



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale




CTN01_00176_163601



TRIM

Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina

Misure di flusso e della cinematica delle bolle in un getto di parete aria-acqua mediante Particle Image Velocimetry e shadowgrafia 3D risolta nel tempo

Sotto-Progetto	Efficienza	
Obiettivo Realizzativo	Test sperimentali per flusso in un canale in presenza di macrobolle e su forma semplice	
Descrizione attività	Allestimento setup e test su forma semplice	
Tipo di documento	Rapporto Tecnico	
Codice del documento	SP.4-OR.2-D.2	
Data di emissione	27/12/2021	
Redazione	Massimo Miozzi	 ISTITUTO DI INGEGNERIA DEL MARE INSTITUTE OF MARINE ENGINEERING





Titolo documento **Misure di flusso e della cinematica delle bolle in un
getto di parete aria-acqua mediante Particle Image
Velocimetry e shadowgrafia 3D risolta nel tempo**

Codice documento SP.4-OR.2-D.2

Distribuzione Pubblico

Rev.	Data	Pagine	Redazione	Approvato da
0	27/12/2021	2+34	Massimo Miozzi	Mario Felli

L'attività descritta nella presente pubblicazione è stata finanziata dal Progetto TRIM — Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina — coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dell'iniziativa dei Cluster Tecnologici Nazionali.



Indice

Sommario	2
1 Introduzione	3
2 Sviluppo di un algoritmo per la ricostruzione della cinematica delle bolle in un flusso bifase aria-acqua	4
2.1 Calibrazione dello spazio delle telecamere	5
2.1.1 Estrazione dei parametri intrinseci ed estrinseci	6
2.2 La geometria epipolare e la ricerca delle corrispondenze	8
2.3 Analisi delle immagini 2D per l'estrazione dei contorni delle bolle	11
2.4 Estrazione dei volumi di intersezione dei traced-rays	13
2.5 Tracciamento delle bolle	16
3 Algoritmo per le misure PIV	17
4 Il setup sperimentale	19
4.1 La vasca	20
4.2 Il setup per le acquisizioni PIV	22
4.3 Il setup per le acquisizioni shadowgrafiche	24
5 Misure di flusso mediante LIF-PIV 2D e della fase gassosa mediante shadowgrafia 3D risolta nel tempo	26
6 Misure della fase gassosa mediante shadowgrafia 3D risolta nel tempo	28
Riferimenti bibliografici	34

Sommario

In questo rapporto si descrive lo sviluppo di un algoritmo per la misura delle caratteristiche cinematiche tridimensionali delle bolle in flussi aria-acqua, sulla base dell'elaborazione di immagini shadowgrafiche acquisite da più punti di osservazione. L'algoritmo è stato applicato alla misura di un getto di parete bifase, in combinazione con misure di flusso bidimensionali effettuate mediante Laser Induced Fluorescent Particle Image Velocimetry.

Un approccio preliminare alla caratterizzazione della riduzione di resistenza indotta dalla presenza di bassissime concentrazioni di microbolle, è riportato in [1].

Una prima presentazione concettuale dell'algoritmo basato sulla shadowgrafia 3D è riportata in [2], unitamente alla validazione tramite ricostruzione 3D di una sfera rigida di dimensioni note e di alcune bolle isolate in galleggiamento.

Nell'approccio presentato in questo report vengono introdotti: la calibrazione simultanea delle 4 camere, l'utilizzo della geometria epipolare nella identificazione delle corrispondenze, l'approccio analitico per il calcolo delle intersezioni dei *traced-rays*.

Il setup è stato progettato presso il CNR-INM di Roma e l'Università di Cassino, dove è stato anche assemblato in forma preliminare. L'allestimento e le misure sono state effettuate nel laboratorio di erosione dell'INM-CNR, con il supporto logistico dell'Ing. Edoardo Faiella e quello all'allestimento del setup sperimentale del Dott. Antonio Camassa.

L'estrazione dei contorni delle bolle dalle immagini shadowgrafiche 2D e la preparazione dell'inseminante fluorescente per i test LIF-PIV sono state effettuate presso l'Università di Cassino.

Contributi

Ing. Massimo Miozzi (CNR-INM): Elaborazione e implementazione numerica dell'algoritmo shadowgrafico. Progettazione del setup, allestimento, misure LIF-PIV, misure shadowgrafiche. Analisi dei dati. Redazione del report.

Ing. Fabio Di Nunno (Università di Cassino): Progettazione del setup. Estrazione dei contorni delle bolle dalle immagini shadowgrafiche 2D e preparazione dell'inseminante fluorescente per i test LIF-PIV.

1 Introduzione

Un approccio preliminare alla caratterizzazione della riduzione di resistenza indotta dalla presenza di bassissime concentrazioni di microbolle, è riportato in [1].

Una prima presentazione concettuale dell'algoritmo basato sulla shadowgrafia 3D è riportata in [2], unitamente alla validazione tramite ricostruzione 3D di una sfera rigida di dimensioni note e di alcune bolle isolate in galleggiamento.

Nell'approccio presentato in questo report vengono introdotti: la calibrazione simultanea delle 4 camere, l'utilizzo della geometria epipolare nella identificazione delle corrispondenze, l'approccio analitico per il calcolo delle intersezioni dei *traced-rays*.

Il setup è stato progettato presso il CNR-INM di Roma e l'Università di Cassino, dove è stato anche assemblato in forma preliminare. L'allestimento e le misure sono state effettuate nel laboratorio di erosione dell'INM-CNR.

L'estrazione dei contorni delle bolle dalle immagini shadowgrafiche 2D e la preparazione dell'inseminante fluorescente per i test LIF-PIV sono state effettuate presso l'Università di Cassino.

2 Sviluppo di un algoritmo per la ricostruzione della cinematica delle bolle in un flusso bifase aria-acqua

La conoscenza della cinematica delle bolle in un flusso di parete aria-acqua è di fondamentale importanza per la comprensione delle dinamiche alla base della modifica della struttura dello strato limite turbolento che ne derivano. Le origini dell'interesse intorno a questa problematica risiedono principalmente, almeno per quanto riguarda il settore del trasporto navale di cui si occupa questo report, negli effetti che tali modifiche hanno sulla riduzione della resistenza di attrito all'interfaccia tra la parete e il fluido.

Le principali difficoltà nel determinare l'evoluzione spaziale e temporale di una nuvola di bolle immersa in un fluido che scorre lungo una parete sono dovute principalmente a:

- **Natura 3D del problema:** le bolle sono oggetti complessi e una loro osservazione significativa richiede la cattura del maggior numero possibile di dettagli. Il tipo di misura adottato in questo report, cioè l'osservazione ottica non intrusiva dell'ombra delle bolle mediante telecamere veloci, fornisce informazioni relative unicamente al contorno degli oggetti investigati e da tali informazioni occorre ricostruire la forma 3D ricercata.
- **Limiti di visibilità a concentrazioni non trascurabili:** la presenza di un numero significativo di bolle rende statisticamente significativa la possibilità di occlusioni nella osservazione, con la conseguente ridotta qualità dell'informazione nel dato registrato.
- **Tempi scala molto bassi:** la dinamica delle bolle può presentare, a seconda delle circostanze, la presenza concomitante di dinamiche ad evoluzione esplosiva associate ad oscillazioni di più lungo periodo, rendendo necessaria l'adozione di frequenze di campionamento (FPS, Frames Per Seconds) molto elevate da cui derivano dataset di grandi dimensioni.
- **Frammentazione e coalescenza:** nella loro evoluzione all'interno dello strato limite, le forze di shear che agiscono sulle bolle inducono sulle stesse azioni tali da indurre la frammentazione dell'oggetto principale. Tale frammentazione può andare dalla completa perdita di identità della bolla, alla formazione di una serie di piccole bolle e, come si vedrà nell'ultima sezione di presentazione dei risultati, rende molto complessa l'operazione di tracciamento.

Lo schema di acquisizione e analisi adottato nello sviluppo del presente algoritmo si basa sul seguente flusso:

- **Calibrazione preliminare delle telecamere come oggetti isolati:** estrazione dei parametri intrinseci di ogni telecamera.
- **Calibrazione preliminare delle telecamere come oggetti in relazione:** estrazione dei parametri estrinseci di ogni telecamera rispetto a una di esse, opportunamente scelta.

- Sincronizzazione delle telecamere. Ogni telecamera è sincronizzata rispetto a una di esse, detta master, ovvero esiste un segnale di sincronismo che rende identici i tempi delle scansioni del sensore di ogni telecamera. In questa fase, precedente alla acquisizione, ogni telecamera scansiona i dati del proprio sensore simultaneamente alle altre telecamere e li invia alla propria memoria RAM ad accesso rapido, che viene riempito fino alla dimensione stabilita per la partizione in uso e poi sovrascritto ciclicamente (FIFO).
- Acquisizione simultanea delle immagini. Per la configurazione adottata in queste misure, un segnale di trigger inviato a tutte le telecamere definisce lo svuotamento della partizione in uso e l'inizio della acquisizione delle immagini scansionate. L'acquisizione termina quando la partizione in uso è stata completamente riempita.
- Identificazione delle bolle ed estrazione dei contorni. Ogni immagine delle quattro telecamere viene analizzata per il riconoscimento delle bolle e l'estrazione dei loro contorni, per tutti gli istanti temporali a disposizione.
- Riconoscimento delle corrispondenze. Attraverso la geometria epipolare, viene stabilita la relazione di corrispondenza tra bolle presenti in tutti e quattro i punti di vista a un determinato istante, ripetendo l'operazione per tutti gli istanti.
- Estrazione del volume di intersezione. Per ogni punto di vista, per ogni istante e per ogni contorno di cui sono state riconosciute le corrispondenze, viene definito un cono avente vertice nell'origine della telecamera relativa a quella vista e con superficie laterale passante per il contorno di ogni bolla, proiettandolo all'infinito. Coni da diversi punti di vista che fanno riferimento al contorno della stessa bolla si intersecheranno nello spazio 3D, identificando il volume della bolla stessa.
- Tracciamento della bolla. Applicando semplici regole di tracciamento, i baricentri di ogni bolla vengono tracciati nello spazio 3D ad istanti successivi, ricostruendo l'evoluzione della traiettoria della bolla nel tempo.

2.1 Calibrazione dello spazio delle telecamere

La calibrazione delle telecamere è un processo in grado di mappare dati dal sensore della telecamera, che costituisce un sistema bidimensionale discreto sia nello spazio sia nei valori di intensità, in informazioni descritte nel sistema continuo, tridimensionale, definito nello spazio reale dove risiedono gli oggetti in esame. Tale processo è stato oggetto di indagine scientifica e tecnica per molti anni fino a raggiungere, ultimamente, un grado di maturità eccellente. Al momento sono disponibili sul mercato strumenti di calibrazione molto efficienti, sia a pagamento che gratuiti o, ancora di più, open source (viene messo a disposizione il codice sorgente). In questo report la calibrazione è stata effettuata con gli strumenti di calibrazione disponibili nell'ambiente Matlab [3], portati a maturazione negli anni precedenti in collaborazione con piattaforme open source [4]. Data la consolidata natura del metodo, questo non verrà ripreso in dettaglio nel report ma verranno fornite solo alcune indicazioni di massima. Nella procedura qui descritta, una delle quattro telecamere viene definita come master e da essa parte l'operazione di calibrazione.

2.1.1 Estrazione dei parametri intrinseci ed estrinseci

La calibrazione è stata effettuata utilizzando un target realizzato ad hoc, incollando su una superficie piana un pattern in forma di scacchiera con dimensione nota. Questo target è stato disposto di fronte alle telecamere in un gran numero di posizioni arbitrarie, avendo cura di catturare le immagini sincronizzate da ogni coppia master-slave. Successivamente è stato selezionato un sottoinsieme di 30 immagini, che sono state poi utilizzate per la calibrazione stereoscopica delle coppie di immagini con il supporto del Camera Calibration Toolbox di Matlab.

La configurazione geometrica delle telecamere adottata durante la procedura di calibrazione è la stessa utilizzata nella misura. La sua schematizzazione, ottenuta a valle della procedura, è riportata in Figura 1. Le camere 1 (master) e 2 sono disposte in un piano orizzontale, mentre le camere 3 e 4 osservano la sezione di prova dall'alto.

