

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di laurea specialistica in MECCANICA DEI MATERIALI

MISURA DELLA DEFORMAZIONE TRAMITE

CORRELAZIONE DIGITALE DI IMMAGINI 3D

Relatore:

Chiar.mo Prof. Ing. Lorenzo PERONI

Laureando:

Stefano MASELLA

Anno accademico 2019-2020

INDICE

INDICE	II
Abstract	1 -
Capitolo 1 Correlazione digitale di immagini	3 -
1.1 Introduzione	3 -
1.2 Condizioni di prova e di setup comuni nei laboratori	5 -
Capitolo 2 Progettazione delle misurazioni DIC	6 -
2.1 Requisiti di misurazione	6 -
2.1.1 Quantity-of-Interest	6 -
2.1.2 Region-of-Interest	6 -
2.1.3 Field-of-View	6 -
2.1.4 Interazione tra ROI e FOV	6 -
2.1.5 Zona di posizionamento dell'hardware	7 -
2.1.6 2D-DIC vs 3D-DIC	7 -
2.1.7 Stereo-Angle	8 -
2.1.8 Depth-of-Field	8 -
2.1.9 Gradienti spaziali	9 -
2.1.10 Noise-Floor	9 -
2.1.11 Frame-Rate	10 -
2.1.12 Exposure Time	11 -
2.1.13 Sincronizzazione e attivazione	11 -
2.2 Attrezzature e hardware	11 -
2.2.1 Selezione della fotocamera e della lente	11 -

2.2.2 Montaggio della fotocamera e della lente	13 -
2.2.3 Diaframma	17 -
2.2.4 Illuminazione ed esposizione	17 -
2.2.5 Riscaldamento dell'hardware	20 -
2.3 Il Pattern DIC	21 -
2.3.1 Tipi di pattern DIC	21 -
2.3.2 Caratteristiche generali dei pattern DIC	22 -
2.3.3 Caratteristiche dei pattern applicati	25 -
2.3.4 Tecniche di patterning	27 -
Capitolo 3 Preparazione per le misure	29 -
3.1 Routine di pre-calibrazione	29 -
3.1.1 Revisione della procedura di prova	29 -
3.1.2 Pulizia delle attrezzature	30 -
3.1.3 Riscaldamento della fotocamera	30 -
3.1.4 Sincronizzazione	31 -
3.1.5 Applicazione del pattern DIC	31 -
3.1.6 Revisione della pre-calibrazione del sistema	32 -
3.2 Calibrazione	34 -
3.2.1 Scopo della calibrazione	34 -
3.2.2 Step generali della calibrazione	35 -
3.3 Routine post-calibrazione	42 -
3.3.1 Immagini per verifica della calibrazione e analisi del rumore di fondo	42 -
3.3.2 Verifica della calibrazione	44 -
3.3.3 Revisione della post-calibrazione del sistema	47 -
Capitolo 4 Esecuzione della prova con misurazioni DIC	49 -

Capitolo 5 Elaborazione delle immagini DIC	
5.1 Software DIC	50 -
5.2 Parametri definiti dall'utente	50 -
5.2.1 Immagine di riferimento	50 -
5.2.2 Pre-filtraggio delle immagini	51 -
5.2.3 Funzione di forma del subset	- 52 -
5.2.4 Interpolante	52 -
5.2.5 Dimensione del subset	53 -
5.2.6 Dimensione dello step	53 -
5.2.7 Soglie	54 -
5.3 Calcoli della deformazione	54 -
5.3.1 Virtual Strain Gauge (VSG)	54 -
5.3.2 Esempi di metodi di calcolo della deformazione	55 -
5.4 Quantificazione dell'incertezza	57 -
5.4.1 Panoramica	57 -
5.4.2 Errori di varianza	58 -
5.4.3 Errori di bias	60 -
5.4.4 Compromesso tra rumore e bias	61 -
5.4.5 Studio del Virtual Strain Gauge	62 -
Capitolo 6 Requisiti del reporting	65 -
6.1 Parametri dell'hardware DIC	65 -
6.1.1 Richiesti	65 -
6.1.2 Raccomandati	66 -
6.2 Parametri dell'analisi DIC	66 -
6.2.1 Richiesti	66 -

