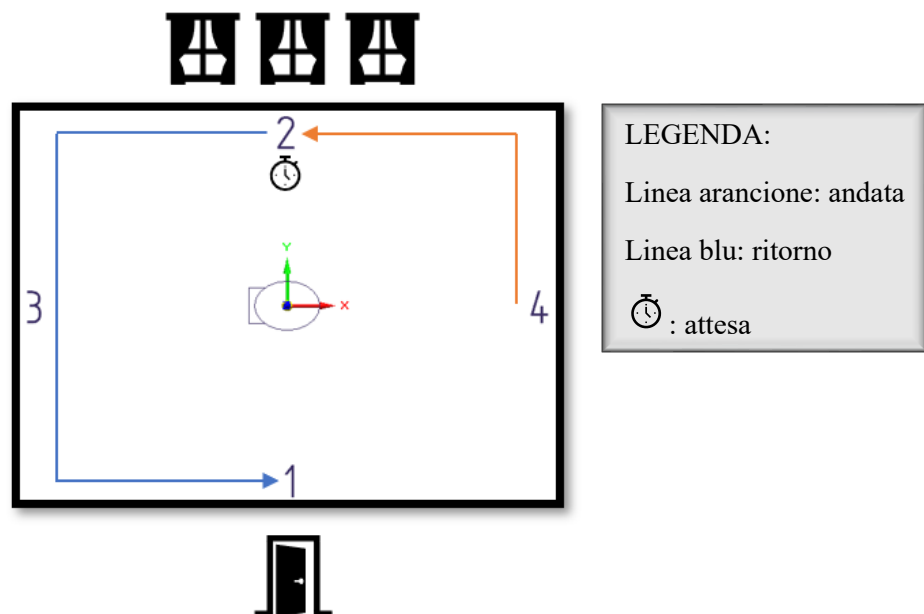


Figura 32: protocollo di misura n.2

Protocollo n.3:

La persona entra in stanza, la percorre lungo due lati e torna verso l'uscita passando al centro della stanza transitando molto vicino al robot.

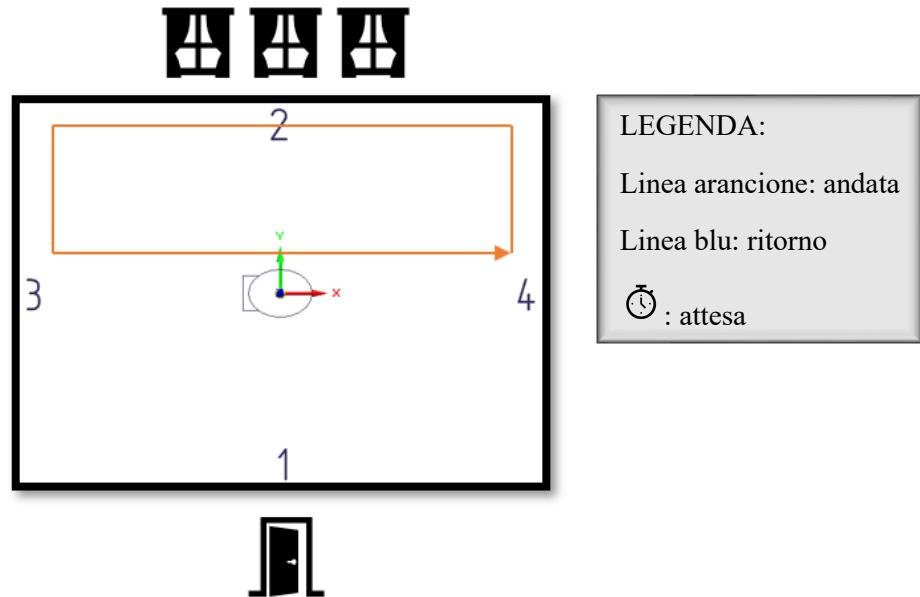


Figura 33: protocollo di misura n.3

2.4.4 Implementazione dei sensori a ultrasuoni

Terminato lo studio sulla localizzazione e sull'individuazione della direzione di moto di una persona fatto mediante l'utilizzo dei soli sensori PIR, mancava da realizzare l'altro obiettivo, ovvero il rilevamento della distanza della persona dal robot.

Per fare questo è stato utilizzato il sensore SRF10, già descritto al paragrafo 2.3.

Lo studio dell'implementazione di 4 sensori, uno per ogni PIR, è stata suddivisa in più step, realizzati mediante la scheda Arduino Leonardo ETH e una *breadboard* esterne (Figura 34), prima di effettuare il montaggio definitivo sul robot:

- STEP 0: realizzazione dei collegamenti necessari per la connessione del sensore alla scheda Arduino del robot, scrittura del codice per la lettura della distanza e test di funzionamento di ogni sensore;
- STEP 1: collegamento di 1 PIR e 1 ultrasuono per l'utilizzo in combinazione, scrittura del relativo codice e test di funzionamento;

- STEP 2: collegamento di 4 SRF10 dopo aver cambiato gli indirizzi di ognuno, scrittura del codice e verifica del funzionamento.