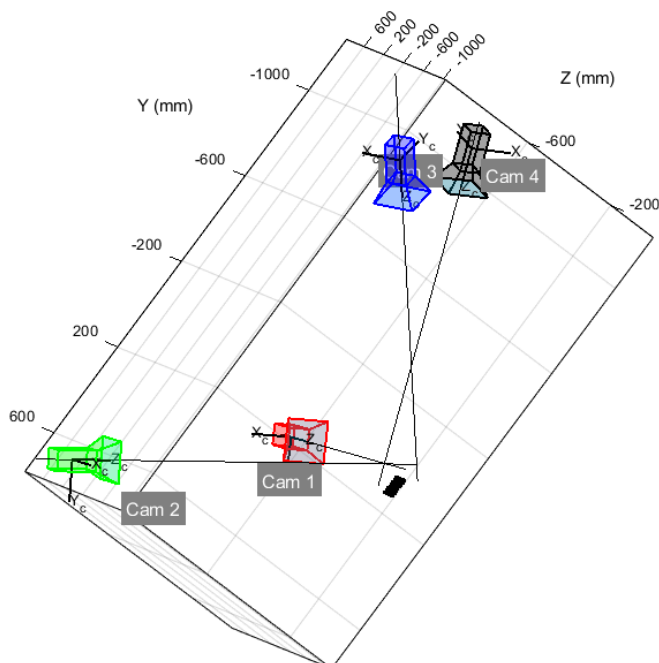


Figura 1: Rappresentazione spaziale del setup sperimentale con le quattro telecamere e la scacchiera nella loro posizione identificata a valle della calibrazione. Cam₁ e Cam₂ giacciono su un piano pressoché orizzontale con un angolo di 90° tra i loro assi ottici, Cam₃ e Cam₄ giacciono invece su un piano verticale.

Parametri estrinseci Vengono definiti estrinseci i parametri che identificano in modo univoco la trasformazione geometrica rigida tra il sistema di riferimento della telecamera (incognito) e il sistema di riferimento mondo che, nel caso del target scacchiera, ha origine nell'angolo in basso a sinistra, ha gli assi x e y che coincidono con i lati delle caselle e l'asse z ortogonale alla scacchiera stessa (ipotesi di perfetta planarità).

Determinare questi parametri significa:

1. Determinare il vettore di traslazione tra le posizioni relative delle origini nei due sistemi di riferimento.
2. Determinare la matrice di rotazione necessaria ad allineare i corrispondenti assi nei due sistemi di riferimento.

Utilizzando i parametri estrinseci della telecamera, si possono determinare le relazioni tra le coordinate di un punto nello spazio *world* (P_w) e quelle nello spazio *camera* (P_c):

$$P_c = R(P_w - T), \text{ dove } R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Definendo $P_c = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$ e $P_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}$ i due sistemi di riferimento sono in relazione tramite:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w - T_x \\ Y_w - T_y \\ Z_w - T_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Parametri intrinseci I parametri intrinseci rappresentano i caratteri specifici della singola telecamera e ne caratterizzano sia l'ottica che la geometria e le caratteristiche digitali del sensore:

- La proiezione prospettica tramite la lunghezza focale f .
- La trasformazione tra le coordinate sul piano e i pixel del sensore, attraverso la posizione del centro immagine $o_{x,y}$, le dimensioni dei pixel $s_{x,y}$ e l'angolo degli assi s_θ qualora i pixel non fossero rettangolari.
- Le distorsioni geometriche introdotte dalla distorsione delle ottiche, ovvero i coefficienti nelle equazioni per le distorsioni radiali e tangenziali k_1 e k_2 .

L'equazione che descrive il modello *pinhole* di formazione dell'immagine sarà quindi:

$$\lambda \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f s_x & f s_\theta & o_x \\ 0 & f s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

o, in forma equivalente:

$$\lambda \mathbf{x}' = K \Pi_0 \mathbf{X}_0 \quad (4)$$

Distorsione radiale Il modello di distorsione radiale utilizzato è:

$$x = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (5)$$

$$y = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (6)$$

2.2 La geometria epipolare e la ricerca delle corrispondenze

La geometria epipolare è la geometria proiettiva che lega due punti di vista sulla base dei i parametri intrinseci delle due telecamere e delle loro pose relative, indipendentemente dalle caratteristiche della scena osservata [5].

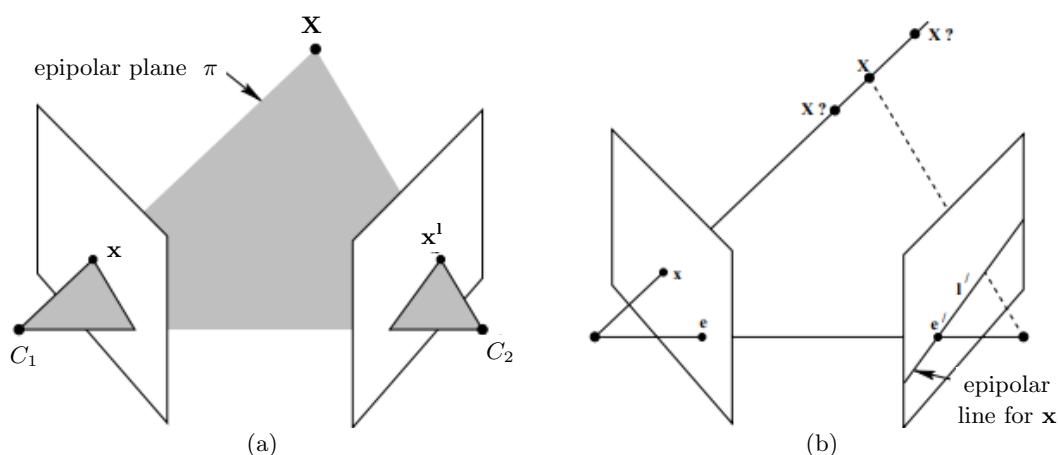
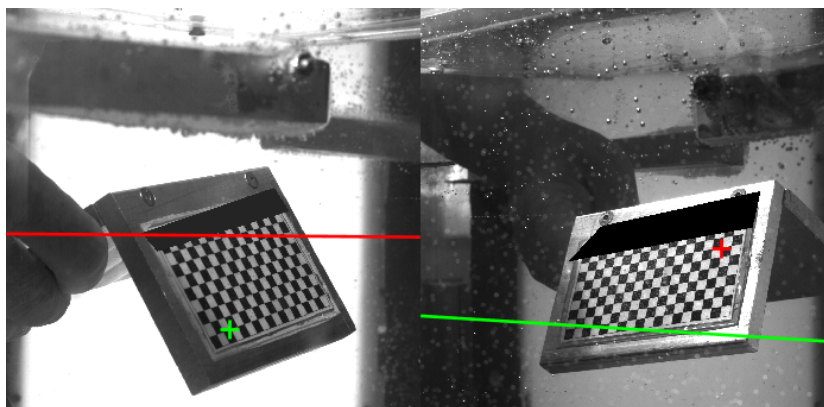


Figura 2: Corrispondenze tra punti: (a) Le due camere sono identificate dai loro centri C_1 , C_2 e dai rispettivi piani immagine. I centri delle telecamere, il punto \mathbf{X} nello spazio e le sue immagini \mathbf{x} e \mathbf{x}^1 giacciono sul piano π . (b) Se il punto immagine \mathbf{x} viene riproiettato nello spazio 3D lungo il raggio $C_1 - \mathbf{X}$, questo raggio viene visto come una linea l_0 nella seconda vista. Il punto \mathbf{X} , che si proietta in \mathbf{x} nella prima vista, deve appartenere a questo raggio e quindi, l'immagine di \mathbf{X} nella seconda vista deve appartenere a l_0 .

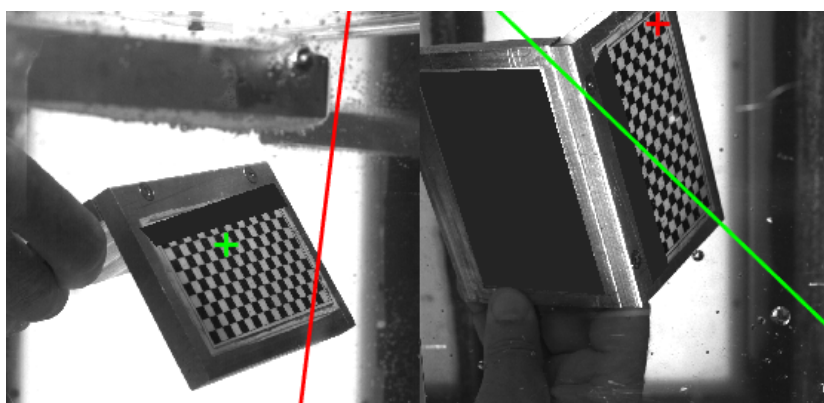
Le relazioni definite da questa geometria intrinseca sono incapsulate nella cosiddetta *matrice fondamentale* F , una matrice 3×3 di rango 2. Se un punto nello spazio 3D è osservato come x nella prima vista e x_0 nella seconda, i due punti nelle immagini soddisfano la relazione:

$$\mathbf{x}' F \mathbf{x}_0 = 0 \quad (7)$$

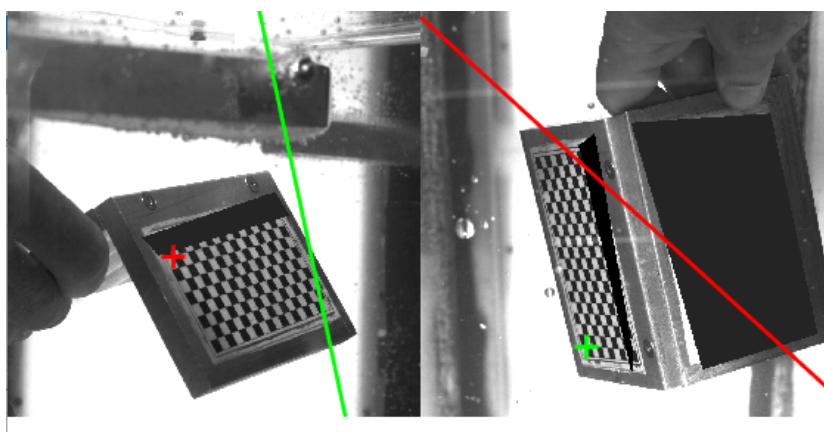
La conoscenza della matrice F per le coppie di telecamere Cam_{ij} , $i = 1 \dots 3, j = i+1 \dots 4$, consente di ricercare le corrispondenze tra le immagini provenienti dai quattro punti di vista sulla base della distanza degli oggetti candidati dai tracciati delle linee epipolari l_{ij} . Un esempio di questo approccio è riportato in Figura 3(a), 3(b), 3(c), sulla base dei risultati della calibrazione. Durante la procedura di calibrazione, gli angoli delle singole celle della scacchiera vengono identificati preliminarmente mediante una procedura automatica. Data la dimensione nota delle celle e la planarità del target, ogni angolo è in una posizione nota nello spazio 3D della scacchiera stessa, ovvero nel sistema di riferimento avente origine nell'angolo in basso a sinistra, gli assi x e y allineati con le celle e il piano $z = 0$ sul piano della scacchiera. Durante la calibrazione della camera isolata, per ogni singola immagine di ogni telecamera tale sistema di riferimento viene adottato come riferimento *word* e la conoscenza dei parametri intrinseci ed estrinseci consente di mappare il riferimento *camera* nel riferimento *word*. Nel passaggio dedicato alla calibrazione stereo viene anche calcolata la *matrice fondamentale* F tra le coppie di camere Cam_{ij} , $i = 1 \dots 3, j = i+1 \dots 4$.



(a) Relazione epipolare tra Cam_1 (sinistra) e Cam_2 (destra).



(b) Relazione epipolare tra Cam_1 (sinistra) e Cam_3 (destra).



(c) Relazione epipolare tra Cam_1 (sinistra) e Cam_4 (destra).

Figura 3: Rappresentazione geometrica delle relazioni epipolari tra la vista da Cam_1 e le altre viste da Cam_{234} . Un punto nell'immagine da Cam_1 viene mappato in una linea nell'immagine dalle altre telecamere e viceversa.

L'acquisizione simultanea delle quattro immagini e la stima della *matrice fondamentale* F consentono di rappresentare le relazioni epipolari tra le coppie Cam_{1j} , $j = 2 \dots 4$: l'angolo della scacchiera identificato dal marker "+" sulla camera 1 a sinistra viene mappato come una linea sulla camera j a destra e viceversa. Nella rappresentazione introduttiva in Figura 3 la scelta dei punti da mappare è arbitraria e serve unicamente a chiarire le definizioni fornite in precedenza.

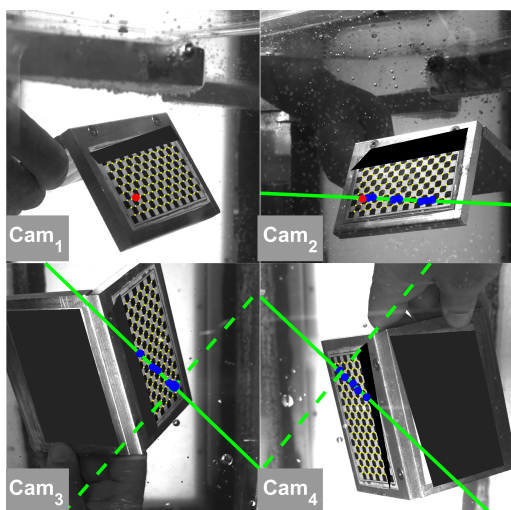


Figura 4: Ricerca delle corrispondenze tra le immagini del target relative alle quattro viste. Il punto rosso in Cam_1 viene mappato nelle linee epipolari l_{1j} , $j = 2 \dots 4$ che individuano i possibili candidati alle corrispondenze, evidenziati in blu. Uno dei candidati in Cam_2 , evidenziato in rosso, viene testato nelle sue relazioni epipolari con gli altri candidati nelle viste da Cam_{34} .

