

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

Tesi di laurea triennale in
INGEGNERIA MECCATRONICA

**Caratterizzazione di un sistema ad ultrasuoni per
la rilevazione di target umani**

Relatore

Prof. Alessandro Sona

Candidato

Mattia Costantino Bedin

Matricola 596480

Anno Accademico 2012/2013

INDICE

Sommario	1
Introduzione	2
1 Descrizione teorica	6
2 Setup sistema	12
2.1 Descrizione generale.....	12
2.2 Dispositivo ad ultrasuoni.....	14
2.3 Motore ed Arduino.....	16
2.4 Sistema di misurazione.....	18
2.4.1 Misurazione raggio.....	19
2.4.2 Oscilloscopio.....	21
3 Misurazioni ottenute	23
Conclusioni	35
Bibliografia	36

Sommario

In questa trattazione si espone la caratterizzazione di un sistema ad ultrasuoni per la rilevazione di un target umano. Tale sistema, costituito da trasmettitore e ricevitore ad ultrasuoni, deve rilevare il movimento di un essere umano che può essere semplificato con la rotazione di una pallina. Come prima cosa vengono descritti a grandi linee gli ultrasuoni, e le loro possibili applicazioni in determinati settori d'utilizzo. Successivamente viene eseguita una descrizione fisica degli ultrasuoni e delle loro proprietà che si generano durante la fasi di propagazione nell'aria, in particolar modo nell'ambiente di utilizzo del sistema citato nelle pagine seguenti.

Vengono descritte le operazioni necessarie per predisporre l'avviamento del sistema complessivo, ossia il suo montaggio parte per parte.

Il passo successivo è quello di definire alcune condizioni per poter eseguire le varie misurazioni, e quindi la successiva fase di acquisizione dati.

Da questi dati acquisiti si ottengono i risultati che permettono la definizione della caratterizzazione del sistema con conseguente discussione dei possibili errori o pregi che esso può avere.

Introduzione

Gli ultrasuoni sono delle onde meccaniche sonore, originate da moti oscillatori delle molecole del mezzo di propagazione, generando fronti d'onda in fase. A differenza dei fenomeni acustici, le frequenze degli ultrasuoni sono superiori a quelle mediamente udibili da un orecchio umano. La frequenza convenzionale che individua approssimativamente le onde soniche dalle onde ultrasoniche è fissata in 20 kHz. Il termine ultrasuono sta ad indicare ciò che è oltre il suono e quindi l'udibile.

La storia degli ultrasuoni è parte della storia della musica e delle onde sonore. Prime testimonianze giungono da Pitagora che nel VI secolo A.C. scoprì che le corde di differenti lunghezze, usate negli strumenti musicali, erano la causa della diversità dei suoni emessi. Nel 1845 Christian Andreas Doppler, caratterizzò l'effetto Doppler. Egli notò che la frequenza del suono veniva alterata se la sorgente era in moto relativo rispetto ad un punto di ascolto. La frequenza del suono aveva un aumento se vi era avvicinamento dei due punti (sorgente e punto di ascolto) e una riduzione se vi era allontanamento dei due punti d'interesse. Nel 1877, Lord Rayleigh in Inghilterra pubblicò il trattato "La teoria del suono", in cui venivano chiariti i principi fisici fondamentali per lo studio del suono e dei suoi fenomeni come la rifrazione e la trasmissione. Un ulteriore passo venne fatto da Joule con l'effetto Magnetostrittivo, fenomeno con cui è possibile convertire un'energia magnetica in energia meccanica, tramite il cambiamento di lunghezza di una sbarretta di nichel (o altro materiale ferromagnetico), al variare del campo magnetico nel quale questa sbarretta si trova. Un altro effetto, detto Piezoelettrico, venne scoperto dai fratelli Curie nel 1880. Essi osservarono che quando veniva esercitata una pressione meccanica su un cristallo di quarzo, o altri cristalli come il sale di Rochelle (sodio potassio tartarato tetra idrato), si produceva un potenziale elettrico. Viceversa, applicando una tensione pulsante al cristallo, esso entrava in vibrazione. Ossia venne scoperto un fenomeno che convertiva energia elettrica in energia meccanica. Tale effetto venne utilizzato in seguito, per generare gli ultrasuoni.

Le prime vere applicazioni degli ultrasuoni risalgono al 1912 per la individuazione del Titanic dopo l'affondamento, difatti è stata usata la tecnica di rilevazione che analizzava le onde riflesse dai vari materiali

presenti nei fondali marini. Nella prima guerra mondiale venne sviluppato un antesignano dell'attuale sonar, per l'identificazione di sottomarini. Negli anni '30, gli ultrasuoni vennero applicati per analizzare la presenza di difetti su materiali metallici. Venivano utilizzati ultrasuoni pulsanti, analizzando le onde riflesse dalle discontinuità dei materiali.

Ulteriori ricerche portarono all'utilizzo di materiali piezoceramici, che permisero la costruzione di generatori ad ultrasuoni sempre più potenti e robusti. I principali generatori di ultrasuoni possono essere: fischi, ruote foniche, sirene. Le principali sorgenti utilizzate per ottenere ultrasuoni sono però quelle che sfruttano i fenomeni piezoelettrici e della magnetostrizione e quelle meccaniche come il fischio di Galton ed il pulsatore di Hartmann. Tra i principali ricevitori si possono individuare quelli piezoelettrici, quelli a magnetostrizione e quelli a microfono condensatore.

Ulteriori studi portarono un ampliamento dei settori di utilizzo degli ultrasuoni. Alla fine della seconda guerra mondiale, i Giapponesi iniziarono ad applicare gli ultrasuoni in ambito diagnostico. I primi strumenti furono di tipo A-mode, con visualizzazione dell'ampiezza del suono su oscilloscopi. Il passo successivo fu il B-mode ossia con la formazione di un'immagine in scala di grigi, bidimensionale. Questi tipi di strumenti utilizzavano l'effetto Doppler per rilevare organi in movimento all'interno del corpo umano, ma al contempo utilizzato per individuare masse tumorali. Questi nuovi sviluppi restarono totalmente oscuri per l'Europa e per gli Stati Uniti fino agli anni 50.

Attualmente, i settori in cui gli ultrasuoni sono utilizzati con risultati soddisfacenti sono parecchi. A livello medico gli ultrasuoni vengono utilizzati per la formazione di immagini ecografiche, per la litotrissia con frequenze e potenze molto elevate, mentre ne viene ridotta la potenza per l'utilizzo in fisioterapia. La maggior parte delle applicazioni terapeutiche degli ultrasuoni funzionano con un aumento non eccessivo della temperatura corporea, creando una vasodilatazione della zona d'interesse. A livello di sistemi di sicurezza gli ultrasuoni sono utilizzati tramite antifurti con sensori di movimento e posizione. Nei sistemi di lavaggio si utilizzano generatori ad ultrasuoni ad altissima potenza che permettono la generazione di cavitazione. Nell'industria gli ultrasuoni vengono applicati nel controllo della qualità di ruote di treni o per l'individuazione di difetti su materiali, come ad

esempio l'individuazione di difetti di costruzione o di saldatura delle rotaie ferroviarie, tramite analisi non distruttive con l'impiego di strumenti.

Gli ultrasuoni sono un intervallo di frequenze di particolare interesse per svariati tipi di studi, dato che sono di libero accesso per tutti, senza nessuna particolare licenza. L'utilizzo di queste onde nell'aria ha qualche limitazione, in particolare alla veloce attenuazione del suo segnale, il quale si attenua molto rapidamente e può essere coperto da una sorgente più potente.

Il progetto riportato nelle pagine seguenti ha come scopo l'identificazione dei movimenti del corpo umano e la loro analisi. Tale finalità ha notevoli campi di utilizzo. Esso potrà essere utilizzato in medicina, nel monitoraggio, nella sicurezza o in aspetti ancora non prevedibili. Nel campo medico per l'identificazione di patologie che comportano handicap nei movimenti o per la definizione di progressi nella riabilitazione di un paziente. Nel monitoraggio ambientale per l'identificazione di piccoli movimenti che potrebbero portare a catastrofi naturali, senza l'utilizzo di decine di sensori. Nel campo della sicurezza potrebbe rappresentare un passo avanti per la realizzazione di antifurti identificando in modo specifico il grado di pericolosità dei soggetti in base al loro portamento.

Nel seguente progetto si caratterizza un sistema ad ultrasuoni, con l'obiettivo di identificare un corpo umano in movimento. La camminata di un essere umano è un atto abbastanza articolato e complesso, per questo è stato scomposto in una serie di palline che rappresentano i vari punti di articolazione del corpo. Per ridurre la complessità del progetto e semplificarne la comprensione si utilizza una pallina in rotazione lungo l'asse longitudinale rispetto al generatore di ultrasuoni, che simula il movimento di un arto del corpo umano. La semplicità del tipo di moto permette di eliminare eventuali complicanze nella lettura dei grafici e di migliorare la stima di eventuali errori rilevati durante le misurazioni.

Lo scopo del progetto è di migliorare l'accuratezza di misura del dispositivo ad ultrasuoni, tramite la ripetizione di misure relative al moto della pallina con differenti velocità di rotazione.

CAPITOLO 1

Descrizione teorica

Rilevare il movimento di un essere umano tramite un sistema ad ultrasuoni è un processo molto complicato. Per ridurre questa complessità si studiano le caratteristiche del sistema tramite il movimento di una pallina.