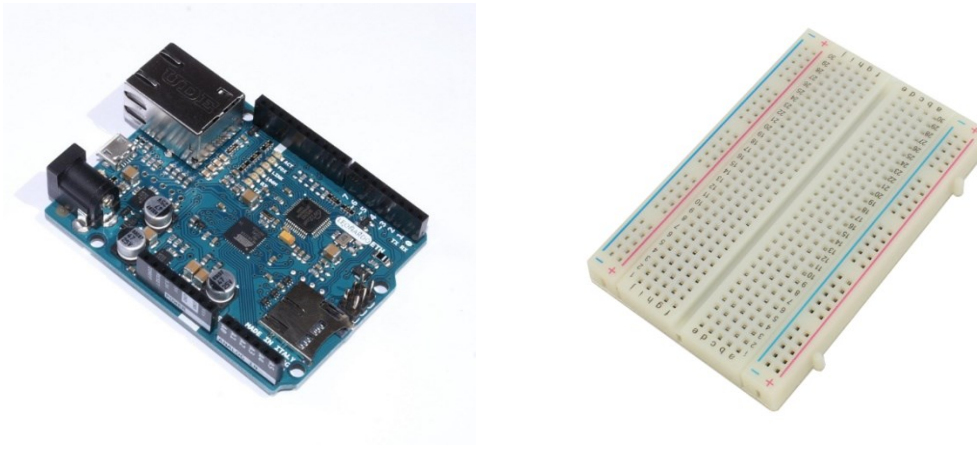


Figura 34: scheda Arduino Leonardo ETH e breadboard utilizzate per il test dei sensori

2.4.4.1 STEP 0

Innanzitutto il sensore acquistato funziona mediante protocollo I^2C , pertanto è stato necessario effettuare una ricerca sulla logica di controllo e sui conseguenti collegamenti necessari (Figura 36) da realizzare sulla *breadboard* e sulla scheda Arduino. Una volta connessi i pin (Figura 37) e le due resistenze di *pull-up* (che hanno lo scopo di portare il valore della tensione di un determinato pin ad un valore alto) da $1.8k\Omega$ (Figura 35), si è passati alla scrittura del codice mediante il Software Arduino IDE per vedere *plottate* nel monitor seriale le letture effettuate del sensore e verificarne la correttezza.

Nel codice è stata utilizzata la libreria *Wire* che gestisce questa tipologia di sensori che seguono il protocollo I^2C ; inoltre per un corretto utilizzo dell'ultrasuono e per una più semplice comprensione delle informazioni acquisite sono state *setate* le seguenti impostazioni attraverso il codice:

- `Wire.beginTransmission(112)` anziché 224 come specificato nel *datasheet*;
- `Wire.write(byte(0x5D))` per impostare il range di misura del sensore fino a 4m anziché 11 come da default in modo da ricevere l'informazione più velocemente e far partire prima l'acquisizione;
- `Wire.write(byte(0x51))` in modo che fossero *plottate* le misure in cm anziché in inches come da default;
- `Delay(70)` in quanto vengono raccomandati almeno 65 millisecondi di intervallo tra un impulso e un altro