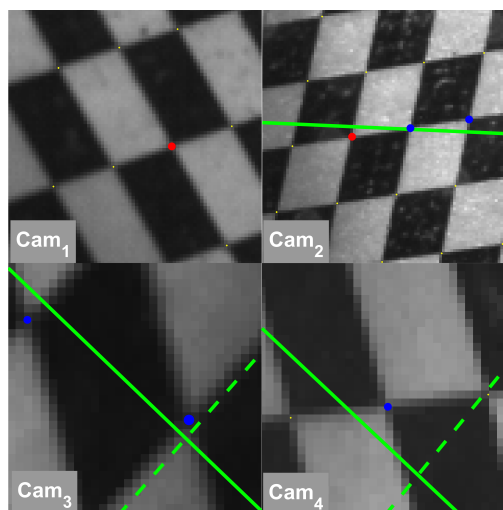


Figura 5: Dettaglio del test di corrispondenza di Figura 4. Le linee epipolari l_{1j} , $j = 3, 4$ del candidato P_2 in rosso nella vista da Cam_2 (verdi tratteggiate) non trovano candidati sufficientemente vicini e il punto P_2 viene scartato.

Nelle Figure 4, 5 e 6, 7 invece, il concetto di relazione epipolare viene applicato alla identificazione delle corrispondenze tra le quattro immagini, per un caso di mancata corrispondenza (Figure 4, 5) e per uno di corrispondenza validata (Figure 6, 7). Il corner P_1 identificato in rosso nella vista Cam_1 di Figura 6 viene mappato nella linea epipolare continua (verde) in Cam_2 . Date le relazioni descritte in precedenza, il suo corrispondente P_2 nella vista Cam_2 deve appartenere a questa linea, o meglio la sua distanza dalla linea deve essere piccola (inferiore a una certa soglia). Nelle viste Cam_{234} di Figura 6 sono evidenziati tutti i corner della scacchiera che sono a una distanza piccola dalla linea epipolare l_{1j} , $j = 2 \dots 4$. Questi punti sono potenziali candidati nella ricerca delle corrispondenze di P_1 nelle diverse immagini. Applicando reiterativamente la stessa procedura ai candidati nella vista Cam_2 , si ottengono per le viste Cam_{34} le linee epipolari tratteggiate (verdi) l_{2j} , $j = 3, 4$. Il dettaglio nella vista Cam_4 di Figura 5 mostra come la linea epipolare l_{24} rappresentativa del corner colorato in rosso della vista Cam_2 cada molto distante da tutti i candidati vicini a l_{14} e quindi la sua candidatura va scartata.

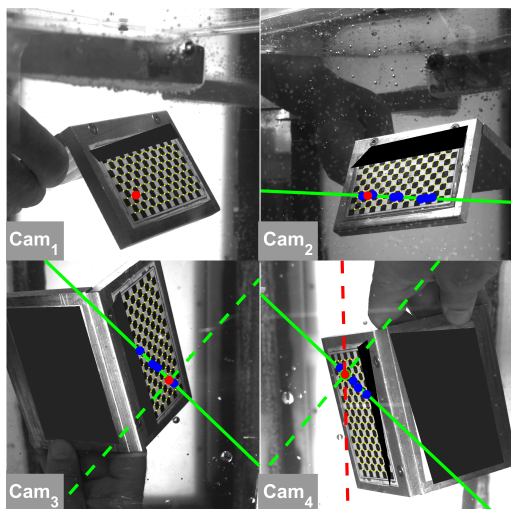


Figura 6: Ricerca delle corrispondenze tra le immagini del target relative alle quattro viste. Il punto rosso in Cam_1 viene mappato nelle linee epipolari l_{1j} , $j = 2 \dots 4$ che individuano i possibili candidati alle corrispondenze, evidenziati in blu. Uno dei candidati in Cam_2 , evidenziato in rosso, viene testato nelle sue relazioni epipolari con gli altri candidati nelle viste da Cam_{34} .

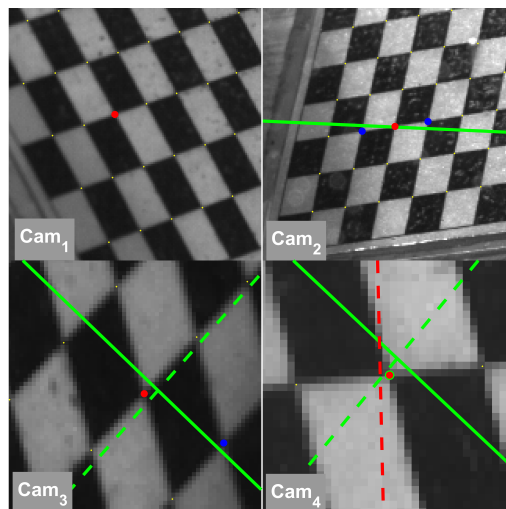


Figura 7: Dettaglio del test di corrispondenza di Figura 4. Le linee epipolari l_{1j} , $j = 3, 4$ del candidato P_2 in rosso nella vista da Cam_2 (verdi tratteggiate) individuano un candidato sufficientemente vicino nelle viste da Cam_{34} . Il test finale sul punto P_3 individua la linea epipolare l_{34} (rossa tratteggiate) che conferma la corrispondenza.

Proseguendo reiterativamente e applicando la stessa procedura a un differente candidato nella vista Cam_2 in Figura 6, questo dà origine a due linee epipolari l_{2j} , $j = 3, 4$ che, come mostrato in Figura 7, cadono molto vicino sia al candidato P_3 nella vista Cam_3 che a quello P_4 nella vista Cam_4 , entrambi evidenziati in rosso. A questo punto, una ulteriore conferma della corrispondenza tra i corners nelle diverse viste si ottiene proiettando il punto P_3 sulla linea epipolare l_{34} nella vista Cam_4 . La linea rossa tratteggiata nella vista Cam_4 in Figura 7 conferma la correttezza della corrispondenza individuata. Al termine di questa procedura, vengono identificate le corrispondenze tra tutti i corner della scacchiera, osservati simultaneamente dai quattro punti di vista. Il processo descritto è alla base della identificazione delle corrispondenze tra le bolle inquadrare dalle diverse viste, con la sostituzione dei baricentri delle bolle ai corner della scacchiera, come verrà descritto in seguito.

2.3 Analisi delle immagini 2D per l'estrazione dei contorni delle bolle

Il primo passo nella ricostruzione dei volumi 3D delle bolle che inseminano il flusso investigato consiste nella estrazione delle informazioni relative ai loro contorni dalle immagini acquisite. Le telecamere acquisiscono le immagini in modo sincrono, da quattro punti di vista differenti e con diverso orientamento, come mostrato più avanti nelle Figure 35 e 36.

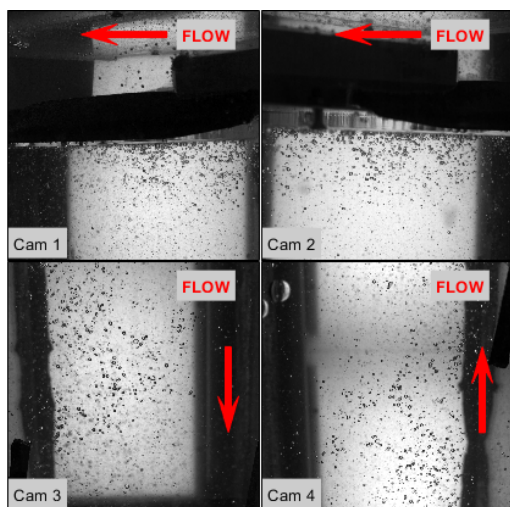


Figura 8: Immagini originali del getto di parete con flusso multifase riprese dalle viste di Cam₁₂₃₄. La direzione del flusso è indicata dalla freccia rossa. Le viste da Cam₁₂ hanno asse ottico parallelo alla parete.

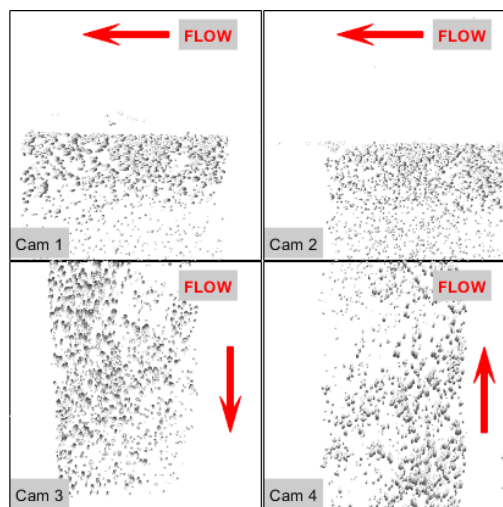


Figura 9: Contorni delle bolle estratte dalle immagini originali riprese dalle viste di Cam₁₂₃₄ relative a cinque istanti temporali successivi, vedi dettaglio in Figura 10. La direzione del flusso è indicata dalla freccia rossa.

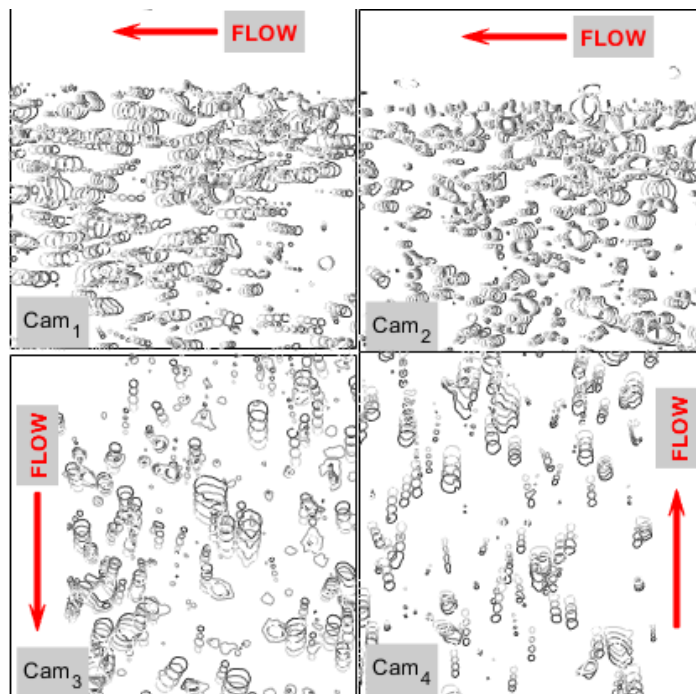


Figura 10: Dettaglio delle immagini in Figura 9. La sovrapposizione di cinque istanti temporali successivi permette di visualizzare la cinematica delle bolle. Contorni più scuri corrispondono a istanti temporali precedenti.

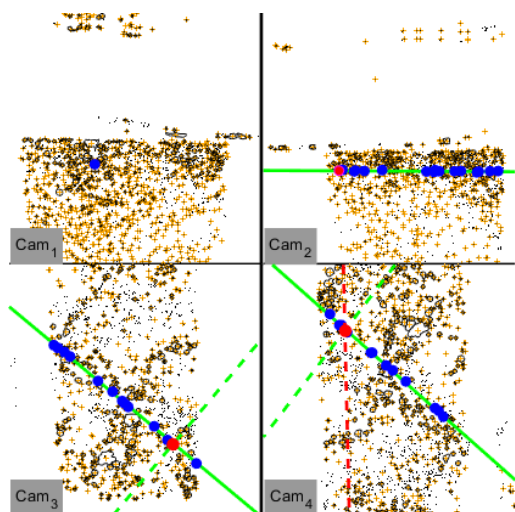


Figura 11: Lo schema per la ricerca delle corrispondenze applicato alle immagini con i contorni delle bolle. Dato il baricentro P_1 in Cam_1 , questo viene mappato nelle linee epipolari l_{1j} , $j = 2 \dots 4$ nelle viste da Cam_{234} (linee verdi continue).

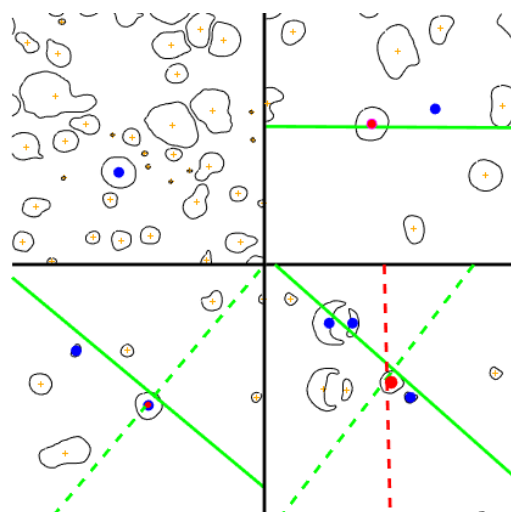


Figura 12: Dettaglio della ricerca delle corrispondenze riportata in Figura 11. Il punto P_2 in Cam_2 viene mappato in l_{23} , che individuano due candidati nelle viste Cam_{34} . La sua mappatura di P_3 in l_{34} (rossa tratteggiata) soddisfa i requisiti delle corrispondenze.