6.2.2 Raccomandati	67 -
Capitolo 7 Digital Image Correlation (3D-DIC)	69 -
7.1 MultiDIC: Un toolbox open-source per la correlazione digitale di immagini	3D multi-
view	69 -
7.1.1 Ricapitolazione concetti fondamentali per la DIC	70 -
7.2 Caratteristiche fondamentali della 3D-DIC multi-view	72 -
7.2.1 Background teorico	72 -
7.2.2 Panoramica del MultiDIC	75 -
7.2.3 Materiali e metodi	76 -
7.2.4 Risultati della prova su arto inferiore di un soggetto umano	89 -
7.3 DICe	96 -
Capitolo 8 Esempio applicativo MultiDIC	98 -
8.1 Preparazione	98 -
8.1.1 STEP 0: calcolare i parametri di distorsione	99 -
8.1.2 STEP 1: calcolare i parametri DLT (calibrazione stereo)	104 -
8.1.3 STEP 1p: calcolare gli errori di ricostruzione	107 -
8.1.4 STEP 2: 2D-DIC con Ncorr	108 -
8.1.5 STEP 3: ricostruzione 3D	115 -
8.1.6 STEP 4: post-processing	117 -
8.2 Linee guida consigliate per condurre al meglio un esperimento in vero un'analisi in MultiDIC	attraverso 118 -
8.2.1 Raccolta delle immagini consigliata per MultiDIC	120 -
Capitolo 9 Esempi applicativi DICe	121 -
9.1 Preparazione	121 -
9.1.1 Primo esempio applicativo DICe	122 -
9.1.2 Secondo esempio applicativo DICe	131 -

Capitolo 10 Esperimento di prova di trazione su un provino piatto 143 -
10.1 Introduzione all'esperimento 143 -
10.2 Calibrazione 144 -
10.3 Analisi 3D-DIC 146 -
10.4 Post-processing in Paraview 148 -
10.4.1 Analisi di spostamenti durante la prova di trazione 150 -
10.4.2 Analisi di deformazioni durante la prova di trazione 156 -
10.5 Linee guida consigliate per condurre al meglio un esperimento in vero attraverso un'analisi in DICe e sue potenzialità per l'analisi di una prova meccanica 164 -
10.5.1 Raccolta delle immagini consigliata per DICe 166 -
Conclusioni 167 -
Appendice A Flow-Chart per le Misurazioni e le Analisi DIC 172 -
Bibliografia e sitografiaVII

Abstract

La correlazione digitale di immagini DIC è una tecnica optically-based per misurare l'evoluzione delle coordinate 2D o 3D sulla superficie di un oggetto durante una prova meccanica. Le quantità di interesse QOIs principali che possono essere valutate sulla base di tale coordinate sono spostamenti, deformazioni e velocità di deformazione. In particolare, l'attenzione è stata focalizzata sulla correlazione di immagini 3D, la cosiddetta 3D-DIC o stereo-DIC, che è una tecnica ottico numerica che consente di valutare il comportamento meccanico dinamico delle superfici di strutture e materiali, tra i quali abbiamo anche i tessuti biologici. Per condurre una corretta analisi DIC è necessario seguire alcuni step fondamentali: progettazione delle misurazioni DIC in termini di attrezzatura e hardware, scelta del pattern DIC, routine di pre-calibrazione, calibrazione, routine post-calibrazione, esecuzione della prova con misurazioni DIC ed elaborazione delle immagini DIC.