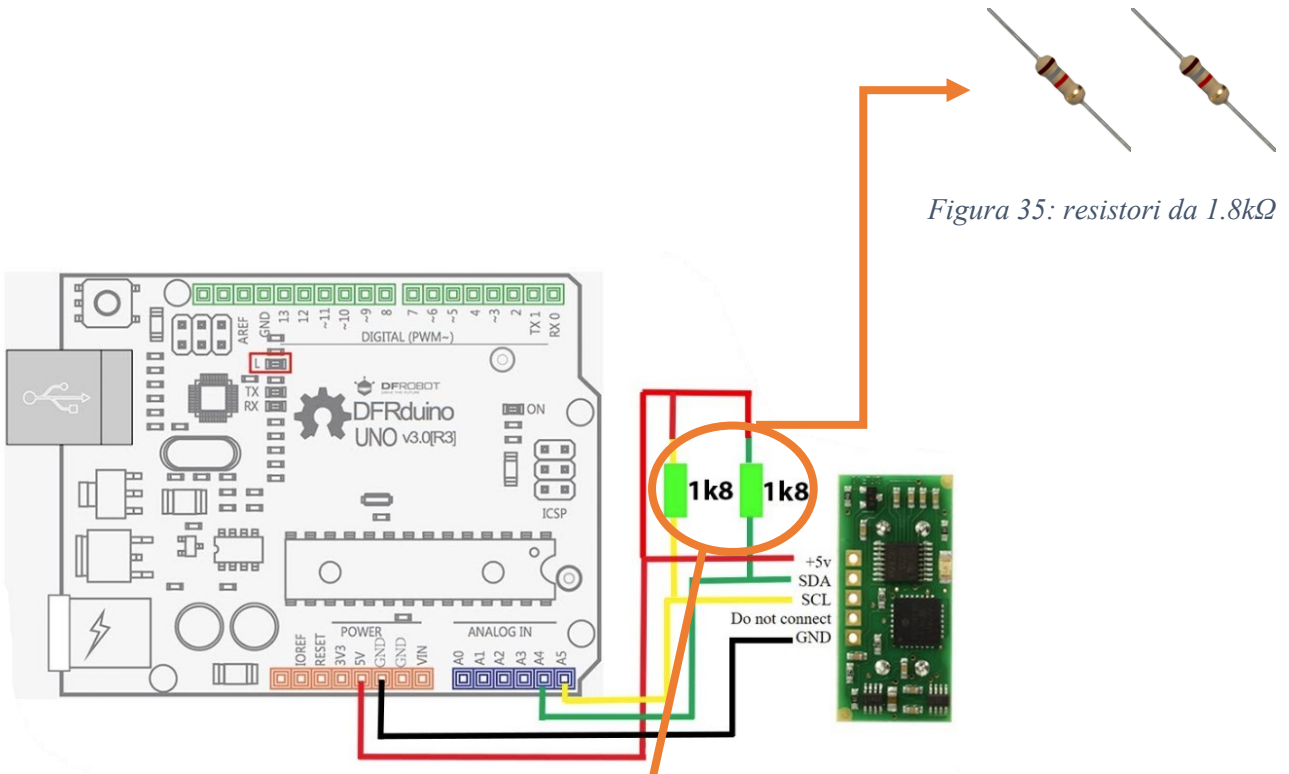


Figura 35: resistori da 1.8kΩ

Figura 36: diagramma di connessione scheda Arduino-sensore a ultrasuoni

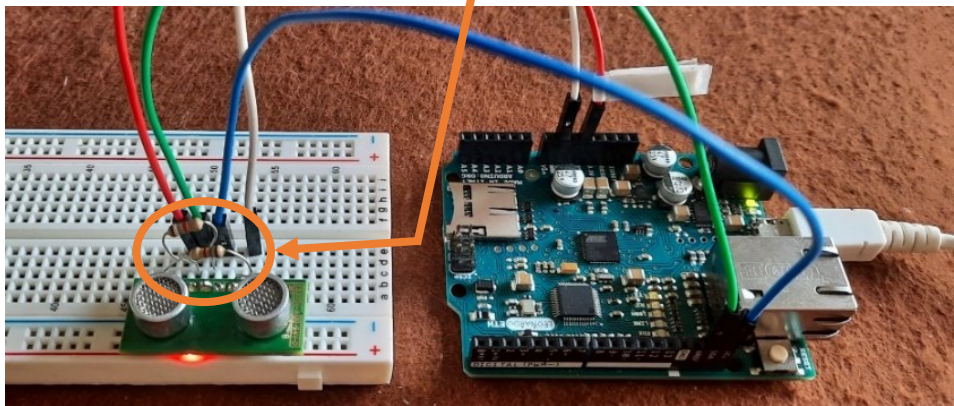


Figura 37: sensore a ultrasuoni montato sulla breadboard con scheda Arduino esterna

2.4.4.2 STEP 1

Una volta effettuati il collegamento e la verifica di ogni sensore a ultrasuoni, lo step successivo è stato quello di montare anche un PIR (Figura 38) insieme al sensore installato nello step 1.

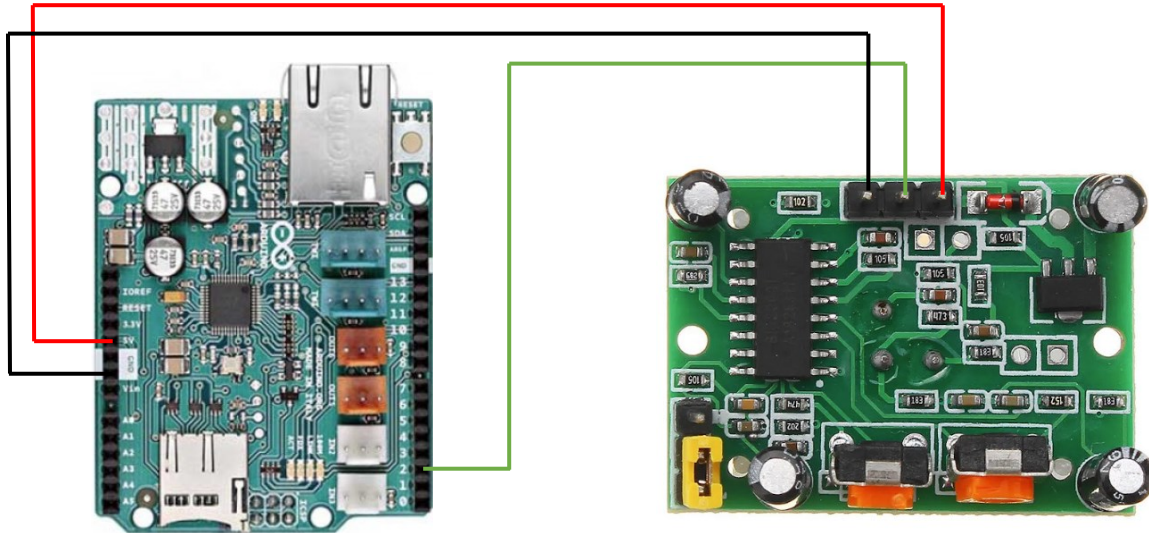


Figura 38: diagramma di connessione scheda Arduino – PIR HC-SR501

L'utilizzo di sensori multipli e il conseguente processamento dei dati attraverso il *Data Fusion*, di cui si è parlato al paragrafo 1.4.2, entra in gioco in questo step in cui l'intenzione è quella di procedere con un'attivazione sequenziale dei sensori.

Il PIR infatti, avendo un FOV leggermente superiore all'ultrasuono, “vede” per primo la presenza della persona e la segnala visivamente con un LED. A quel punto il LED, che funge da lasciapassare per l'alimentazione, va in LOW e appunto consente alla corrente di raggiungere il sensore ultrasonico che fino a quel momento era rimasto spento.

Quest'ultimo, entrando in funzione, misura la distanza della persona dal robot.

Per praticità e per testare il funzionamento del codice, il montaggio (in Figura 39) è stato fatto sempre mediante una breadboard e una scheda Arduino esterne. In questo caso il PIR, rilevando un movimento, attivava l'ultrasuono, il quale misurava, come nello step 1, la distanza tavolo-soffitto.