Per ogni telecamera e per ogni istante temporale, vengono estratti i contorni delle bolle seguendo la procedura descritta in [2]. I dati dei contorni ottenuti in questo modo sono espressi a livello di pixel, cioè descrivono il contorno con una successione di numeri interi. L'applicazione di una routine di smoothing locale consente di regolarizzare l'andamento del contorno e di esprimerlo con precisione di subpixel. Dai contorni così ottenuti vengono estratte le posizioni dei baricentri e i dataset risultanti alimentano l'algoritmo di ricerca delle corrispondenze descritto in precedenza.

2.4 Estrazione dei volumi di intersezione dei traced-rays

L'identificazione delle corrispondenze tra le quattro viste dei contorni delle bolle consente di estrarre il volume della bolla nel riferimento *word*. Per ognuna delle viste, viene tracciato un raggio che parte dal punto di vista della telecamera e passa per il baricentro della bolla nelle quattro immagini da Cam_{1234} (Figura 13). Nel caso ideale, i quattro raggi Ray_{01234} si intersecano tutti in un punto unico, mentre nel caso della misura in questione questo non avviene a causa del rumore nella misura. Per ovviare a questo mancato allineamento si procede identificando il punto P_r di minima distanza tra i quattro raggi. Questo punto viene assunto come posizione del baricentro della bolla nello spazio *word*.

Dai quattro punti di vista di Cam_{1234} vengono emessi i raggi Ray_{11234} che passano per il punto di minima distanza P_r e tutte le informazioni relative ai diversi punti di vista vengono ruotate nello spazio fino a far sovrapporre Ray_{01234} su Ray_{11234} .

I coni centrati sui punti di vista Cam_{1234} e passanti per i contorni ruotati delle diverse immagini (Figura 15) definiscono uno spazio comune al loro interno la cui definizione comporta una operazione di *space – carving*, descritta nel seguito.

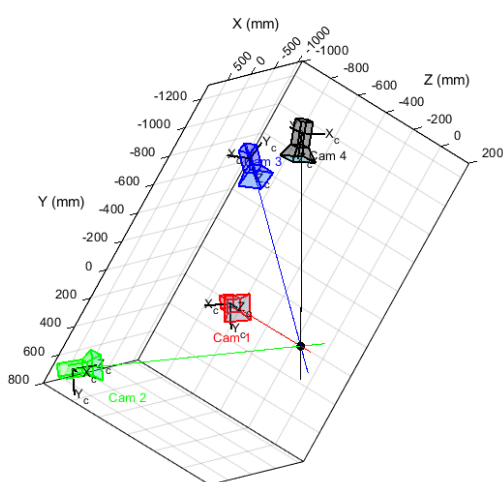


Figura 13: Vista 3D del sistema delle telecamere e dei raggi Ray_{01234} che escono da ogni punto di vista Cam_{1234} e passano per la posizione dei baricentri delle bolle corrispondenti.

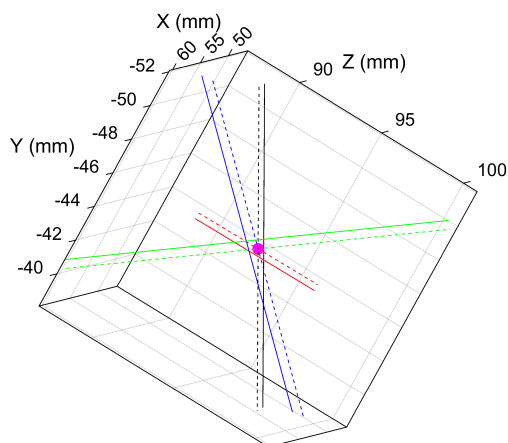


Figura 14: Dettaglio dei raggi Ray_{01234} (linea continua) e dei raggi Ray_{1234} che uniscono Cam_{1234} con P_r (linea tratteggiata). I quattro raggi non si incontrano ma si può identificare il punto più vicino a loro P_r .

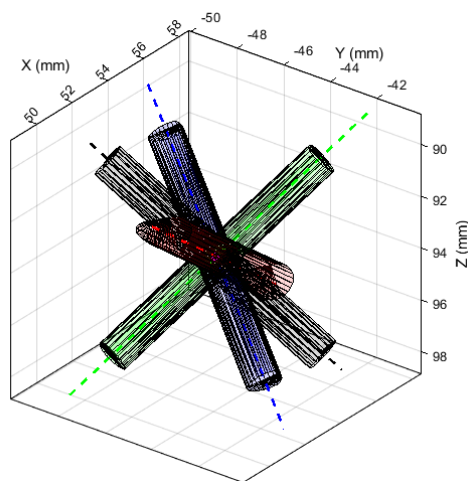


Figura 15: Coni con origine nei punti di vista Cam_{1234} e passanti per i contorni della bolla nelle immagini 2D. Gli assi dei coni Ray_{01234} sono ruotati sui raggi Ray_{1234} , cioè passano tutti per il punto P_r .

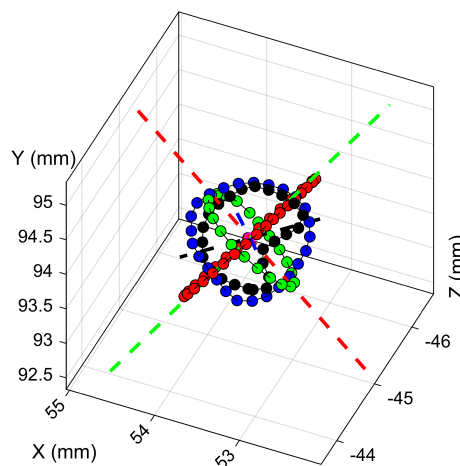


Figura 16: I piani π_{1234} , normali ai raggi Ray_{1234} e passanti per P_r , inseriscono i coni in Figura 15 lungo le curve piane qui riportate.

Come primo passo vengono definiti i piani π_{1234} come quei piani ortogonali ai raggi Ray_{1234} e passanti per P_r . Questi piani sono paralleli al piano immagine delle telecamere e la loro intersezione con i coni rappresentativi del contorno della bolla in 2D ripropone lo stesso contorno, ma collocato nello spazio 3D. La Figura 16 riporta i risultati della intersezione.

Le curve piane risultanti, rappresentate con il colore dell'asse del cono intersecato, definiscono una prima rappresentazione dello spazio comune all'interno delle superfici coniche. In prima approssimazione, possiamo definire come E_r l'ellissoide che minimizza la distanza con i punti delle quattro curve, come rappresentato in Figura 17. Più che per un suo effettivo utilizzo, la definizione dell'ellissoide consente di individuare uno spazio circoscritto all'interno del quale ricercare il volume di intersezione dei coni (box rosa in Figura 17).

Per ogni bolla investigata, questo spazio viene discretizzato e, per i quattro coni in successione, vengono ricercate le celle contenute all'interno delle superfici. Il risultato finale, riportato in Figura 18, mostra la qualità del risultato ottenuto, in particolare in relazione alla possibilità di catturare bolle con caratteristiche sia concave che convesse, quest'ultima proprietà essendo niente affatto scontata.

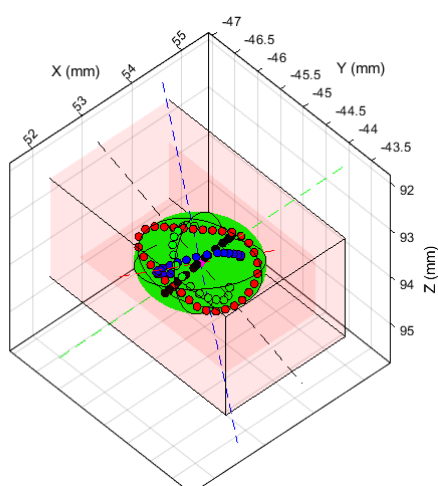


Figura 17: L'ellissoide (superficie verde) che minimizza le distanze dai punti di intersezione (punti rossi, verdi, blu e neri) definisce una prima forma per la bolla, ma soprattutto identifica i limiti della griglia su cui effettuare lo *space-carving*, qui rappresentati con il box rosa.

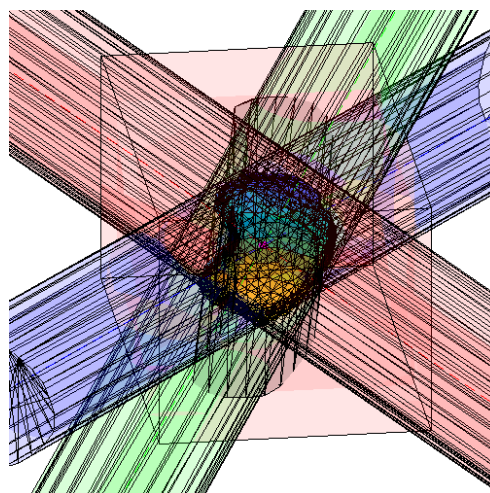


Figura 18: Le superfici dei coni intersecano il box rosa e definiscono un dominio esterno e uno interno. Il volume in comune con l'intersezione dei quattro coni e del box rappresenta la bolla finale.

2.5 Tracciamento delle bolle

Il tracciamento delle bolle, ovvero il riconoscimento della appartenenza di una bolla catturata in diversi istanti a una particolare traiettoria, avviene mediante un semplice algoritmo di ricerca, basato su semplici ipotesi preliminari. L'algoritmo viene alimentato con la sequenza delle posizioni 3D dei baricentri delle bolle identificati con il metodo descritto in precedenza.

Il processo richiede la conoscenza del massimo valore atteso degli spostamenti dei baricentri e del suo massimo gradiente, quantità rispettivamente legate alla massima velocità v e alla massima accelerazione a . Definendo dt il passo temporale tra due campi di particelle in successione e assegnando il vettore velocità nel punto medio, per avvantaggiarsi dei benefici delle derivate centrali, la ricostruzione delle traiettorie richiede tre passi, inerenti l'identificazione e la validazione della stessa: (i) a t_0 , ogni baricentro identificato viene considerato come un potenziale punto iniziale di una traiettoria possibile; (ii) a $t_0 + dt$, i candidati per le posizioni successive vengono identificati come quelli che ricadono all'interno di una sfera di raggio $v \times dt$; (iii) per ogni coppia di baricentri appartenenti a una potenziale traiettoria, un terzo baricentro a $t_0 + 2dt$ all'interno di una sfera di raggio $(v + a dt)dt$ centrato sul secondo dei due candidati, con una certa tolleranza a . Se viene trovato un baricentro a $t_0 + 2st$, la traiettoria viene validata e viene proseguita la ricerca per una sua estensione a istanti successivi applicato lo step iii) in successione. La procedura richiede la presenza di una tripletta di baricentri disposti in posizioni reciproche ben definite e costituisce un filtro efficace nella ricostruzione delle traiettorie, purché la densità dei baricentri non superi una certa soglia.

Tuttavia può accadere che alcune delle traiettorie ricostruite siano in realtà parte di traiettorie più lunghe. Può infatti accadere che la ricerca 3D fallisca a un certo istante, interrompendo la ricostruzione in quel passo temporale. Per riconnettere queste traiettorie, lo step iii) viene applicato fino a otto volte consecutive in istanti temporali successivi alla fine della traiettoria precedentemente identificata e validata, utilizzando una interpolazione spline di Catmull-Rom [6], con le ultime due posizioni della traiettoria in esame e i primi due della candidata come prolungamento come punti di controllo. Prima della validazione della traiettoria prolungata viene effettuato un test sulla continuità dell'intensità della velocità tra le traiettorie da riconnettere e il segmento di estensione.

3 Algoritmo per le misure PIV

I dati acquisiti nella forma di sequenze di coppie di immagini sono stati analizzati per mezzo di un algoritmo di *feature tracking* basato sulla correlazione, che identifica nel minimo della Sum of Squared Differences l'ottimo della misura e che deriva dalla equazione del flusso ottico [7] risolta localmente [8, 9]. In termini formali, la ricerca del picco di correlazione tra due finestre di interrogazione a e b utilizzato dall'approccio PIV classico, rappresentabile come $R_{PIV} = a \times b|_{max}$, viene sostituita dalla ricerca del minimo della funzione di correlazione $R_{SSD} = (a - b)^2|_{min} = a^2 + b^2 - 2a \times b|_{min}$. I due approcci sono coerenti tra loro, ma l'utilizzo della *SSD* consente di tenere conto dei due termini energetici quadratici e viene considerato, nell'ambito della teoria dei segnali, un approccio ottimale [10].

L'algoritmo è stato implementato nel software *YATS* [11], che ha contribuito al III e IV International PIV Challenge [12]. Una delle principali caratteristiche del metodo risiede nella impostazione dell'algoritmo di ricerca degli elementi da tracciare: la soluzione al problema del moto di una particella viene ricondotta a quella del moto dei gradienti di luminosità, risolta in forma chiusa. Questa soluzione esiste solo in presenza di elevati gradienti di intensità luminosa in entrambe le direzioni orizzontale e verticale (corner).

