

Introduzione

Gli ultrasuoni, ossia onde sonore con frequenze superiori a quelle percepibili dall'orecchio umano (tipicamente oltre 20 kHz), costituiscono il principio di funzionamento dei sensori ultrasonici. Un sensore a ultrasuoni funziona emettendo onde sonore ad alta frequenza che si propagano nell'aria fino a colpire un oggetto. Quando queste onde incontrano una superficie, vengono riflesse indietro verso il sensore. Misurando il tempo intercorso (time of flight) tra l'emissione e la ricezione dell'eco, è possibile determinare con precisione la distanza dell'oggetto rispetto al sensore. La tensione di funzionamento è di 5V, quindi può essere alimentato direttamente utilizzando una fonte di alimentazione a 5V.

L'utilizzo dei sensori a ultrasuoni si ha in applicazioni che spaziano dai sistemi di localizzazione, alla rilevazione della forza muscolare, fino ai robot di sorveglianza e ai sistemi radar per la prevenzione di incidenti. Tanaka et al. (2003) aveva sviluppato un sensore di attività muscolare a ultrasuoni, dove il principio di funzionamento si basava sulla rilevazione delle variazioni ultrasoniche nei muscoli, attraverso cui è possibile stimare la forza muscolare ([link](#)).

Bakar et al. (2017) hanno presentato un sistema a ultrasuoni a basso costo, basato su un'implementazione hardware e software, capace di operare sott'acqua per misurare la distanza di un oggetto, visualizzando il valore tramite un'applicazione mobile e monitorando in tempo reale la frequenza di rilevamento ([link](#)).

Mohialden et al. (2022) hanno realizzato un sistema di prevenzione degli incidenti basato sulla rilevazione automatica delle collisioni. Il sistema rileva la presenza di ostacoli a partire da una distanza di 1 metro avvisando adeguatamente il conducente. Se l'auto si avvicina troppo a un ostacolo, si ferma automaticamente, aiutando in caso di sonnolenza o distrazione del guidatore ([link](#)).

Shrivastava et al. (2010) hanno approfondito l'utilizzo del microcontrollore P89C51RD2, mostrando che sensori a ultrasuoni combinati con microcontrollori appropriati rappresentano un metodo efficace per la misura della distanza. La misura della distanza di un oggetto posto frontalmente o lateralmente a un corpo in movimento è una funzionalità richiesta in numerosi dispositivi, che possono variare da soluzioni semplici ed economiche a sistemi complessi e di grandi dimensioni. In questo articolo si mette in luce che i sensori a ultrasuoni rappresentano una soluzione estremamente versatile e conveniente, in quanto sono rapidi, affidabili e utilizzabili sia in aria che in acqua. Il sistema sviluppato è stato progettato e sperimentato per essere integrato in un veicolo robotico per l'ispezione delle fognature, in fase di sviluppo. Questo approccio permette di effettuare misurazioni della distanza in maniera automatica anche all'interno di condotte piene o semipiene, superando i limiti delle tradizionali tecniche di ispezione che richiedono lo svuotamento delle tubazioni. In tal modo, è possibile individuare ostacoli o blocchi, registrarne la posizione e trasmettere le informazioni in tempo reale a una stazione di controllo in superficie, rendendo l'ispezione più rapida, sicura ed economica ([link](#)).

Tra le possibili applicazioni avanzate dell'uso degli ultrasuoni figura il monitoraggio della frequenza cardiaca fetale tramite Doppler, una tecnica utilizzata in campo medico per valutare lo stato di salute del feto monitorando il battito cardiaco direttamente attraverso l'addome materno. Un esempio recente è il sistema descritto da Hamelmann et al. (2019) ([link](#)).

Infine, nel lavoro di Zhmud et al. (2018) è illustrato l'uso del sensore HC-SR04 all'interno di contesti robotici, si spiega il principio di funzionamento del sensore e le equazioni utili per calcolare la distanza in base al tempo di ritorno dell'eco, evidenziando l'efficacia di questa tecnologia a basso costo per il rilevamento e la localizzazione in robotica ([link](#)).