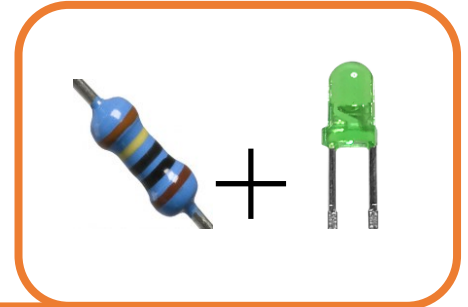
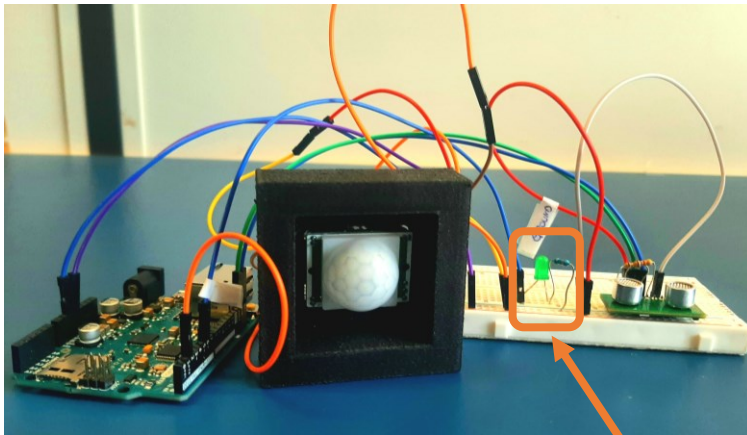


Figura 39: collegamento completo PIR + ultrasuono e dettaglio del LED con la propria resistenza

2.4.4.3 STEP 2

Terminata l'implementazione della combinazione PIR + ultrasuono, lo step 3 prevede la connessione delle altre 3 coppie di sensori e la verifica del loro funzionamento.

In realtà la prima e più evidente problematica si è presentata nella connessione del secondo ultrasuono in quanto la scheda Arduino dispone solo di 1 ingresso SCL e di 1 ingresso SDA.

La soluzione si è raggiunta andando a modificare l'*address* di ogni sensore.

Per cambiare l'indirizzo di ogni SRF10, questo dev'essere connesso singolarmente con la scheda; dopodiché è necessario scrivere la sequenza di comandi, mostrata nell'esempio che segue, nell'ordine corretto. Ad esempio: per cambiare l'indirizzo da 0xE0 (che è quello di default di tutti i sensori) a 0xF2, bisogna scrivere: 0xA0, 0xAA, 0xA5, 0xF2). Una volta fatto ciò, il sensore, mediante un flash lungo e un certo numero di flash corti, indicherà l'indirizzo acquisito [18].

In Figura 40 si mostrano gli *addresses* a disposizione; per un corretto funzionamento ogni sensore deve avere indirizzo diverso dagli altri.

Address Decimal	Hex	Long Flash	Short flashes
224	E0	1	0
226	E2	1	1
228	E4	1	2
230	E6	1	3
232	E8	1	4
234	EA	1	5
236	EC	1	6
238	EE	1	7
240	F0	1	8
242	F2	1	9
244	F4	1	10
246	F6	1	11
248	F8	1	12
250	FA	1	13
252	FC	1	14
254	FE	1	15

Figura 40: indirizzi possibili degli ultrasuoni

Terminate le modifiche agli indirizzi si è passati al collegamento tenendo conto della mancanza di porte SCL e SDA sopra evidenziata.

Per ovviare a ciò sono stati collegati i pin dalle porte in questione della scheda Arduino alla *breadboard* e in parallelo a questi i pin di ogni sensore. In questo modo (Figura 41) si è realizzato quanto già visto in Figura 21, ovvero un master (la scheda Arduino) e più slaves (in Figura 41 sono rappresentati solo due ultrasuoni poiché il principio di funzionamento per 4 è lo stesso). Per rendere la rappresentazione più semplice e focalizzare l'attenzione sull'aspetto dell'ampliamento delle porte per il protocollo I²C si sono trascurati gli altri collegamenti (es. GND e VCC).

