

**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

**SCUOLA DI INGEGNERIA  
-Sede di Forlì-**

***CORSO DI LAUREA IN:*  
INGEGNERIA AEROSPAZIALE  
Classe: L9**

**ELABORATO FINALE DI LAUREA**

**In: Aerodinamica degli Aeromobili**

**Titolo:**

**Tecnica innovativa per la calibrazione di un tubo di Pitot a 5  
fori**

**CANDIDATO:**

**Marco Bellucci**

**RELATORE:**

**Prof. Alessandro Talamelli**

**Anno Accademico 2022-2023**

## **Sommario**

Nella presente tesi viene si descrivono le caratteristiche del tubo di Pitot a 5 fori, in particolare i processi e le tecniche per la calibrazione di questa sonda. Si è studiata una nuova tecnica di calibrazione che possa essere comparata con le altre già esistenti in modo da ricavarne i vantaggi ingegneristici. Inoltre, viene descritto un processo di simulazione di calibrazione su MatLab che è stato utile ai fini della visualizzazione grafica delle mappe di calibrazione senza il bisogno di un test pratico. Infine, vengono presentati i risultati grafici e numerici con l'aggiunta di consigli su come migliorare ulteriormente l'intero processo.

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	1
<b>Teoria</b> .....	3
<b>1.1 Pressione statica e totale</b> .....	3
<b>1.2 Tubo di Pitot</b> .....	5
<b>1.3 Tubo di Pitot multiforo</b> .....	8
<b>1.4 Effetti viscosi e di comprimibilità</b> .....	11
<b>1.5 Catena di misurazione</b> .....	12
<b>Procedure di Calibrazione</b> .....	15
<b>2.1 Metodi Operativi</b> .....	15
<b>2.2 Coefficienti di pressione e mappe di calibrazione</b> .....	16
<b>2.3 Procedura di calibrazione tradizionale</b> .....	22
<b>2.4 Procedure di calibrazione alternative</b> .....	23
<b>2.4.1 Calibrazione su stella e croce</b> .....	23
<b>2.4.2 Calibrazione beccheggio-rollio</b> .....	24
<b>Simulazione di Calibrazione</b> .....	28
<b>3.1 Procedura di simulazione</b> .....	28
<b>3.2 Studio dell'errore di posizionamento</b> .....	32
<b>Risultati</b> .....	36
<b>4.1 Mappe di calibrazione</b> .....	37
<b>4.2 Errori di posizionamento</b> .....	39
<b>4.3 Discussione dei risultati</b> .....	44
<b>Conclusioni</b> .....	45
<b>Elenco delle figure</b> .....	46

## Lista dei Simboli

$\alpha$	Angolo di beccheggio
$\psi$	Angolo di imbardata
$\theta$	Angolo di spazzata
$\varphi$	Angolo di rollio
$\rho$	Densità
$\vec{V}$	Vettore velocità
$C_{p\alpha}$	Coefficiente di pressione di beccheggio
$C_{p\psi}$	Coefficiente di pressione di imbardata
$C_{ps}$	Coefficiente di pressione statica
$C_{pt}$	Coefficiente di pressione totale
$P_s$	Pressione statica
$P_t$	Pressione totale
$a$	Velocità del suono
$M$	Numero di Mach
$P$	Pressione
$R$	Costante specifica del gas
$Re$	Numero di Reynolds
$T$	Temperatura

# Introduzione

Un tubo di Pitot a 5 fori è una sonda multiforo (*Multi-hole probe, MHP*) il cui scopo è quello di misurare un campo di moto in un flusso tridimensionale, ossia risalire al vettore completo della velocità a partire da misurazioni di pressione del flusso.

Grazie agli sviluppi tecnologici moderni, che hanno permesso una riduzione delle dimensioni dei componenti elettronici di acquisizione e un aumento della capacità di calcolo dei computer, le sonde multiforo sono diventate valide alternative alle altre tecniche di misurazione del campo di moto, come l'anemometro a filo caldo (*Hot-Wire Anemometry*), il *Particle-Image Velocimetry* (tecnica ottica) oppure il *Laser Doppler Anemometry* (tecnica laser).

La robustezza e la semplicità costruttiva di queste sonde, che le rendono affidabili e poco costose, sono i motivi principali per cui sono strumenti sempre più presenti in ambiti di progettazioni e ricerca.

I campi applicativi delle sonde multiforo riguardano tutti quegli ambiti dove si vuole conoscere la composizione tridimensionale del flusso, ossia le tre componenti del vettore velocità, e si possono differenziare a seconda delle loro forme geometriche, frequenza di acquisizione, temperature operative e tipologia di applicazione (nulling e non-nulling).

Alcuni esempi dei loro campi applicativi posso essere l'utilizzo di MHP per calibrare una galleria del vento per ottenere un flusso uniforme, studiare il campo di moto attorno modelli aerodinamici per valutarne resistenza e portanza studiando la composizione della loro scia e dei loro vortici, valutare il comportamento del flusso in entrata o in uscita da uno stadio di una turbomacchina in modo tale da ottimizzare le prestazioni di quest'ultima. Anche nella sezione di scarico di un veicolo è possibile studiare la direzionalità del flusso, tramite una sonda resistente alle alte temperature.

L'applicazione più importante rimane quella per determinare l'assetto di un velivolo in volo, ottenendo i valori di beccheggio e imbardata. In questo caso la sonda multiforo viene denominata *Air-data probe*. In questa situazione si fa uso di un tubo di Pitot a 5 fori precedentemente calibrato che verrà fissato al velivolo.

Lo scopo della tesi sarà quello di studiare la fattibilità e l'eventuale procedimento applicativo di un metodo alternativo di calibrazione del tubo di pitot a 5 fori, cercando di passare da un metodo dove la sonda viene mossa su angoli di beccheggio e imbardata, ad uno dove quest'ultima si muove su angoli di beccheggio e rollio, in modo da ottenere direttamente una mappa completa.

In altri termini, il lavoro sarà incentrato sul trovare relazioni matematiche che permettono di ottenere le misurazioni degli effetti di imbardata, tramite variazioni degli angoli di rollio durante la calibrazione. Si passerà quindi da matrici equispaziate in pitch e roll da matrici non necessariamente equispaziate in pitch e yaw e viceversa.

Una parte fondamentale del lavoro sarà quella della simulazione di calibrazione in modo tale da comprendere la complessità e la precisione richiesta dal nuovo meccanismo in modo da valutarne poi la fattibilità manifatturiera.

L'output finale sarà quindi una valutazione sull'intero processo di realizzazione e calibrazione dell'insieme sonda e meccanismo, in modo da capire se può portare vantaggi rispetto la calibrazione classica e semplificata su pitch e yaw.

# Capitolo 1

## Teoria

### 1.1 Pressione statica e totale

Ogni flusso è caratterizzato dalle seguenti grandezze: densità, temperatura, velocità e pressione, che combinate tramite le equazioni di Navier-Stokes, permettono di descriverne il comportamento nello spazio e nel tempo. Se il numero di Mach del flusso, che contiene l'informazione della velocità rapportata a quella del suono nel mezzo, non supera una soglia di 0.3, si può considerare tale flusso come incomprimibile e ciò mi permette di ricavare l'informazione della densità direttamente dall'equazione dei gas perfetti (ipotizzando quindi l'aria come tale), utilizzando solamente l'informazione sulla pressione e sulla temperatura.

$$\rho = \frac{P_s}{RT}$$

Per quanto riguarda l'informazione sulla velocità, essa può essere ricavata tramite il teorema di Bernoulli che è derivato dall'equazione della conservazione della quantità di moto delle equazioni di Navier-Stokes dove le ipotesi di flusso incomprimibile, stazionario, irrotazionale e con forze dovute alla massa del fluido trascurabili, sono soddisfatte. Secondo questo teorema, la pressione totale di un flusso rimane costante. La pressione totale di un flusso si ottiene se quest'ultimo venisse rallentato isoentropicamente, quindi senza perdite di energia, fino ad azzerare la velocità.

$$P_t - P_s = \frac{1}{2} \rho V^2 = q$$

La pressione totale di un flusso è data dalla somma della pressione statica da quella dinamica. Per pressione statica si intende la pressione che tale flusso possiede localmente. Il teorema di Bernoulli, una volta noti i valori di pressione statica e totale e quello della densità, fornisce il modulo della velocità del flusso, tramite la relazione inversa:

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

Un flusso che si muove con una velocità non nulla e che incontra un corpo solido, varierà i suoi valori di pressione statica e pressione dinamica a seconda della geometria di tale corpo che a sua volta permette al flusso di accelerare o decelerare. Infatti, affinché si conservi la pressione totale e il principio di Bernoulli sia rispettato, la pressione statica aumenterà o diminuirà a seconda se la velocità del flusso rispettivamente diminuisce o aumenta.

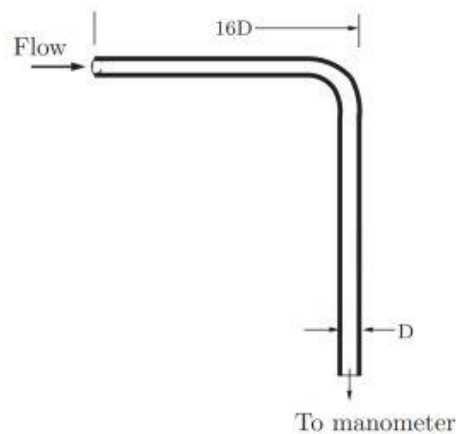
Il principio di funzionamento base delle ali o eliche dei vari velivoli si basa esattamente su questo concetto: il profilo alare di un'ala di un aeroplano, per esempio, ha una geometria tale da rallentare il flusso d'aria nel suo ventre e accelerarlo nel suo dorso, in modo tale da avere rispettivamente un aumento e una diminuzione della pressione statica e ciò genera un gradiente di pressione tale da creare una spinta verso l'alto.

Si può quindi dedurre che, quando il flusso incontra un punto del corpo dove la sua velocità si azzera, la pressione che si può misurare in tale punto sarà uguale alla pressione totale e quando lo stesso flusso è invece indisturbato, allora la pressione equivarrà alla pressione statica. I punti dove la pressione equivale alla pressione totale sono definiti come *punti di ristagno*.



## 1.2 Tubo di Pitot

Il tubo di Pitot è uno strumento che si basa appunto sulla conservazione della pressione totale di un flusso e ne permette la misura.



**Figura 1** Tubo di Pitot [1]

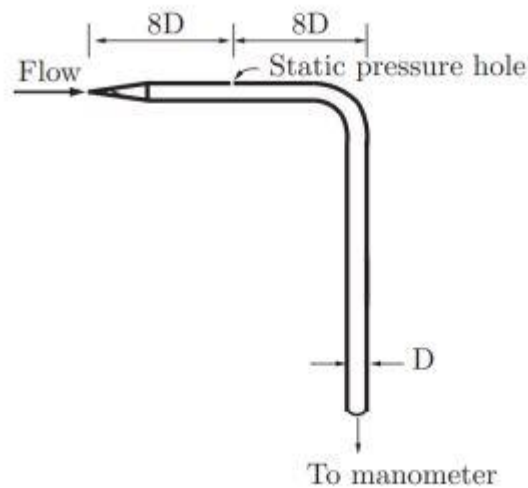
Come si può notare dall'immagine, la geometria del tubo di Pitot è tale da presentare un punto di ristagno sulla sua punta, che viene appositamente orientata come il flusso, e appunto in prossimità di esso viene aperto un orifizio, così da poter trasportare una porzione di flusso, caratterizzato da una pressione equivalente a quella totale, dall'esterno fino allo strumento di misura, che sia un trasduttore oppure un manometro.

La misurazione della pressione totale risulta essere molto accurata per i flussi a numero di Mach subsonico e ad alto numero di Reynolds. I flussi a basso numero di Reynolds comportano errori di misurazione dovuti alla viscosità del flusso, mentre flussi con numero di Mach intorno o maggiore di

I sono caratterizzati da fenomeni transonici e supersonici, come ad esempio onde d'urto che si generano in prossimità dell'orifizio.

Insieme alla misura della pressione totale, va ottenuta anche la misura della pressione statica per risalire al modulo della velocità.

La pressione statica, come già introdotto, è misurabile in quei punti in cui il flusso non è disturbato da alcun oggetto e ciò porta subito dedurre una prima problematica concerne alla sua misurazione. Uno strumento di misura, per quanto poco ingombrante possa essere, avrà comunque influenza sulla pressione del flusso per via delle variazioni di velocità indotte dalla sua forma geometrica; quindi, la pressione in corrispondenza dell'orifizio di misura non potrà mai essere esattamente equivalente alla pressione statica.



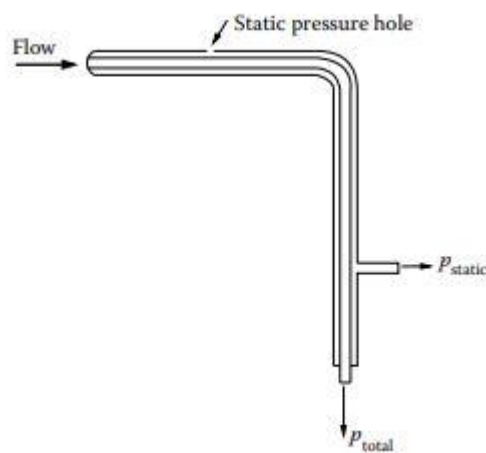
**Figura 2** Presa statica [1]

L'immagine rappresenta un tipico esempio di sensore utilizzato per la misurazione della pressione statica di un flusso, che prende il nome di *presa statica*: la punta, rivolta verso il flusso, accelera il flusso causando un decremento della pressione, tuttavia, come si può notare anche dall'immagine,

l'orifizio per la lettura della pressione è posizionato ad una distanza dalla punta presso la quale la pressione del flusso è molto simile a quella indisturbata.

Gli orifizi delle prese statiche sono posizionati paralleli alla direzione del flusso in modo da non creare eventuali punti di ristagno che potrebbero compromettere le misurazioni di pressione, infatti come l'angolarità del flusso varia anche di pochi gradi, questi sensori sono soggetti a sensibili errori. Infatti, la pressione misurata da un Pitot o da una sonda statica sarà errata se non è allineata con la direzione del flusso. Ma per piccoli angoli di disallineamento l'errore è generalmente piccolo, specialmente per le sonde di Pitot, che sono molto meno sensibili a questo effetto rispetto alle sonde statiche.