I sensori a ultrasuoni, quindi, vengono scelti in molti progetti perché offrono diversi vantaggi: costano poco, sono semplici da utilizzare, permettono di misurare le distanze senza contatto diretto, funzionano bene a corto e medio raggio, consumano poca energia.

Nonostante questi punti di forza, presentano anche alcuni limiti che è importante considerare. La loro portata è limitata, quindi non sono adatti a misurazioni su lunghe distanze. Inoltre, possono subire interferenze dovute a riflessioni irregolari, soprattutto da superfici non metalliche o dalla forma complessa, che deviano il segnale. Rispetto ad altri sensori, come quelli a infrarossi, hanno tempi di risposta più lenti. Hanno anche difficoltà a rilevare oggetti molto piccoli, materiali molto densi oppure a funzionare correttamente in condizioni ambientali estreme, ad esempio con temperature troppo alte o troppo basse. Tutti questi fattori possono influenzare l'accuratezza delle misurazioni, causando sottostime o errori nei dati raccolti.

Invece, il concetto di radar (Radio Detection and Ranging) ha origine nel XIX secolo ed è stato sviluppato in modo significativo durante la Seconda Guerra Mondiale, principalmente per il rilevamento di aerei. Tradizionalmente, i radar utilizzano onde elettromagnetiche per determinare distanza, direzione e velocità degli oggetti.

Obbiettivo

Il rilevamento di oggetti rappresenta una tecnologia chiave in numerosi settori, tra cui la robotica, i veicoli autonomi e i sistemi di sorveglianza intelligenti. In questi contesti il suo compito principale è quello di identificare e localizzare oggetti all'interno di un ambiente.

Un aspetto particolarmente rilevante riguarda la sorveglianza, dove l'identificazione di oggetti non autorizzati diventa essenziale per garantire la sicurezza e ridurre i rischi. La segnalazione rapida permette infatti di attivare protocolli adeguati e di prevenire non solo ulteriori accessi non autorizzati, ma anche attività potenzialmente dannose. Inoltre, risulta importante anche la capacità di misurare accuratamente la velocità è fondamentale per applicazioni pratiche come la prevenzione di incidenti, in quanto consente di reagire in tempo reale alla presenza di oggetti in movimento.

Il seguente progetto presenta un metodo economico e affidabile per rilevare accessi non autorizzati, in particolare l'idea è quella di emulare il funzionamento di un vero radar, per rilevare ostacoli e rappresentarli su uno schermo in tempo reale.

Una tra le tante finalità del progetto potrebbe essere il suo utilizzo per proteggersi da intrusioni di animali selvatici o domestici.

Componenti utilizzati

- **Elegoo Uno R3, IdeaSpark® ESP32 Development Board**, dotata di un display OLED da 0,96 pollici integrato, con chip CH340 per la programmazione e connettività Wi-Fi e BLE;
- **Servomotore** (per muovere il sensore a ultrasuoni da 0° a 180°);
- **Sensore a ultrasuoni HC-SR04** (per la misura delle distanze);
- **LED rosso** (segnalazione allarme);
- **LED verde** (stato normale);
- **Buzzer passivo** (avviso acustico in caso di ostacolo);
- Resistenze e jumper per i collegamenti.

Il progetto utilizza due sensori HC-SR04 distinti, uno collegato a Elegoo Uno R3 per la parte radar con servomotore e visualizzazione su [Processing](#), e un secondo sensore collegato all'ESP32, dedicato esclusivamente alla misurazione della distanza e della velocità degli oggetti.

I due sensori, inoltre, sono stati collocati fisicamente sullo stesso supporto, fissati uno sopra l'altro, come vediamo in Figura 1. La base del supporto è il servomotore, che ruota entrambi contemporaneamente durante la scansione.