Gli ultrasuoni hanno un ampio intervallo di frequenze di utilizzo che va da una frequenza minima di 20 kHz fino a 10 MHz per la diagnosi in medicina. La frequenza che si è stabilito di usare è approssimativamente attorno ai 41 kHz, frequenza che non provoca complicanze ad un corpo umano, come un aumento della temperatura corporea e un conseguente movimento molecolare dei tessuti, che potrebbe portare anche ad una variazione di pressione e un conseguente movimento dei liquidi interni ai tessuti biologici. Le onde sonore subiscono fenomeni generali di riflessione, rifrazione, diffrazione, diffusione, assorbimento e propagazione che possono essere definiti mediante parametri quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità (misurata in decibel), l'attenuazione (dovuta all'impedenza acustica del mezzo attraversato).

Si possono ricavare parametri come:

- La velocità di propagazione degli ultrasuoni nell'aria:

$$v = 331.4 + 0.6 \cdot T , \quad (1.1)$$

dove T è la temperatura espressa in Kelvin. Per aria secca a 15°C $v = 341 \text{ m/s}$.

Nel caso in esame si ha:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{330}{41000} = 8 \text{ mm} , \quad (1.2)$$

in cui $v=330 \text{ m/s}$ e $f=41 \cdot 10^3 \text{ Hz}$. Quindi una lunghezza d'onda di 8 mm.

Da Fig. 1 si notano delle zone con "puntini" più fitti che rappresentano una maggior intensità sonora, mentre nelle altre zone si ha un'intensità sonora minore. Sempre da Fig. 1 si può individuare la lunghezza d'onda del segnale ad ultrasuoni definita da λ .

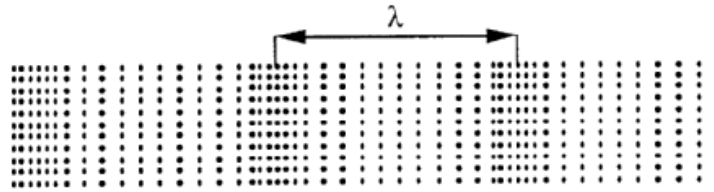


Figura 1: Lunghezza d'onda

L'intensità sonora, in un punto di una certa direzione, è il flusso di energia sonora trasmesso attraverso un'area di sezione unitaria normale alla direzione stessa, e per un'onda sferica si ha:

$$I = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{con} \quad [W/m^2] \quad (1.3)$$

dove W è la potenza sonora media. Dalla (1.3) si nota che l'intensità diminuisce all'aumentare della distanza dalla sorgente. Come rappresentato in Fig. 2, la stessa potenza sonora passa attraverso A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , ma le aree aumentano proporzionalmente al quadrato del raggio. Quindi la potenza del suono per unità di area diminuisce proporzionalmente al quadrato del raggio.

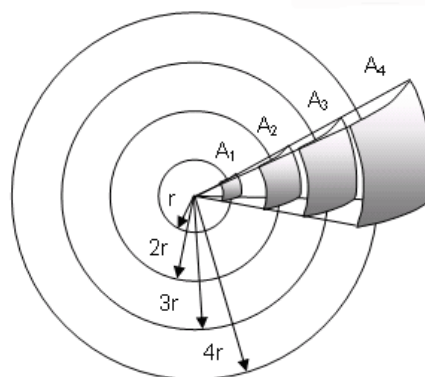


Figura 2: Intensità sonora

Il fenomeno dell'attenuazione è un parametro molto importante, perché può determinare un non corretto impiego delle onde ultrasonore, dovuto ad una dispersione molto elevata a causa dell'ambiente circostante. É legato

all'eterogeneità dei materiali, e quindi dalla loro natura. L'attenuazione degli ultrasuoni può essere misurata in scala logaritmica dalla relazione:

$$A_{dB} = \log \frac{I_1}{I_2} , \quad (1.4)$$

dove I_1 e I_2 rappresentano l'intensità dell'onda rispettivamente prima e dopo l'attenuazione e ricondotta a due fenomeni principali:

- **Assorbimento:** è uno smorzamento del movimento molecolare, che comporta una dispersione delle onde ad ultrasuoni in più direzioni e generando attenuazione del fascio lungo l'asse di propagazione d'interesse. Legato alla formula:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\alpha(f)x} , \quad (1.5)$$

con I_x e I_0 rispettivamente l'intensità in funzione dello spessore x e l'intensità all'ingresso del pezzo, mentre $\alpha(f)$ rappresenta il coefficiente d'assorbimento. Coefficiente legato a caratteristiche del materiale investito dagli ultrasuoni come: frequenza, viscosità, densità costanti adiabatiche, conduttività termica, calore specifico e dalla temperatura. Attraverso vari studi si è notato che il coefficiente di assorbimento, quando il primo mezzo è l'aria mentre il secondo è acqua o legno o metallo, è circa uguale a zero. Ciò ci fa notare che per gli ultrasuoni e per queste sostanze si ha la massima riflessione. In genere si può dire che quando un'onda sonora o ultrasonora giunge alla superficie di un nuovo mezzo di densità diversa da quello in cui si propaga, in parte passa oltre e in parte è riflessa.

- **Diffusione:** Si verifica per differenza di impedenza acustica tra due mezzi. Legata al fenomeno di rifrazione, dato che gran parte del fascio che incide sul materiale viene riflesso. Il rapporto fra la quantità riflessa e quella rifratta dipende dalle impedenze presentate all'onda nei due mezzi. Se il secondo mezzo presenta una impedenza poco diversa da quella del primo, l'onda sarà poco riflessa. Questa impedenza del mezzo

è definita come il prodotto della densità del mezzo per la velocità del suono in esso.

$$Z = \rho \cdot v \quad \text{con} \quad [\text{Ns/m}^2 \text{ o Rayl}] , \quad (1.6)$$

dove ρ è la densità mezzo e v la velocità dell'onda.

Un altro fenomeno fisico di particolare interesse riguardante le onde sonore è l'effetto Doppler. La frequenza percepita da un osservatore in movimento o fisso nell'aria con sorgente mobile, è diversa dalla frequenza percepita quando osservatore e sorgente sono immobili. Nel caso in esame viene utilizzato l'effetto micro-Doppler, variante dell'effetto Doppler, generato dal moto relativo di piccoli oggetti rispetto la sorgente. Il ricevitore Rx e il trasmettitore Tx si trovano in quiete rispetto al corpo riflettente in movimento, ossia la pallina.

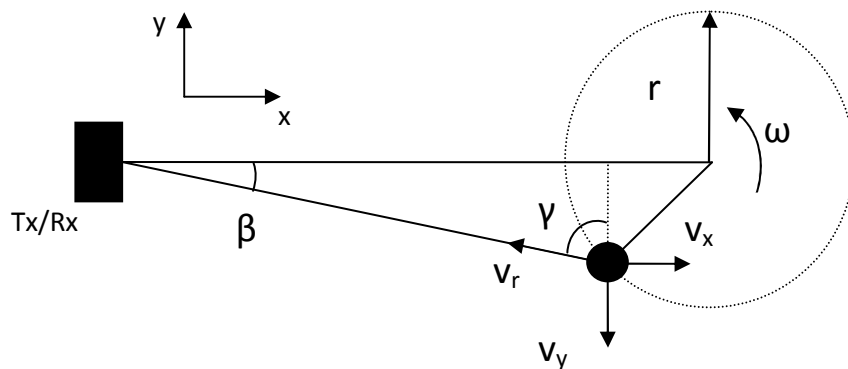


Figura 3: Schematizzazione del sistema

La frequenza percepita dalla ricevente, dovuta al moto della pallina, corrisponde a:

$$f_D = \frac{2}{v} \cdot f_n \cdot Vr(t). \quad (1.7)$$

Dall'equazione (1.7) si deduce che la frequenza di Doppler è legata alla variazione della velocità della pallina, quindi proporzionale al raggio di rotazione r e all'angolo che si genera tra pallina e la normale all'asse y .

Prendendo in considerazione Fig. 3, la velocità nel tempo varia nel seguente modo:

$$Vr(t) = Vx \cdot \cos \gamma + Vy \cdot \sin \gamma . \quad (1.8)$$

Rappresentandola in funzione del raggio si ottiene: $Vr = \omega * r$. Questa variazione delle frequenze nel tempo permette di ottenere una traccia, visualizzata nell'oscilloscopio, che rappresenta una stima del moto della pallina.

Attraverso l'utilizzo di programmi creati con il software Matlab, si può eseguire la trasformata di Fourier della traccia ottenuta dall'oscilloscopio e individuare l'ampiezza di frequenze nel tempo, ossia l'andamento dell'effetto Doppler nel tempo in una scala di grigi. Da questi grafici ottenuti è possibile convertire l'asse delle ampiezze dalle frequenze alle velocità, ponendo come valor medio di velocità lo zero del grafico (valore di offset). La conversione delle ampiezze permette di ottenere l'andamento della traiettoria della pallina.

Dai grafici velocità tempo si può ricavare una stima della traiettoria della pallina tramite la trasformata di Hough. Questa trasformata è un metodo per la rilevazione di curve, sfruttando la dualità tra i punti di una curva e i suoi parametri. Il primo passo è filtrare l'immagine in scala di grigio trasformandola in un'immagine in bianco e nero, ponendo un valore di soglia. Successivamente si passa da una parametrizzazione a due variabili (x,y) ad una parametrizzazione a cinque variabili: ampiezza massima ammissibile, sfasamento massimo, passo di discretizzazione, livello dei grigi, valore minimo dell'onda stimata. Quindi viene eseguita la media pesata dei valori ottenuti in base alla loro posizione nell'immagine e sovrapposti all'immagine stessa per verificare se la stima è stata eseguita correttamente. Per ottenere il valor medio delle ampiezze è necessario avere un numero intero di periodi, nel caso in esame se ne considerano due.