Esiste uno strumento che unisce il tubo di Pitot con il sensore per la pressione statica: il *Tubo di Pitot alla Prandtl*.



**Figura 3** Tubo di Pitot alla Prandtl [1]

Dall'immagine si può notare l'unione dei due sensori in uno unico; infatti, sono presenti due canali che prelevano una piccola parte del flusso: il canale centrale parte dall'orifizio sul punto di ristagno e trasporta l'informazione sulla pressione totale, mentre il canale esterno è connesso alla presa statica e quindi alla pressione statica.

### 1.3 Tubo di Pitot multiforo

Il tubo di Pitot alla Prandtl è uno strumento poco costoso e molto efficace per misurare il modulo della velocità di un flusso, ma esso deve necessariamente essere allineato con il flusso affinché le misure risultino essere accurate e precise, poiché, come riportato in precedenza, anche piccole variazioni della direzione del flusso rendono le misure di pressione totale e statica non più attendibili.

La soluzione a questa problematica è stata trovata attraverso l'utilizzo di tubi di Pitot multiforo, che permettono di ottenere informazioni sulla direzione del flusso. I tubi di Pitot multiforo sono chiamati così per via della loro punta caratterizzata da più orifizi rispetto al principale, inclinati rispetto all'asse dello strumento in modo tale da cogliere l'angolarità del flusso rispetto la sonda.

Le sonde multiforo sono solitamente a 3, 5 oppure a 7 fori, ma esistono anche soluzioni con ancora più fori per flussi altamente tridimensionali.



**Figura 4** Esempi di sonde di pressione multiforo [16]

Il principio di funzionamento di queste sonde si basa sulla variazione di pressione sui fori a seconda della direzione del flusso; infatti, se un flusso incide da una direzione diversa da quella dell'asse della sonda la pressione che si registra dal foro più allineato sarà più alta rispetto ai valori ottenuti dagli altri.

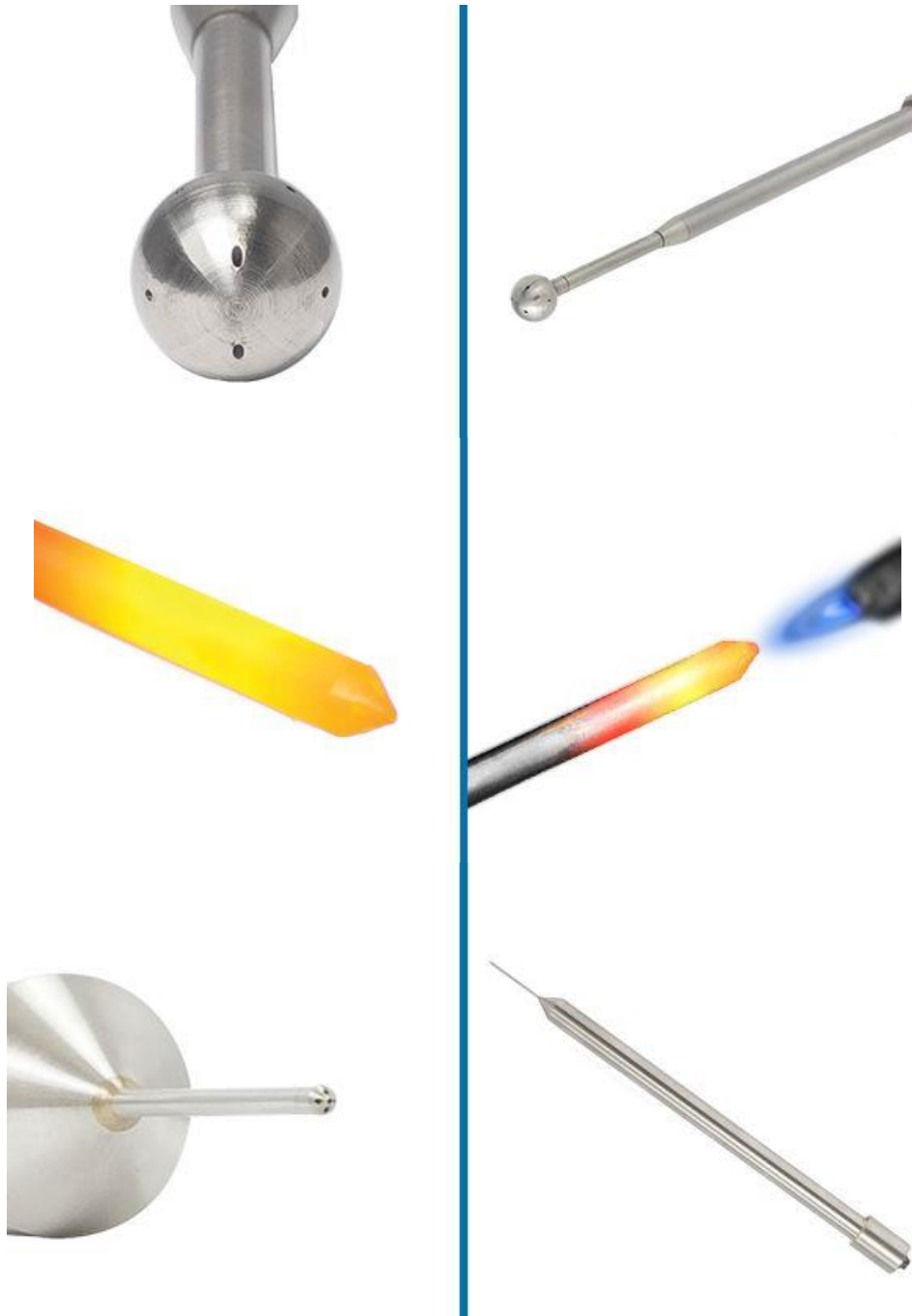
Se prendiamo come esempio il tubo di Pitot a 5 fori, che è l'oggetto di questa tesi, esso è utilizzato in situazioni dove il flusso che incide sulla sonda è tridimensionale, ossia quando sono necessari due angoli rispetto l'asse della sonda per descrivere l'incidenza su quest'ultima, infatti si può considerare come l'estensione del tubo di pitot a 3 fori, utilizzato dove il flusso è considerabile bidimensionale.

Questi angoli sono chiamati *angolo di beccheggio*, che indica l'inclinazione verticale del flusso rispetto la sonda, e *angolo di imbardata*, che indica l'inclinazione orizzontale e il tubo di Pitot a 5 fori riesce a fornirne i valori con una buona accuratezza fino ad una certa soglia, intorno ai 35 gradi di inclinazione. La soglia definisce gli angoli di incidenza superati i quali i fenomeni viscosi, come la separazione dello strato limite che altera il campo di pressione intorno alla sonda, rendendo le misure degli angoli non più attendibili.

Per questi motivi, le sonde multiforo possono avere diversi design e diversi materiali di costruzione a seconda dell'applicazione per le quali vengono costruite, poiché anche l'ingombro della sonda stessa all'interno del flusso ha un'influenza sulle misure di pressione, come già constatato precedentemente. Quindi una sonda utilizzata per misurare la posizione relativa tra un aeromobile e la direzione di crociera avrà una forma diversa da quella che si utilizza all'ingresso di uno stadio di una turbomacchina.

Le differenze tra le sonde riguardano anche la massima resistenza termica e la frequenza di acquisizione del valore di pressione, che ne definiscono i limiti applicativi.

In seguito, vengono riportate immagini di diversi tipi di sonda di pressione multiforo utili nei vari campi ingegneristici citati.



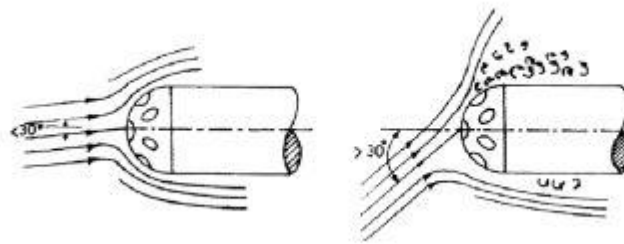
**Figura 5** Dall'altro verso il basso: sonda omnidirezionale, sonda per alte temperature e sonda ad alta frequenza di acquisizione [16]

## 1.4 Effetti viscosi e di comprimibilità

Gli effetti viscosi e di comprimibilità hanno una considerevole influenza sulle misure di pressione.

Il numero di Reynolds è parametro adimensionale che rapporta i termini che descrivono l'inerzia di un flusso con la sua viscosità e i flussi che ne presentano valori bassi sono caratterizzati da una viscosità tale da compromettere significativamente le misure dei coefficienti di pressione.

Inoltre, la viscosità è causa di errori di misura anche quando si va a posizionare la sonda multiforo ad alti angoli di incidenza, per via della separazione del flusso.



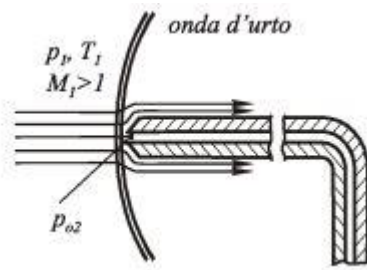
**Figura 6** Separazione dello strato limite ad alti angoli di incidenza [3]

La comprimibilità del flusso è descritta dal numero di Mach, parametro adimensionale che rapporta la velocità del flusso con la velocità del suono locale.

La densità del flusso è strettamente legata da questo parametro, soprattutto quando si esce dalla precedentemente citata *soglia di incomprimibilità*, posta ad un Mach pari a 0.3, e ciò porta ad un errore di misura della velocità dovuto a misurazioni di pressione totale e statica intaccate da una densità variabile.

Inoltre, per numeri di Mach intorno e maggiori a 1, il tubo di Pitot risulta inefficace a causa dei fenomeni di natura transonica e supersonica, quali le onde d'urto che si formano sulla punta del tubo di pitot.

Nel caso applicativo di questa tesi, come già riportato precedentemente, il flusso d'aria utilizzato per la calibrazione della sonda sarà approssimabile a incomprimibile, il che comporta un numero di Mach basso e un Reynolds alto; perciò, gli errori dovuti a comprimibilità e viscosità verranno trascurati, ad eccezione di eventuali misurazioni sballate a causa della separazione.



**Figura 7** Onda d'urto sulla punta di un tubo di Pitot in un flusso supersonico [17]

## 1.5 Catena di misurazione

La catena di misurazione è l'insieme di tutti gli strumenti necessari affinché un segnale sia prelevato, trasportato, letto ed eventualmente registrato.

Gli elementi che costituiscono la catena sono:

- **Sensore**

È il primo elemento della catena e capta il segnale reale che si intende misurare. Un sensore è un dispositivo che cambia il suo stato quando entra in contatto con il segnale, ma nel caso delle sonde di pressione trattate in questa tesi, si riduce ad essere un semplice orifizio che permette di entrare in contatto con il segnale.

I sensori vengono caratterizzati in base alle loro capacità, quali la risoluzione spaziale e temporale, l'accuratezza, la robustezza, l'intrusività e il costo.

Andando in ordine, la risoluzione viene definita dalla più piccola misura effettuabile e dalla frequenza di acquisizione del sensore; l'accuratezza rappresenta l'errore che ci si può aspettare nella lettura del segnale; la robustezza rappresenta la capacità del sensore a resistere a urti e a danni nel tempo; per intrusività, come si è già accennato, si intende l'ingombro che ha il dispositivo e i disturbi che può creare alla lettura del segnale. Il costo di un sensore, che ne indica la qualità, cresce al crescere delle capacità del sensore a soddisfare i requisiti sopraelencati.



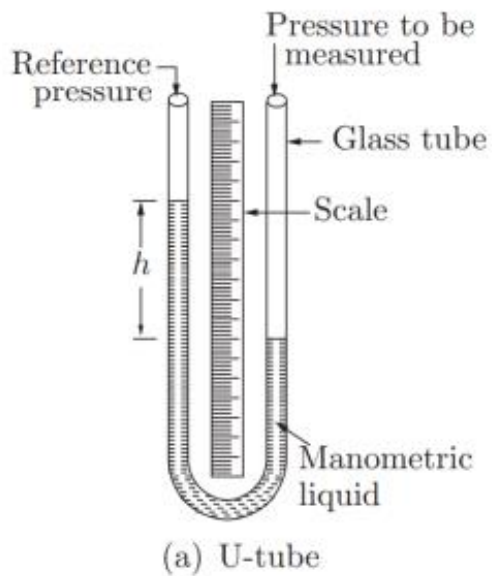
- **Trasduttore**

Il trasduttore è l'elemento della catena che riceve come input il segnale captato dal sensore, ne esegue una lettura e come output fornisce il valore del segnale.

Prendendo come esempio il caso di interesse di questa tesi, i trasduttori di pressione ricevono come input due valori di pressione, quella fornita dal sensore e una pressione di riferimento. L'output del trasduttore di pressione dipende dal tipo di pressione di riferimento gli si fornisce: con una pressione di riferimento pari a quello del vuoto, l'uscita sarà una *pressione assoluta*; con una pressione di riferimento pari alla pressione atmosferica, si avrà una *pressione relativa*; e con una pressione di riferimento che non sia quella nel vuoto o quella atmosferica, si ottiene una *pressione differenziale*.

Oltre la distinzione sull'input della pressione di riferimento, i trasduttori possono essere anche distinti in *manometri* oppure *trasduttori elettronici*, a seconda che il valore fornito sia una colonna di fluido in un tubo oppure un segnale elettronico dovuto ad una tensione elettrica.

Il manometro è uno strumento analogico per la misura della pressione dei fluidi, caratterizzato generalmente da un tubo di vetro a U riempito con un liquido di densità nota e dotato di una scala di misura. Dalle due estremità del tubo entra il fluido (aria nel caso di interesse) a due pressioni differenti: la pressione di riferimento e la pressione rilevata dal sensore, e si può leggere il valore della pressione, tramite la variazione dell'altezza della colonna liquida nel ramo dove è presente la scala di misura.



**Figura 8** Manometro a U [1]

Il trasduttore elettronico si avvale invece di circuiti elettronici tramite i quali fornisce in output una differenza di potenziale elettrico.

Per interpretare questo tipo di output i trasduttori necessitano di un *sistema di acquisizione dati* che riceve il segnale dal trasduttore, lo amplifica e solitamente lo rende disponibile su un display in modo tale da rendere possibile l'analisi della misurazione.



**Figura 9** Trasduttore di pressione elettronico [18]

# Capitolo 2

## Procedure di Calibrazione

### 2.1 Metodi Operativi

Le sonde di pressione multiforo possono hanno due principali metodi operativi, chiamati *nulling technique* e *non-nulling technique*.