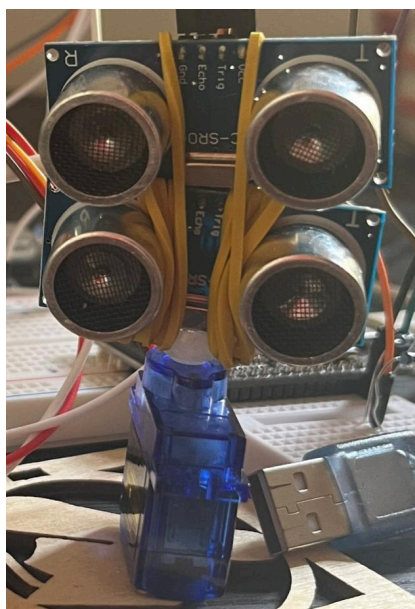


Figura 1: posizionamento sensori su servomotore

In entrambi i casi la distanza viene calcolata partendo dall'equazione $S = vt$, dove S rappresenta lo spazio percorso, v la velocità di propagazione dell'onda e t il tempo di percorrenza.

L'onda sonora emessa dal sensore deve compiere un tragitto completo di andata e ritorno prima di essere rilevata dal trasduttore ricevente. Questo significa che il tempo misurato dal sensore corrisponde al tempo necessario per percorrere il doppio della distanza effettiva dall'oggetto, quindi bisogna trasformare l'equazione base in $S = vT/2$.

Si utilizza il valore $0.034 \text{ cm}/\mu\text{s}$ per rappresentare una conversione ottimizzata della velocità del suono nell'aria nelle unità di misura appropriate. La velocità del suono a temperatura ambiente è approssimativamente 340 metri al secondo. Poiché il sensore restituisce il tempo di volo in microsecondi e si desidera ottenere la distanza in centimetri, la velocità deve essere espressa in centimetri per microsecondo.

Il progetto è nato inizialmente per funzionare unicamente con Elegoo Uno R3, ma in seguito si è deciso di sperimentare l'integrazione di l'ESP32 con un altro sensore, per sfruttare anche le potenzialità del Wi-Fi. Nonostante ciò, la versione principale si basa sulla scheda Elegoo Uno R3, mentre per quanto riguarda l'ESP32 sono stati effettuati solo i collegamenti tra scheda e sensore.

Prima parte: Elegoo Uno R3

Nello specifico la prima parte utilizza un servomotore che muove un sensore a ultrasuoni HC-SR04 da zero a centottanta gradi e ritorno, effettuando una scansione continua dello spazio circostante. Ogni cinque gradi viene eseguita una misurazione della distanza e, se un oggetto viene rilevato a meno di 40 centimetri, il sistema passa in modalità di allarme. In questo stato si spegne il LED verde, si accende il LED rosso e il buzzer passivo emette un segnale acustico, mentre i dati di angolo e distanza vengono inviati tramite la porta seriale. Se invece non ci sono ostacoli entro la soglia impostata, il sistema resta nello stato normale con il LED verde acceso e il buzzer disattivato. L'uso della comunicazione seriale consente quindi di collegare Elegoo Uno R3 a Processing per la visualizzazione dei dati.

Il sensore a ultrasuoni HC-SR04 è collegato con il pin TRIG al pin digitale 11 di Elegoo Uno R3 per l'invio dell'impulso ultrasonico, mentre il pin ECHO è collegato al pin digitale 10 per la ricezione del segnale riflesso. Il servo motore utilizzato per il movimento del radar è connesso al pin digitale 12 e consente di regolare l'angolo di rotazione. Il LED rosso, impiegato per segnalare la condizione di allarme, è collegato al pin digitale 3, mentre il LED verde, che rappresenta lo stato normale del sistema, è collegato al pin digitale 4. Il buzzer, che emette un segnale acustico in caso di rilevamento di un ostacolo entro la soglia di distanza, è connesso al pin digitale 2. Al seguente [link](#) viene riportato lo schema e i collegamenti effettuati.

Successivamente tramite Processing si ricevono le informazioni inviate da Elegoo Uno R3, le interpreta e le rappresenta graficamente su uno schermo che simula il comportamento di un radar vero e proprio. Nel semicerchio verde, che rappresenta l'area di scansione, sono tracciate linee radiali con passo di 30 gradi e cerchi concentrici ogni dieci centimetri. Questa struttura consente di vedere spazialmente gli oggetti rilevati e di comprenderne immediatamente la posizione rispetto al sensore. La linea verde mobile riproduce il fascio radar che oscilla tra 0° e 180° , seguendo il movimento del servo motore. In corrispondenza delle rilevazioni del sensore ultrasonico compaiono punti rossi, ciascuno caratterizzato da una graduale dissolvenza, questo per emulare i radar nei quali l'eco di un segnale ha una durata limitata e tende a svanire nel tempo. Tale interfaccia viene mostrata in Figura 2.