I risultati sono ottenuti in forma sparsa nello spazio 2D dell'immagine in corrispondenza dei punti dove è massimo il rapporto segnale/rumore. A differenza dei classici algoritmi PIV, che risolvono il problema sui nodi di un grigliato regolare a prescindere dalla qualità delle informazioni ivi acquisite, questo approccio consente di estrarre il moto delle particelle solo dove queste sono presenti, anche laddove si trovino circondate da bolle.

Questo è possibile in quanto le particelle da tracciare vengono sostituite da enti matematici, cioè luoghi individuati estraendo, dall'intorno 9×9 di ogni pixel, gli autovalori della matrice di correlazione dei gradienti di intensità luminosa e scegliendo solo quelli dove il secondo autovalore è superiore a una soglia minima. Se questa soglia minima è abbastanza elevata, tutti quegli oggetti all'interno dell'immagine che si presentano come contorni di una bolla, o loro residui, vengono automaticamente scartati in quanto il gradiente lungo la direzione del contorno sarà molto basso, confrontato con quello normale al contorno stesso.

Un esempio concreto delle modalità di funzionamento dell'algoritmo e dei vantaggi derivanti da un suo uso in presenza di bolle può essere dedotto da una osservazione dei dettagli di immagini LIF-PIV presentati nelle Figure 19 e 20.

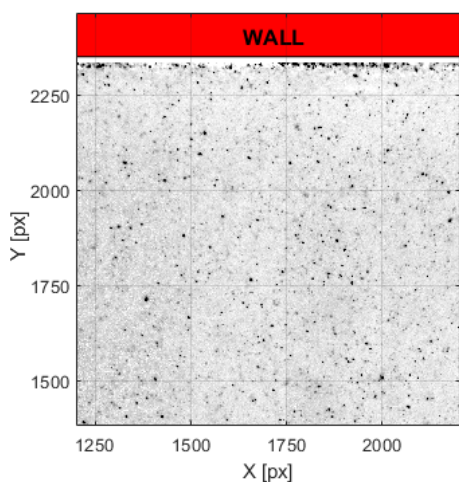


Figura 19: Dettaglio di una immagine LIF-PIV acquisita in assenza di bolle. La fluorescenza indotta dalla lamina laser sullo scatter delle bolle ne enfatizza la visibilità.

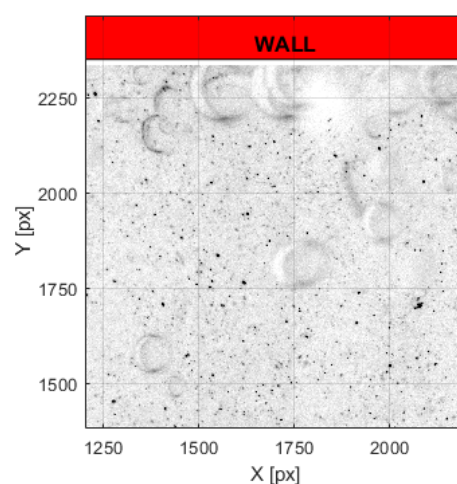


Figura 20: Dettaglio di una immagine LIF-PIV acquisita in presenza di bolle. La presenza del filtro passa-alto nell'ottica della telecamera permette di evitare la presenza delle riflessioni sulla superficie delle bolle.

La prima immagine mostra la presenza di particelle isolate per il flusso monofase, la seconda riporta una immagine del flusso bifase con alcune tracce residue dei contorni delle bolle, minimizzate grazie alla azione del filtro ottico. La loro presenza influenzerà solo marginalmente il conto in quanto verranno esclusi dai punti da tracciare. Inoltre, nel calcolo della funzione di correlazione *SSD* la matrice di pesi gaussiani applicata alla finestra di interrogazione aumenta significativamente il peso della sua zona centrale, ovvero della particella investigata, il cui contributo sul calcolo del moto risulterà prevalente rispetto a quello del suo intorno.

4 Il setup sperimentale

Il setup sperimentale descritto nel seguito è costituito da un getto di parete, con fluido monofase (acqua, newtoniano) e bifase (aria-acqua, non-newtoniano). Nello schema concettuale riportato in Figura 21 è visibile il tubo di adduzione del getto (da sinistra) e il piano orizzontale posto al di sopra del tubo stesso. Il getto che si sviluppa in ingresso viene deflesso verso l'alto per effetto Coanda e sul piano orizzontale si sviluppa il getto di parete.

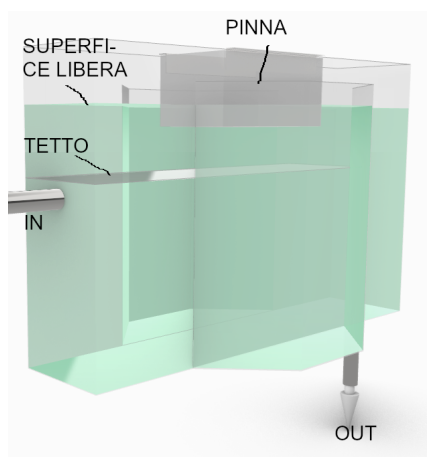


Figura 21: Generazione del getto di parete. Il getto si sviluppa sulla faccia inferiore del piano orizzontale posto sotto al pelo libero. La pinna prismatica è leggermente immersa nel fluido, consentendo l'accesso ottico al di sotto della superficie.

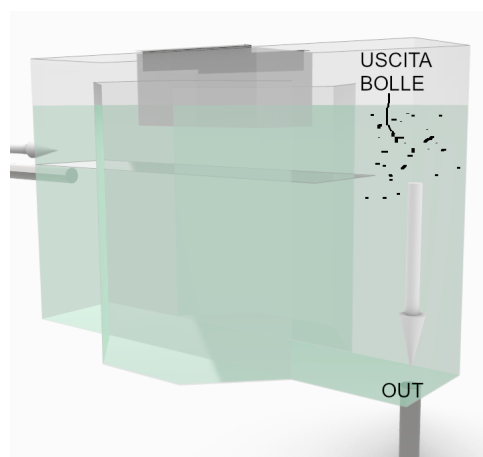


Figura 22: Gestione del flusso bifase. La miscela aria-acqua che viene immessa nella sezione di prova viene gestita lasciando aperto un passaggio per la superficie libera alle bolle trasportate dal getto alla fine del piano orizzontale.

La natura bifase del getto determina l'inserimento, all'interno della vasca, di una quantità d'aria non trascurabile che va rimossa rapidamente per garantire tempi sufficientemente lunghi alla misura. A questo scopo, la parete orizzontale su cui si sviluppa il getto si estende solo per una frazione dell'intera vasca, rendendo accessibile il pelo libero alla frazione gassosa che, in forma di bolle, si muove per galleggiamento verso la superficie libera e si dissolve in atmosfera (Figura 22). Questa soluzione tecnica implica la presenza di una superficie libera, che però rende impossibile sia osservare dall'alto i fenomeni all'interno della vasca, sia utilizzare sistemi di illuminazione da quella direzione. Per ovviare a questo problema, si è utilizzata una pinna prismatica leggermente immersa, in grado di eliminare il passaggio dell'interfaccia aria-acqua e di garantire un accesso ottico di qualità per l'osservazione e/o l'illuminazione della sezione di prova.

4.1 La vasca

Gli esperimenti sono stati condotti in un serbatoio prismatico la cui base misura $930 \times 200 \text{ mm}^2$ e l'altezza 580 mm. Il prisma interseca un cilindro ottagonale avente la stessa altezza, con lato di 220 mm. Le due parti del cilindro, i segmenti ottagonali simmetrici ed esterni ai lati lunghi del prisma, mettono a disposizione quattro punti di vista inclinati di 45° rispetto al piano di mezzeria del prisma stesso, ma ortogonali rispetto alla interfaccia aria/acqua (Figura 23).



Figura 23: Il setup sperimentale visto dall'alto. La vasca prismatica accoglie la sezione di prova ed è inglobata in un cilindro ottagonale. Le pareti inclinate dei due segmenti ottagonali esterni alla vasca consentono di minimizzare le distorsioni dell'accesso ottico che avviene nella direzione delle normali.

Ciò consente di ridurre al minimo le distorsioni indotte dal cambio di indice di rifrazione tra i due mezzi, in quanto l'asse ottico delle telecamere che osservano l'interno è sempre ortogonale alla parete di ingresso.

L'altezza della sezione di prova è determinata da un tetto in plexiglass, posto a 350 mm dal fondo, che si estende per 750 mm lungo la direzione maggiore del prisma, lasciando quindi aperta la comunicazione tra la sezione di prova e la parte di fluido al di sopra del tetto stesso. Ciò consente di operare con un flusso multifase aria/acqua, garantendo allo stesso tempo il rapido smaltimento delle bolle immesse nella sezione ed evitando un loro accumulo non gestito (Figura 24).

L'assenza di una chiusura ermetica nella vasca determina la presenza di una superficie libera. Al fine di consentire sia una corretta visione dall'alto per le prove shadowgrafiche, sia la formazione di una lamina laser non distorta per le prove PIV, è stato necessario garantire un accesso ottico efficiente attraverso l'utilizzo di una pinna prismatica in plexiglass, posta in corrispondenza alla ROI, avente base $170 \times 300 \text{ mm}^2$ e altezza 140 mm (Figure 21, 22).



Figura 24: Vista laterale del sistema sperimentale. L'estensione del tetto della sezione di prova lascia aperto un varco per la comunicazione tra l'ambiente di prova e la superficie libera, consentendo il rapido smaltimento delle bolle durante le prove. Una pinna prismatica, visibile sulla sinistra dell'immagine, consente l'accesso ottico al di sotto della superficie libera.

Attraverso la regolazione del livello di riempimento della vasca, è stato possibile immergere la parte della pinna di 25–30 mm, garantendo un accesso ottico indisturbato alla regione sottostante il tetto in plexiglass. Su uno dei lati corti è stato praticato un foro per l'inserimento dell'ugello del getto. Quest'ultimo, a sezione circolare di $D = 18$ mm, ha il suo centro ad una distanza di 30 mm dal tetto stesso. Il tubo di adduzione entra nella vasca per una misura di 2 mm e i suoi bordi sono lavorati a coltello (Figura 25).

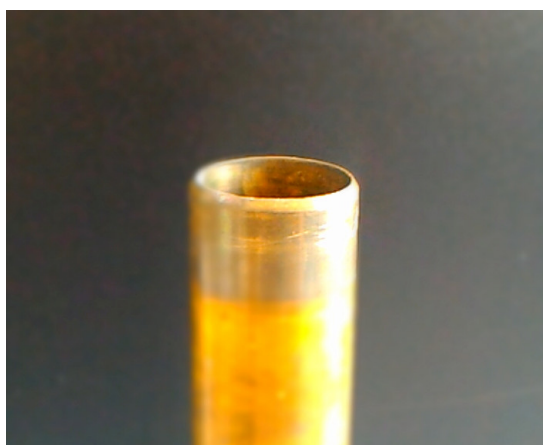


Figura 25: Ugello.

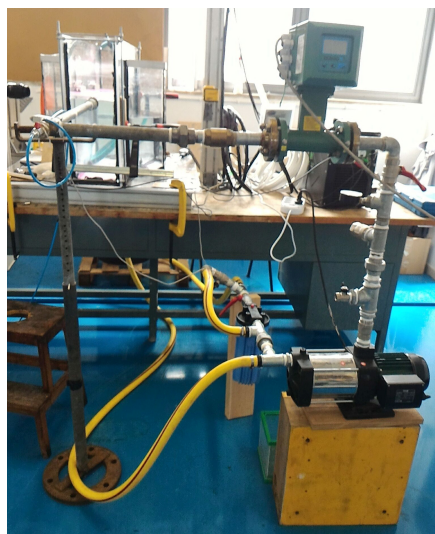


Figura 26: La pompa di mandata alimenta il flusso all'interno della tubazione verticale, a una portata che viene misurata dal flussimetro verde (in alto a destra), e lo indirizza all'interno della sezione di prova.



Figura 27: Il flusso d'aria passa attraverso il flussimetro e viene immesso nel circuito dell'acqua attraverso il tubicino di plastica blu visibile nell'immagine. Il flussimetro consente la misura e la regolazione del flusso d'aria.

La portata del getto è garantita da una pompa DAB da 1.36 HP, la cui portata è controllata tramite un flussimetro ISOIL, con una accuratezza pari a 0.11/m. All'interno del tubo di mandata, è alloggiato un ulteriore tubicino per l'inserimento dell'aria compressa. Quest'ultimo, di diametro 4 mm, immette un flusso d'aria a portata controllata attraverso un flussimetro Riels PFM7, con misurazione di portata minima pari a 0.011/min. La Regione Di Interesse (ROI) è posta a 500 mm dall'ingresso del getto.