#### **Nulling technique**

Il primo metodo è chiamato “nulling technique” o “metodo a sonda rotante”.

Consiste nell'inserire la sonda in un flusso sconosciuto e, utilizzando un sofisticato meccanismo di movimentazione, muoverla nelle direzioni di beccheggio e imbardata fino a quando le pressioni misurate dai quattro fori esterni diventano uguali e il foro centrale misura esattamente la pressione totale. Se ciò avviene, significa che la sonda è perfettamente allineata con il flusso e conoscendo la posizione del meccanismo di rotazione, è possibile determinare l'orientamento del flusso.

Questo tipo di utilizzo richiede un meccanismo di controllo molto complesso con cinque gradi di libertà e può richiedere molto tempo a causa dello spostamento della sonda lungo le direzioni di beccheggio e imbardata fino a quando non è allineata con il flusso, il che rende il metodo svantaggioso per quelle applicazioni dove la frequenza di acquisizione deve essere elevata.

Tuttavia, un tubo di Pitot a 5 fori utilizzato secondo la modalità a sonda rotante non necessita di una calibrazione prima di essere utilizzata.

## **Non-nulling technique**

Il secondo metodo operativo è chiamato “non-nulling technique” oppure “metodo a sonda fissa”. A differenza del primo, questo metodo prevede il posizionamento fisso della sonda all’interno del flusso incognito e tramite la lettura e l’analisi delle differenze di pressione misurate dai vari fori risalire alla direzione di incidenza del flusso.

Tuttavia, l’assenza di una relazione analitica che lega pressioni e angoli di incidenza del flusso sulla sonda, quest’ultima necessita di una calibrazione preliminare che permette di ottenere le mappe di calibrazione.

Infine, tramite le mappe di calibrazione, si può risalire alla direzione della velocità del flusso.

Nel presente caso applicativo, lo studio sulla calibrazione è stato svolto ai fini di un utilizzo delle sonde di pressione multiforo secondo un metodo a sonda fissa.

Come già accennato, una sonda per un’applicazione non-nulling prevede una calibrazione preliminare affinché si riescano ad ottenere le mappe di calibrazioni che legano pressioni ad angoli di beccheggio e imbardata.

## **2.2 Coefficienti di pressione e mappe di calibrazione**

La costruzione delle mappe di calibrazione avviene tramite l’utilizzo di coefficienti adimensionali di pressione invece dei valori di pressione direttamente misurati.

Si preferisce l’utilizzo di coefficienti adimensionali per via delle piccole variazioni di pressione tra i fori che si riscontrano durante la calibrazione.

I coefficienti di pressione sono quattro:

**1. Coefficiente di beccheggio**

$$C_{P\alpha} = \frac{P_1 - P_3}{P_5 - P^*}$$

**2. Coefficiente di imbardata**

$$C_{P\psi} = \frac{P_2 - P_4}{P_5 - P^*}$$

**3. Coefficiente di pressione statica**

$$C_{P_s} = \frac{P^* - P_s}{P_5 - P^*}$$

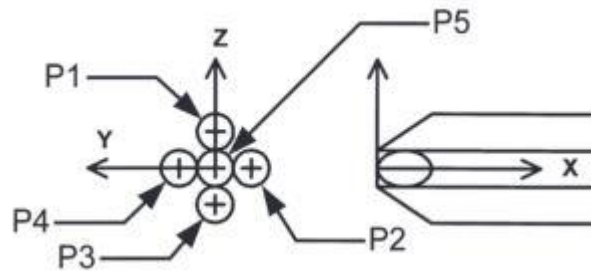
**4. Coefficiente di pressione totale**

$$C_{P_t} = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - P^*}$$

Dove i vari  $P_i$  rappresentano la pressione misurata dall'  $i$ -esimo foro numerato secondo l'ordine riportato nella seguente figura.

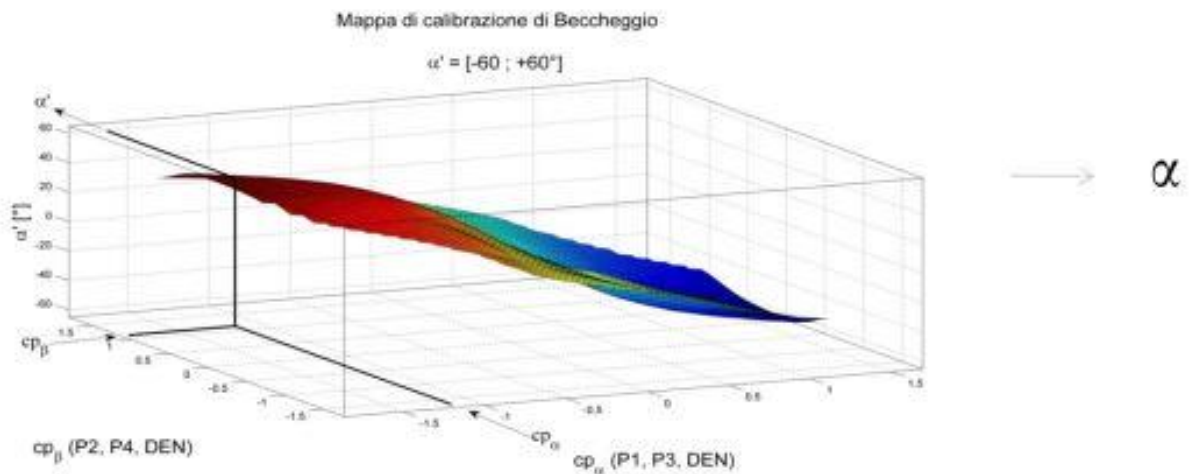
I valori  $p_s$  e  $p_t$  rappresentano la pressione statica e totale del flusso misurata da un tubo di Pitot alla Prandtl ausiliario allineato con il flusso e  $p^*$  determina la media matematica delle pressioni misurate dai quattro fori laterali.

$$P^* = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}{4}$$

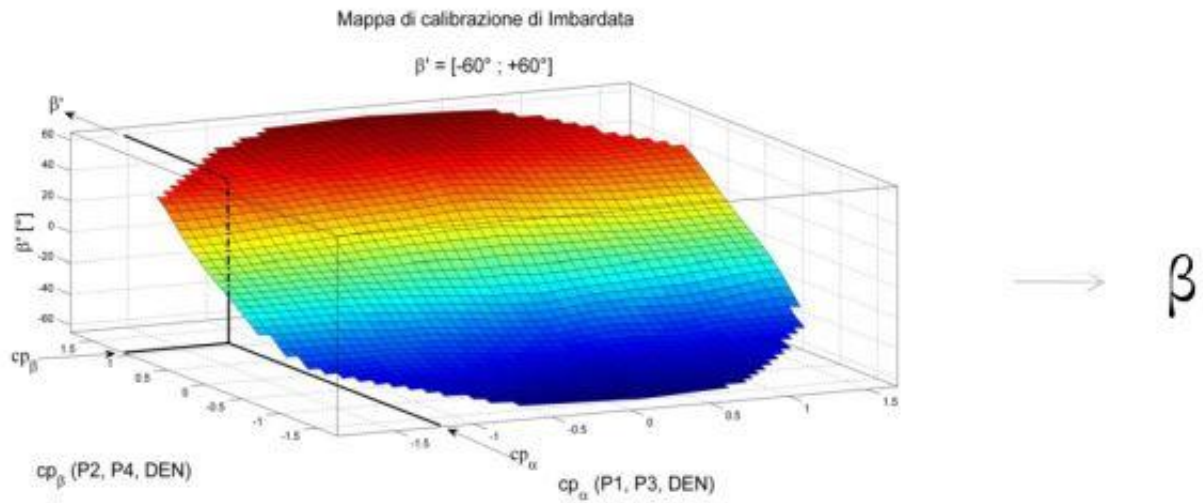


**Figura 10** Nomenclatura dei fori [6]

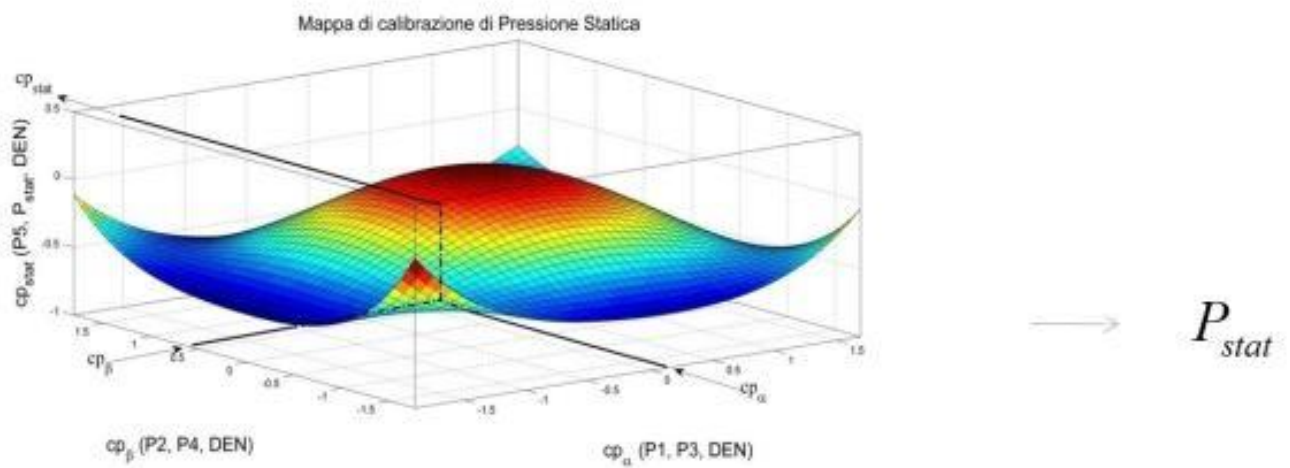
Si riporta un esempio delle mappe di calibrazione nelle figure sottostanti, dove si vuole mostrare come esse legano i coefficienti di pressione, che si sono registrati durante la procedura di calibrazione, con gli angoli di beccheggio e di imbardata e i valori di pressione statica e totale.



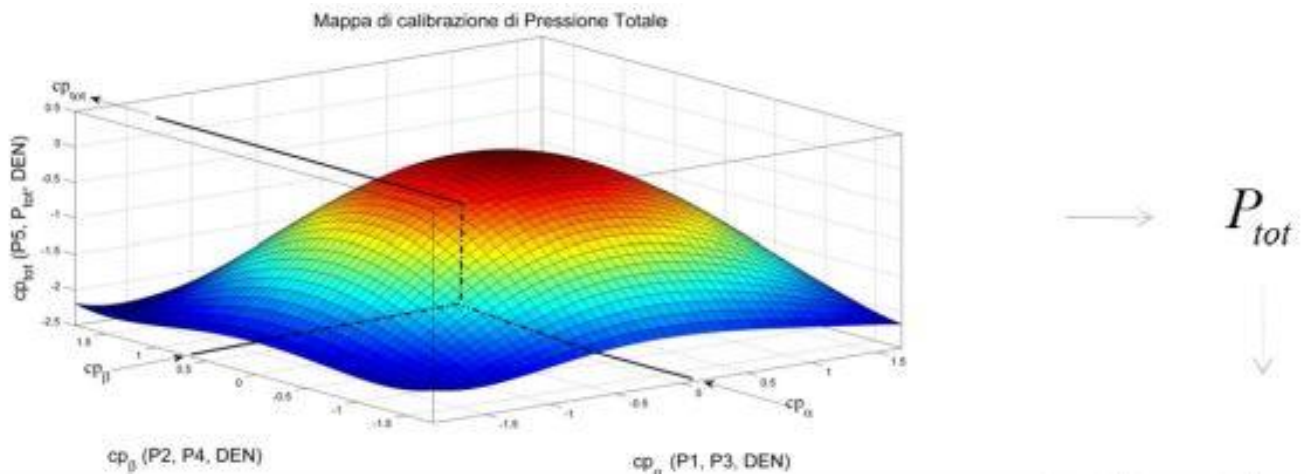
**Figura 11** Mappa di calibrazione per angolo di beccheggio [19]



**Figura 12** Mappa di calibrazione per angolo di imbardata [19]



**Figura 13** Mappa di calibrazione per pressione statica [19]



**Figura 14** Mappa di calibrazione per pressione totale [19]

*(Nei precedenti esempi , si indica l'angolo di imbardata tramite la lettera greca Beta ( $\beta$ ), invece che la lettera Psi ( $\psi$ ) come poi verrà utilizzata in tutto questo lavoro di tesi.)*

Una volta ottenute le mappe di calibrazione, il tubo di Pitot multiforo può essere inserito in un flusso non noto ed utilizzato secondo una non-nulling technique e quindi risalire sia agli angoli di incidenza del vento, sia al modulo della velocità.

Infatti, la sonda registra i valori di pressione, si calcolano i coefficienti di pressioni e con essi si entra nelle mappe, riuscendo quindi a estrarre il valore dell'angolo di beccheggio e di imbardata, il coefficiente di pressione totale e quello di pressione statica.

Le informazioni sui coefficienti di pressione permette l'estrazione dei valori di pressione statica e totale veri e propri, come possiamo notare nelle seguenti relazioni.

$$C_{P_s} = \frac{P^* - P_s}{P_5 - P^*} \rightarrow P_s = P^* - C_{P_s}(P_5 - P^*)$$



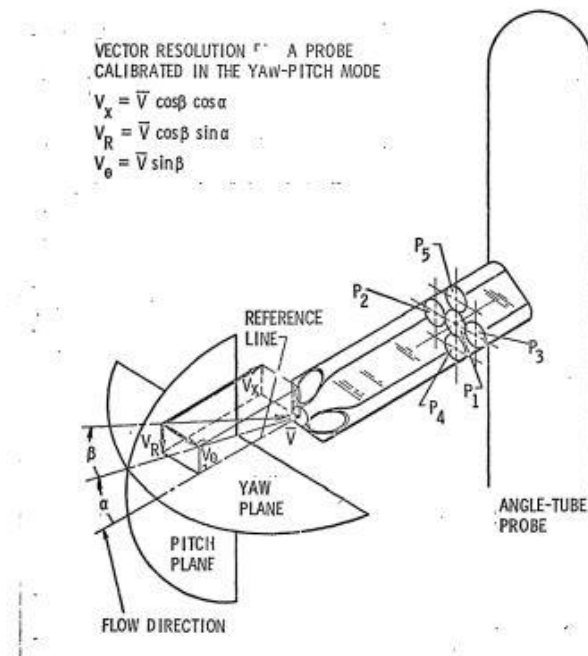
$$C_{Pt} = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - P^*} \rightarrow P_t = P_5 - C_{Ps}(P_5 - P^*)$$

La pressione statica e quella totale vengono poi utilizzate per calcolare il modulo della velocità attraverso l'equazione già riportata nel capitolo 1.