Per condurre le analisi 3D-DIC si è scelto dapprima di caratterizzare ed utilizzare due software open source: MultiDIC e DICe. Il toolbox MATLAB MultiDIC nasce dalla necessità di fornire un'alternativa ai classici software commerciali e accademici 3D-DIC, che sia in grado di offrire soluzioni semplici di calibrazione e fusione dei dati per l'analisi multi-view, particolarmente desiderabile nelle applicazioni biomediche. Il vantaggio principale di MultiDIC è di consentire un processo di calibrazione semplice, anche quando si utilizza un elevato numero di fotocamere, senza perdere la capacità di ridurre gli errori attraverso la correzione delle distorsioni delle lenti. La performance di MultiDIC è stata testata con un sistema low-cost sperimentale caratterizzato da una configurazione di 12 fotocamere a 360°. Il software è stato dapprima valutato sulla base dei risultati ottenuti attraverso una prova in-vivo condotta su un soggetto umano in cui si è effettuata la misurazione dell'arto inferiore a seguito della plantarflessione della caviglia [1] e successivamente attraverso la misurazione di un oggetto cilindrico di nota geometria soggetto a moto di corpo rigido [2]. DICe è stato utilizzato come codice di analisi autonomo le cui capacità principali sono la computazione full-field degli spostamenti e delle deformazioni a partire da sequenze di immagini digitali ottenute da due fotocamere e il tracciamento del movimento di corpo rigido di determinati oggetti. Le immagini analizzate sono tipicamente di un campione di materiale sottoposto a un esperimento di caratterizzazione, come ad esempio,

una prova di trazione. La performance di DICe è stata testata a partire dalle immagini di un provino sottoposto a trazione e di una traslazione rigida di un piatto con caratteristiche 3D di dimensioni note. La fase di visualizzazione e di elaborazione dei risultati è stata condotta attraverso l'applicazione open-source Paraview [3].

La possibilità di scegliere un provino di calibrazione che non fosse necessariamente cilindrico e la necessità di un compromesso tra economicità delle attrezzature e hardware dell'ambiente di prova sono state, in via preliminare, le motivazioni principali che hanno portato alla scelta di utilizzare DICe come software per l'analisi di una prova di trazione in controllo di spostamento, non distruttiva, su un provino piatto condotta in laboratorio presso il Politecnico di Torino. I risultati ottenuti in termini di deformazioni e velocità di deformazione hanno mostrato come l'utilizzo di due fotocamere sia più che sufficiente per rilevare il comportamento dei materiali durante una prova meccanica, a ulteriore sostengo della scelta di aver preferito DICe al MultiDIC. È stato dimostrato come condurre un'analisi 3D-DIC piuttosto che una 2D-DIC su un provino piatto sia preferibile in quanto oltre ad eliminare il problema di allineamento della fotocamera col provino si ha la possibilità di mediare la misura delle due fotocamere, andando a compensare eventuali errori. Inoltre, una serie di considerazioni sulla qualità dei risultati ottenuti, nonché sulla risoluzione delle immagini di calibrazione e di prova, ha permesso di stabilire delle linee guida da seguire per condurre al meglio un'analisi 3D-DIC su un provino soggetto ad una prova meccanica.

Capitolo 1 Correlazione digitale di immagini

1.1 Introduzione

DIC è una tecnica basata sull'ottica (optically-based) utilizzata per misurare l'evoluzione delle coordinate 2D o 3D a tutto campo (full-field) sulla superficie di un oggetto durante una prova meccanica. Tali coordinate possono essere utilizzate per valutare quantità di interesse (quantitities of interest QOIs) derivate come spostamenti, tensioni, strain rate, velocità e curvature. Poiché DIC è una tecnica non-contact che è indipendente dal materiale che viene testato o dalla scala di lunghezza di interesse, può essere usato in un'ampia varietà di applicazioni per investigare e caratterizzare la deformazione dei solidi. I materiali che generalmente sono testati includono metalli, polimeri, calcestruzzo, campioni geologici, tessuti biologici, elettrodi di una batteria, esplosivi, ecc. mentre per la gamma dei provini si va da piccoli campioni utilizzati nelle prove di trazione sino ad arrivare a interi sottogruppi di un velivolo. Questa versatilità ha portato allo sviluppo di metodologie e codici software, sia commerciali che sviluppati indipendentemente, per utilizzare i dati catturati da una misurazione DIC.