Si ha:

$$Vm = \sum_{x=0}^{\pi/2} \frac{y(x) + y(x+\frac{\pi}{2})}{2} . \quad (1.9)$$

Dal valor medio si può determinare una stima di ampiezza e fase dall'andamento del segnale:

$$A = \frac{y(x) - Vm}{\text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} \cdot x + \varphi\right)} . \quad (1.10)$$

Per ottenere una stima di ampiezza A e fase φ il programma esegue una votazione tra i rispettivi valori. I risultati ottenuti permettono di sovrapporre la stima ottenuta all'andamento nella scala di grigi.

CAPITOLO 2

Setup Sistema

2.1 Descrizione generale

Sono state eseguite le operazioni necessarie a predisporre l'avviamento del sistema e la successiva acquisizione di misure. Il sistema complessivo può essere rappresentato nel seguente modo:

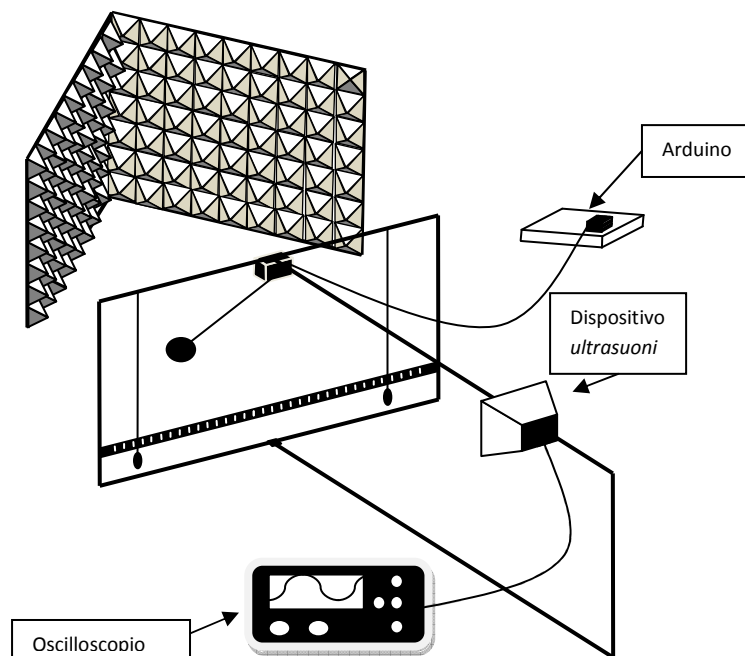


Figura 4: Schema del sistema complessivo

Da Fig. 4 si nota subito che tutto il sistema è fissato ad una costruzione composta da tubi idraulici del diametro di circa 40 mm. Questi tubi sono saldati tra loro per creare una struttura che permetta la rotazione orizzontale della pallina, senza il rischio di eccessive ondulazioni o vibrazioni che potrebbero aumentare gli errori in fase di misurazione.

Le dimensioni della struttura sono:

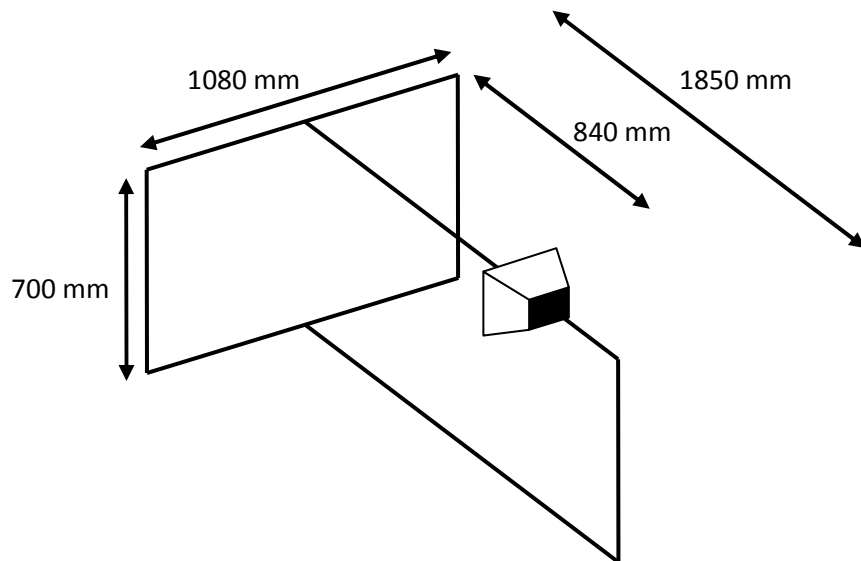


Figura 5: Dimensioni struttura

In Fig. 5 si può notare che l'area in cui è presente l'insieme di motore, corda e pallina (1080 mm x 700 mm), permette di applicare un raggio di rotazione della pallina abbastanza ampio da simulare il movimento di un arto umano. Altra dimensione di notevole importanza è la distanza tra la sorgente ad ultrasuoni e l'oggetto in movimento (840 mm). Essa permette di definire la distanza più corretta per ottimizzare i risultati di misura ed individuare il raggio d'azione entro il quale il ricevente e il trasmettitore non subiscono un'attenuazione eccessiva per la loro potenza d'utilizzo.

Il sistema può essere schematizzato, come rappresentato in Fig. 4 e 6, raggruppando i vari componenti in sottosistemi come: il dispositivo ad ultrasuoni, il sistema di comando del motore, il sistema di misurazione costituito da oscilloscopio e misura del raggio.



Figura 6: Immagine schema complessivo

2.2 Dispositivo ad ultrasuoni

È costituito dalle sonde trasmettitore e ricevitore, create in laboratorio per ridurre i costi dei vari componenti. Il trasmettitore Tx è basato su un chip costituito da sei porte NOT e configurato in modo tale da ottenere una frequenza nominale di oscillazione di circa 41'112 Hz. Il Tx è regolato adeguatamente per avere una massimizzazione della potenza trasmessa al ricevitore. Quest'ultimo è costituito da un amplificatore operazionale ad alto prodotto banda guadagno, che permette di avere un guadagno di circa 40 dB. Le due sonde, rappresentate in Fig. 7 sono saldamente fissate alla struttura metallica e poste ortogonalmente rispetto all'asse del motore.



Figura 7: Immagine della trasmettente e del ricevitore

Trasmettente e ricevitore sono posti tra loro ad una distanza di pochi centimetri. Questo per ottenere un segnale di ritorno pressoché in asse con la sonda ricevitore, quindi un angolo di incidenza dell'onda rispetto alla sonda ricevente, quasi nullo.

Il trasmettitore è stato alimentato attraverso un generatore GW INSTEK GPS-4303 con una tensione di circa 12 V e una corrente pressoché trascurabile. Mentre il ricevente alimentato sempre dallo stesso generatore ma con una doppia alimentazione da -12 V a +12 V. Al ricevitore sono collegati i puntali di una sonda di misurazione, la quale permette il collegamento con l'oscilloscopio e la successiva visualizzazione dei segnali di ritorno.



Figura 8: Cono di polistirolo

Per evitare dispersioni di segnale e l'insorgere di disturbi, provenienti dall'esterno, è stato applicato un tronco di cono a base rettangolare di polistirolo. Il polistirolo è un materiale fonoassorbente quindi permette inoltre la riduzione dell'angolo di propagazione del segnale generato dallo speaker trasmettitore. Questo cono permette la riduzione sia del segnale di ritorno dovuto alle pareti e agli oggetti dell'ambiente circostante, ossia l'eliminazione della componente in frequenza di 41 khz, sia l'eliminazione delle componenti in frequenza variabili nel tempo causate dall'effetto Doppler. Questo effetto Doppler di disturbo potrebbe essere creato sia dall'addetto alla misurazione, mentre si sposta per controllare i vari strumenti del sistema di misura, sia da persone ignare dell'attività di misura, le quali potrebbero passare vicino al campo d'azione delle sonde alterandone le misurazioni.

Per aumentare la riduzione dei disturbi provenienti dall'esterno è stato applicato,



Figura 9: Pannello fonoassorbente

come in Fig. 4 e 9, dietro il campo di misura, dei pannelli fonoassorbenti. Essi assorbono il segnale diminuendo la riflessione quindi risaltando le frequenze causate dal movimento della pallina. Inoltre isolano il dispositivo da agenti esterni che creerebbero disturbo come movimenti inaspettati o passaggio di persone ignare alle misurazioni che in questo caso invaliderebbero la prova. I pannelli sono due delle dimensioni di 1 m di altezza e 1 m di larghezza con superficie piramidale. Essi sono fissati ad un pannello di cartone e posti a V, rivolti con l'apertura di 110° , verso il dispositivo per ridurre ulteriormente le riflessioni.

2.3 Motore e Arduino

Il motore utilizzato per la prova è di tipo passo-passo (stepper), quindi sincrono con corrente continua.

L'utilizzo di questo motore è vantaggioso per il fatto che ha un basso costo rispetto ad altri motori con stesse caratteristiche, ma anche per riuscire a mantenere velocità di rotazione costanti nel tempo. Quest'ultimo parametro importante per avere una perfetta rotazione della pallina.

Il circuito di alimentazione del motore è costituito da un alimentatore GPS-3303, il quale eroga una tensione di circa 25 Volt ed una corrente di 0.23 Amperé.

Il motorino è stato fissato alla struttura metallica, all'altezza dell'incrocio della T, come rappresentato in Fig. 10 per ottenere una maggior stabilità

nella fase di rotazione della pallina e con l'albero motore rivolto verso il terreno.