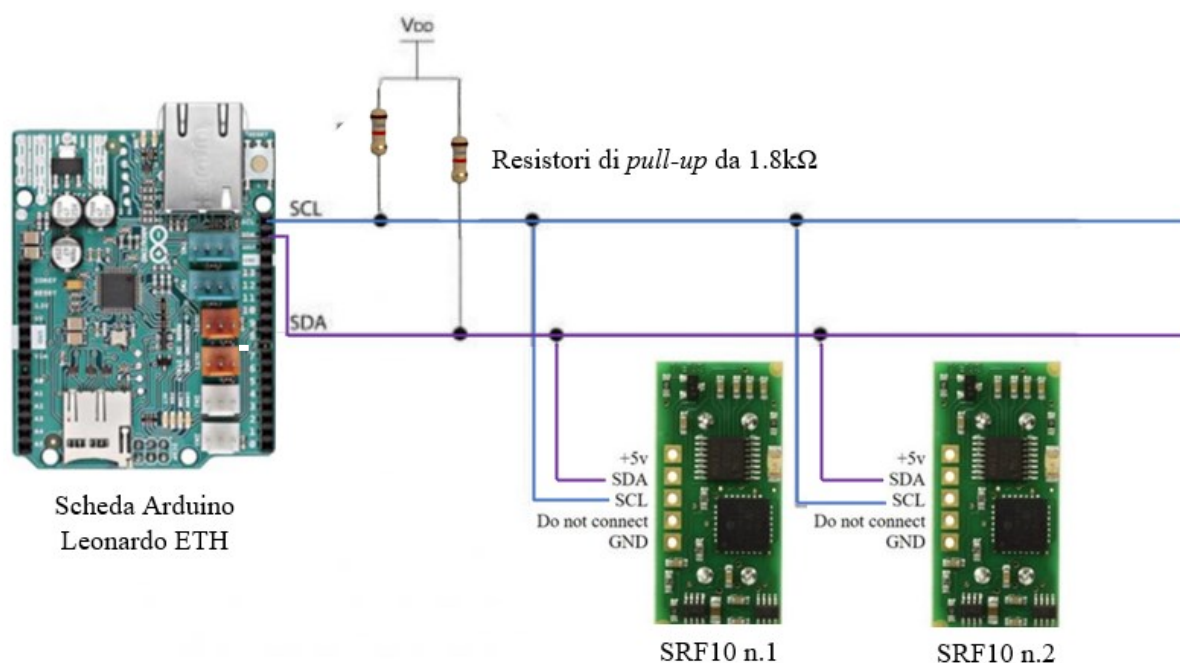


Figura 41: schema di collegamento degli ultrasuoni alla scheda Arduino

Capitolo 3: risultati e discussione

3.1 Risultati delle acquisizioni ottenute con i PIR

3.1.1 Risultati protocollo 1

Dal seguente protocollo non sono emerse le problematiche legate alla sensibilità dei PIR. Infatti il percorso si è svolto appositamente su un lato nel quale era presente una scaffalatura vetrata e su un lato completamente finestrato. Di conseguenza le radiazioni infrarosse emesse dal soggetto in movimento, pur riflettendo sui vetri, non inficiavano l'attivazione dei PIR corretti.

Come si pensava i risultati dell'algoritmo sono quasi perfettamente corrispondenti al percorso eseguito, a meno del terzo plot del secondo test che dà una freccia in senso contrario rispetto a quello corretto, pur facendo riferimento ai PIR giusti (il 2 e il 3).

Per visualizzare i risultati si è utilizzato il codice elaborato nella fase precedente alla realizzazione dei 3 protocolli, basato sui dati acquisiti eseguendo un giro attorno al robot, e si sono ottenuti i plot riportati in Figura 41 (si fa riferimento al plot del test 1).

In Tabella 6 sono riportate le attivazioni dei PIR per effettuare il confronto tra la sequenza reale e quelle *plottate* dall'algoritmo. Nell'ultima colonna c'è il rapporto plot corretti/plot totali per ogni test; la media di questi rapporti dà come risultato un'accuratezza dell'algoritmo nello stampare la sequenza corretta rispetto a quella effettivamente realizzata di circa l'88%, la stessa percentuale riportata in Tabella 5. Questo dimostra la congruenza tra i valori relativi al *Decision Tree* e i risultati in presenza di prove eseguite correttamente e senza pareti riflettenti dalla parte opposta del soggetto.

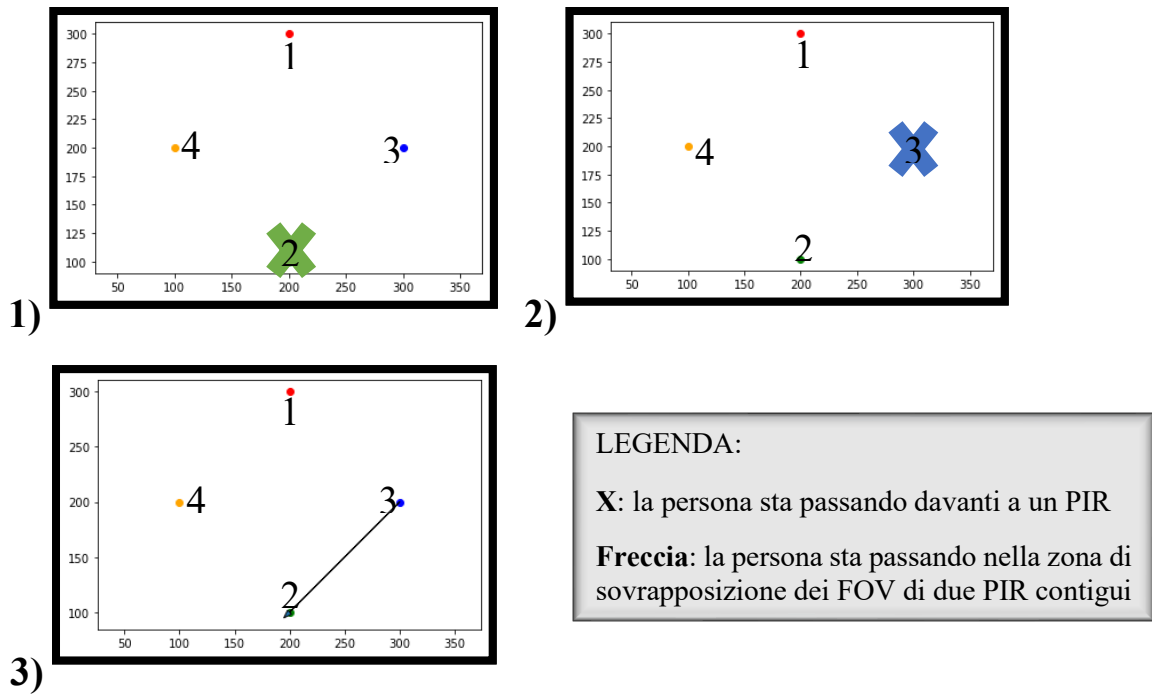


Figura 42: plot del protocollo 1, test 1

PROTOCOLLO 1	1^attivazione	2^attivazione	3^attivazione	Plot corretti/ Plot totali
Sequenza di PIR corretta	2	3	2	
Test 1	2	3	3→2	3/3
Test 2	2→3	3	2→3	2/3
Test 3	2→3	3→2	2	3/3

Tabella 6: risultati del protocollo 1

3.1.2 Risultati protocollo 2

Il secondo protocollo prevedeva innanzitutto un percorso più lungo in termini di distanza e anche la permanenza nella zona del PIR 2 per circa 3 minuti in modo da simulare una possibile attività svolta dal soggetto all'interno della casa. L'intervallo di tempo scelto è indicativo ed è servito unicamente a realizzare una prova che non sia solo il passaggio di fronte al PIR ma anche il perdurare di una situazione semi-statica sempre nel FOV di un unico sensore o al massimo nella zona di sovrapposizione di uno dei due PIR adiacenti.