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}}$$

Infine, combinando il modulo della velocità con le misure degli angoli di incidenza ottenuti dalle prime due mappe, si può risalire alle 3 componenti del vettore velocità.

$$\vec{V} = \begin{matrix} V \cos(\alpha) \cos(\psi) \\ V \sin(\alpha) \cos(\psi) \\ V \sin(\psi) \end{matrix}$$



**Figura 15** Scomposizione del vettore velocità [6]

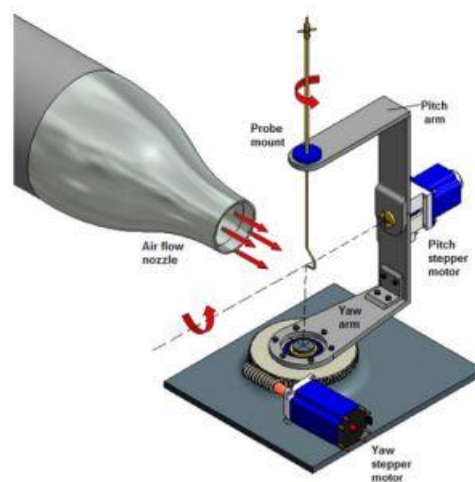
## 2.3 Procedura di calibrazione tradizionale

La procedura tradizionale di calibrazione avviene tramite l'utilizzo di un cinematismo piuttosto complesso tale da mantenere la punta della sonda nella zona di passaggio del flusso e muovere invece la coda in modo da ottenere un orientamento relativo punta-flusso che copra un determinato intervallo di angoli di beccheggio e imbardata dai quali poi costruire la mappa di calibrazione. Inoltre, durante il processo di calibrazione la sonda multiforo deve essere affiancata da un tubo di Pitot alla Prandtl, mantenuto fisso, che permette di conoscere i valori di pressione statica e totale del flusso in ogni istante.

Il range di angoli di beccheggio ed imbardata che vanno scelti per la calibrazione di tubi di Pitot a 5 fori che si usano in aeronautica di solito non si estendono oltre la soglia dei  $\pm 35^\circ$ , dopo la quale gli effetti viscosi sopracitati provocano separazione dello strato limite, causando errori di misurazione delle pressioni.

La procedura di calibrazione tradizionale è quindi un processo che prevede l'utilizzo di cinematismi complessi (2 gradi di libertà), come si può notare nella figura sottostante, e che richiede una notevole quantità di tempo; infatti, se si pensa ad un processo di calibrazione per ottenere una mappa che copra  $\pm 30^\circ$  in beccheggio e in imbardata con un passo di  $1^\circ$  tra ogni posizione, in totale sarà necessario acquisire i valori di pressione in 3721 punti (griglia 61x61).

Questi due aspetti fondamentali riguardanti la calibrazione delle sonde multiforo sono oggetto di studio di tecnici e ingegneri, affinché si riescano a trovare soluzioni sempre più ottimizzate.



**Figura 16** Esempio di sistema di movimentazione per la calibrazione [2]

## 2.4 Procedure di calibrazione alternative

Le procedure di calibrazione alternative nascono con lo scopo sia di ridurre i tempi di acquisizione dati, sia di migliorare la strumentazione appositata, andando a semplificarla e a renderla più efficiente.

### 2.4.1 Calibrazione su stella e croce

La calibrazione su stella e croce è una procedura che prevede una riduzione significativa dei punti di acquisizione e permette di utilizzare meccanismi di movimentazione semplici rispetto quelli necessari per la tecnica tradizionale, andando ad intervenire quindi su entrambi gli aspetti fondamentali della calibrazione delle sonde multiforo.

Il tutto si basa sull'acquisizione dei valori di pressione in punti specifici della griglia per poi essere completata attraverso un processo di interpolazione numerica.

La calibrazione su croce legge i valori di pressione solamente sulla croce principale della griglia: si esegue una calibrazione mantenendo l'angolo di imbardata nullo per ogni posizione di beccheggio e poi mantenendo l'angolo di beccheggio nullo per ogni posizione di imbardata. Se si riprende la griglia quadrata 61x61 del precedente esempio, si può notare come i 3721 punti di acquisizione si riducono ad essere solamente 123.

La calibrazione su stella è un'estensione di quella a croce andando ad aggiungere le diagonali principali della griglia come punti di acquisizione, in modo tale da avere dati sugli accoppiamenti di beccheggio e imbardata che permettono di ottenere una mappa migliore dopo l'interpolazione. In questo caso si avrebbero 245 punti di acquisizione, sempre facendo riferimento all'esempio precedente.

Per quanto riguarda la movimentazione della sonda, non sarà più necessario l'utilizzo di un meccanismo a 2 gradi di libertà, ma sarà sufficiente un meccanismo ad 1 grado di libertà che esegue una spazzata verticale oppure orizzontale, mantenendo la testa della sonda esposta al flusso. Infatti, la calibrazione su croce può essere effettuata tramite una prima spazzata seguita da una seconda dove la sonda è stata ruotata di  $90^\circ$ , mentre quella a stella prevede 4 spazzate totali dove la sonda sarà posizionata a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $-45^\circ$  rispetto la sua posizione di riferimento.

La calibrazione su stella fornisce risultati più attendibili rispetto quella su croce, poiché l'algoritmo di interpolazione può basarsi già in partenza su dei dati relativi agli effetti di accoppiamento di beccheggio e imbardata della sonda.

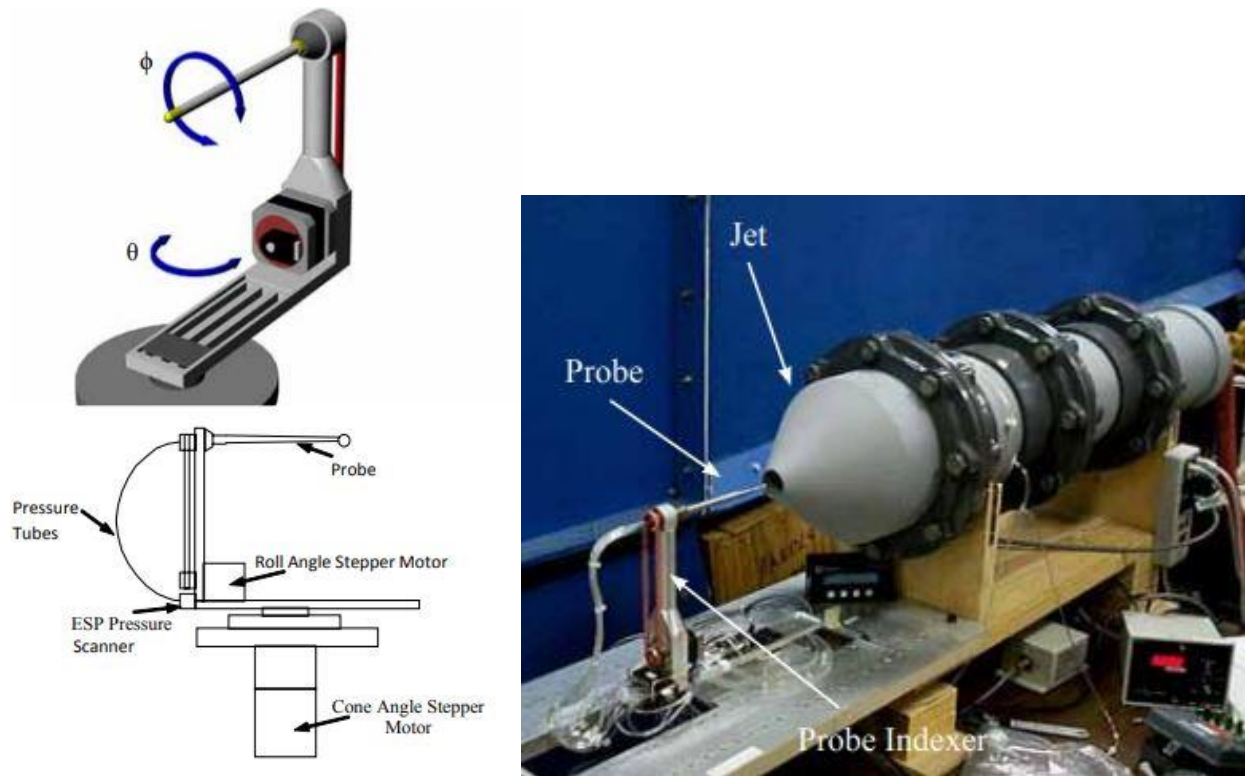
## **2.4.2 Calibrazione beccheggio-rollio**

La calibrazione beccheggio-rollio, in inglese pitch-roll, è l'oggetto di studio di questa tesi. Essa consiste nel movimentare il tubo di Pitot multiforo attorno al suo asse di beccheggio e di rollio, sfruttando le relazioni che esistono tra imbardata e rollio, affinché si possano redigere le mappe di calibrazione, che resteranno sempre in funzione dell'angolo di beccheggio e l'angolo di imbardata.

Questa tipologia di procedura può essere comparata con la procedura tradizionale in quanto, come quest'ultima, necessita di un meccanismo a 2 gradi di libertà per le rotazioni attorno agli assi di interesse; tuttavia, è importante sottolineare il fatto che la progettazione di un sistema per la movimentazione attorno al beccheggio e il rollio risulta più semplice ed efficace di un sistema per il beccheggio e l'imbardata. Infatti, a livello pratico queste sonde vengono calibrate facendo utilizzo di un getto piano oppure di piccole gallerie del vento a sezione aperta: ciò prevede che la testa del Pitot non si discosti dal centro della sezione e rende quindi un movimentatore in beccheggio e in imbardata risulta più complesso da progettare rispetto ad uno per pitch-roll.

Una differenza sostanziale tra i due tipi di calibrazione riguarda le mappe di calibrazione che si possono ottenere seguendo una procedura invece che un'altra: la procedura tradizionale permette la movimentazione attorno gli assi di beccheggio ed imbardata in modo indipendente tra loro, dando modo di avere come output una mappa non necessariamente quadrata; al contrario, come poi verrà spiegato e illustrato più dettagliatamente, le mappe che si ottengono dalla tecnica alternativa sono vincolate al range di spazzata del meccanismo e la rotazione rispetto l'asse di rollio deve coprire un arco di 180°.

Il risultato della calibrazione pitch-roll sarà sempre un set di mappe a forma di circonferenze concentriche.



**Figura 17** Movimentatore per calibrazione pitch-roll [16]

Scendendo più nel dettaglio di questo tipo di calibrazione si va a distinguere tutti i vari angoli che vengono utilizzati per le relazioni e si procede con le seguenti definizioni:

**- Angolo di spazzata ( $\theta$ )**

L'angolo di spazzata identifica l'inclinazione del meccanismo rispetto il piano. Questo angolo viene considerato positivo se il meccanismo fornisce una posizione cabrata alla sonda.

**- Angolo di rollio ( $\varphi$ )**

L'angolo di rollio identifica la rotazione della sonda rispetto la sua posizione standard. Questo angolo, viene considerato positivo se la sonda, vista frontalmente, esegue una rotazione oraria.

### - Angolo di imbardata ( $\psi$ )

L'angolo di imbardata identifica come è inclinata l'incidenza del vento sulla sonda rispetto il suo piano verticale.

Questo angolo è definito positivo se il vento incide sulla sonda da sinistra.

### - Angolo di beccheggio ( $\alpha$ )

L'angolo di beccheggio identifica come è inclinata l'incidenza del vento sulla sonda rispetto il suo piano longitudinale.

Questo angolo è definito positivo se il vento incide sulla sonda da sotto.

Gli angoli di cinematismo e di incidenza sono collegati tra loro dalle seguenti relazioni matematiche, che si andranno successivamente ad utilizzare per trovare le posizioni dei punti di griglia.

$$\alpha = \theta \cos \phi$$

$$\psi = \theta \sin \phi$$

Invertendo le formule si ottiene:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\psi}{\alpha}$$

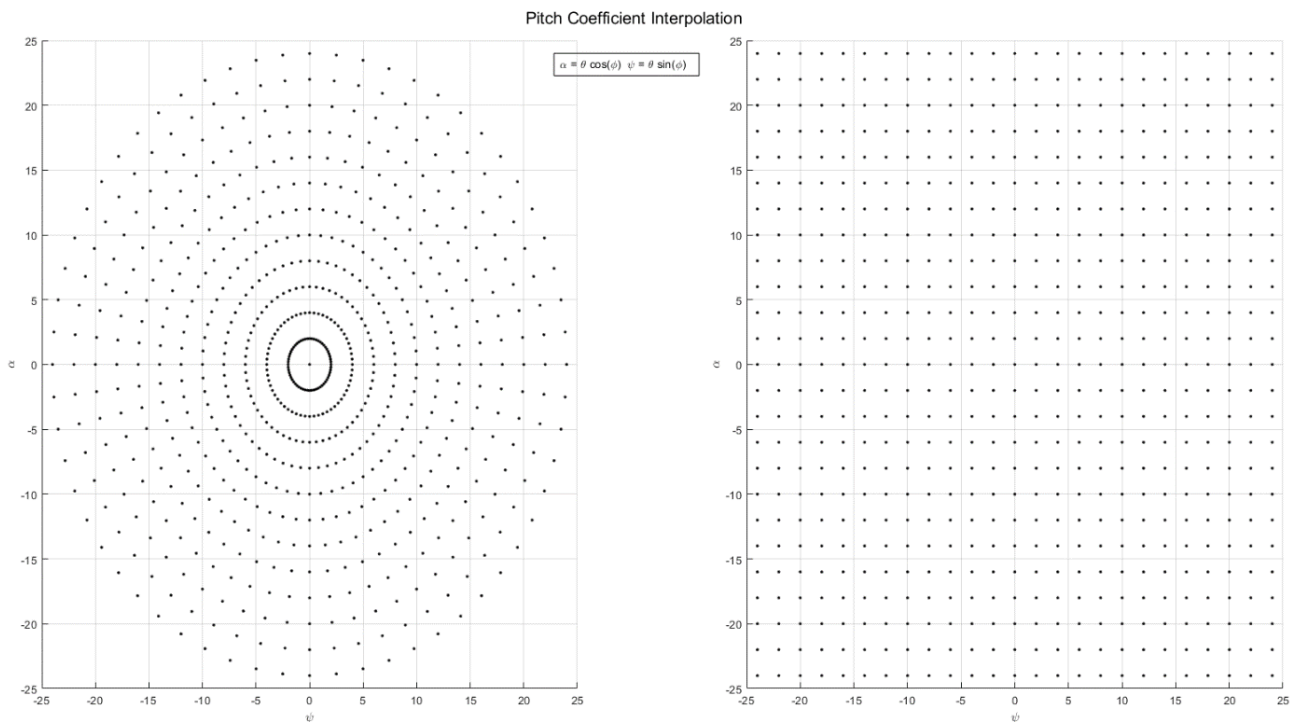
$$\theta = \frac{\psi}{\sin \phi}$$

L'inversione delle formule permette di ottenere gli angoli di cinematismo tali da ottenere i desiderati angoli di incidenza.