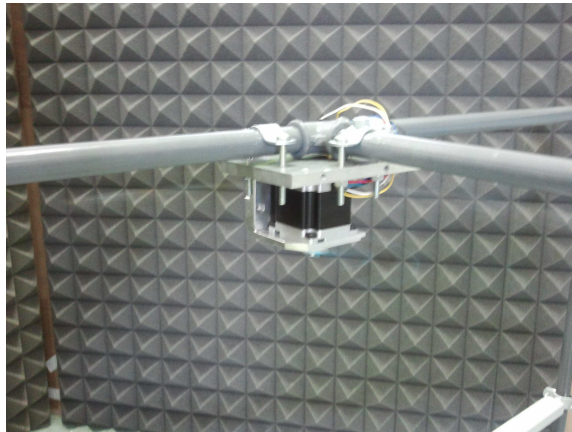


Figura 10: Motore stepper

Il motore stepper viene comandato tramite il sistema di controllo costituito da un PC, un Arduino Mega 2560 ed una scheda di potenza, Fig. 11.

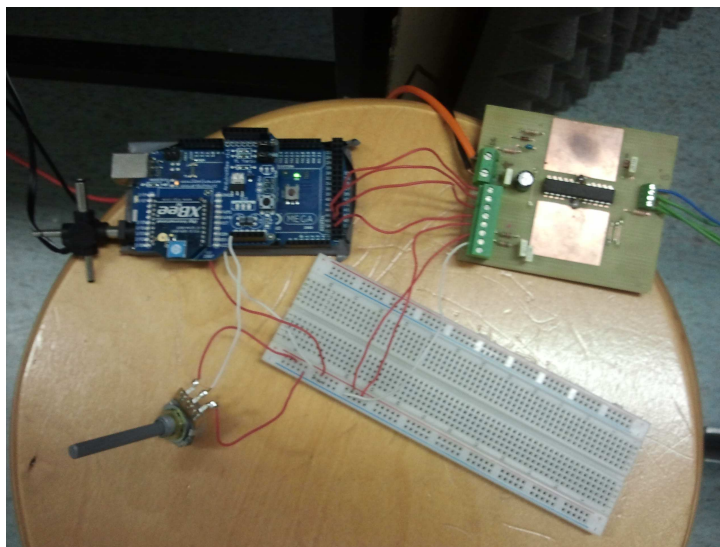


Figura 11: Sistema di controllo

All'Arduino è stata collegata una scheda Shield Xbee, la quale permette ad Arduino di comunicare in modalità wireless utilizzando Zigbee, il quale può comunicare fino a 20 metri al chiuso e circa 100 metri all'aperto. Zigbee è un protocollo di comunicazione ad alto livello che utilizza piccole antenne digitali a bassa potenza per WPAN. Esso opera nelle frequenze radio assegnate per scopi industriali, scientifici e medici; in Europa individuate alle frequenze di 915 MHz. Questa tecnologia ha lo scopo di essere più

semplice e più economica di altre WPAN come, ad esempio, Bluetooth o Wi-Fi.

Tramite il software Arduino è stato compilato un programma, il quale successivamente è stato inviato all'Arduino, con l'utilizzo della connessione Zigbee. Il software Arduino è formato di una libreria software C/C++ chiamata "Wiring", che permette una facile compilazione. Il programma utilizzato consente di comandare il motore attraverso il pc, ossia da remoto. Questo aspetto è molto vantaggioso per il fatto che la persona addetta alle misure, può mantenersi ad una adeguata distanza dal raggio d'azione del sistema ad ultrasuoni. Questo permette di ridurre gli errori dovuti a spostamenti indesiderati nelle vicinanze del campo di misura. L'applicazione consente di resettare la velocità del motore a 200 rpm, la quale successivamente tramite altri due pulsanti può essere aumentata o diminuita di 10 rpm. Per evitare la lettura degli strumenti ad una velocità non corrispondente a quella reale, è stato applicato un pulsante che permette la visualizzazione della velocità corrente; mentre nel caso in cui questa velocità deve essere aumentata di un valore inferiore ai 10 rpm è possibile convertire la modalità di comando da remoto a potenziometro attraverso un altro pulsante.

2.4 Sistema di misurazione

Il sistema di misurazione può essere suddiviso in due sottosistemi che permettono di rilevare: la misura del raggio effettivo di rotazione e la misurazione, attraverso un oscilloscopio, del valore che acquisisce il ricevente.

2.4.1 Misurazione raggio

In questo progetto è stata utilizzata una pallina di legno, dal diametro di 33 mm, e verniciata di colore grigio.

Il legno è un componente molto leggero che permette di avere un'inerzia non molto elevata del carico applicato al motore, quindi un assestamento al

cambio di velocità molto rapido. Questa poca inerzia però al contempo impedisce l'utilizzo di raggi di rotazione troppo elevati a causa dell'attrito viscoso dell'aria che prevale sull'inerzia della pallina.

Nella pallina è presente un piccolo gancio su cui è legato un filo inestensibile di lana con spessore un decimetro di millimetro e con lunghezza di 300 mm, che permette il collegamento con l'albero motore. Il filo è fissato all'albero motore tramite delle fasciette di plastica.

A causa della forza di gravità il filo collegato alla pallina non sarà mai parallelo al terreno, durante la rotazione, dato che le velocità utilizzate impediscono il perfetto allineamento orizzontale.

Quindi si creerà un angolo di rotazione rispetto l'orizzonte.

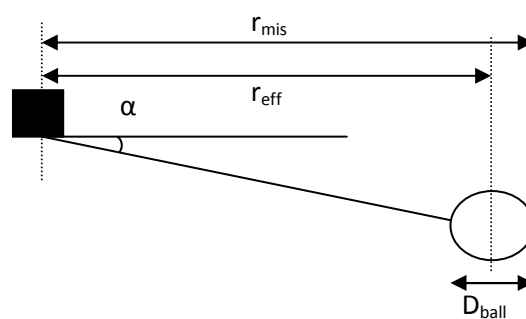


Figura 12: Rappresentazione rotazione

Dato che la conoscenza dell'angolo α , come rappresentato in Fig. 12, è di difficile acquisizione, si utilizza un modo più semplice e diretto per ottenere il raggio effettivo di rotazione.

Fig. 13 mostra schematicamente il sistema di misurazione del raggio effettivo di rotazione della pallina, che è costituito da una sbarra millimetrata, fissata alla struttura metallica subito sotto alla zona di rotazione della pallina e posta parallelamente al terreno.

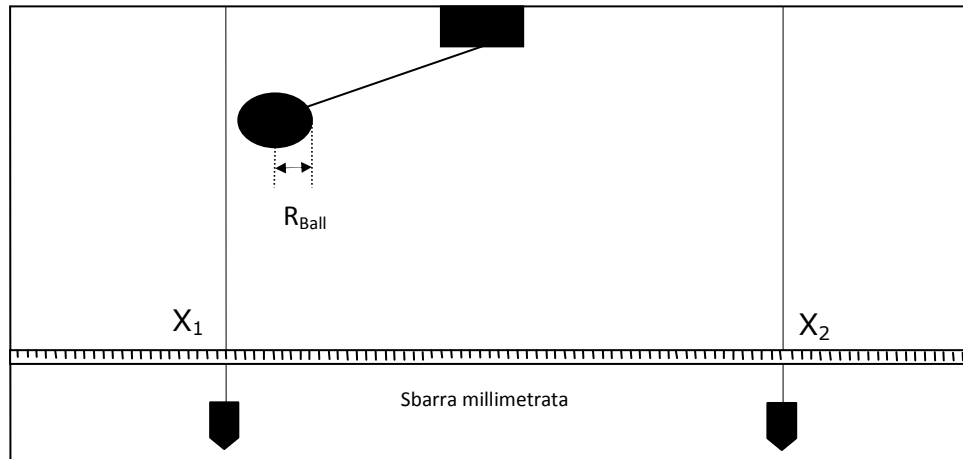


Figura 13: Sistema di misurazione del raggio

Sono presenti due fili di nylon, alle cui estremità sono legati due piombini da pesca. Spostando i fili e facendoli sfiorare con la pallina in rotazione, si può rilevare il diametro della pallina più il filo, quindi eseguendo la differenza dei due valori misurati X_1 e X_2 , sottraendoci il diametro della pallina d_p e dividendolo per due si ottiene il raggio effettivo di rotazione:

$$r_e = \frac{(X_1 - X_2) - d_{Ball}}{2} \quad (2.1)$$

Nel eseguire questo tipo di misurazione l'errore più frequente è quello di parallasse, dato che la riga millimetrata è nelle prossimità della zona di rotazione della pallina, quindi posizione scomoda per la lettura. È necessario prestare particolare attenzione nella lettura delle misure.

2.4.2 Oscilloscopio

L'oscilloscopio utilizzato nell'esperienza è un LeCroy 400 MHz con ADC a 12 bit ed una frequenza di campionamento fino a 2 GSamples/sec.

Il collegamento tra oscilloscopio e ricevitore ad ultrasuoni avviene tramite una sonda di misurazione, la quale viene collegata dal lato del connettore BNC al canale ch1 dell'oscilloscopio, Fig. 14, mentre il puntale metallico e il collegamento a massa al ricevente.