In questo caso le problematiche legate alla conformazione della stanza sono state più evidenti.

La parete completamente finestrata e la scaffalatura vetrata riflettevano le onde infrarosse emesse dal soggetto in movimento e spesso facevano attivare i PIR esattamente dalla parte opposta rispetto a dove era effettivamente la persona. Nonostante questo, che si è potuto notare visivamente durante le prove grazie ai LED montati sulla *breadboard* e connessi ai sensori, l'algoritmo costruito appositamente per minimizzare il più possibile queste false attivazioni ha restituito dei buoni risultati.

In questo caso la media dei plot corretti/plot totali si abbassa a un valore dell'83%, abbassamento causato dalle cause precedentemente citate e comunque tollerabile.

In Figura 42 il plot relativo al test migliore, in questo caso il test 3.

In Tabella 7 i risultati di tutti i test riguardanti il protocollo 2.

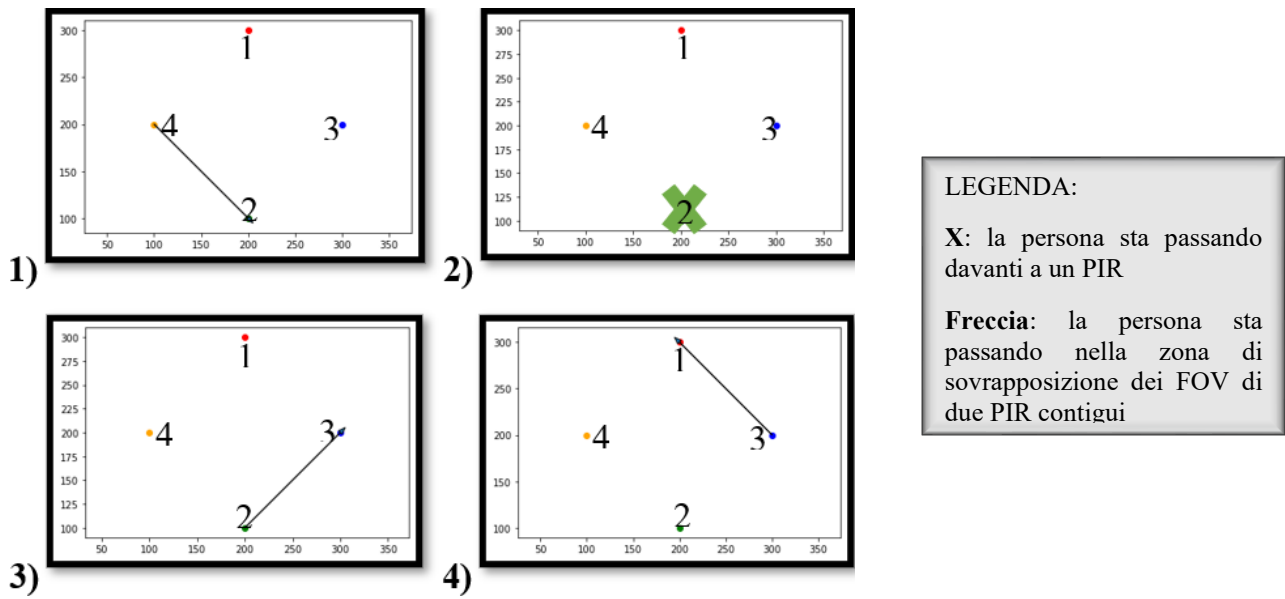


Figura 43: plot del protocollo 2, test 3

PROTOCOLLO 2	1^attivazione	2^attivazione	3^attivazione	4^attivazione	Plot corretti/ Plot totali
Sequenza di PIR corretta	4	2	3	1	
Test 1	3→1	2→3	3→1	1	3/4
Test 2	4	2	3	2→3	3/4
Test 3	4→2	2	2→3	3→1	4/4

Tabella 7: risultati del protocollo 2

3.1.3 Risultati protocollo 3

Il terzo protocollo prevedeva infine di effettuare un percorso che variasse la distanza dal robot in modo da analizzare la risposta dell'algoritmo a una situazione diversa non più solo in termini di direzione ma anche di distanza.

Quello che si può evincere dal percorso risultante in Figura 43 e dai valori della Tabella 8 (l'accuratezza data dalla media dei plot corretti/plot totali cala notevolmente al 66,7%) è che passando così vicino al robot spesso il PIR non fa in tempo ad attivarsi o addirittura, essendo il sensore posto a soli 35cm da terra, non riesce a "vedere" la persona poiché il FOV si trova all'interno del passo che il soggetto compie a brevissima distanza da Misty II.