4.2 Il setup per le acquisizioni PIV

L'organizzazione spaziale del setup per le misure PIV è riportato in Figura 28. La testa del laser EverGreen della Quantel da 200 mJ è montata in verticale al di sopra della sezione di prova. Il raggio emesso passa attraverso il sistema di ottiche che lo trasformano nella lamina per la misura. La lamina è orientata nel verso del moto e ha spessore massimo di 3 mm nella regione di misura. Grazie alla pinna prismatica, la lamina supera indisturbata la superficie libera della sezione di prova, passa attraverso la parete su cui si sviluppa il getto e illumina la ROI dello strato limite. Il getto di parete investigato ha la parete che lo confina posta al di sopra, quindi la lamina che lo illumina attraversando la parete minimizza le riflessioni. La testa laser è collegata all'unità di raffreddamento (Figure 30 e 31) che provvede anche al controllo dei sincronismi tra i due impulsi laser. Questi sincronismi sono impostati via software e inviati al dispositivo di sincronizzazione TSI Synchronizer 610 036 (Figura 32) che gestisce la telecamera e il laser. Attraverso l'impostazione del timing desiderato, è possibile stabilire i ritardi tra l'emissione delle lamine e la cattura delle immagini (Figura 33).

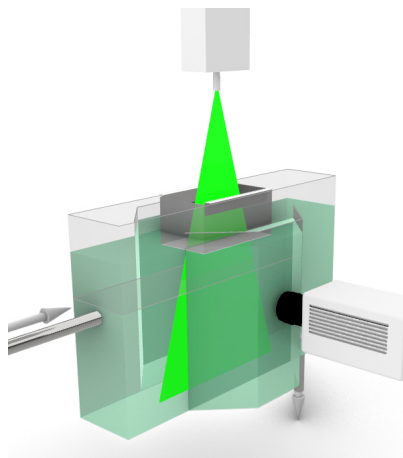


Figura 28: Organizzazione spaziale del setup per le misure PIV visto dalla regione di ingresso del getto. Il getto generato sulla sinistra della vasca si sviluppa lungo la parete orizzontale posta al di sotto della superficie libera. La lamina laser attraversa la pinna prismatica e illumina lo strato limite del getto, minimizzando le riflessioni.



Figura 29: Sistema di acquisizione PIV visto dalla regione di uscita del getto. Sono visibili in alto la testa del laser e il sistema di lenti utilizzato per generare la lamina laser. Il varco per la comunicazione tra l'ambiente di prova e la superficie libera consente il rapido smaltimento delle bolle durante le prove.



Figura 30: Dettaglio della testa laser. Sono visibili i tubi di ingresso e di uscita del liquido refrigerante proveniente dal chiller, il cavo di potenza e il cilindro di alloggiamento del sistema di lenti utilizzato per generare la lamina.



Figura 31: Dettaglio del pannello del chiller e dei cavi per la comunicazione dei segnali TTL di trigger per l'apertura del Q-Switch, provenienti dal sincronizzatore.

Una fotocamera TSI PowerView™ 8MP, Progressive Scan Interline CCD w/microlens, osserva il moto delle particelle illuminate dalla lamina attraverso la parete dell'otta-

gono parallela al moto del getto (Figura 34). L'osservazione del moto da parte della telecamera avviene attraverso un filtro ottico in grado di eliminare le riflessioni della lamina sulla superficie delle bolle che, oltre a deteriorare la qualità delle immagini acquisite, potrebbero addirittura danneggiare il sensore della telecamera. A questo scopo sono stati utilizzati due tipi di filtri: il primo montato di fronte all'ottica Nikkor 105 mm, il secondo montato al suo interno.

Le particelle di insemnante utilizzate sono state realizzate presso l'Università di Cas-sino, attraverso una procedura che consente di inglobare un materiale fluorescente, la rotamina, al loto interno. Eccitata dalla radiazione laser, la rotamina decade emetten-do a sua volta una radiazione in grado di superare i filtri ottici predisposti di fronte all'ottica. Si ottiene in questo modo un sistema Laser Induced Fluorescence - Parti-cle Image Velocimetry (LIF-PIV) in grado di acquisire misure di flusso anche in una miscela bifase, ovvero operando in presenza di bolle a concentrazione significativa.

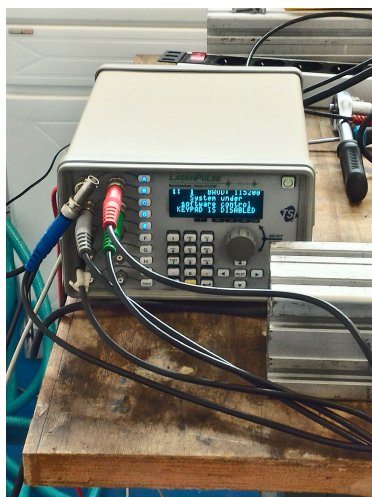


Figura 32: Dettaglio del dispositivo di sincronizzazione e dei cavi per la comunicazione dei segnali TTL di trigger per la sincronizzazione tra telecamera e impulsi laser.

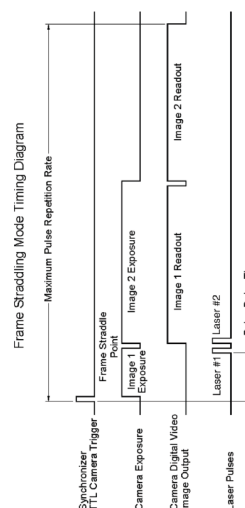


Figura 33: Esempio di schema per la sincronizzazione della telecamera e dei due impulsi laser (dal manuale TSI Synchronizer 610036).

4.3 Il setup per le acquisizioni shadowgrafiche

La geometria del setup è stata progettata sia per effettuare misure PIV, sia per acquisizioni shadowgrafiche. Le due diverse configurazioni, riportate nelle Figure 28, 29 e 35, 36 si differenziano sostanzialmente per il tipo di illuminazione utilizzato e per la configurazione delle telecamere. Nel primo caso si utilizza una lamina laser e la regione illuminata viene osservata da un unico punto di vista. Nel secondo si utilizzano quattro pannelli LED e quattro telecamere che osservano gli oggetti interposti, cioè le bolle.

Per ottimizzare la qualità delle immagini acquisite per la parte shadowgrafica, la vasca prismatica è stata avvolta in un cilindro ottagonale, con pareti piane le cui normali costituiscono l'asse ottico delle telecamere per le acquisizioni.

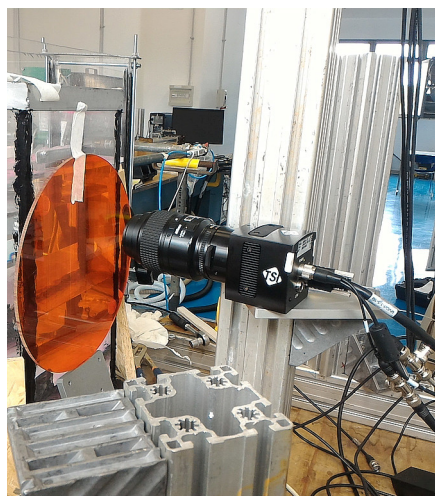


Figura 34: Dettaglio della camera TSI 8 Mpx utilizzata per le acquisizioni PIV. In una prima fase delle prove, è stato utilizzato un filtro passa basso costituito da un pannello circolare dal colore arancione. Nelle misure presentate in questo rapporto, il filtro è stato montato all'interno delle ottiche.

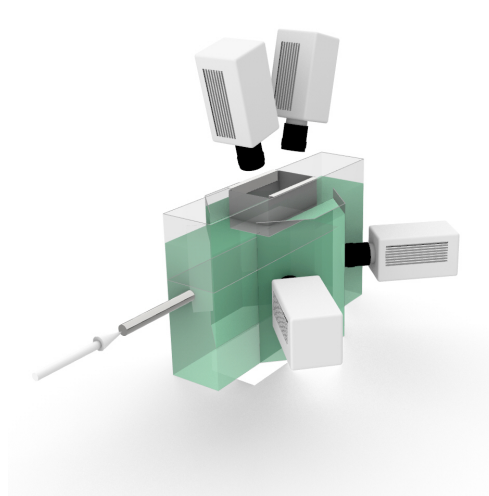


Figura 35: Organizzazione spaziale del sistema di acquisizione per la shadowgrafia 3D. Due telecamere sono su un piano orizzontale, altre due su un piano verticale ortogonale. Le prime osservano le bolle attraverso le pareti dell'ottagono, le altre attraverso la pinna prismatica.

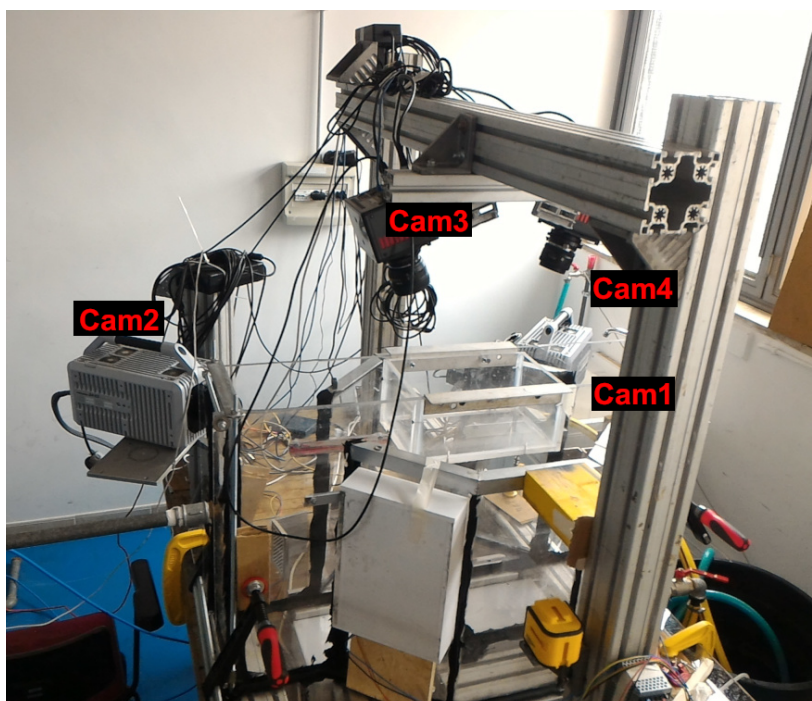


Figura 36: Il setup sperimentale per le acquisizioni shadowgrafiche. Sono visibili le quattro telecamere, due su un piano idealmente orizzontale (Cam₁ e Cam₂), altre due su un piano verticale (Cam₃ e Cam₄), il pannello led bianco in basso, il tubo di ingresso del getto e la pinna prismatica.

5 Misure di flusso mediante LIF-PIV 2D e e della fase gassosa mediante shadowgrafia 3D risolta nel tempo

Nell'ambito della campagna LIF-PIV, sono state acquisite 1000 coppie di immagini. Il lasso di tempo tra le immagini di ogni coppia è pari a $dt = 150 \mu\text{m}$. Le immagini acquisite con la LIF-PIV sono state analizzate dividendo il dominio di investigazione in due parti, una vicino alla parete e una lontano.

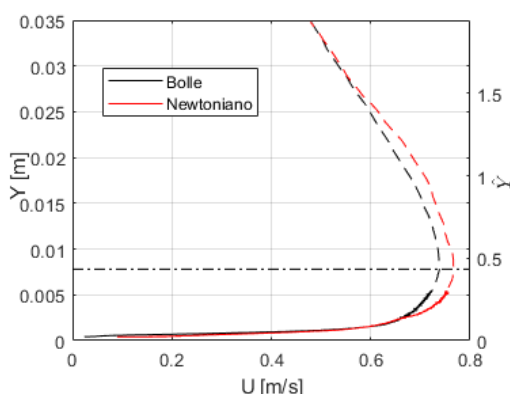


Figura 37: Velocità media dimensionale streamwise vs la distanza dall'ugello per il getto in presenza di bolle (linee rosse) e con fluido newtoniano (linee nere). L'asse di destra riporta la distanza adimensionale $\hat{Y} = Y/D$. Le linee continue si riferiscono al dominio prossimo alla parete ($dY = 1 \times 10^{-5} \text{ mm}$), le linee tratteggiate a quello esterno ($dz = 1 \text{ mm}$).

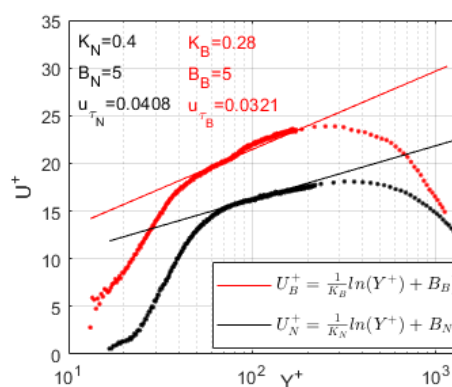


Figura 38: Velocità media streamwise vs la distanza dall'ugello per il getto in presenza di bolle (linee rosse) e con fluido newtoniano (linee nere) espressa in variabili interne. I punti a maggior densità si riferiscono al dominio prossimo alla parete ($dY = 1 \times 10^{-5} \text{ mm}$), quelli più distanziati a quello esterno ($dz = 1 \text{ mm}$).