Nella parte inferiore della finestra vengono mostrati in tempo reale i valori numerici dell'angolo e della distanza misurata, permettendo un controllo delle misurazioni.

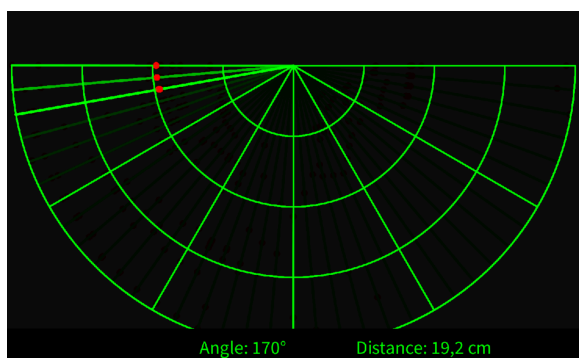


Figura 2: interfaccia utilizzando Processing

Seconda parte: utilizzo di ESP32.

Nella seconda fase del progetto è stato utilizzato l'ESP32 che dispone della connettività Wi-Fi integrata. Questo permette di realizzare un sistema radar non solo locale, ma anche capace di inviare notifiche a distanza.

Il sistema utilizza un file separato denominato "credentials.h" per gestire tutte le informazioni di autenticazione, incluso nel codice principale attraverso la direttiva `#include "credentials.h"`. Questo file contiene le credenziali Wi-Fi (nome rete e password), il token del bot Telegram ottenuto da BotFather e l'ID della chat di destinazione per le notifiche. La separazione delle credenziali dal codice principale viene effettuata per ragioni di sicurezza.

Il sensore HC-SR04 viene collegato all'ESP32 e utilizzato per misurare la distanza e la velocità di eventuali oggetti. I dati raccolti dal sensore vengono mostrati in tempo reale su un piccolo display OLED che fornisce feedback visivo immediato e il quale è integrato direttamente sulla scheda, non è un modulo esterno da collegare.

Il sensore HC-SR04 viene collegato con il pin TRIG connesso al GPIO 5 dell'ESP32 per l'invio dell'impulso ultrasonico, mentre il pin ECHO è collegato al GPIO 18 per la ricezione del segnale riflesso.

La soglia di rilevamento è impostata a 40 centimetri, definendo la distanza massima entro la quale un oggetto viene considerato "rilevato". Inoltre, sono implementati diversi timeout: 20 secondi per stabilire la connessione Wi-Fi, 30 millisecondi per la ricezione dell'eco ultrasonico e un intervallo di 500 millisecondi tra misurazioni consecutive.

Inizialmente il tentativo di connessione alla rete wireless, viene visualizzato "Connessione Wi-Fi..." per informare l'utente dello stato del processo. In caso di connessione riuscita, il display mostra brevemente "Wi-Fi OK!" seguito dall'indirizzo IP assegnato al dispositivo.

Se la connessione fallisce, viene mostrato un messaggio di errore "ERRORE Wi-Fi!" per guidare l'utente nella risoluzione del problema.

Al termine dell'inizializzazione, il display presenta una schermata di benvenuto che include il titolo "RADAR ULTRASONICO", la soglia di rilevamento configurata espressa come "Soglia: 40.0 cm" e il messaggio "Pronto..." per confermare che il sistema è operativo e pronto per iniziare il monitoraggio.

Indipendentemente dalla modalità operativa, il display mantiene sempre visibile un indicatore dello stato della connessione Wi-Fi posizionato nell'angolo superiore destro alle coordinate 100,0.

Quando la connessione Wi-Fi è attiva e stabile, l'indicatore mostra il testo "WiFi", come si nota in Figura 7, confermando la disponibilità delle funzionalità di rete. In caso di disconnessione o problemi di connettività, l'indicatore cambia in una "X", si nota in Figura 3, per segnalare immediatamente la perdita della connessione di rete, permettendo all'utente di comprendere che le notifiche Telegram non saranno disponibili fino al ripristino della connettività.