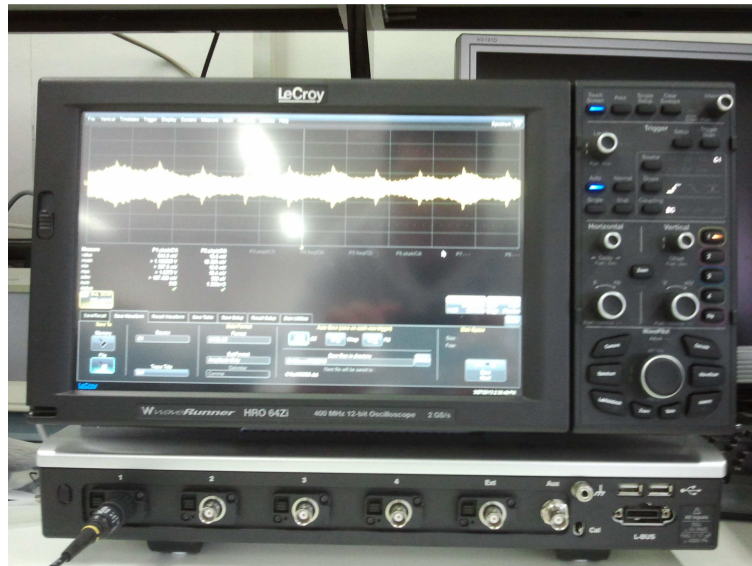


Figura 14: Oscilloscopio

L'oscilloscopio è stato impostato in modo tale da visualizzare sul display un determinato numero di periodi, stabiliti in base alla velocità di rotazione della pallina. Dato che la prova va da 100 rpm fino a 300 rpm, dividendo per 60 si ottengo i giri per secondo quindi si ha:

$$\frac{100}{60} = 1.66 \text{ rps} \quad \text{e} \quad \frac{300}{60} = 5 \text{ rps},$$

rappresentanti le corrispettive frequenze di rotazione della pallina. Per garantire il teorema di Nyquist è necessario che la frequenza di campionamento sia almeno due volte maggiore della massima frequenza del segnale. Nel caso in esame è stata assunta una frequenza di campionamento di 500 kSamples/s e un intervallo di acquisizione di 2 secondi, pertanto i periodi visualizzati sono circa 3 e mezzo per la velocità a 100 rpm e all'incirca 10 per la velocità di 300 rpm, come rappresentato in Fig. 15. Quindi un numero di periodi visualizzati non troppo basso per la velocità a 100 rpm e non eccessivo per la velocità a 300 rpm.

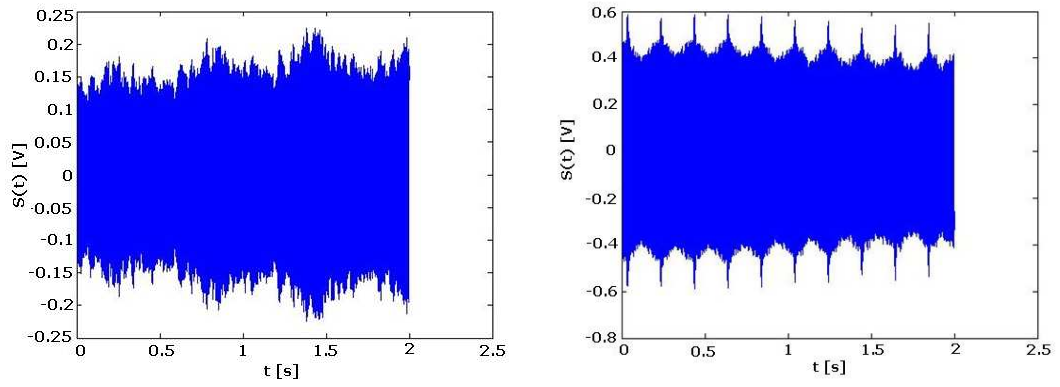


Figura 15: Visualizzazione display DSO 100 rpm e 300 rpm

Questa velocità di campionamento mi impedisce di avere un fenomeno di aliasing, e al contempo un numero molto elevato di campioni.

CAPITOLO 3

Misure ottenute

L'attività di misurazione è eseguita dopo aver completato il montaggio del sistema e la calibrazione degli strumenti di misura.

Le misure sono state eseguite mantenendo inalterata la distanza tra sorgente/ricevente ad ultrasuoni e fulcro di rotazione della pallina, albero motore, pari ad 840 mm.

L'intensità della trasmittente è mantenuta costante, come anche la frequenza di propagazione, pari a $41 \cdot 112$ Hz.

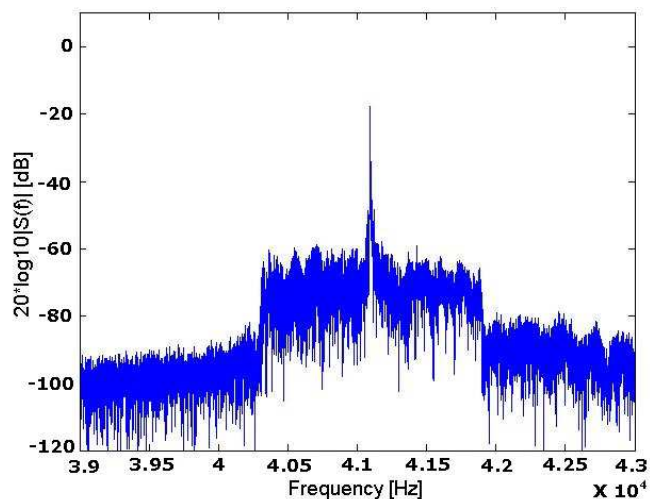


Figura 16: Spettro in frequenze

L'ampiezza dello spettro in frequenze, rappresentata in Fig. 16 è in scala logaritmica, questo tipo di scala fa notare la rapida decrescita dello spettro dalla frequenza fondamentale a quelle laterali, e l'alto valore del rapporto segnale rumore.

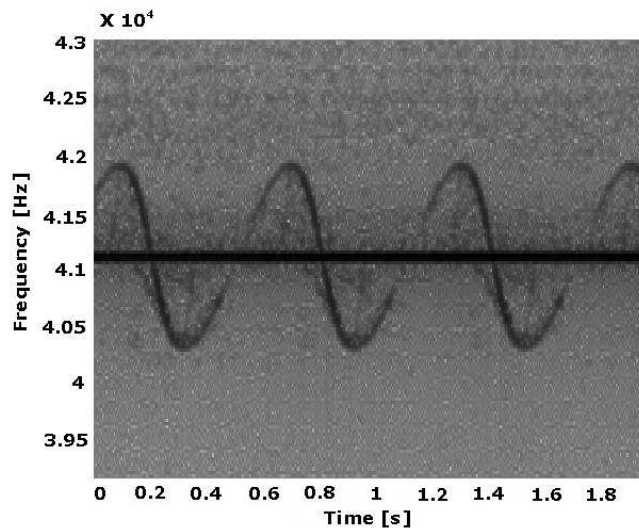


Figura 17: Spettrogramma frequenze tempo

Si nota, da Fig. 17, che la frequenza fondamentale è il valor medio dell'andamento di rotazione della pallina, con un aumento e una diminuzione di frequenza dovuto all'effetto Doppler.

Viene mantenuta costante anche la lunghezza del filo che collega l'albero motore con la pallina di legno, pari a 300 mm. L'unico parametro che viene variato è la velocità di rotazione del motore che va da un minimo di 100 rpm ad un massimo di 300 rpm, scelta in modo tale da rappresentare, con un raggio approssimativo di 350 mm, una velocità tangenziale rispettivamente di 3.5 m/s e di 10.5m/s. Queste velocità sono state scelte col presupposto di simulare le velocità che possono raggiungere alcuni arti umani durante la fase di camminata e/o di corsa. Il passo di incremento da una velocità all'altra è di 20 rpm, ossia vengono considerate undici velocità differenti. Per ogni velocità si eseguono dieci misure, quindi si ottiene un complessivo di 110 misurazioni. Questo permette di ottenere un valore più prossimo a quello reale. Un altro parametro che varia a causa della velocità è il raggio di rotazione della pallina in legno.

Si possono riassumere i valori appena citati in tabella 1:

Velocità (rpm)	Numero di acquisizioni	Raggio effettivo (mm)
100	10	316
120	10	323
140	10	326
160	10	328
180	10	329
200	10	330
220	10	331
240	10	331
260	10	331
280	10	331
300	10	331

Tabella 1: Velocità e raggi effettivi

Quindi il procedimento per ogni velocità è: applicare tramite il software Arduino la velocità presa in considerazione e verificare se corrisponda a quella desiderata, avvicinarsi al campo di misura per rilevare le indicazioni presenti sulla riga millimetrata e ricavarne il raggio effettivo di rotazione ed infine salvare tramite chiavetta USB le dieci acquisizioni prelevate dall'oscilloscopio. Il procedimento per le altre velocità è il medesimo, prestando parecchia attenzione a rilevare le misure del raggio e a non portare disturbo nel campo di misurazione. Quest'ultimo potrebbe essere provocato da un movimento dell'utilizzatore del sistema nelle prossimità del dispositivo ad ultrasuoni, che genererebbe una componente di effetto Doppler di disturbo per la rilevazione.

La prima velocità considerata è quella a 100 rpm. Il raggio effettivo di rotazione è di 316 mm con una velocità tangenziale massima pari a:

$$v_{t,max} \frac{2*\pi*rpm}{60} \cdot (r_{Ball}) = \frac{2*\pi*100}{60} \cdot 0.316 = 3.31 \text{ m/s.} \quad (3.1)$$

Il grafico ricavato tramite il programma Matlab, relativo allo spettrogramma in scala di grigi è rappresentato in Fig. 18.

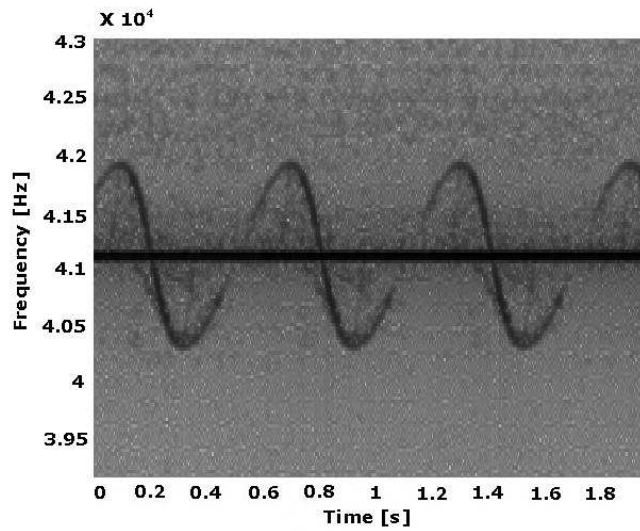


Figura 18: Spettrogramma frequenze tempo

Mentre considerando solo due periodi dell'andamento della rotazione della pallina e convertendo l'ampiezza da frequenze a velocità tangenziali si ottiene uno spettrogramma come quello in Fig.19.