La regione vicino alla parete è stata analizzata avendo cura di estrarre i risultati con una maggiore risoluzione. In dettaglio, nella regione interna, che si estende fino a circa 8 mm dalla parete, è stata utilizzata una finestra di interrogazione di 15 px e le features sono state selezionate a una distanza minima di 3 px, che corrisponde a una potenziale sovrapposizione dell'80%. Nella regione esterna, invece, la finestra di interrogazione è stata fissata di dimensioni pari a 19 px, e la distanza minima tra le features pari a 6 px, con una sovrapposizione potenziale del 30%. Si parla di sovrapposizione potenziale in quanto le features non sono ordinate su un grigliato regolare, quindi la sovrapposizione dichiarata è la massima possibile, se gli oggetti indagati si trovassero a una distanza tra loro pari esattamente alla distanza minima.

I campi di velocità così ottenuti contengono dei vettori sparsi, che in questo report vengono presentati nella forma di profili verticali di velocità orizzontale. La Figura 37 mostra l'andamento del profilo di velocità orizzontale medio al variare della distanza dalla parete, sia per il flusso bifase che per quello newtoniano. Il profilo è stato ottenuto campionando, nella regione vicina alla parete, tutti i dati disponibili in slot verticali

di dimensione pari a 1×10^{-5} m, mentre nella parte esterna del dominio la risoluzione è stata drasticamente ridotta a 1 mm, vista la sostanziale riduzione dei gradienti spaziali di velocità. Il raccordo tra i due profili è eccellente, dando modo di osservare l'evoluzione della velocità streamwise fino a una distanza di 35 mm dalla parete stessa. Questa distanza consente di catturare il punto dove si manifesta la massima velocità, ma non cattura la posizione dove la velocità raggiunge la metà del suo massimo, la cosiddetta $Y_{1/2}$, che possiamo qui stimare tra i 45 mm e i 60 mm. L'assenza di questo dato pone dei limiti al tipo di adimensionalizzazione che può essere effettuata sui dati PIV, che verrà qui tralasciata. Il getto in esame deve essere considerato come un test case per gli studi sulla riduzione di resistenza e per i test sull'algoritmo di riconoscimento delle bolle, piuttosto che come uno studio parametrico di getto di parete. Nella configurazione adottata, l'ugello del getto è posto a distanza $2 \times D$ dalla parete. La traiettoria del getto in uscita viene deflessa a causa dell'effetto Coanda che si instaura in presenza di una parete laterale e non esistono dati di letteratura riferiti a getti di parete analoghi su cui effettuare i confronti.

Il punto di massimo della velocità streamwise, evidenziato con la linea tratto-punto in Figura 37, suddivide il getto di parete in due domini adiacenti: un inner layer e un outer layer. Come introdotto in [13], il profilo di velocità del getto di parete non presenta caratteristiche di self-similarity: nel getto di parete coesistono due layer, uno esterno e uno a parete, separati da un mixing layer intermedio dove la velocità streamwise raggiunge il suo massimo. I layer a parete ed esterno sono molto differenti tra di loro ed esibiscono entrambi una self-similarity incompleta, relativa alla dimensione dello slot di ingresso.

Il confronto dimensionale tra le due configurazioni mostra come la presenza delle bolle influenzi in modo evidente il tratto di raccordo tra l'inner layer e l'outer layer del getto stesso, mentre rimangono quasi inalterate le velocità molto vicino e molto lontano dalla parete. È interessante notare come la presenza delle bolle vada a modificare soprattutto la regione di raccordo tra i due layer esterno e a parete, aumentando il valore della velocità del getto.

La Figura 38 riporta un tentativo di rappresentazione del profilo di velocità scalato con grandezze interne, ottenute attraverso un fit dei risultati con il profilo del log layer $U^+ = 1/K \log(Y^+) + B$ nella regione di raccordo. Per il flusso newtoniano sono stati utilizzati i coefficienti classici $K_N = 0.4$ e $B = 5$, mentre per il flusso non newtoniano il fit è stato ottenuto modificando il coefficiente $K_B = 0.28$, seguendo la procedura descritta in [1]. Con i parametri descritti, i valori della friction velocity nei due casi sono $U_{\tau_N} = 0.0408$ m/s e $U_{\tau_B} = 0.0321$ m/s per il flusso newtoniano e per quello con le bolle. Questi risultati, lungi dall'essere definitivi, suggeriscono una riduzione della U_τ rilevata in presenza di bolle, e quindi una riduzione della skin friction, equivalente a una riduzione di resistenza.

6 Misure della fase gassosa mediante shadowgrafia 3D risolta nel tempo

Le misure della fase gassosa effettuate con la shadowgrafia risolta nel tempo sono state effettuate acquisendo sequenze di circa 6000 immagini a una frequenza di campionamento di 1000 fps.

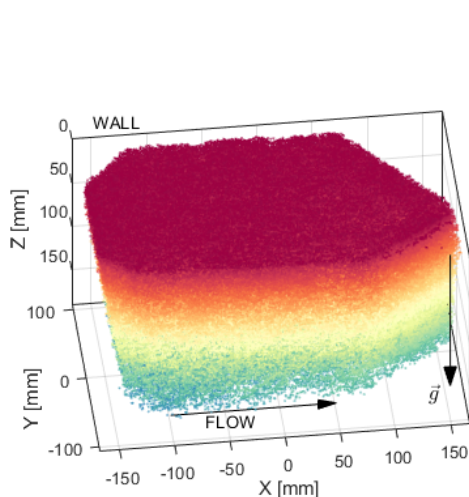


Figura 39: Visione volumetrica dei baricentri delle bolle individuate nei 1000 istanti acquisiti dalle 4 telecamere. a scala dei colori è rappresentativa della coordinata Z . La parete è in alto e il galleggiamento delle bolle è opposto a \vec{g} .

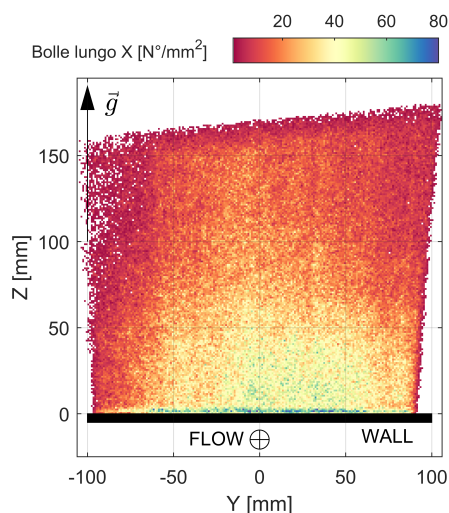


Figura 40: Densità di bolle ricostruite lungo l'asse X , campionate ogni mm^2 . Il numero di bolle aumenta al centro, in prossimità della parete e in corrispondenza del getto (in basso). Il flusso è ortogonale alla pagina.

Le immagini delle quattro telecamere sono state binarizzate e, per ognuna di esse, è stata effettuata la ricerca delle bolle e dei loro contorni [2] e dei baricentri, con cui si è proseguito nella ricerca delle corrispondenze tra le quattro serie. Le bolle che sono state identificate in tutte e quattro le immagini vengono poi utilizzate per la ricostruzione dell'oggetto 3D ottenuto dalla intersezione delle proiezioni coniche dei loro contorni. Al termine della procedura il dataset prodotto contiene l'insieme di oggetti 3D che, istante per istante, rappresentano le bolle presenti nel volume investigato. Questo report riporta, a titolo di esempio, i risultati ottenuti in condizioni sperimentali identiche a quelle utilizzate per i test PIV, ovvero un getto di portata pari a $Q = 231/\text{m}$, in cui è stata insufflata aria a una portata pari a $Q_v = 0.31/\text{m}$. Data la natura preliminare di questo studio, i risultati presentati riguarderanno principalmente la caratterizzazione spaziale del dato e l'evoluzione di alcune quantità medie di interesse, rimandando analisi di maggior dettaglio, risolte nel tempo, a futuri ed eventuali sviluppi. Una prima visione d'insieme del risultato ottenuto per la identificazione delle bolle è riportata in Figura 39, dove la totalità dei baricentri delle bolle ottenute è

riportata simultaneamente. La colorazione degli oggetti riporta la loro distanza dalla parete, ed è utile soprattutto a cogliere la forma e le dimensioni del volume investigato, approssimativamente pari a $V_{ol} = 335 \times 200 \times 195 \text{ mm}^3$ nelle tre direzioni X , Y e Z . Le ragguardevoli dimensioni del volume investigato suggeriscono di effettuare una prima verifica in merito alla omogeneità delle posizioni occupate dalle bolle, mediante gli istogrammi spaziali di Figure 40, 42 e 41. Questo allo scopo di individuare eventuali deformazioni o addensamenti spuri, non in relazione con la scena osservata e sintomatici di possibili errori nell'implementazione dell'algoritmo.

L'istogramma lungo la sezione trasversale al getto di Figura 40 è stato ottenuto dividendo la sezione stessa in maglie di dimensione $1 \times 1 \text{ mm}^2$ e contando il numero di baricentri delle bolle che cade all'interno di ogni maglia. La parete si trova in basso e il flusso è normale alla pagina. Le bolle galleggiano in verso opposto al vettore \vec{g} . Il risultato mostrato per questa sezione indica una concentrazione più elevata in prossimità della parete, nella zona centrale della vasca. Questo è perfettamente in linea con la fisica del fenomeno attesa, e quella identificata a maggior concentrazione è quella dove il contributo del getto e del galleggiamento si sommano. La leggera dissimmetria lungo la direzione Y può essere attribuita alla capacità del sistema di riconoscere meglio bolle più vicine ($Y > 0$) rispetto a bolle più lontane dalle camere con vista orizzontale (Cam₁ e Cam₂). La stessa leggera asimmetria, stavolta tra la parte superiore e la

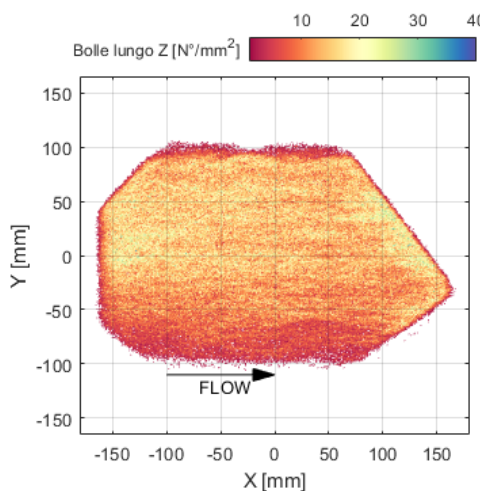


Figura 41: Densità di bolle ricostruite lungo l'asse Z , campionate ogni mm^2 . Il numero di bolle aumenta per $Y > -50 \text{ mm}$, in corrispondenza del getto e del punto di vista delle camere orizzontali.

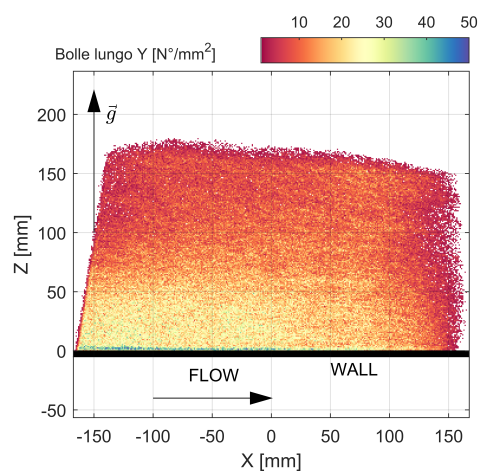


Figura 42: Densità di bolle ricostruite lungo l'asse Y , campionate ogni mm^2 . Il numero di bolle aumenta in prossimità della parete e decade con l'avanzare del getto.

parte inferiore della sezione orizzontale ma sempre lungo la direzione Y , è visibile in Figura 41. In questa figura il flusso si muove da sinistra a destra e le telecamere, che in questa visualizzazione sono disposte in alto, hanno maggior facilità nel ricostruire le bolle a loro vicine, cioè nella regione con $Y > -50 \text{ mm}$.

Nella sezione verticale di Figura 42, il flusso si muove da sinistra a destra e l'istogramma mostra un decadimento del numero di bolle identificate con l'aumentare della distanza dall'ugello. La presenza del getto e l'azione del galleggiamento (opposta al verso della gravità \vec{g}) contribuiscono ad aumentare la concentrazione delle bolle verso la parete.

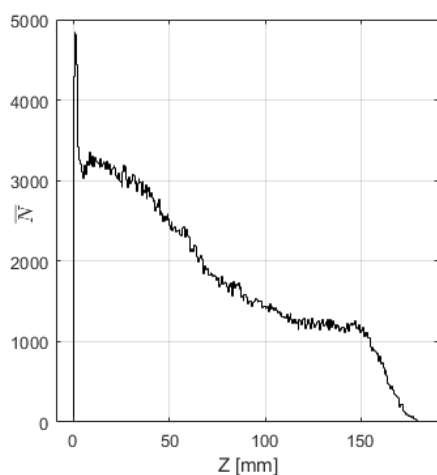


Figura 43: Variazione del numero delle bolle con la distanza dalla parete Z . Media nel tempo su tutti gli istanti acquisiti.