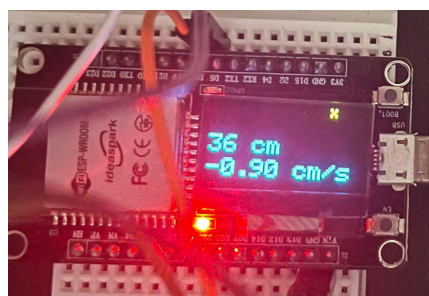


Figura 3: scheda non connessa al Wi-Fi

In questa fase del progetto l'obiettivo era abbassare il segnale ECHO dal sensore ($\approx 5V$) a $\sim 3.3V$ per evitare di danneggiare ESP32. Per far ciò viene utilizzato un partitore di tensione ([link](#)), in questo modo la tensione ai capi della seconda resistenza sarà quindi:

$$V_2 = V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Figura 4: formula tensione.

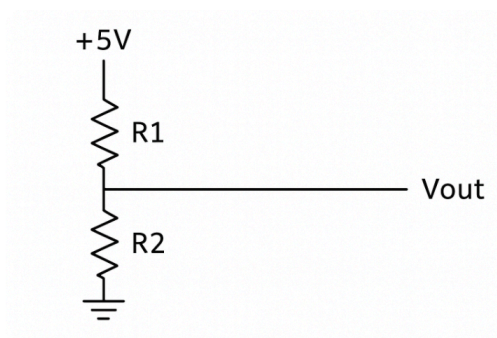


Figura 5: schema del partitore di tensione utilizzato.

In questo caso, R2 (2k Ω) è il doppio di R1 (1k Ω), la tensione si divide in modo da ottenere all'uscita circa i 2/3 della tensione in ingresso. Applicando la formula in Figura 4, seguendo il circuito in Figura 5, con 5V in ingresso si ottiene circa 3,3V in uscita, valore sicuro e compatibile con l'ESP32.

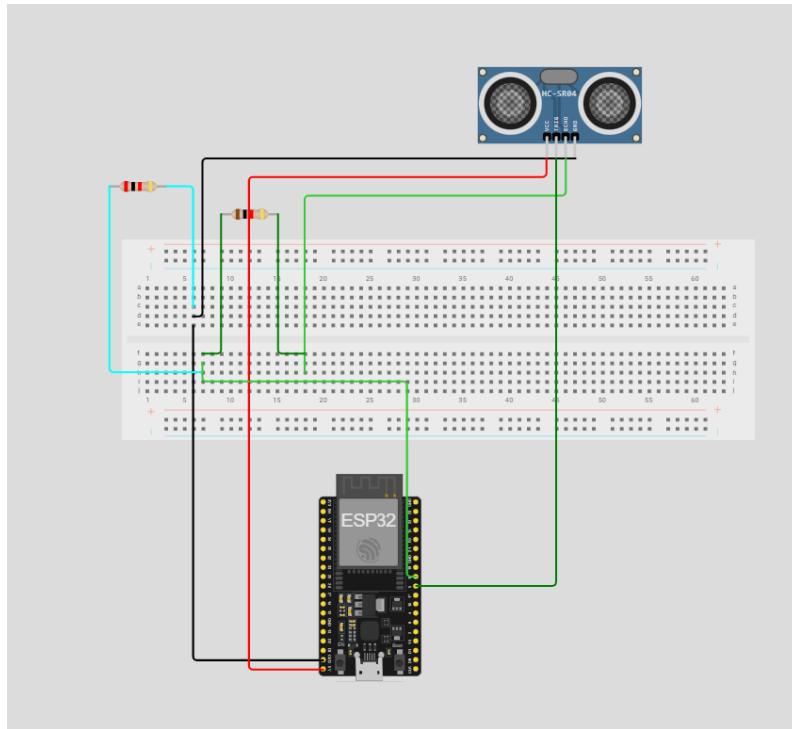


Figura 6: schema circuito con ESP32

Nella Figura 6 viene riportato lo schema e i collegamenti effettuati, mentre il display OLED non compare in figura, perchè già integrato.