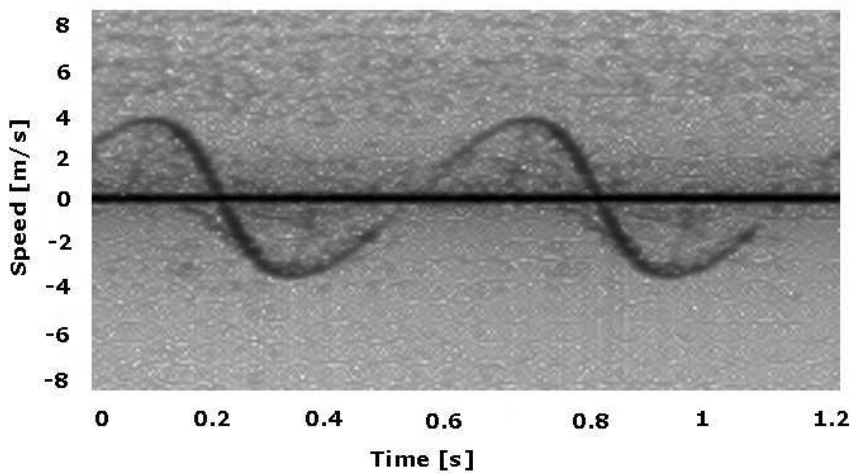


Figura 19: Spettrogramma 100 rpm

Attraverso la formula inversa della (1.7), relativa all'effetto Doppler istante per istante, si può ricavare la velocità tangenziale dalla frequenza:

$$v_r(f) = \frac{f_D \cdot v}{2 \cdot f_n} ,$$

con $v = 341 \text{ m/s}$ e $f_n = 41 \cdot 112 \text{ Hz}$.

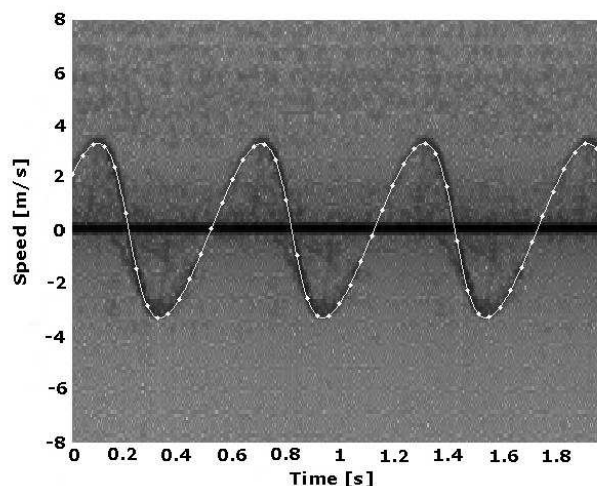


Figura 20: Spettrogramma velocità tempo con andamento teorico

Dalla Fig. 20 si nota la sovrapposizione della traiettoria reale, con la traiettoria ideale impostata in Matlab variando alcuni parametri come ampiezza, fase e pendenza dei fronti di salita e di discesa. È possibile notare inoltre che il fronte di salita della traiettoria ha pendenza, in modulo, minore del fronte di discesa, a causa dell'effetto Doppler. Il passo successivo è quello di sovrapporre all'andamento reale una sua stima, che può essere creata con l'utilizzo della trasformata di Hough tramite Matlab.

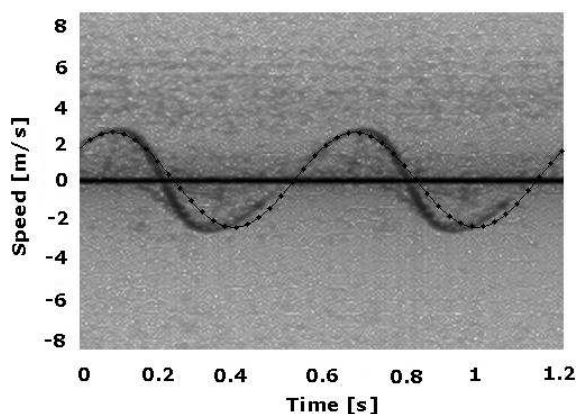


Figura 21: Spettrogramma con stima sovrapposta

Da Fig. 21 si può notare che il programma di stima riesce a rilevare in modo accurato l'ampiezza della traiettoria, mentre non viene considerato il fronte di salita e il fronte di discesa con una pendenza diversa rispetto all'andamento di una sinusoidale.

Fig. 22 rappresenta l'andamento della traiettoria con una velocità di 300 rpm, ossia alla massima velocità considerata nell'esecuzione del progetto.

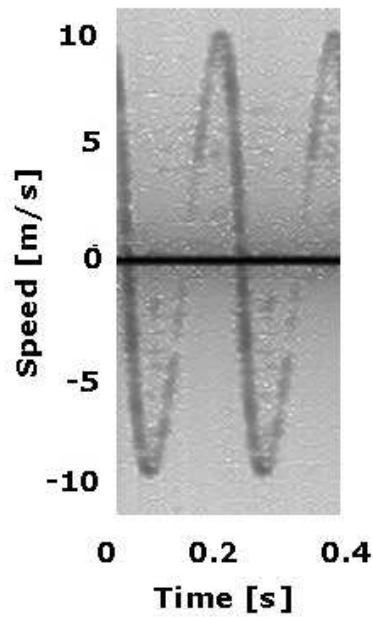


Figura 22: Spettrogramma 300 rpm

Per tale velocità si ha un andamento della traiettoria che ha un raggio di 331 mm e una velocità tangenziale massima pari a 10.39 m/s.

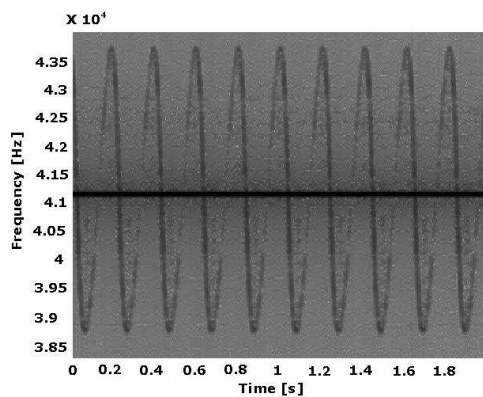


Figura 23: Spettrogramma in frequenza

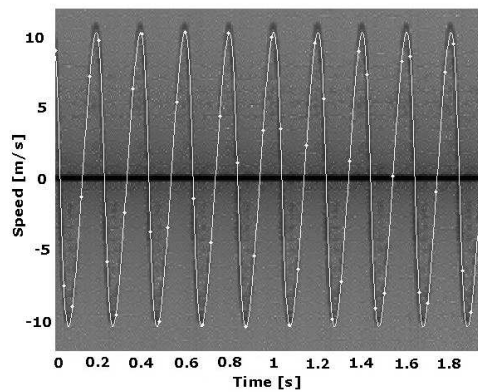


Figura 24: Spettrogramma nelle velocità

Confrontando le Fig. 19 e 23 si può notare che all'aumentare della velocità di rotazione della pallina si ha un aumento della frequenza massima dovuta all'effetto Doppler.

Osservando la figura 24, invece si ha un andamento reale quasi prossimo a quello ideale generato tramite Matlab.

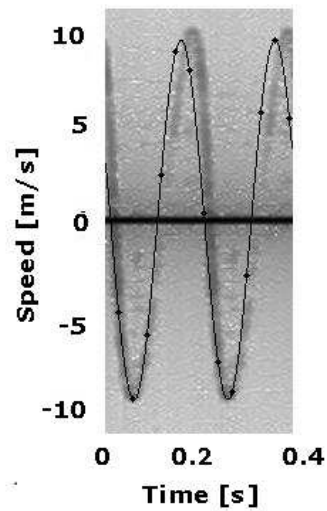


Figura 25: Spettrogramma con stima sovrapposta

In Fig. 25 si nota che il programma Matlab che determina la stima ha un po' di difficoltà a trovare il valore di ampiezza massima positiva, ma rileva un periodo abbastanza corretto rispetto a quello dello spettrogramma, ossia dell'andamento reale della traiettoria.

Dall'analisi degli spettrogrammi reali si possono individuare alcune particolarità:

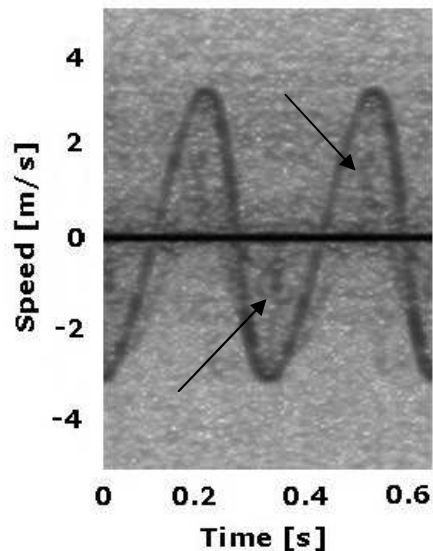


Figura 26: Fenomeni di disturbo

Dai punti individuati delle frecce in Fig.26 sono presenti delle zone di un grigio più scuro, che individuano degli oggetti in movimento, dato che

hanno frequenza diversa rispetto a quella nominale(41`112 Hz) della sonda ad ultrasuoni.

Questi disturbi potrebbero essere dovuti al filo che esegue una piccola variazione delle frequenze di ritorno al ricevente.