DIC stima le coordinate full-field e gli spostamenti da una sequenza di immagini digitali prese da un pattern sulla superficie del provino, risolvendo un problema di ottimizzazione, tipicamente basato su un modello di trasporto come quello del flusso ottico (optical-flow). Un'assunzione fondamentale nelle misurazioni DIC è che il pattern sulla superficie del provino, sia esso naturale o applicato, segui la deformazione dello stesso. Così facendo, le immagini catturate attraverso il test possono essere tra loro correlate al fine di produrre le coordinate fullfield rappresentative della forma, movimento e deformazione della superficie del provino. Le coordinate 2D della superficie possono essere misurate usando una singola fotocamera e in questo caso, si fa riferimento al 2D-DIC. La misurazione invece di coordinate 3D della superficie richiede un minimo di due camere orientate secondo un angolo di stereo (stereoangle) per eseguire la fotogrammetria in aggiunta alla correlazione di immagini: questo è chiamato stereo-DIC o più comunemente 3D-DIC da non confondere col volumetric-DIC. Prima che le misurazioni siano effettuate è necessaria una calibrazione del sistema fotocamera/lenti. Tale calibrazione consente al software DIC di correggere le distorsioni per le lenti e, nel caso di 3D-DIC, fornisce la posizione e l'orientazione delle camere nello spazio l'una rispetto all'altra e rispetto al provino.

Ci sono diversi tipi di software sviluppati per eseguire questa correlazione ma le categorie più comuni sono i metodi DIC locali e globali. In un metodo locale, la soluzione della coordinata in un punto dipende solo da un piccolo subset dell'immagine nella vicinanza di quel punto ma è altrimenti indipendente dalla soluzione in tutti gli altri punti di interesse. In un metodo globale, la soluzione in un punto ha la stessa dipendenza dalla soluzione negli altri punti nella vicinanza del punto di interesse.

In breve, un codice software analizza una regione di interesse (region of interest ROI) definita dall'utente attraverso delle immagini, la quale contiene un set di punti di interrogazione o di misura. Nella DIC locale, il punto di interrogazione è centrato con il subset dell'immagine. I punti di interrogazione sono tipicamente definiti rispettando un certo step-size in modo tale che i subset vicini a quello preso in considerazione possano, o non possano, sovrapporsi. I subset sono poi correlati numericamente partendo dall'immagine di riferimento (prima del movimento/deformazione) sino all'immagine successiva (durante i1 movimento/deformazione). Questa correlazione è eseguita dapprima approssimando il pattern in ogni subset usando una funzione di interpolazione e successivamente consentendo alla funzione di deformare dall'immagine di riferimento basata su di un subset della funzione di forma. È poi utilizzato un criterio di corrispondenza basato su pesi dei subset per eseguire un'operazione di matching tra ogni subset nell'immagine di riferimento e il corrispondente nell'immagine deformata. Nella 3D-DIC abbiamo che tale criterio di corrispondenza, abbinato ai parametri provenienti dalla calibrazione dello stereo-system, consente di abbinare i subset di una fotocamera con quelli dell'altra fotocamera. Il risultato della correlazione sono le coordinate misurate del centro di ogni subset.

Il calcolo delle QOIs è l'ultimo step in molti degli schemi di processo DIC. Le più comuni di queste quantità derivate sono probabilmente le deformazioni, sebbene DIC consenta di accedere

ad altre QOIs come la curvatura, la velocità e l'accelerazione. Il setup della misurazione (cioè selezione della fotocamera, contrasto dell'immagine, dimensione caratteristica del pattern della DIC) e parametri di processo (cioè dimensione del subset, funzione di forma del subset, misuratore della deformazione virtuale) sono aspetti che influenzano la risoluzione minima delle QOIs, anche chiamata noise-floor. Inoltre, per determinare tale risoluzione è necessario condurre un'analisi di quantificazione delle incertezze relative alle misure effettuate. Questo lascia l'utente con una descrizione full-field degli spostamenti e/o delle quantità derivate di un provino soggetto a una prova meccanica nonché le incertezze di tali misurazioni.