Oltre alla distanza viene calcolata anche la velocità media. La velocità è data dal rapporto tra lo spostamento e il tempo impiegato a compierlo, cioè $v = \Delta s / \Delta t$.

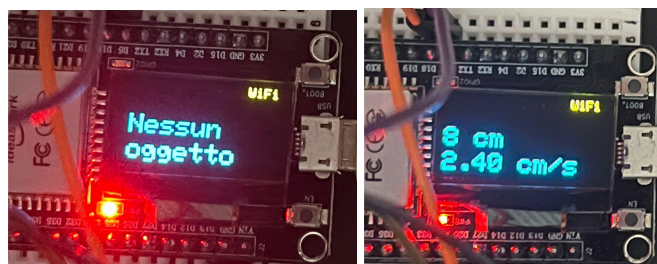


Figura 7: display OLED con visualizzazione distanza e velocità.

Quando la distanza è inferiore a 40 centimetri, sul display compaiono sia il valore della distanza sia quello della velocità in centimetri al secondo. Se invece non viene rilevato alcun oggetto vicino, viene visualizzato un messaggio generico ("Nessun oggetto") che informa della mancanza di ostacoli. Entrambe le visualizzazioni mostrate in Figura 7.

Parallelamente è stato creato un bot Telegram tramite BotFather, ottenendo il token e l'identificativo della chat necessari per l'invio dei messaggi. L'ESP32, una volta connesso alla rete Wi-Fi, ogni volta che viene rilevato un oggetto a distanza ravvicinata, invia automaticamente una notifica sullo smartphone, con i valori esatti di distanza e velocità, come mostrato in Figura 8.



Figura 8: screenshot chat con bot Telegram dopo le rilevazioni.

Misurazioni

Per verificare l'affidabilità del sensore impiegato nella prima parte del progetto sono state effettuate misurazioni reali utilizzando un righello, come si nota in Figura 9, e confrontate con quelle rilevate dal sensore (Tabella 1), nelle tabelle seguenti sono state riportate tali misurazioni, insieme al calcolo dell'errore (Tabella 2) e al confronto delle distanze tra le misurazioni effettuate con il primo e con il secondo sensore (Tabella 3).

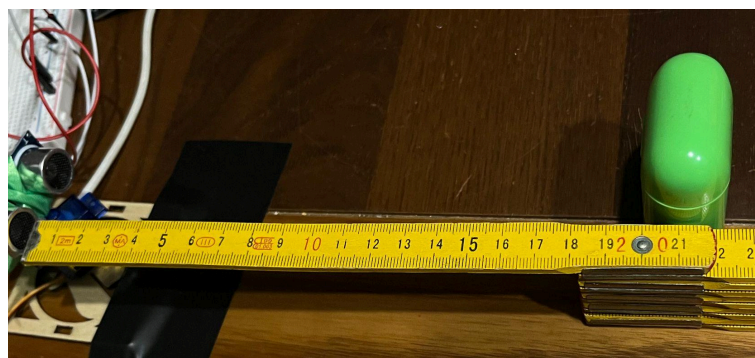


Figura 9: misurazione distanza reale.

Misura	Reale (cm)	Rilevata (cm)
1	30	29.1
2	20	20.1
3	32	32.3
4	40	39.2
5	10	10
6	5	5.3
7	19	19.2

Tabella 1: confronto distanza reale con quella rilevata.

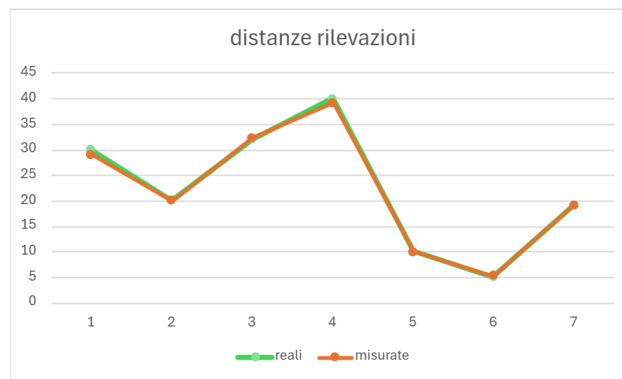


Figura 10: grafico confronto misurazioni.