Nella fase di misurazione si sono rilevate delle velocità critiche per la struttura metallica di sostegno. Alla velocità di 140 rpm la struttura presentava un fenomeno di vibrazione non trascurabile. Aumentando la velocità da 240 a 280 rpm si ha un effetto di ondulazione, della struttura, che peggiora in un effetto di vibrazione molto più intenso di quello a 140 rpm. Questo fenomeno di disturbo lo si può notare dalle Fig. 27 e 28, dove a 280 rpm si generano delle componenti in frequenza costanti e poste molto vicine a quella fondamentale.

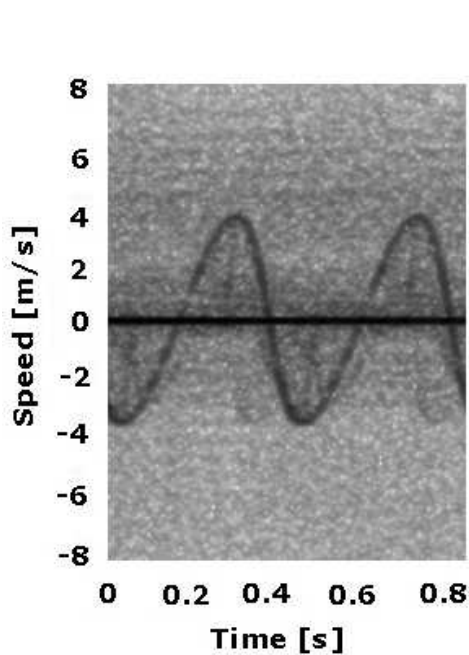


Figura 27: Disturbo non evidente a 140 rpm

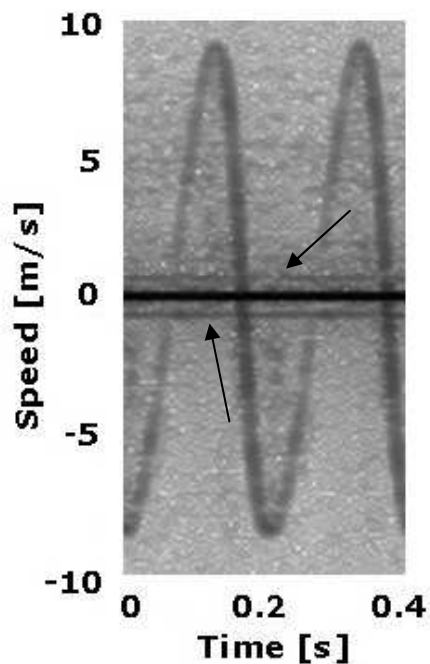


Figura 28: Fenomeno di disturbo a 280 rpm

La velocità di 280 rpm è critica per il motore, ossia genera vibrazioni non trascurabili per il nostro sistema di misura.

Tutti questi disturbi che si presentano negli spettrogrammi, possono causare problemi nella rilevazione delle stime delle traiettorie ossia l'individuazione dell'ampiezza e della fase che hanno il maggior numero di "voti".

Ora è possibile rappresentare in un grafico, Fig. 29, che ha come ascissa la velocità angolare ω [rad/s] e come ordinata la velocità tangenziale $V_{b,t}$ [m/s], l'andamento ideale (rosso tratteggiato) considerando i raggi effettivi, e l'andamento reale (blu continuo). L'andamento reale è creato eseguito lo scarto tipo di ogni velocità considerando le 10 misure e dopo aver eliminato quella che si discosta di più dal valor medio. Si creano degli intervalli attraverso i quali passa la retta reale.

Lo scarto tipo è:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^N (q_k - \bar{q})^2} \quad , \quad (3.2)$$

in cui $N = 10$, q_k il k-esimo valore, mentre q segnato il valor medio dei dieci valori.

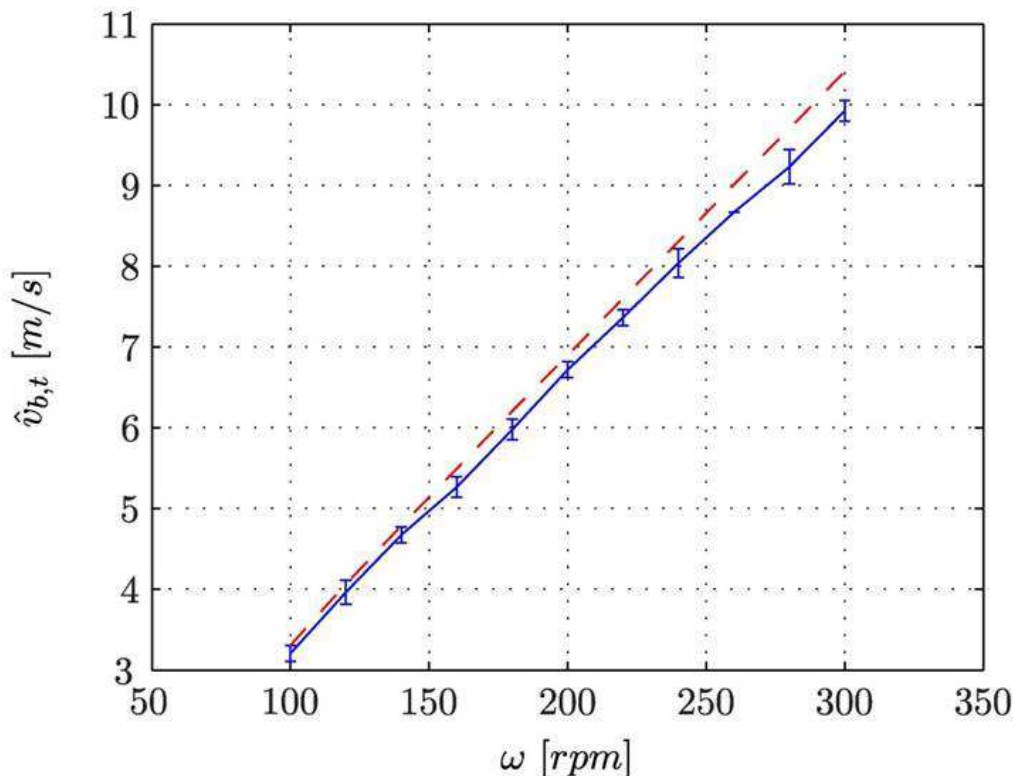


Figura 29: Andamento reale ed ideale

Si possono notare da Fig. 29 parecchi aspetti di non idealità. All'aumentare della velocità si ha un aumento proporzionale dello scostamento dei valori reali da quelli ideali e anche uno spostamento lungo l'asse delle ordinate di un certo valore.

Osservando l'andamento dello scarto tipo delle varie velocità, si può notare che il valore minimo è di 0.06 m/s alla velocità di 260 rpm, mentre quello massimo, è di 0.11 m/s alla velocità di 280 rpm. Quest'ultimo risultato coincide col disturbo dovuto alle vibrazioni della struttura, le quali portano un deterioramento dei risultati di misura.

Per correggere il grafico si possono individuare due particolari errori, uno di offset ed uno di guadagno. Il primo si ottiene misurando lo scostamento del valore di velocità a 100 rpm tra la retta ideale e quella reale, pari a -0.126 m/s. Il secondo errore si ottiene applicando il criterio dei minimi quadrati, ossia la retta che minimizza la differenza quadratica media tra la curva reale e la retta di miglior approssimazione stessa. Quindi l'errore di guadagno è identificato dalla seguente equazione:

$$e = \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2} ,$$

dove gli e_n sono le differenze tra i valori assunti dalla curva reale e la retta di migliore approssimazione, in corrispondenza delle 11 velocità. L'errore di guadagno ottenuto è pertanto pari a 1.05.

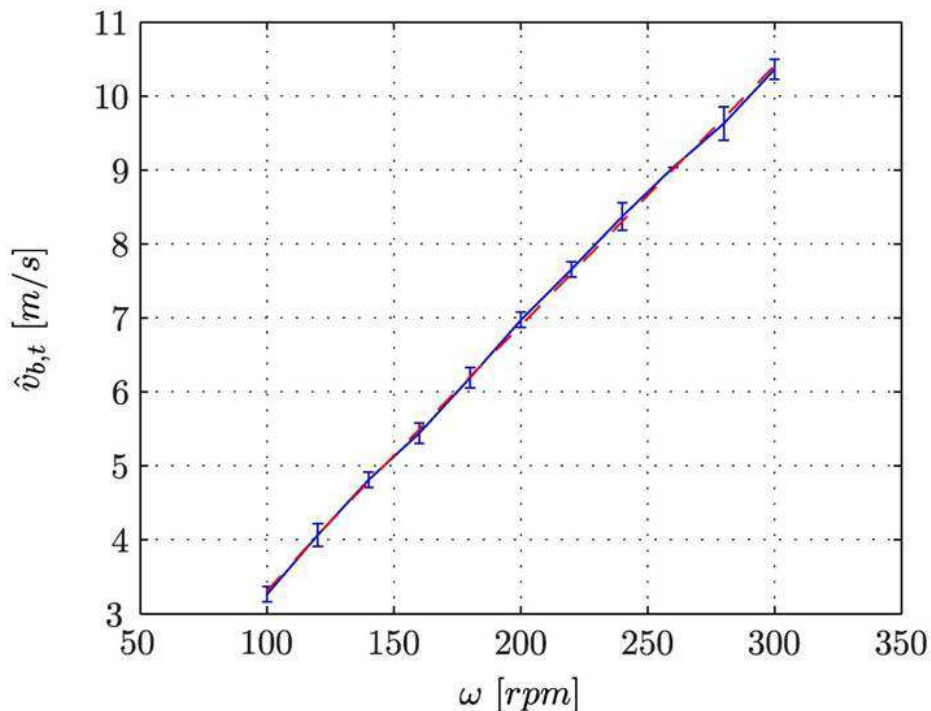


Figura 30: Andamento reale ed ideale con compensazione

Da Fig. 30 è evidente che la compensazione eseguita porta ad una quasi perfetta sovrapposizione della retta ideale con quella reale, per di più l'andamento reale è quasi comparabile con una retta, quindi non vi sono enormi scostamenti nell'intervallo di velocità, che va da 100 rpm a 300 rpm.