1.2 Condizioni di prova e di setup comuni nei laboratori

Osserviamo quelle che sono le condizioni di prova e di setup che vengono solitamente utilizzate nei laboratori per effettuare misurazioni DIC:

- La dimensione dei provini varia approssimativamente da 50 mm a 1 m;
- Provini planari sottoposti a movimento e/o deformazione nominalmente planari;
- Intervallo di deformazione fino a circa il 60% di deformazione equivalente;
- Ambiente di prova controllato (ad esempio, stanza con temperature comprese tra i 15 e i 25°C e vibrazioni minime);
- Condizioni ambiente non speciali (ad esempio, nessuna cisterna d'acqua o recipienti pressurizzati, nessuna finestra, niente esplosioni o onde d'urto);
- Immagini optical-based (niente immagini provenienti, per esempio, da microscopi a scansione elettronica o da raggi X);
- 2D-DIC e 3D-DIC;
- Sistema DIC singolo: una fotocamera per 2D-DIC e due camere per 3D-DIC;
- Camere e lenti ottiche standard (niente immagini, per esempio, da microscopi o da camere ad alta velocità);
- Algoritmi DIC locali e basati sul subset (in opposizione agli algoritmi globali);
- La velocità della prova meccanica, cioè quasi statica contro dinamica, non è specificata dato che non abbiamo nessun tipo di limite.

Capitolo 2 Progettazione delle misurazioni DIC

2.1 Requisiti di misurazione

Prima di condurre misurazioni DIC, bisogna definire chiaramente le aspettative e i requisiti della prova meccanica e gli obiettivi delle misurazioni DIC. I limiti qui scelti saranno utilizzati in seguito per asserire se i risultati analizzati sono all'interno o oltre i limiti per i quali le misurazioni DIC sono state progettate.

2.1.1 Quantity-of-Interest

Selezionare la quantità di interesse QOI come ad esempio la forma, lo spostamento, la velocità, l'accelerazione, la deformazione, la velocità di deformazione, ecc.

2.1.2 Region-of-Interest

Selezionare la regione di interesse ROI del provino e determinare il movimento che ci si aspetta e/o la deformazione di questa regione. Il ROI può essere una specifica porzione dell'intero provino (ad esempio la lunghezza utile di un provino uniassiale).

2.1.3 Field-of-View

Determinare il campo di visione richiesto FOV basato sul ROI del provino e il movimento che ci si aspetta e/o la deformazione del provino.

2.1.4 Interazione tra ROI e FOV

Tipicamente, il ROI del provino dovrebbe quasi riempire il FOV al fine di ottimizzare la risoluzione spaziale, pur rimanendo nel FOV per tutta la durata del teste. Per la 3D-DIC, dove

il FOV non è lo stesso per ciascuna fotocamera, il FOV effettivo non è altro che il FOV comune ad entrambe le camere.

2.1.5 Zona di posizionamento dell'hardware

Stimare la posizione potenziale per le camere, che montano l'hardware, e le luci per determinare la cosiddetta stand-off distance (SOD) e la locazione. Determinare quale obiettivo di dimensioni e di tipo di calibrazione verrà usato (ad esempio illuminato frontalmente o retroilluminato) e come la configurazione della prova meccanica dovrà essere modificata al fine di calibrare il sistema ottico.

2.1.6 2D-DIC vs 3D-DIC

Determinare se sarà usato la 2D-DIC o la 3D-DIC.

Per la 2D-DIC, si assume che il provino sia piano, che rimanga piano durante la prova, che sia perpendicolare all'asse ottico della fotocamera e che si mantenga costante la SOD durante la prova. Qualsiasi movimento fuori dal piano, sia esso causato dallo spessore o dall'instabilità del pezzo, da rotazioni o traslazioni indotte dal disallineamento delle morse, ecc.) causerà degli errori nella 2D-DIC.