Lo sviluppo per la calibrazione che si propone in questa tesi prevede la movimentazione della sonda a partire da angoli di meccanismo noti ed equi spazati; perciò, gli angoli di incidenza avranno l'andamento sinusoidale descritto nel set di formule diretto.

Le relazioni matematiche che legano rollio e imbardata confermano il fatto che le mappe di calibrazione avranno dei vincoli a causa della modalità di movimentazione.

- I range angolari di beccheggio e imbardata sono determinati esclusivamente dal range di spazzata del meccanismo, perciò, non potranno essere diversi tra loro.
- Gli andamenti sinusoidali fanno sì che le mappe non siano delle griglie rettangolari con punti equispaziati tra loro, ma si dimostreranno essere delle circonferenze concentriche.
- Sempre a causa degli andamenti sinusoidali, non sarà possibile acquisire i punti estremi di calibrazione, ossia quei punti dove l'accoppiamento tra beccheggio e imbardata è massimo. Infatti, per acquisire le pressioni in quei punti, è necessario che la sonda sia ruotata di  $\pm 45^\circ$  e la spazzata sia massima, ma se si impongono queste due condizioni sui parametri di meccanismo si può verificare che il beccheggio e l'imbardata risultano essere minori degli estremi di griglia.



**Figura 18** Esempio di mappa di calibrazione in pitch-roll confrontata con una mappa tradizionale

# Capitolo 3

## Simulazione di Calibrazione

Nel capitolo precedente vengono spiegate le differenze sostanziali tra la calibrazione tradizionale e la calibrazione alternativa pitch-roll e per poterle capire è stato eseguito uno studio di questa calibrazione alternativa tramite una simulazione su MatLab che, sfruttando l'interpolazione numerica, ha permesso di ricavare delle mappe di calibrazione alternative a partire da mappe note derivate da un processo tradizionale.

Inoltre, è stato possibile valutare eventuali effetti dovuti a malposizionamenti della sonda nella sua movimentazione attorno all'asse di rollio in modo tale da simulare l'errore a cui si va incontro nella pratica a causa di impossibilità di precisione assoluta dei vari meccanismi.

### 3.1 Procedura di simulazione

Si riportano i vari step che sono stati seguiti durante la simulazione di calibrazione.

#### 1. Upload delle mappe di calibrazione su pitch e yaw

Come già preannunciato, per eseguire la simulazione è stato necessario l'utilizzo di mappe di calibrazione già note ed è stato possibile utilizzarle grazie a Grant Ingram che ha messo a disposizione i risultati della sua calibrazione.

Il file si presenta così:



$\alpha$	$\Psi$	$C_{p\alpha}$	$C_{p\psi}$	$C_{pt}$	$C_{ps}$
-36	-36	5.078101	-6.026387	-3.168662	-0.128683
-36	-34	7.739617	-8.903047	-5.259692	0.143920
...	...	...	...	...	...
-34	-36	7.084451	-8.783816	-4.990590	-0.153467
-34	-34	6.520717	-7.743704	-4.375454	0.100821
...	...	...	...	...	...

La griglia di acquisizione è una matrice quadrata, dove sia l'angolo di beccheggio sia l'angolo di imbardata variano da  $-36^\circ$  a  $+36^\circ$  con passo di 2 gradi.

In particolare, l'angolo  $\alpha$  rimane costante e viene fatto variare  $\psi$ , quando si è finito di far variare  $\psi$  si cambia  $\alpha$ .

Tuttavia, questo set di dati non è stato utilizzato nella sua interezza, ma si sono considerati solo i valori che rientrano in un range ridotto di spazzate: ad alti angoli di incidenza in beccheggio o in imbardata, i valori dei coefficienti risultano essere estremamente sfasati e proprio per questo si "tagliano" i vettori, linearizzando il problema, in modo da ottenere, anche se con una griglia più piccola, risultati più attendibili senza eventuali errori.

## 2. Definizione degli angoli di meccanismo e di incidenza

Per vedere le differenze tra i due tipi di calibrazione, si è deciso di mantenere lo stesso range di angolo di incidenza  $\theta$  e si definisce un range di angoli di rollio come segue:

-  $\theta = [-24^\circ : 2 : 24^\circ]$

-  $\varphi = [-90^\circ : 6 : 90^\circ]$

Da questi ultimi si sono quindi ricavati i rispettivi angoli di incidenza  $\alpha$  e  $\psi$  per ogni combinazione dei precedenti, tramite le relazioni precedentemente riportate.

Si è deciso di scegliere un passo di  $6^\circ$  per il range di rollio in modo da non appesantire troppo sia il costo computazionale sia le mappe di calibrazione.

### **3. Interpolazione dei coefficienti di pressione**

Il cuore della simulazione risiede in questo step, attraverso il quale è stato possibile ottenere i valori dei coefficienti di pressione relativi nuovi angoli di incidenza a partire da quelli contenuti nelle mappe originali per interpolazione numerica.

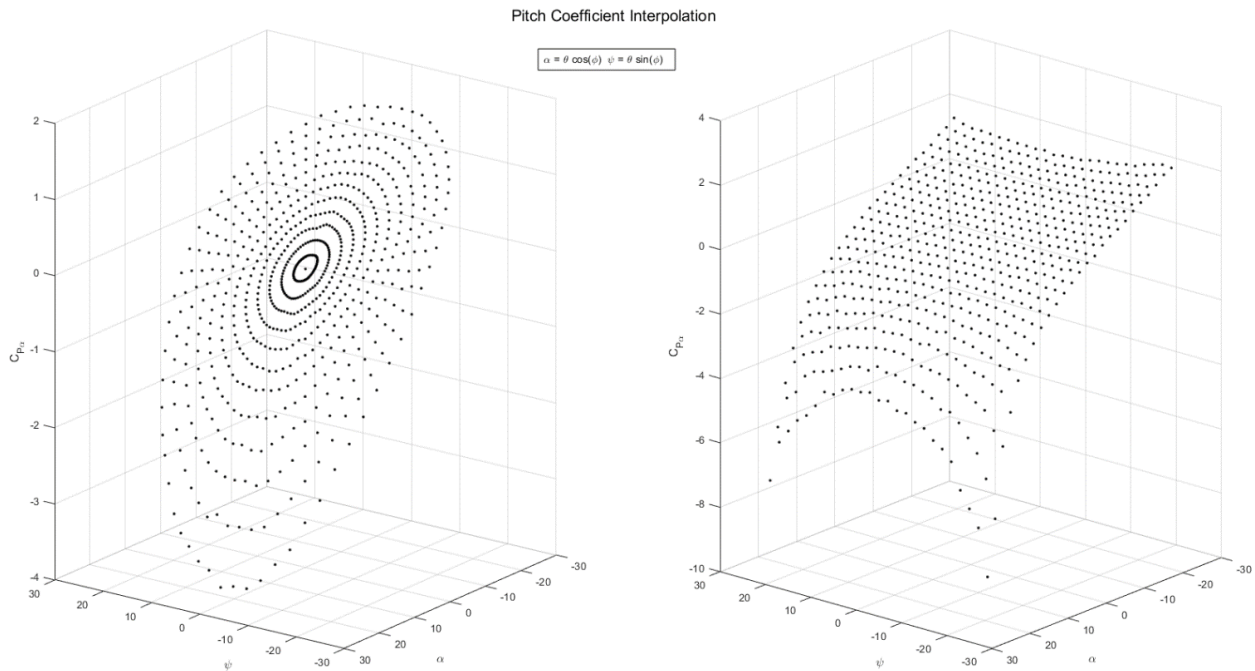
Questo step è stato fondamentale ai fini di una visualizzazione a priori delle mappe di calibrazione, ma anche per una valutazione di quello che può essere l'errore che si commette a causa di un possibile posizionamento errato della sonda nella rotazione sull'asse di rollio.

### **4. Visualizzazione grafica dei risultati**

Si riporta l'esempio della mappa dei coefficienti di beccheggio ottenuta per interpolazione a partire dalla mappa tradizionale.

L'esempio mostra due mappe che legano il coefficiente di beccheggio con i due angoli di incidenza.

Si può già notare come la movimentazione della sonda attorno all'asse di rollio invece che attorno all'asse di imbardata rende le mappe circolari e non quadrate, in maniera del tutto coerente con le relazioni matematiche che sono state riportate in precedenza.



**Figura 19** Mappe di calibrazione per il coefficiente di beccheggio

I risultati ottenuti tramite interpolazione mostrano una coerenza e una bontà molto più che sufficiente ai fini di uno studio preliminare su che range di angoli si decide di andare ad utilizzare. Si nota dai risultati che una calibrazione effettuata su angoli di beccheggio e imbardata rispetto ad una calibrazione effettuata su angoli di beccheggio e rollio copra la superficie quadrata delimitata dai range di incidenza del vento, a parità di range di spazzata del meccanismo.

Infatti, la calibrazione su pitch e roll non sarebbe riuscita a cogliere i valori dei coefficienti agli estremi della griglia, proprio a causa di una limitazione matematica.

La soluzione più logica risulta essere l'estensione del range di spazzata del meccanismo quando si esegue la calibrazione in pitch e roll per ottenere anche i coefficienti ad alte incidenze contemporaneamente in imbardata e in beccheggio.

## 3.2 Studio dell'errore di posizionamento

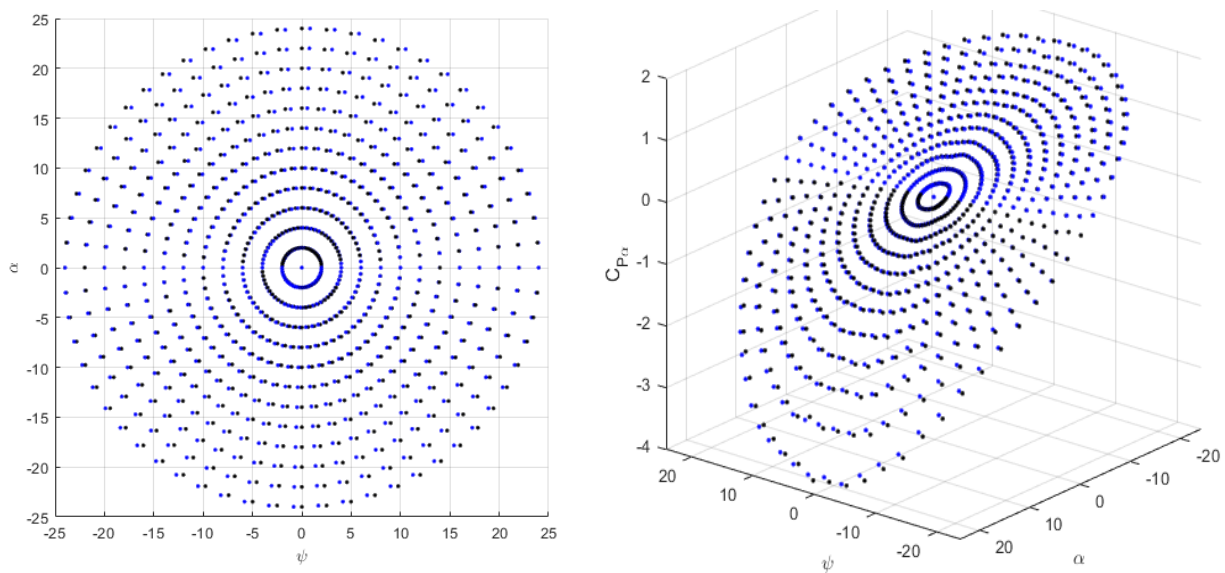
Per valutare l'eventuale errore di calibrazione che si può commettere nel posizionare la sonda in una posizione non precisa, si è introdotta una perturbazione  $\Delta\varphi$  da sommare ad ogni componente del vettore degli angoli di rollio.

Si sono eseguite diverse prove dove la perturbazione introdotta è compresa all'interno dell'intervallo  $[-2^\circ ; 2^\circ]$ , in modo tale da comprendere l'andamento dell'errore assoluto e relativo dei coefficienti di pressione.

Nella pratica, la perturbazione che si va ad introdurre rappresenta l'eventuale imprecisione che si ha in fase di movimentazione: in un qualunque momento della calibrazione la sonda sarà orientata rispetto il vento in maniera nota, ma un errore di posizionamento non calcolabile associerebbe una misurazione delle cinque pressioni con una posizione che si pensa giusta ma è sbagliata in realtà.

Per semplificare con un esempio: se si posizionasse una sonda a  $20^\circ$  in beccheggio e a  $20^\circ$  in rollio senza alcun tipo di errore, allora l'acquisizione dati relativa a quella specifica posizione sarebbe priva di errori, ma se ci fosse un'imprecisione nel meccanismo e la sonda fosse in realtà posizionata a  $20^\circ$  in beccheggio e  $21^\circ$  in rollio, allora l'acquisizione relativa alla posizione 20 pitch 20 roll sarebbe compromessa.

I risultati ottenuti dimostrano come un errore di pochi gradi sul posizionamento attorno l'asse di rollio della sonda non influisce particolarmente sul valore dei coefficienti di pressione, a meno di qualche anomalia riscontrata nella valutazione dell'errore relativo a causa di errori numerici. Chiaramente, l'entità dell'errore sarà proporzionale all'entità dell'errore di posizionamento della sonda, ma se quest'ultimo è contenuto nel range che si è utilizzato anche in simulazione, non avrà gravi ripercussioni sulla bontà della calibrazione.