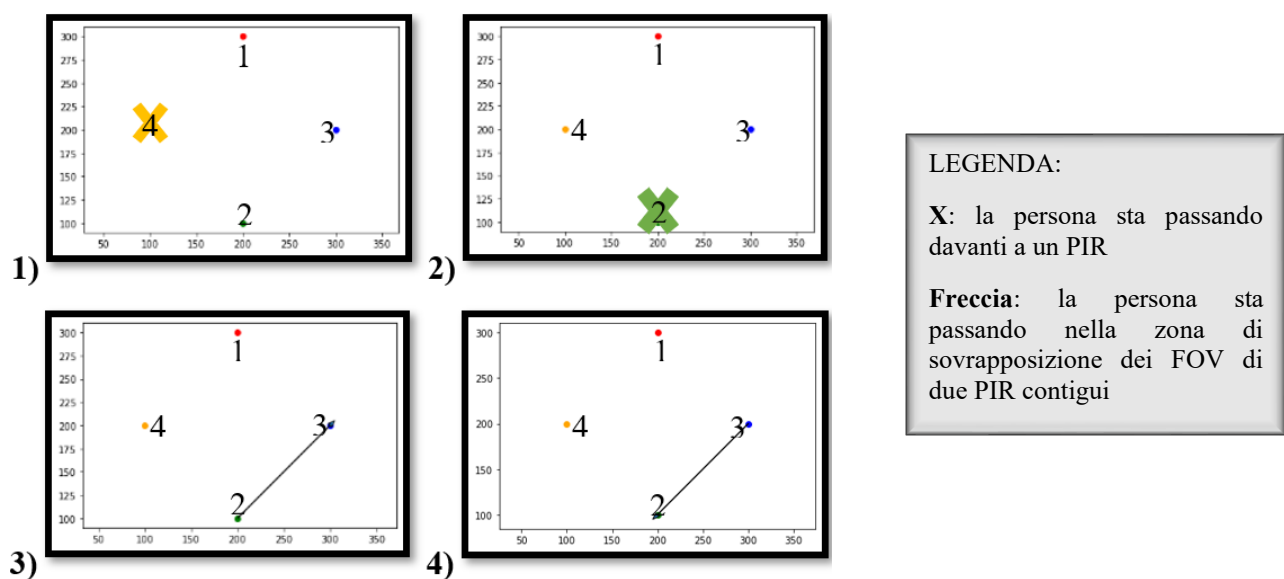


Figura 44: plot del protocollo 3, test 2

PROTOCOLLO 3	1^attivazione	2^attivazione	3^attivazione	4^attivazione	5^attivazione	Plot corretti/ Plot totali
Sequenza di PIR corretta	4	2	3	2	4	
Test 1	3→2	2	2→3	3→2	2	3/5
Test 2	4	2	2→3	3→2		4/5
Test 3	2	2	2→3		4	3/5

Tabella 8: risultati del protocollo 3

3.2 Conclusioni

Al termine di questo lavoro di tesi si possono trarre le seguenti conclusioni.

L'utilizzo dei soli sensori PIR per l'individuazione della sola direzione di moto della persona diventa efficace con l'aiuto di un algoritmo *Decision Tree* che consente il filtraggio e la conseguente minimizzazione delle numerose false attivazioni.

Il *testing* mediante differenti protocolli è servito a verificare l'efficacia dell'algoritmo e a valutarne le massime prestazioni in termini di accuratezza.

Come visto nella sezione dei risultati dei protocolli di prova, il valore massimo di accuratezza è dell'88%. Questa percentuale si è ottenuta nel primo protocollo ed è pari al valore di accuratezza proprio dell'algoritmo (riportato in Tabella 5).

Negli altri due protocolli l'accuratezza del sistema cala notevolmente; nel secondo si ha ancora un valore accettabile dell'83%, mentre nel terzo la percentuale cala al 66.7%.

Queste percentuali sono il risultato di quanto previsto a seguito dell'analisi delle caratteristiche e dei limiti dei PIR; nel primo percorso infatti si raggiunge il valore più alto in quanto:

- il soggetto cammina dallo stesso lato delle pareti finestrate (non ci sono quindi riflessioni dalla parte opposta del soggetto);
- la distanza dai sensori è sufficientemente grande da evitare che con un passo si salti un FOV di un PIR;
- il percorso effettuato è semplice e di breve durata.

Negli altri due percorsi invece non si ha almeno una delle precedenti caratteristiche che fanno sì che il valore di accuratezza sia massimo.

Infatti nel protocollo 2 il soggetto cammina anche dal lato non finestrato, inoltre il percorso è più lungo sia in termini di distanza che in termini di durata.

Nel protocollo 3 invece si ha sia un breve tratto di percorso dalla parte non finestrata, ma soprattutto quel che abbassa la percentuale è la distanza ravvicinata di passaggio di fronte al sensore.

Volendo avere un valore complessivo di accuratezza si può fare una media delle precedenti percentuali ottenendo il 79,23% di accuratezza nella previsione della direzione di un moto libero di un soggetto in un'ambiente chiuso.

Rispetto a quanto presente nello stato dell'arte, il posizionamento di questi sistemi è spesso a parete o a soffitto, quindi ben oltre i 35cm da terra a cui si era vincolati per le dimensioni di Misty II. Inoltre sensori posti su un robot in movimento sono sottoposti a condizioni di acquisizione sempre differenti e non è possibile impostare un set fisso all'interno della stanza che minimizzi gli errori dovuti alla sensibilità degli strumenti.

L'unico modo per superare questo ostacolo è stato quindi quello di lavorare non sul setup dei sensori ma sui dati acquisiti. Attraverso l'algoritmo decisionale si sono ottenuti i risultati di cui si è trattato; una volta ottenuti questi si è passati all'implementazione dei sensori a ultrasuoni e si è giunti sia al collegamento di 1 PIR e 1 ultrasuono (e quindi a verificare l'effettiva realizzabilità del lavoro dei due sensori in combinazione) sia al montaggio e alla verifica del funzionamento di 4 ultrasuoni, il che rende plausibile, in futuro, il completamento del lavoro con il collegamento sia dei 4 PIR sia dei 4 ultrasuoni.