La 3D-DIC è fortemente raccomandata rispetto alla 2D-DIC per tutte le prove quando possibile, anche in quei test in cui un provino nominalmente piano subisce deformazione nominalmente piana. La 2D-DIC, dunque, è raccomandata soltanto se la geometria della configurazione del provino non consente di accomodare due camere (cioè quando due camere non possono essere fisicamente posizionate nella zona adibita all'hardware).

Nel caso in cui il 2D-DIC deve essere usato, bisogna stimare l'atteso movimento/deformazione fuori dal piano del provino durante la prova e l'errore delle misurazioni fuori dal piano corrispondenti.

2.1.7 Stereo-Angle

Selezionare l'angolo stereo richiesto. Esso dipende essenzialmente dalla geometria della configurazione della prova e dal QOI, che è ancora più importante. Angoli stereo più piccoli portano ad ottenere un'accuratezza maggiore degli spostamenti nel piano a fronte di un aumento dell'incertezza fuori dal piano. In maniera del tutto opposta, angoli stereo più grandi portano ad un'accuratezza maggiore degli spostamenti fuori dal piano a fronte di un aumento dell'incertezza nel piano.

Questa relazione tra angolo stereo e incertezza è influenzata anche dalla lunghezza focale delle lenti. Lunghezze focali più piccole, infatti, richiedono un angolo stereo più grande al fine di ottenere la stessa incertezza fuori dal piano che si avrebbe utilizzato lunghezze focali più grandi.

L'angolo stereo influenza la profondità di campo (Depth-of-Field DOF) utilizzabile. Con angoli stereo più piccoli, il provino rimarrà nel fuoco di entrambe le camere per un intervallo di movimenti fuori dal piano più grande. In maniera opposta, con angoli stereo più grandi, il movimento fuori dal piano consentito al fine di mantenere il provino nel fuoco delle camere è ridotto.

Tipicamente, l'angolo stereo dovrebbe essere approssimativamente di 15-35 gradi. Per ridurre il più possibile l'incertezza fuori dal piano e massimizzare il DOF disponibile, le lenti di lunghezza focale corta (8-12 mm) dovrebbero avere un angolo minimo di 35 gradi, le lenti di lunghezza focale intermedia (17 mm) dovrebbero avere un angolo minimo di 25 gradi e, infine, le lenti di lunghezza focale di 35 mm o più possono avere un angolo stereo di 15 gradi.

L'esperienza ci mostra però anche come l'utilizzo di angoli stereo più grandi di 35 gradi potrebbe portare a difficolta nella correlazione trasversale tra le due camere a causa delle grandi differenze di prospettiva tra le immagini provenienti da ciascuna fotocamera.

2.1.8 Depth-of-Field

Per la 3D-DIC, bisogna determinare la profondità di campo DOF richiesta così che l'intera ROI del provino rimanga a fuoco durante la prova, prendendo in considerazione il movimento fuori dal piano atteso e l'angolo stereo delle camere.

Per la 2D-DIC, si assume che il provino sia piano e che vi rimanga tale con una SOD costante. Perciò, il DOF non è un fattore poi così importante nella progettazione della configurazione di una 2D-DIC. Tuttavia, avere un DOF sufficiente aiuta ad assicurare che le immagini saranno a fuoco quando il provino sarà inserito nella montatura di carico e riduce la sensibilità all'allineamento del provino e della montatura di carico rispetto agli assi ottici del sistema per la rilevazione delle immagini. Inoltre, avere un DOF sufficiente aiuterà ad assicurare che il fuoco sarà mantenuto anche durante quei movimenti o deformazioni fuori dal piano inaspettati.

2.1.9 Gradienti spaziali

Stimare i gradienti spaziali attesi nella QOI. Questo determinerà la risoluzione spaziale richiesta dal sistema DIC, la quale è una funzione dei parametri di progetto della misurazione come la risoluzione della fotocamera e il FOV, e dei parametri di processo come la dimensione del subset e lo step-size.