**Figura 20** Effetto dell'errore di posizionamento di  $2^\circ$  sulla mappa del coefficiente di beccheggio

Nelle figure soprariportate i punti neri rappresentano i punti di acquisizione originali mentre i blu rappresentano quelli perturbati e si riesce a mostrare come un errore di posizionamento di  $2^\circ$  in rollio influenza la mappa del coefficiente di beccheggio: nel grafico a sinistra, dove si vedono gli effetti sull'incidenza del vento sulla sonda, quest'ultima viene sfasata seguendo un andamento sinusoidale, in modo totalmente coerente con le relazioni matematiche che legano imbardata e rollio; nel grafico a destra è possibile vedere l'influenza del malposizionamento sui valori di pressione dei vari punti di acquisizione e si conferma quello che è stato affermato in precedenza sull'entità effettiva dell'errore di posizionamento.

Lo studio dell'errore di posizionamento, anche se eseguito tramite una simulazione numerica, è stato fondamentale per trovare un vantaggio della calibrazione pitch-roll rispetto la tradizionale: un malposizionamento in rollio ha un effetto minore di un malposizionamento in imbardata durante il processo di calibrazione e ciò può essere confermato anche a livello teorico facendo riferimento alle relazioni matematiche, per le quali l'andamento sinusoidale smorza l'entità dell'errore.

Per completare la verifica grafica sull'errore, si è valutata l'entità dell'errore anche a livello quantitativo seguendo la definizione di errore assoluto e errore relativo, andandola applicare a ogni punto di acquisizione con il suo rispettivo perturbato.

Si riportano le definizioni:

$$E_{Assoluto} = |C_p \text{ indisturbato} - C_p \text{ disturbato}|$$

$$E_{Relativo} = \frac{|C_p \text{ indisturbato} - C_p \text{ disturbato}|}{|C_p \text{ indisturbato}|}$$

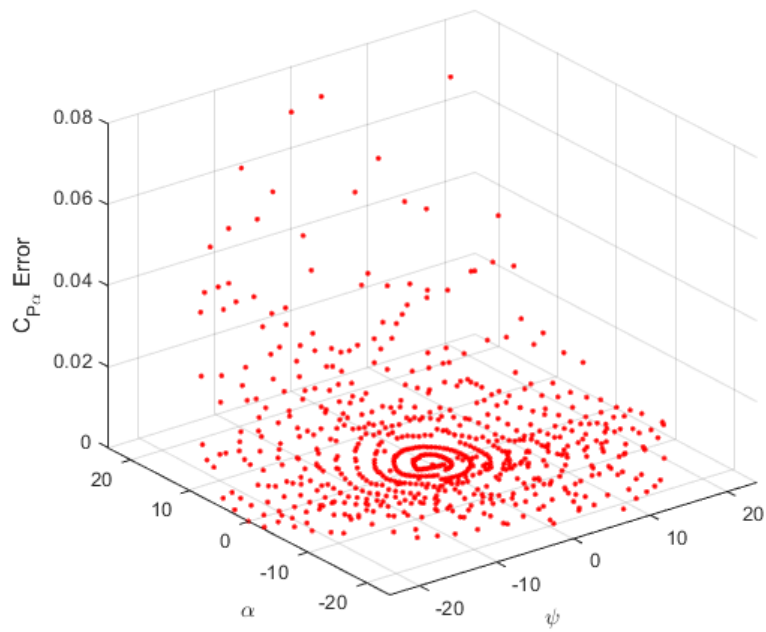
Inoltre, è stata fatta una valutazione sia del massimo, sia del valore medio dell' errore assoluto e relativo che si ha per ogni mappa di calibrazione per far sì che i risultati non vengano eccessivamente influenzati da eventuali anomalie e valori sballati ottenuti in seguito a malcondizionamenti dell'algoritmo di interpolazione.

Il risultato dello studio dell'errore, che verrà interamente esposto nel capitolo dei risultati, conferma ulteriormente tutte le affermazioni fatte precedentemente.

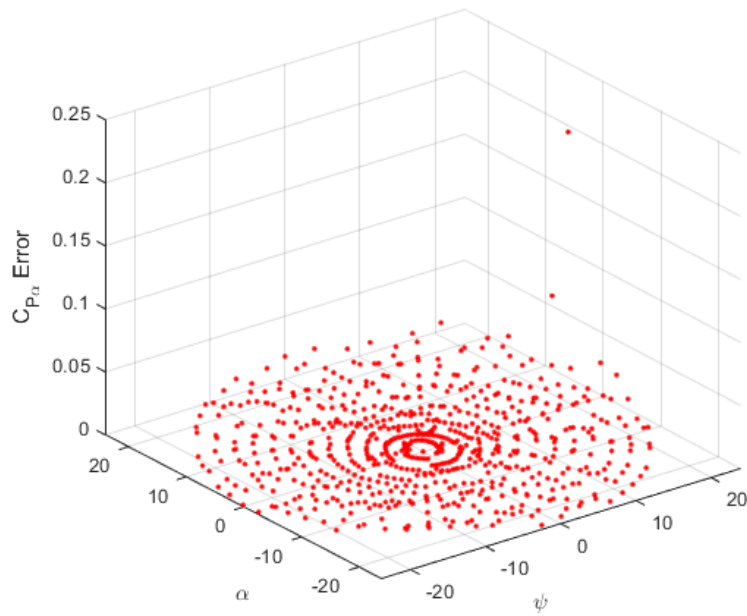
Si riportano i risultati relativi al precedente esempio fatto sul coefficiente di beccheggio.

<b>Errore sul <math>C_{p\alpha}</math></b>	Assoluto	Relativo
Massimo	0.072925	0.22519
Medio	0.0048519	0.0061267

**Tabella 1** Errore indotto dalla perturbazione sul coefficiente di beccheggio



**Figura 21** Distribuzione dell'errore assoluto nella mappa del coefficiente di beccheggio



**Figura 22** Distribuzione dell'errore relativo nella mappa del coefficiente di beccheggio

# Capitolo 4

## Risultati

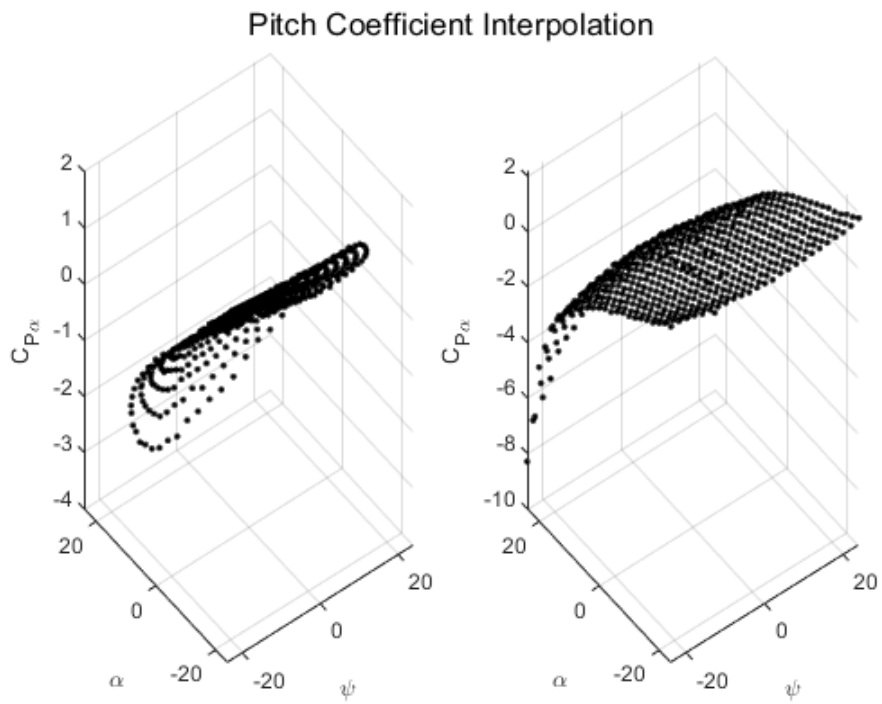
In questo capitolo vengono presentati tutti i risultati ottenuti dalla simulazione di calibrazione. Sono riportate sia le mappe di calibrazione trasformate e confrontate rispetto le originali sia tutti i risultati sugli errori dovuti a malposizionamenti.

I risultati ottenuti per lo studio sui malposizionamenti sono stati ottenuti grazie ad una perturbazione dell'angolo di rollio di  $2^\circ$ .

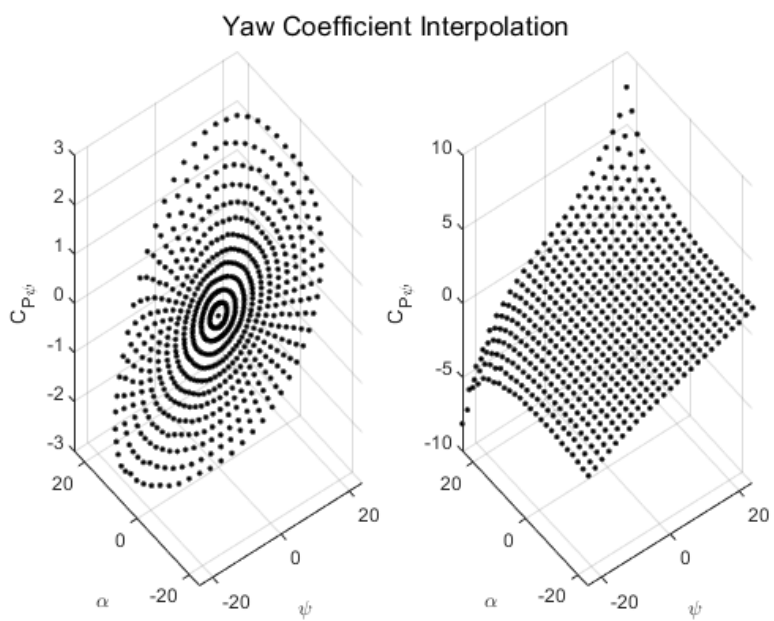
Tutti i risultati grafici sono stati ottenuti in funzione dell'angolo di beccheggio e di imbardata, ossia gli angoli di incidenza del vento sulla sonda durante la calibrazione, in modo da rendere l'idea dell'andamento spaziale dei coefficienti di pressione e degli errori di posizionamento.



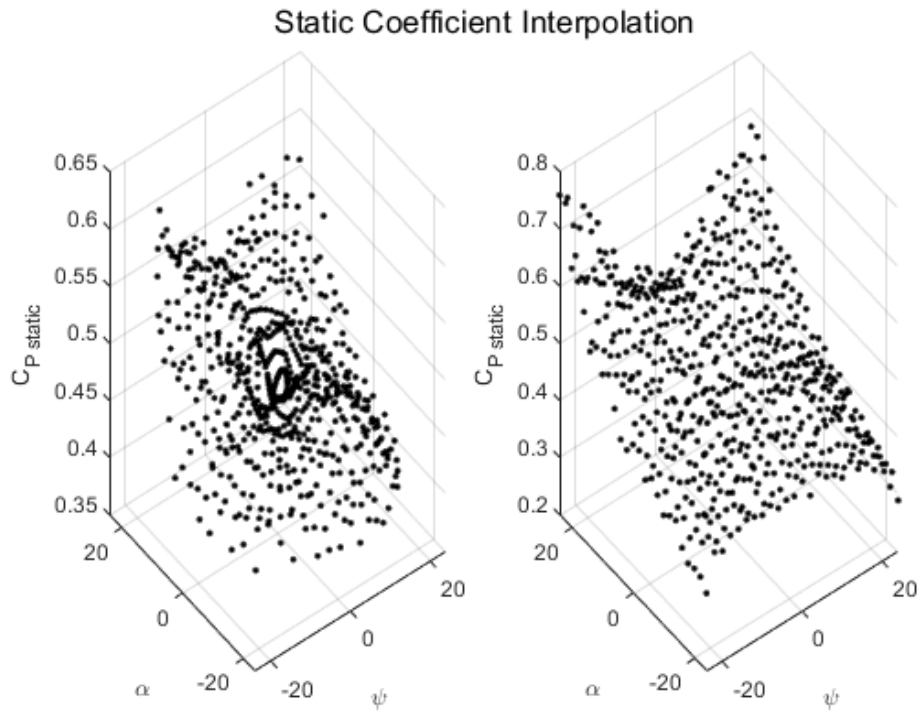
## 4.1 Mappe di calibrazione



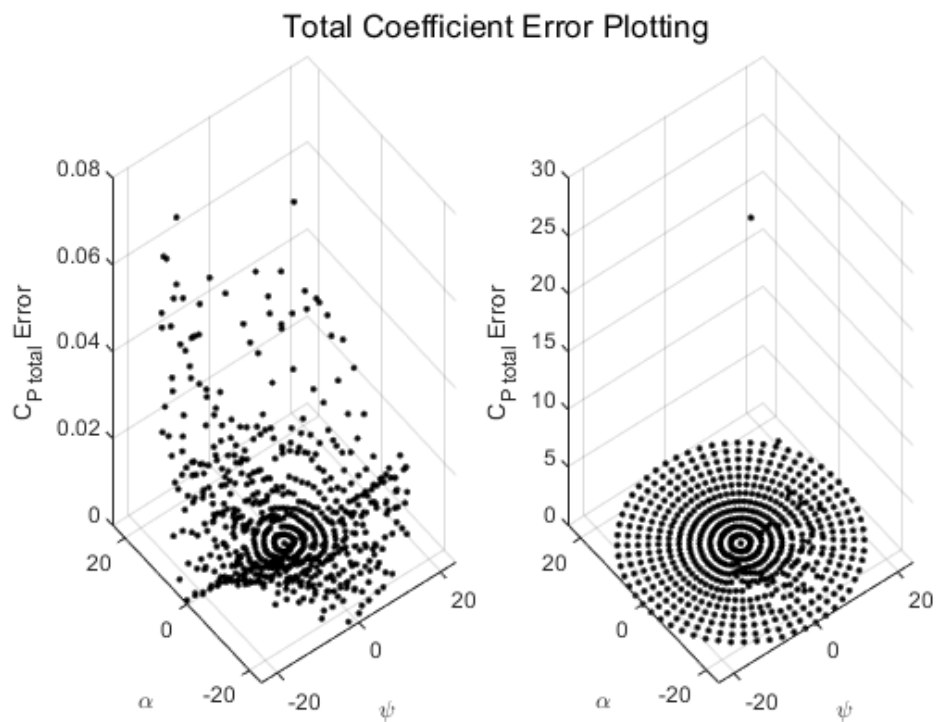
**Figura 23** Mappa per il coefficiente di beccheggio trasformata