Capitolo 4: sviluppi futuri

Il lavoro di questa tesi si è incentrato sulla ricerca, sullo sviluppo e sull'implementazione di una rete di sensori che consentisse la localizzazione puntuale di una soggetto in movimento all'interno di una stanza, mantenendo la privacy dello stesso e senza l'utilizzo di dispositivi *wearable*.

Al termine del lavoro si è giunti con il conseguimento di due obiettivi fondamentali:

- la connessione di un PIR e un ultrasuono e la verifica del loro funzionamento combinato;
- la connessione di 4 ultrasuoni e il test del loro funzionamento in contemporanea.

Dunque come sviluppi futuri si prevede l'integrazione di 4 PIR in corrispondenza dei 4 ultrasuoni installati nello step 2, sulla base degli obiettivi precedentemente realizzati nello step 1.

In questo modo il robot potrà avere per ogni lato la capacità di rilevare la presenza con il PIR e di misurare la distanza della persona in movimento esattamente di fronte al PIR che si è attivato; questo servirà a scartare le false attivazioni in quanto l'ultrasuono corrispondente al PIR attivato erroneamente non rileverà nessuna variazione di distanza durante il tempo in cui il sensore piroelettrico rimane attivo, andando dunque ad incrementare l'accuratezza delle acquisizioni.

In ultimo l'implementazione di tutti i sensori potrà avvenire sul supporto completo stampato in 3D per aumentare la stabilità, specialmente se Misty II è in movimento, e per rendere i campi visivi e i range di misura simmetrici rispetto al robot uniformando le acquisizioni in tutte le direzioni.

In Figura 45 una rappresentazione CAD di come si dovrebbe presentare il supporto con tutti i sensori.

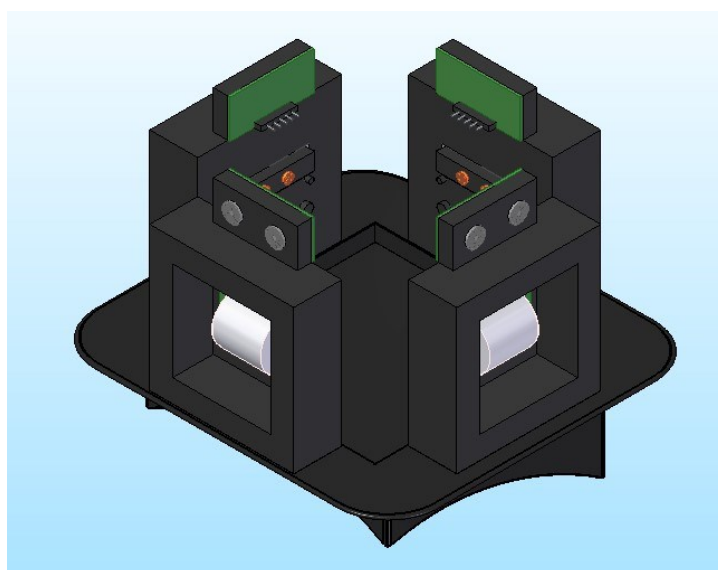


Figura 45: portasensori completo con 4 PIR e 4 ultrasuoni

Bibliografia

- [1] https://www.infodata.ilsole24ore.com/2021/09/05/linvecchiamento-della-popolazione-mondiale-infografica/?refresh_ce=1
- [2] <https://salute.xagena.it/news/0314c9b108b8c39f1cf878ed93fdd5ae.html>
- [3] Timothy David Robbins, Sarah N. Lim Choi Keung, Theodoros N. Arvanitis, E-health for active ageing; A systematic review, *Maturitas*, Volume 114, 2018, Pages 34-40,
- [4] Carmine Clemente, in “SALUTE E SOCIETÀ” 1/2015, pp. 102-115
- [5] <https://guardian-aal.eu>
- [6] <https://www.hdblog.it/2017/06/21/Sphero-nasce-Mist-Robotics-robot-domestici/>
- [7] J. Ahmad, H. Larijani, R. Emmanuel and M. Mannion School of Computing, Engineering and Built Environment, Glasgow Caledonian University, Glasgow, United Kingdom, and A. Javed Department of Electrical and Computer Engineering, COMSATS University Islamabad, Lahore Campus, Lahore, Pakistan. “Occupancy detection in non-residential buildings – A survey and novel privacy preserved occupancy monitoring solution”.
- [8] R. Melfi, B. Rosenblum, B. Nordman, K. Christensen, Measuring building occupancy using existing network infrastructure, in: *Green Computing Conference and Workshops (IGCC)*, 2011 International, IEEE, 2011, pp. 1–8.
- [9] T. Labeodan, W. Zeiler, G. Boxem, Y. Zhao, Occupancy measurement in commercial office buildings for demand-driven control applications-a survey and detection system evaluation, *Energy Build.* 93 (2015) 303–314
- [10] G. Rossi, *Misure meccaniche e termiche. Basi teoriche e principali sensori e strumenti.* Carocci, 2010.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Passive_infrared_sensor
- [12] <https://www.chimica-online.it/fisica/piroeletricit.htm>
- [13] <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor/how-pirs-work>
- [14] https://elettronica-plus.it/sensori-a-ultrasuoni-concetti-di-base_112316/

- [15] https://elettronica-plus.it/sensori-di-prossimita-un-confronto-tra-le-diverse-tecnologie_111214/
- [16] C. Arndt, SensorData-Fusion (2012), (ZESS University of Siegen)
- [17] D. Levshun, A. Chechulin and I. Kotenko, "A technique for design of secure data transfer environment: Application for I2C protocol," *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 2018, pp. 789-794, doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8390807.
- [18] <https://www.robot-italy.com/it/miniature-ultrasonic-range-finder.html>