Se i gradienti spaziali della QOI sono più grandi di quelli che il sistema DIC può risolvere, bisogna considerare di aumentare la grandezza del sistema ottico (1) utilizzando una fotocamera con una risoluzione dell'immagine maggiore o (2) riducendo la ROI del provino in modo tale che sia una porzione dello stesso ancora più piccola. Notiamo come questi suggerimenti assumano che la risoluzione spaziale di un sistema DIC sia limitato dalla fotocamera, ovvero che aumentando il numero di pixel attorno alla ROI si migliori direttamente la risoluzione del sistema di correlazione. Tuttavia, se si procedesse in questo senso, il sistema potrebbe diventare limitato dalla lente e questo significa che ulteriori incrementi in termini di prestazioni o risoluzione dell'immagine non porteranno a miglioramenti della risoluzione spaziale.

2.1.10 Noise-Floor

Determinare il rumore di fondo accettabile per tutte le QOI. Giustificare e documentare i criteri utilizzati per stabilire tale parametro.

Questa soglia per un rumore di fondo accettabile dipende molto dall'applicazione ed è spesso determinata da un soggetto esperto. Il rumore di fondo può essere valutato durante la progettazione della misurazione al fine di assistere nella selezione della componente hardware del sistema DIC (ad esempio la fotocamera e le lenti, la tecnica di pattern, l'illuminazione, ecc.) e i parametri di processo (ad esempio la dimensione del subset, lo step-size, ecc.).

2.1.11 Frame-Rate

Determinare il frame rate desiderato.

Ci sono diversi fattori da considerare quando si determina il frame rate desiderato e qui sono elencati in ordine di importanza:

 Il fattore più importante nel determinare una frequenza di misurazione appropriata è la risoluzione temporale delle QOI. Quindi, il frame rate per le misurazioni DIC è scelto per essere commensurato con la più grande frequenza di variazione attesa di ogni QOI. I requisiti per la risoluzione temporale sono anch'essi molto specifici per l'applicazione.

Come esempio, se l'obiettivo delle misurazioni DIC è quello di catturare il punto di snervamento di un metallo in una prova di trazione, i requisiti della risoluzione temporale sono una funzione del numero di frame richiesti per catturare la transizione elastico-plastica. Alternativamente, se l'obiettivo è quello di determinare la massima deformazione prima della strizione di un materiale duttile, il frame rate potrebbe essere molto più lento. Come terzo esempio, se il provino è caricato ciclicamente, il frame rate minimo è determinato dal teorema del campionamento di Shannon per segnali rumorosi e dunque deve essere circa 10-15 volte la frequenza di oscillazione.

2. Una seconda e minore considerazione quando si seleziona il frame rate è la quantità di spostamento tra i frame. Se lo spostamento tra i frame fosse grande, gli algoritmi DIC potrebbero fallire nel determinare la posizione del subset nelle immagini deformate. Molti software DIC ormai consentono all'utente stesso di fissare tale spostamento. Comunque, è bene precisare che lo spostamento massimo tra i frame che può essere catturato è specifico del software; comunque, un valore ragionevole è approssimativamente pari alla dimensione del subset. Per esempio, se la dimensione del subset è di 25 px e la scala dell'immagine è di 20 px·mm⁻¹, allora, il massimo spostamento tra due frame successivi dovrebbe essere inferiore approssimativamente a 1.25 mm. Se la velocità del provino è approssimativamente di 1 mm·s⁻¹, il frame rate minimo dovrebbe essere approssimativamente di 0.8 Hz.

 Una terza minore considerazione è la quantità di dati raccolti durante una prova meccanica. Durante misurazioni DIC possono essere accumulati velocemente gigabyte di dati e pertanto si rende essenziale una gestione dei dati.

2.1.12 Exposure Time

Determinare la massima esposizione possibile al fine di limitare la sfocatura del movimento.