**Figura 24** Mappa per il coefficiente di imbardata trasformata



**Figura 25** Mappa per il coefficiente di pressione statica trasformata



**Figura 26** Mappa per il coefficiente di pressione totale trasformata

## 4.2 Errori di posizionamento

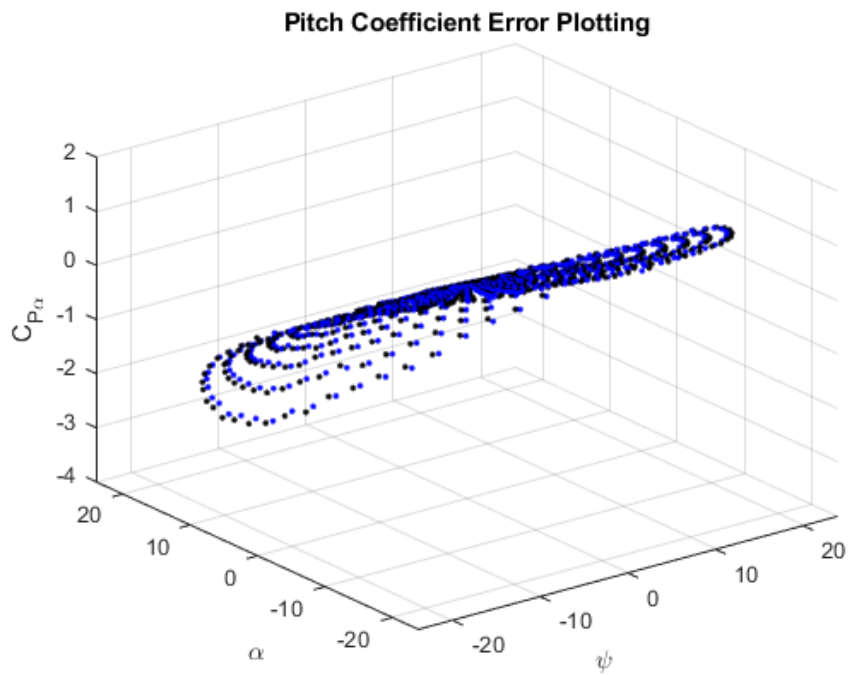


Figura 27 Sfasamento della mappa del coefficiente di beccheggio

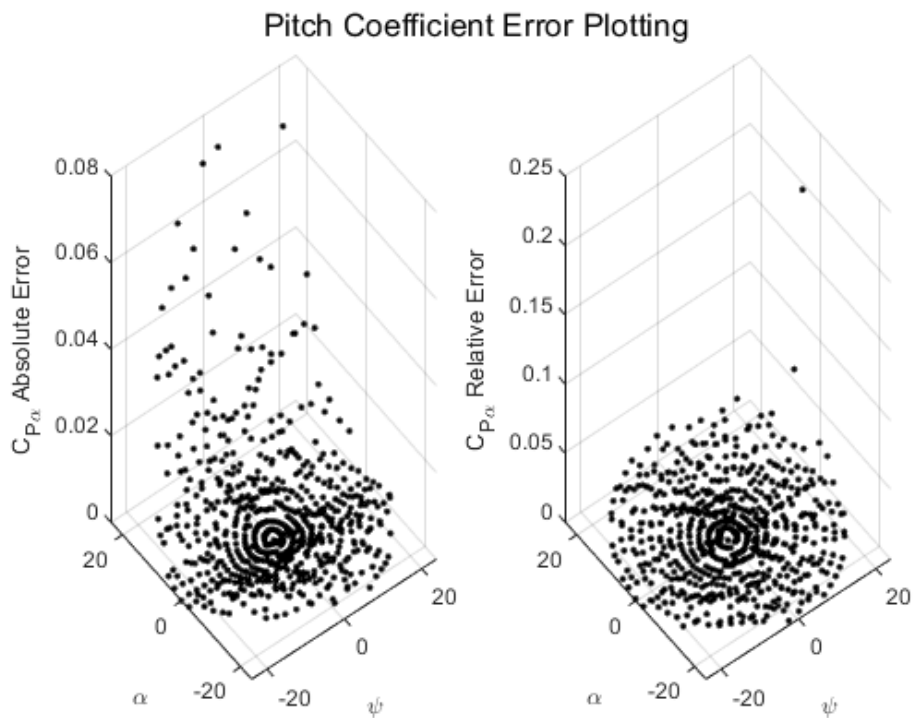
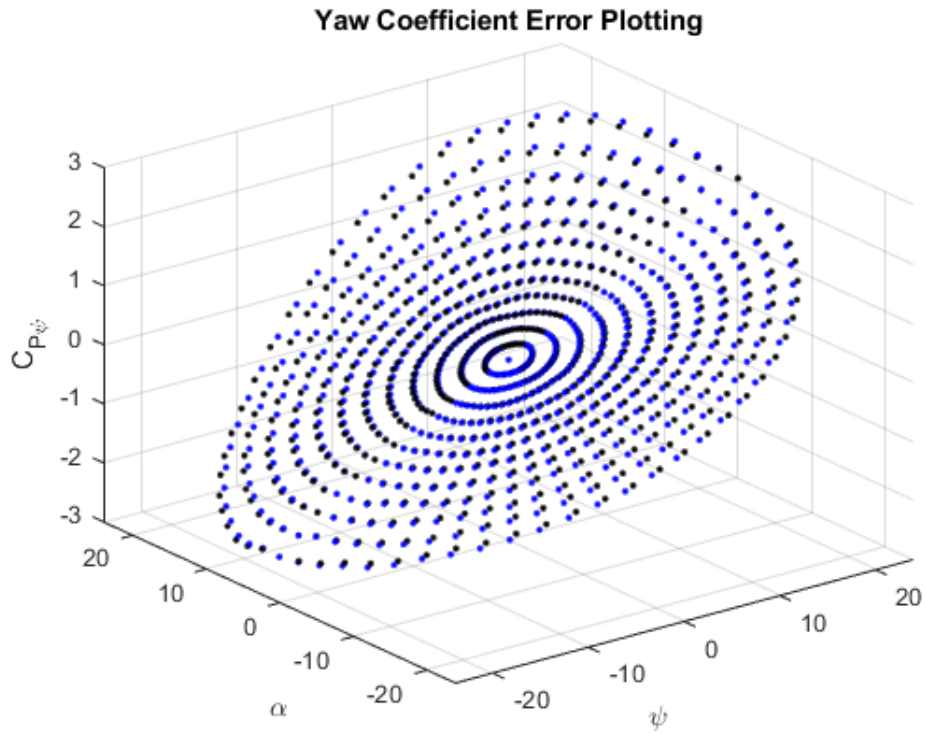
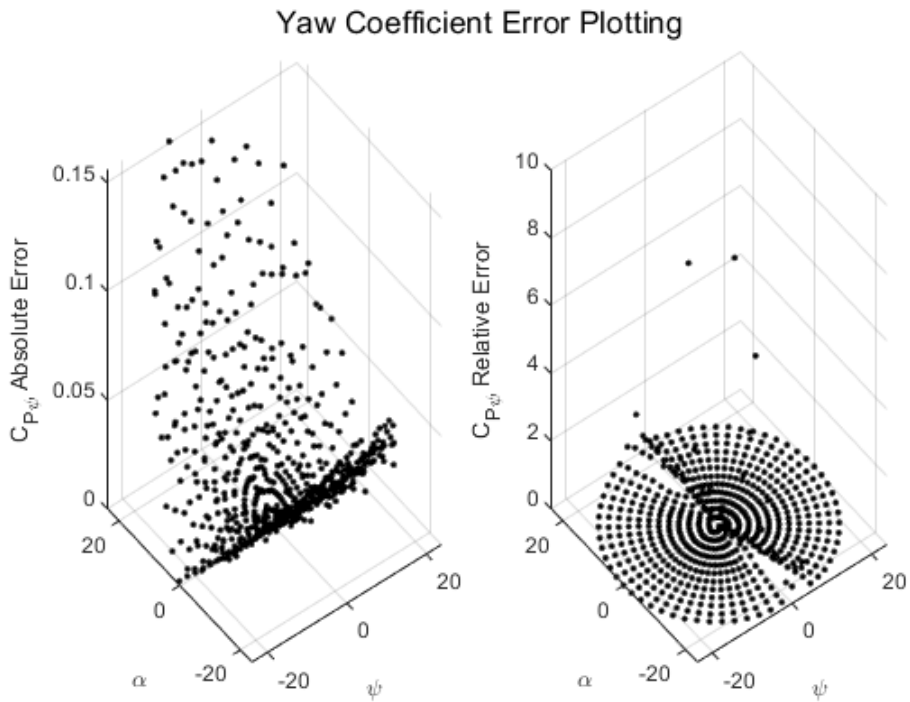


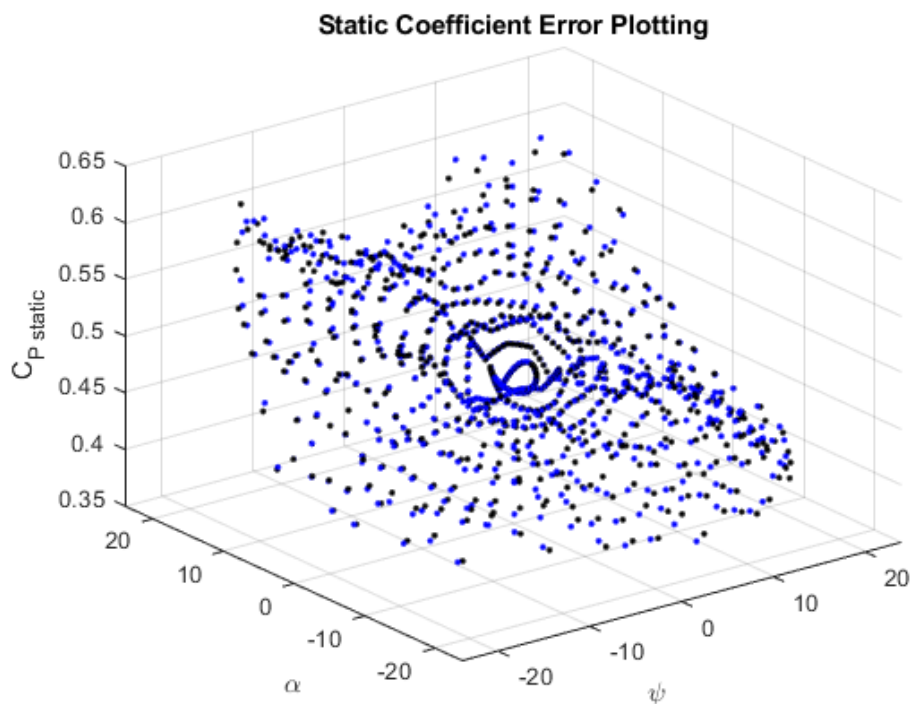
Figura 28 Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di beccheggio



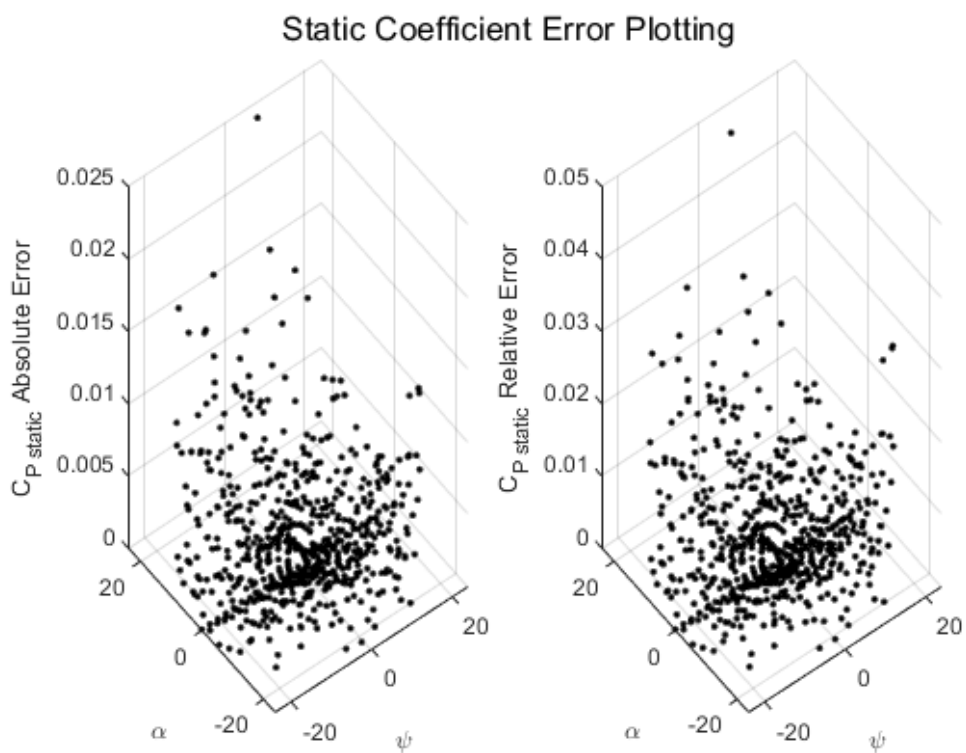
**Figura 29** Sfasamento della mappa del coefficiente di imbardata



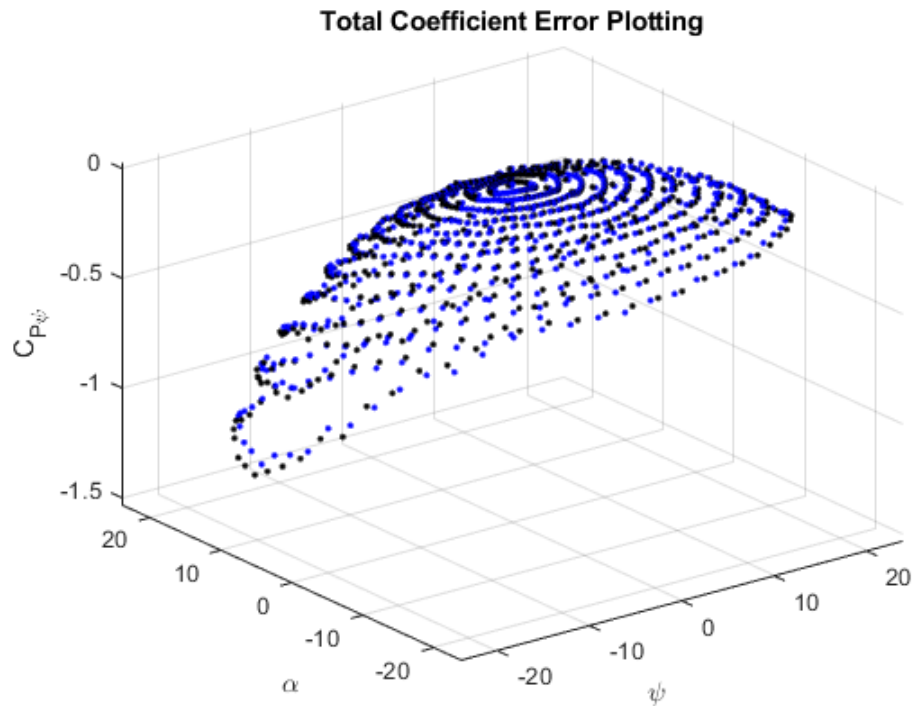
**Figura 30** Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di imbardata