Questi due errori appena considerati possono essere compensati applicando, al sistema, un guadagno di 1.05 ed un valore di offset di -0.126 m/s. È possibile creare un andamento a gaussiana relativo alle velocità, eseguendo una differenza tra matrice di velocità reali e matrice di velocità teoriche. Si ottiene pertanto una matrice di errori che ha il seguente andamento:

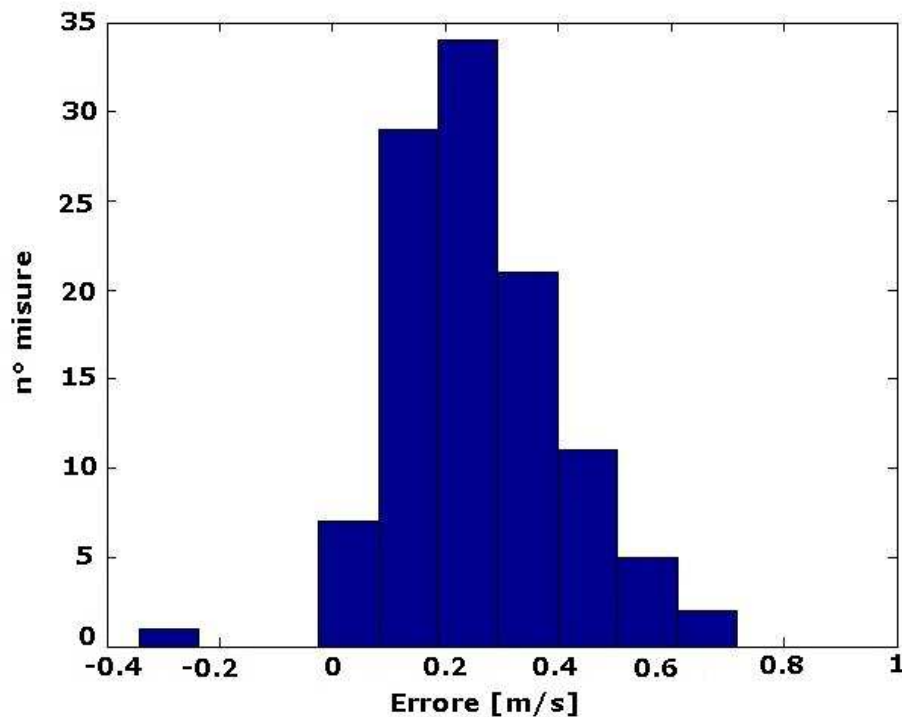


Figura 31: Gaussiana senza compensazione

Da Fig. 31 si nota che la maggior parte delle misure (circa 34) sono concentrate ad un valore di pressappoco 0.25 m/s.

Compensando la matrice di velocità reali v_i con l'equazione $v_i' = 1,05 \cdot v_i - 0,126$ m/s, si ottiene un andamento a gaussiana come in Fig. 32.

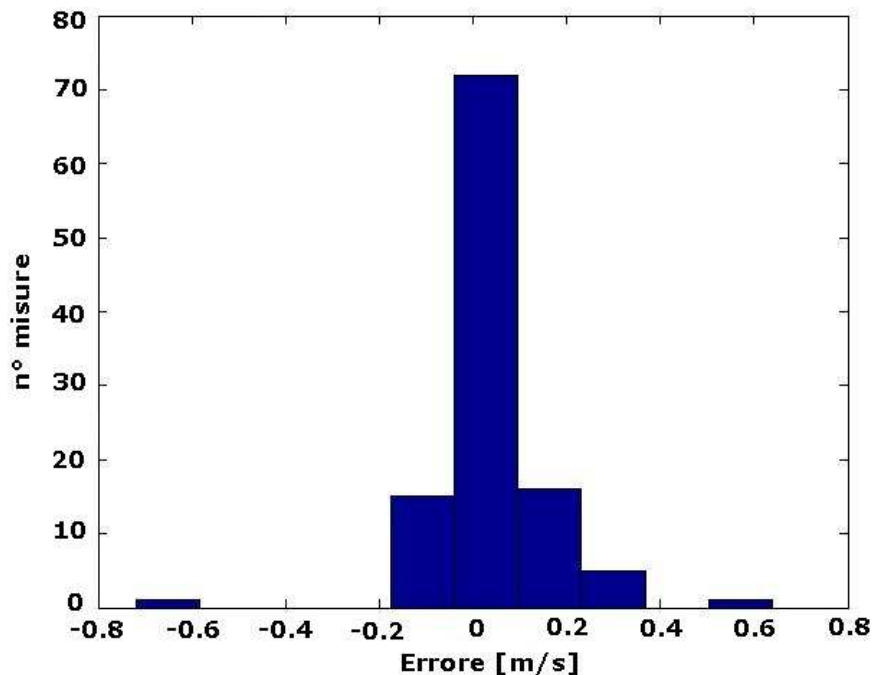


Figura 32: Gaussiana con compensazione

Si nota che la compensazione è stata eseguita in modo molto accurato, dato che la maggior parte delle misure, all'incirca 70, sono concentrate in 0.4 m/s.

Analizzando l'incertezza di misura si può individuare, oltre al contributo d'incertezza ottenuto tramite lo scarto tipo (0.11 m/s), un contributo dovuto alla campionamento nel tempo. È possibile tenere in considerazione il numero di campioni utilizzati in Matlab per fare la trasformata di Fourier del segnale ottenuto dall'oscilloscopio con frequenza di campionamento pari a 500 kS/s. Si otterrà quindi un intervallo temporale tra un campione e quello successivo pari a:

$$T_c = \frac{N_c}{R_s} = \frac{16384}{500000} = 0.032 \text{ s.} \quad (3.3)$$

Quindi una frequenza pari a $R_c = 30.52 \text{ Hz}$.

Utilizzando la formula dell'effetto Doppler (1.7) si può ricavare l'incremento di velocità relativo alla frequenza tra un campione e quello successivo:

$$u_2 = \frac{R_c \cdot c}{2 \cdot f_n} = \frac{30.52 \cdot 341}{2 \cdot 41112} = 0.13 \text{ m/s,}$$

con $c = 341 \text{ m/s}$, mentre $f_n = 41112 \text{ Hz}$.

Il contributo di incertezza dovuta al campionamento è quindi pari a 0.13 m/s .

È possibile unire i due contributi d'incertezza ottenendo un'incertezza globale pari a:

$$u_x = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.11^2 + 0.13^2} = 0.16 \text{ m/s}.$$

Conclusioni

Studi precedentemente eseguiti hanno permesso di impostare una distanza tra dispositivo ad ultrasuoni e centro di rotazione della pallina (albero motore) di 840 mm. Le velocità considerate invece variano da un minimo di 3.31 fino a un massimo di 10.39 m/s. Con l'impostazione di questi parametri è stato possibile eseguire la caratterizzazione del sistema ad ultrasuoni.

Attraverso l'acquisizione ed il successivo studio delle misure, sono stati ottenuti due valori d'errore importanti per una successiva compensazione del sistema, un errore di offset pari a -0.126 m/s ed un errore di guadagno pari a 1.05. La compensazione ha permesso di ridurre l'errore complessivo medio del sistema da un valore di 0.25 m/s ad un valore di 0.04 m/s, quindi si ha un consistente aumento dell'accuratezza di misura. L'incertezza di misura ottenuta ha come valore massimo 0.16 m/s, presente alla velocità di 280 rpm.

Riprendendo in considerazione gli obiettivi del progetto, ovvero l'identificazione del corpo umano, si possono trarre alcune considerazioni. Il funzionamento del sistema tra le velocità di 3.31 m/s e 10.39 m/s permette un suo utilizzo nell'identificazione del movimento di un essere umano. Un campo di utilizzo in cui può essere applicato il sistema in considerazione è quello della sicurezza, nel quale viene rilevato il movimento di una o più persone. La condizione che permette l'attivazione dell'allarme può essere stabilita dalla velocità con cui si muove l'individuo o dalla postura che mantiene. Ulteriore utilizzo è quello di distinguere il movimento di un animale domestico rispetto ad una persona vista come intruso. Per settori come quello medico, il dispositivo non è ancora pronto per l'utilizzo. Sono necessari ulteriori studi per aumentare la sensibilità e l'accuratezza di misura della sonda. Un possibile passo successivo potrebbe essere quello di applicare più sorgenti ad ultrasuoni posizionate con differenti angolazioni che rilevano un corpo umano. Si avrebbe quindi una complessità computazionale più elevata, ma che potrebbe permettere un possibile passo avanti per una successiva produzione di tale sistema.

Bibliografia

- Lazzarin R., Strada M., 2001, Elementi di acustica tecnica, CLEUP
- D.H.Ballard, 1980, "Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes", in IEEE
- Q. Zang, T. S. Yeo, H. Tan, and Y. Luo, "Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform", IEEE transaction on geosciences and remote sensing, January 2008.
- N. F. Law, A. W. C. Liew and Wan-Chi Siu, "Fast algorithm for binary field wavelet transform for image processing" IEEE
- M. Bertocco, A. Sona, Introduzione alle misure elettroniche, Ed. 2010, Lulu
- <http://www.verascienza.com/che-cosa-sono-gli-ultrasuoni/>, 12 giugno 2013
- <http://www.audiomaster.it/2013/01/20/cose-il-suono/>, 12 giugno 2013
- Wikipedia