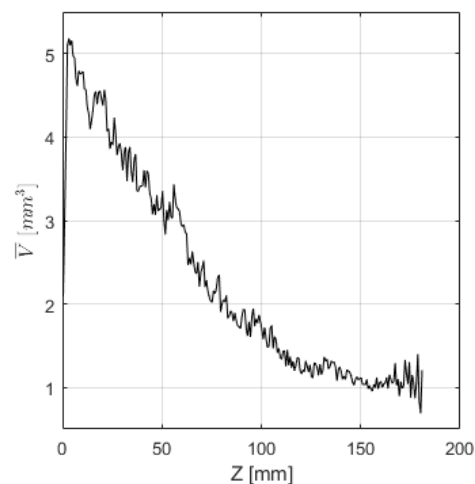


Figura 44: Variazione del volume delle bolle con la distanza dalla parete Z . Media nel tempo su tutti gli istanti acquisiti.

Una analisi più dettagliata del variare della concentrazione delle bolle con la distanza dalla parete è riportata in Figura 43, dove si può osservare la media \bar{N} del numero di bolle ricostruito in intervalli di 1 mm lungo l'asse Z . È interessante notare la presenza del picco adiacente alla parete del getto, che decade molto rapidamente entro 2 mm, per poi ridursi molto più lentamente. Anche il volume delle bolle presenta un massimo vicino alla parete, come mostrato in Figura 44. La maggior propensione al galleggiamento di bolle di grandi dimensioni giustifica questo risultato. L'ultimo dato relativo alla distribuzione della concentrazione della fase gassosa è mostrato in Figura 45, calcolata considerando la somma dei volumi delle bolle che cadono in intervalli di 1 mm lungo l'asse Z in rapporto percentuale rispetto al volume effettivamente considerato dalle quattro telecamere contemporaneamente.

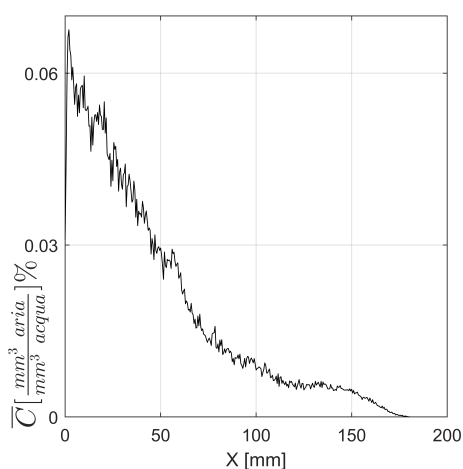


Figura 45: Media temporale della concentrazione della frazione gassosa nella fase liquida. Andamento con la distanza dalla parete.

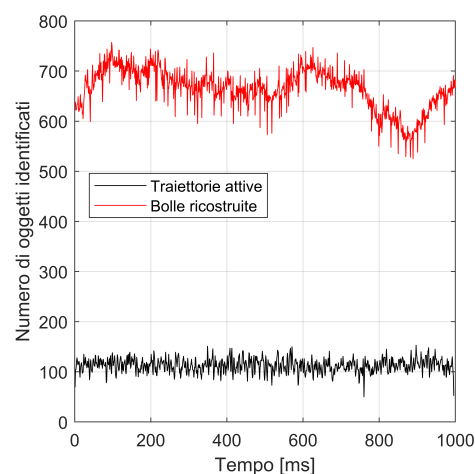


Figura 46: Numero di bolle ricostruite nel tempo (rosso) e numero di traiettorie attive in ogni istante (nero).

Si passa ora a considerare i risultati del tracciamento delle traiettorie delle bolle, con il conseguente calcolo delle velocità. Il dato temporale relativo al numero di bolle ricostruite è riportato in Figura 46 (linea rossa), mettendo in relazione il numero di bolle identificate con l'istante di acquisizione dei quattro frames. L'andamento del profilo indica una significativa coerenza nella sua evoluzione, con delle variazioni nel numero che mostrano scale temporali dell'ordine di qualche secondo, a cui si sovrappone un rumore randomico di piccola scala, con picchi abbastanza radi.

Il tracciamento delle traiettorie delle bolle avviene istante per istante, considerando la procedura precedentemente esposta in Sezione 2.5. Nella condizione ideale, in cui tutte le bolle vengono correttamente identificate in ogni istante, il numero delle bolle coinciderebbe con il numero delle traiettorie. Nel caso in esame, invece, il numero di traiettorie tracciate in ogni istante è molto inferiore, pari a circa 1/6, come indicato dal profilo nero in Figura 46. Il confronto tra i due andamenti enfatizza le difficoltà riscontrate nel massimizzare il tracciamento, dovute a una molteplicità di fattori tra cui si possono elencare:

- Deformazione delle bolle da una frame all'altro;
- Frammentazione;
- mancata ricostruzione della bolla a un certo istante.

Questi fattori complicano significativamente l'analisi, e hanno come conseguenza sia la riduzione del numero di traiettorie tracciate, sia un forte ridimensionamento della loro lunghezza. Il grafico in Figura 47 riporta l'istogramma con la lunghezza di tutte le traiettorie ricostruite nei 1000 istanti temporali, e mostra l'estrema rarità di accadimento

di traiettorie con lunghezza superiore a 10 istanti temporali. Questo dato formalizza la necessità di una futura, eventuale revisione dell'approccio al tracciamento, attività che esula dal presente studio, ponendo in essere strategie in grado di riportare l'informazione tracciabile dalle immagini 2D nello spazio tridimensionale.

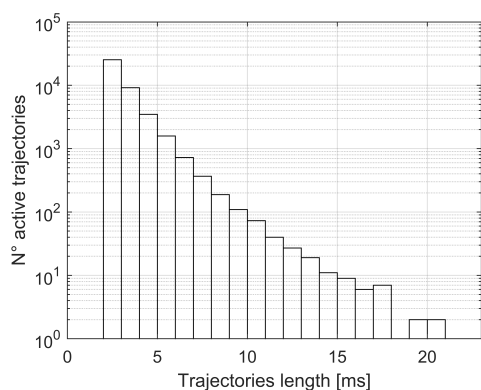


Figura 47: Istogramma delle lunghezze delle traiettorie ricostruite.

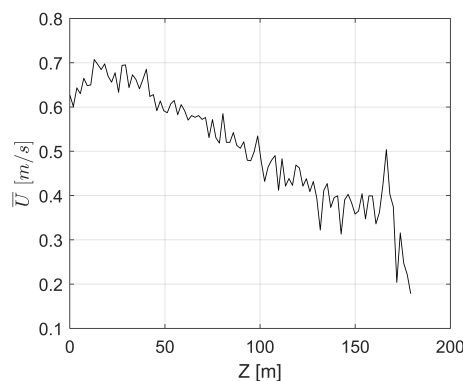


Figura 48: Velocità delle bolle lungo la direzione del getto X .

Con i dati disponibili allo stato attuale è comunque possibile stimare un profilo medio per le tre componenti di velocità, dove la media è calcolata su tutti i 1000 istanti temporali per un profilo lungo Z a intervalli di 1 mm. Gli andamenti al variare della distanza dalla parete di \bar{U} , \bar{V} e \bar{W} sono riportati nelle Figure 48, 49 e 50. Il dato relativo alla velocità streamwise, lungo la componente X , è in accordo con quello ottenuto con le misure PIV per la fase liquida e riportato in Figura 37. La componente trasversale mostra una leggera deriva in prossimità dell'ugello, dovuta a correnti di ricircolo del getto o a un allineamento non ottimale del getto, mentre la componente verticale mostra una tendenza alla risalita (negativa), che aumenta all'aumentare della distanza della bolla dalla parete. Vengono infine presentate, a puro titolo di esempio, quattro traiettorie per quattro differenti bolle ricostruite in diversi istanti temporali. Il tracciamento delle traiettorie a) e c) mostrano il potenziale della tecnica, anche nel tracciare oggetti non convessi. Gli esempi delle traiettorie c) e d) evidenziano, invece, una forma allungata che potrebbe essere dovuta a una non ottima identificazione del contorno della bolla in una delle quattro immagini, con conseguente riduzione anomala della sezione in quella proiezione.

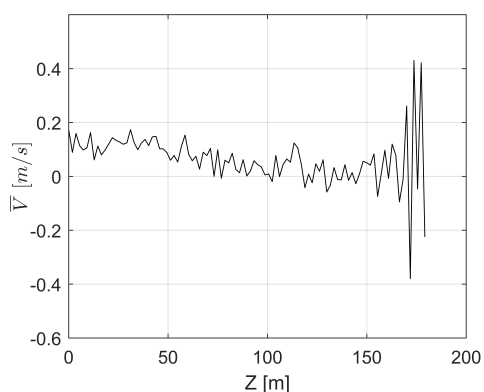


Figura 49: Velocità delle bolle in direzione trasversale al getto Y .

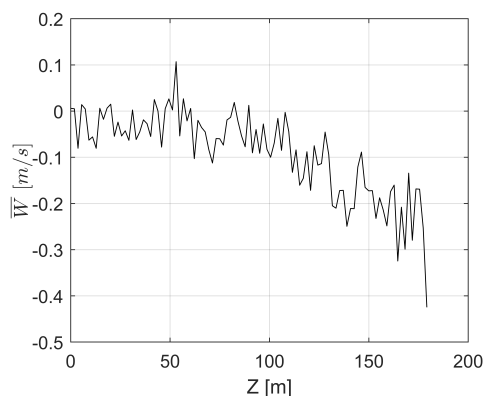


Figura 50: Velocità delle bolle in direzione normale alla parete Z .

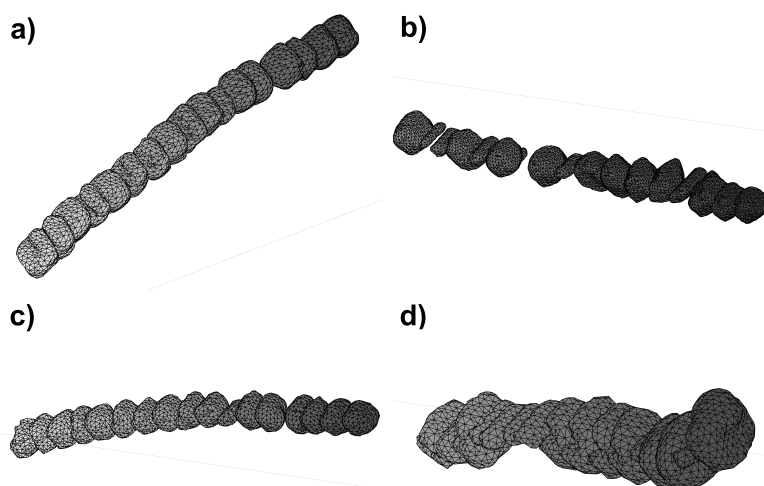


Figura 51: Quattro esempi di traiettorie tracciate. Le traiettorie $a)$ e $c)$ riportano la posizione di un oggetto con delle concavità. Le traiettorie $b)$ e $d)$ sembrano invece affette da una non ottima stima di un contorno in una delle quattro viste, con conseguente allungamento della forma in quella proiezione.

Riferimenti bibliografici

- [1] Jacob B., Olivieri A., Miozzi M., Campana E. F. e Piva R. Drag reduction by microbubbles in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*, 22(11):115104, 2010.
- [2] Di Nunno F., Alves Pereira F., Granata F., De Marinis G., Di Felice F., Gargano, R. e Miozzi M. A shadowgraphy approach for the 3D lagrangian description of bubbly flows. *Measurement Science and Technology*, 31(10), 2020.
- [3] Bouguet J.-Y. A release of a camera calibration toolbox for Matlab. In *Computational Vision at the California Institute of Technology*, 2009.
- [4] Bradski G. The OpenCV Library. *Dr. Dobb's Journal of Software Tools*, 2000.
- [5] Hartley Richard e Zisserman Andrew. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, second edition, 2004.
- [6] Catmull E. e Rom R. A class of local interpolating splines. In Barnhill R. E. e Riesenfeld R. F., editors, *Computer Aided Geometric Design*, pages 317–326. Academic Press, 1974.
- [7] Horn B. K. P. e Schunck B. G. Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17(1-3):185–203, 1981.
- [8] Lucas B. D. e Kanade T. Iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81)*, volume 2, pages 674–679, San Francisco, CA, USA, 1981. Kaufmann.
- [9] Shi J. e Tomasi C. Good features to track. In *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 593–600, 1994.
- [10] Duda R. O., Hart P. E. e Stork D. G. *Pattern Classification*. Wiley, New York, second edition, 2001.
- [11] Miozzi M., Jacob B. e Olivieri A. Performances of feature tracking in turbulent boundary layer investigation. *Experiments in Fluids*, 45(4):765–780, 2008.
- [12] Stanislas M., Okamoto K., Kähler C. J., Westerweel J. e Scarano F. Main results of the third international piv challenge. *Experiments in Fluids*, 45(1):27–71, 2008.
- [13] Barenblatt G. I., Chorin A. J. e Prostokishin V. M. The turbulent wall jet: A triple-layered structure and incomplete similarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(25):8850–8853, 2005.