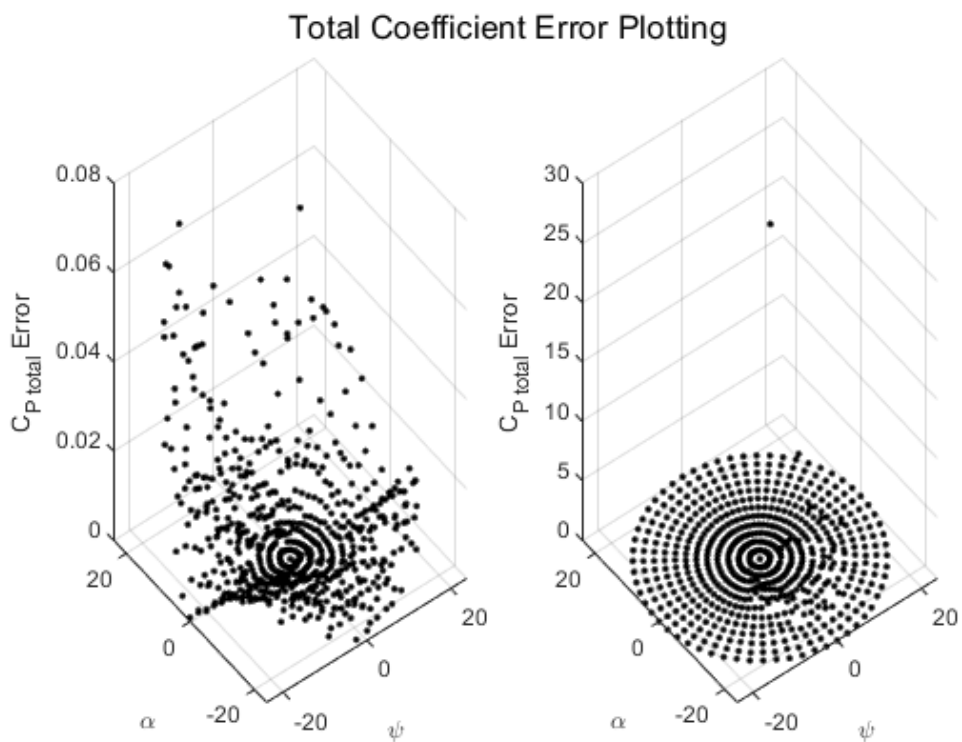
**Figura 31** Sfasamento della mappa del coefficiente di pressione statica



**Figura 32** Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di pressione statica



**Figura 33** Sfasamento della mappa del coefficiente di pressione totale



**Figura 34** Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di pressione totale

<b>Errore Assoluto</b>	$C_{p\alpha}$	$C_{p\psi}$	$C_{ps}$	$C_{pt}$
Massimo	0.072925	0.15582	0.024279	0.064104
Medio	0.0048519	0.026107	0.0020454	0.0057188

**Tabella 2** Errore assoluto per una perturbazione di 2° sul range di rollio

<b>Errore Relativo</b>	$C_{p\alpha}$	$C_{p\psi}$	$C_{ps}$	$C_{pt}$
Massimo	0.22519	8.5526	0.046462	28.282
Medio	0.0061267	0.12366	0.0041688	0.14126

**Tabella 3** Errore relativo per una perturbazione di 2° sul range di rollio

## 4.3 Discussione dei risultati

I risultati ottenuti dalla simulazione numerica sono piuttosto soddisfacenti e riassumono a livello grafico tutti gli aspetti teorici inerenti alla calibrazione alternativa trattati in precedenza. In seguito, si vuole brevemente riportare tutte le problematiche che derivano dalla calibrazione pitch-roll, già trattate in precedenza, andandole a commentare con alcune soluzioni pensate per queste ultime.

Le principali problematiche sono:

1. Mappe circolari e non quadrate
2. Distribuzione non uniforme ed equispaziata dei punti di acquisizione
3. Mancanza di acquisizione dati agli estremi delle mappe

Tutte e tre sono dovute agli andamenti sinusoidali che legano l'imbardata con il rollio e che ne determinano le relazioni matematiche.

La soluzione generale che si propone per risolvere queste problematiche vede l'utilizzo dell'interpolazione numerica dei dati delle mappe in una modalità simile a quella utilizzata nel processo di simulazione.

L'utilizzo dell'interpolazione numerica dei dati durante il post-processing può rivelarsi utile sia dal punto di vista di estensione delle mappe, sia da quello della raffinazione di esse: l'estensione delle mappe fornisce risultati simili a quelli che si ottengono nei processi di calibrazione semplificata a stella e a croce, mentre per raffinazione delle mappe permette di avere una maggiore densità di punti di acquisizione senza dover andare ad intervenire a livello fisico sui meccanismi di movimentazione del setup di calibrazione, il che può essere favorevole a quei tipi di utilizzi della sonda che necessitano di una maggior quantità di dati dove delle mappe con punti non equispaziati non sarebbero efficaci.

Un altro aspetto che ha influenzato i risultati riguarda l'interpolazione numerica: tutta l'elaborazione dati è stata eseguita mantenendo il codice il più semplice possibile, il che significa che non si sono curati i principali aspetti numerici, quali il tipo di interpolazione e il condizionamento del codice stesso. Infatti, il tipo di interpolazione utilizzato è stato mantenuto lineare e non si è aggiunto nessun algoritmo migliorativo per quanto riguarda il condizionamento del problema.

In letteratura sono presenti molti algoritmi per migliorare l'elaborazione dati a livello numerico che permetterebbero il miglioramento del codice MatLab in modo tale da rendere il post-processing dei dati ancora più efficiente e riuscire a ottenere risultati migliori.



# Capitolo 5

## Conclusioni

Gli scopi principali di questa tesi sono due.

Il primo riguarda lo studio teorico che riguarda gli aspetti principali della calibrazione delle sonde di pressione multiforo, in particolare del tubo di Pitot a 5 fori, in modo da valutare la fattibilità di un processo di calibrazione alternativa, che prevede la movimentazione della sonda attorno l'asse di rollio. Come si è visto questo tipo di tecnica di calibrazione è possibile e può essere una valida alternativa alla tecnica standard tradizionale dove la sonda è mossa lungo l'asse di imbardata.

Il secondo obiettivo era quello di studiare la calibrazione alternativa da un punto di vista più pratico attraverso l'utilizzo di una simulazione numerica in MatLab che permettesse la visualizzazione delle mappe dei coefficienti di pressione in modo tale da capirne le varie caratteristiche e da poterle comparare a quelle della calibrazione tradizionale. La simulazione sviluppata ha fornito ottimi risultati coerenti con quello che ci si aspettava dalle premesse derivate dalla teoria. Inoltre, è stato possibile studiare gli effetti di eventuali errori dovuti ad imprecisioni che si avranno poi nella pratica.

Per concludere, si è dimostrato che è possibile calibrare un tubo di Pitot a 5 fori movimentandolo attorno ai suoi assi di beccheggio e di rollio, ma comunque ottenere delle mappe più che attendibili che possono ulteriormente essere migliorate da operazioni numeriche in fase di post-processing.

# Elenco delle figure

<b>Figura 1</b> Tubo di Pitot [1].....	5
<b>Figura 2</b> Presa statica [1].....	6
<b>Figura 3</b> Tubo di Pitot alla Prandtl [1] .....	7
<b>Figura 4</b> Esempi di sonde di pressione multiforo [16].....	8
<b>Figura 5</b> Dall'altro verso il basso: sonda omnidirezionale, sonda per alte temperature e sonda ad alta frequenza di acquisizione [16] .....	10
<b>Figura 6</b> Separazione dello strato limite ad alti angoli di incidenza [3] .....	11
<b>Figura 7</b> Onda d'urto sulla punta di un tubo di Pitot in un flusso supersonico [17] .....	12
<b>Figura 8</b> Manometro a U [1] .....	14
<b>Figura 9</b> Trasduttore di pressione elettronico.....	14
<b>Figura 10</b> Nomenclatura dei fori [6] .....	18
<b>Figura 11</b> Mappa di calibrazione per angolo di beccheggio .....	18
<b>Figura 12</b> Mappa di calibrazione per angolo di imbardata .....	19
<b>Figura 13</b> Mappa di calibrazione per pressione statica .....	19
<b>Figura 14</b> Mappa di calibrazione per pressione totale .....	20
<b>Figura 15</b> Scomposizione del vettore velocità [6] .....	21
<b>Figura 16</b> Esempio di sistema di movimentazione per la calibrazione [2] .....	22
<b>Figura 17</b> Movimentatore per calibrazione pitch-roll [16] .....	25
<b>Figura 18</b> Esempio di mappa di calibrazione in pitch-roll confrontata con una mappa tradizionale	27
<b>Figura 19</b> Mappe di calibrazione per il coefficiente di beccheggio .....	31
<b>Figura 20</b> Effetto dell'errore di posizionamento di 2° sulla mappa del coefficiente di beccheggio .	33
<b>Figura 21</b> Distribuzione dell'errore assoluto nella mappa del coefficiente di beccheggio .....	35
<b>Figura 22</b> Distribuzione dell'errore relativo nella mappa del coefficiente di beccheggio .....	35
<b>Figura 23</b> Mappa per il coefficiente di beccheggio trasformata .....	37
<b>Figura 24</b> Mappa per il coefficiente di imbardata trasformata.....	37
<b>Figura 25</b> Mappa per il coefficiente di pressione statica trasformata .....	38
<b>Figura 26</b> Mappa per il coefficiente di pressione totale trasformata.....	38
<b>Figura 27</b> Sfasamento della mappa del coefficiente di beccheggio .....	39
<b>Figura 28</b> Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di beccheggio .....	39
<b>Figura 29</b> Sfasamento della mappa del coefficiente di imbardata .....	40
<b>Figura 30</b> Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di imbardata.....	40

<b>Figura 31</b> Sfasamento della mappa del coefficiente di pressione statica.....	41
<b>Figura 32</b> Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di pressione statica .....	41
<b>Figura 33</b> Sfasamento della mappa del coefficiente di pressione totale .....	42
<b>Figura 34</b> Distribuzione dell'errore assoluto e relativo per il coefficiente di pressione totale.....	42

# Bibliografia

- [1] E. Rathakrishnan, *Instrumentation, Measurements, and Experiments in Fluids*. Taylor & Francis, 2007.
- [2] P. Ruchala, K. Stryczniewicz, P. Malachowski, L. Santos, and D. Back, “Use and calibration of 5-hole pressure probes to measurement of airflow velocity,” *Journal of KONES*, vol. 25, pp. 319–327, 09 2018.
- [3] C. V. Babu, M. Govardhan, and N. Sitaram, “A method of calibration of a seven-hole pressure probe for measuring highly three-dimensional flows,” *Measurement Science and Technology*, vol. 9, pp. 468–476, mar 1998.
- [4] E. Ower, “Pressure-probe methods for determining wind speed and direction. d. w. bryer and r. c. pankhurst. hmsO, london, 1971. 126 pp. illustrated. £3.50.,” *The Aeronautical Journal* (1968), vol. 75, 1971.
- [5] S. Tavoularis, *Measurement in Fluid Mechanics*. Cambridge University Press, 2005.
- [6] T. J. Dudzinski and L. N. Krause, “Flow-direction measurement with fixed-position probes in subsonic flow over a range of Reynolds numbers.,” 1969.
- [7] G. G. Zillac, “Modelling, calibration, and error analysis of seven-hole pressure probes,” *Experiments in Fluids*, vol. 14, pp. 104–120, Dec. 1993.
- [8] A. Gerner, C. L. Maurer, and R. W. Gallington, “Non-nulling sevenhole probes for high angle flow measurement,” *Experiments in Fluids*, vol. 2, pp. 95–103, 1984.
- [9] A. Alvisi, *Progettazione di un sistema di calibrazione ex-situ per anemometri a filo caldo*. PhD thesis.
- [10] M. B. Eryildiz, “Development and automatization of a planar jet wind tunnel for the x-wire calibration.”
- [11] A. R. Paul, R. R. Upadhyay, and A. Jain, “A novel calibration algorithm for five-hole pressure probe,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 2, 2011.
- [12] A. Pisasale and N. Ahmed, “A novel method for extending the calibration range of five-hole probe for highly three-dimensional flows,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 13, no. 1, pp. 23–30, 2002.

- [13] N. WU, Y. SAKAI, K. NAGATA, H. SUZUKI, O. TERASHIMA, and T. HAYASE, “Analysis of flow characteristics of turbulent plane jets based on velocity and scalar fields using dns,” *Journal of Fluid Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 247–261, 2013.
- [14] S. H. Hassan, T. Guo, and P. P. Vlachos, “Flow field evolution and entrainment in a free surface plunging jet,” *Phys. Rev. Fluids*, vol. 4, p. 104603, Oct 2019.
- [15] L. Gramer, L. Gramer@noaa, and Gov, “Kelvin-helmholtz instabilities,” 05 2007.
- [16] NIST traceable probe calibration (2017) Aeroprobe. Available at:  
<https://www.aeroprobe.com/probe-calibration/>.
- [17] Appunti di Gasdinamica, University of Naples. Available at:  
<http://wpage.unina.it/astarita/Corsi/Gasdinamica/Old/2019/3%20ONDE%20D%27URTO.pdf>
- [18] Aerofeel, trasduttori di pressione. Available at:  
<https://www.aerofeel.com/prodotto/strumentazione/trasduttori/tradsuttore-dpt-flow-u-1000/>
- [19] N. Carioli, Realizzazione in stampa 3D e calibrazione attraverso procedura semplificata di una sonda a 5 fori, Bachelor thesis.