Nel grafico, Figura 10, la linea verde rappresenta i valori reali, mentre la linea arancione mostra le misurazioni del sensore. Si può osservare che, nella maggior parte dei casi, le misurazioni del sensore coincidono strettamente con i valori reali, dimostrando il corretto funzionamento.

Misura	Errore relativo in percentuale
1	3.0%
2	0.5%
3	0.9%
4	2.0%
5	0.0%
6	6.0%
7	1.05%

Tabella 2: calcolo errore relativo in percentuale.

Misura	Prima parte (ELEGOO UNO R3)	Seconda parte (ESP32)
1	19.7	19.8
2	11.5	11.5
3	10.1	10.2
4	8.7	8.5
5	4.4	4.5
6	5.7	5.7
7	3.8	3.7

Tabella 3: confronto parti del progetto.

L'errore relativo, in tabella 2, in percentuale varia tra 0.0% e 6.0%. In generale, la maggior parte delle misure presenta un errore inferiore al 3%, indicando una buona affidabilità complessiva.

Nella terza tabella invece, i valori rilevati dai due dispositivi, si nota che essi sono molto vicini tra loro per tutte le misurazioni quindi i dati fra di loro sono coerenti.

Successivamente è stato testato utilizzando come ostacolo uno shock, si voleva testare utilizzando un oggetto con geometria prevalentemente cilindrica. La forma dell'oggetto ha influenzato il processo di rilevamento, poiché la curvatura della superficie tende a deviare parzialmente l'onda ultrasonica, riducendo la riflessione diretta verso il sensore e introducendo leggere variazioni nei valori acquisiti. Infatti, le misurazioni ottenute dal sensore hanno riportato rispettivamente distanze pari a 15.9 cm, 14.9 cm e 15.9 cm, come si nota in Figura 11.

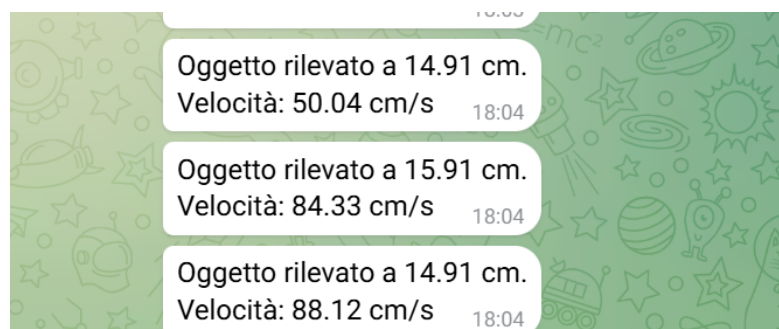


Figura 11: screenshot messaggi telegram ricevuti.

Limitazioni

In primo luogo, Elegoo Uno R3 non dispone di connettività integrata e ciò impone l'utilizzo costante di un computer per la visualizzazione dei dati, infatti l'interfaccia radar esiste infatti solo se il collegamento seriale con il PC è attivo. A ciò si aggiunge la nota sensibilità del sensore ultrasonico, il quale trova difficoltà con superfici inclinate e curve possono deviare o assorbire l'onda acustica, producendo misurazioni diverse.

La seconda fase con ESP32 risolve parzialmente alcune di queste problematiche, introducendo la connettività Wi-Fi e quindi la possibilità di trasformare il radar in un sistema di monitoraggio remoto. Tuttavia la dipendenza dalla rete Wi-Fi rende il sistema vulnerabile a disconnessioni.

Al di là delle differenze emerse tra la prima e la seconda implementazione, esistono limitazioni comuni dovute all'utilizzo del sensore ultrasonico HC-SR04, indipendenti dalla piattaforma di controllo adottata. Oltre al problema dell'altezza relativa degli oggetti rilevati, visto che il primo sensore è posizionato più in alto rispetto al secondo, anche la forma geometrica dei bersagli influisce sensibilmente sull'affidabilità delle misure. In particolare, superfici curve o sferiche tendono a deviare parzialmente il fronte d'onda ultrasonico, quindi si notano distanze diverse attribuite allo stesso oggetto.