La stima più conservativa per stimare il massimo movimento possibile del provino nel corso del tempo di esposizione è il rumore di fondo delle misurazioni dello spostamento. Per configurazioni DIC tipiche, questa soglia è di circa 0.01 pixel. In alcuni ambiti come la visione di macchina, è tipicamente usata una soglia di 0.1-0.3 pixel mentre nelle prove dinamiche modali è accettato un valore soglia di 3 pixel. Lo spostamento, in pixel, per tempo di esposizione è calcolato come:

$$Displacemente \ per \ Exposure \ [px] = \left(Velocity \ \left[\frac{mm}{s}\right]\right) \cdot \left(Image \ Scale \ \left[\frac{px}{mm}\right]\right) \cdot (Exposure \ Time[s])$$

2.1.13 Sincronizzazione e attivazione

Determinare come le immagini DIC saranno sincronizzate alle altre misurazioni di interesse, come la forza applicata o lo spostamento, estensimetri, termocoppie, ecc. Determinare come le acquisizioni dei dati saranno attivate all'inizio della prova meccanica.

2.2 Attrezzature e hardware

2.2.1 Selezione della fotocamera e della lente

Selezione una coppia di fotocamera e di lenti per ottenere il FOV, DOF, SOD, risoluzione spaziale, risoluzione temporale e il rumore di fondo desiderati.

FOV, SOD e DOF sono tra loro intrecciati e pertanto devono essere selezionati insieme. Le camere e le lenti, allo stesso modo, non possono essere selezionate indipendentemente in quanto entrambe hanno degli effetti sulla scala dell'immagine risultante.

In molti casi, l'esperienza è necessaria per determinare se una fotocamera (ad esempio il livello di rumore e l'intervallo dinamico) o le lenti (ad esempio distorsioni e risoluzione) sono di qualità sufficiente per DIC. Pertanto, sono raccomandate un qualche tipo di qualifica e di verifica del nuovo hardware andando a caratterizzare il rumore di fondo dei risultati DIC con il nuovo hardware. Tipicamente, questo è fatto dai venditori DIC per ciascuna componente hardware che essi forniscono, ma gli utilizzatori veri e propri possono verificare i risultati o valutare in maniera del tutto indipendente l'hardware utilizzando determinate procedure.

Una precauzione è fondamentale: dovrebbero essere evitati tutti quei sistemi che automaticamente vanno ad aggiustare le componenti delle lenti o della camera come, ad esempio, l'auto-focus delle lenti o dispositivi che si aprono/chiudono con l'acquisizione di ogni immagine in quanto non appropriati per le misure DIC. Inoltre, alcune fotocamere, specialmente quelle digitali più vecchie, hanno la possibilità di "interlacciare" i frame per ottenere un video fluido che sia più piacevole per l'occhio umano. Tuttavia, questa funzione combina ogni altra riga del frame precedente con il frame corrente e questo è completamente inappropriato per l'uso in DIC. Pertanto, quando viene utilizzato un hardware della fotocamera che sia nuovo e non familiare, è sempre raccomandato verificare che "l'interlacciamento" non sia usato.

Alcune fotocamere hanno un elemento fisico che funge da filtro passa-basso, anche chiamato filtro anti-aliasing, aderito davanti al rilevatore. Questo è tipico delle fotocamere single-lens reflex (SLR) o digital single-lens reflex (DSLR). È importante sapere se la fotocamera che si sta utilizzando per DIC sia provvista di tale elemento oppure no, in particolare quando bisogna decidere se o non pre-filtrare le immagini.

Ci sono due tipi principali di lenti utilizzate per la 3D-DIC (e occasionalmente anche per la 2D-DIC): lenti a lunghezza focale fissa o lenti zoom. Con una lente a lunghezza focale fissa, il FOV o la scala dell'immagine sono adattati andando ad adattare la SOD. Con una lente zoom, il FOV o la scala dell'immagine sono adattati andando ad adattare o la SOD o la lunghezza focale della lente. Comunque, a causa dell'aumentata complessità delle ottiche in una lente zoom, le distorsioni della lente sono spesso più grandi nelle lenti zoom piuttosto che nelle altre. Inoltre, molte lenti zoom non hanno la possibilità di bloccare la regolazione della lunghezza focale, rendendole più suscettibili a cambiamenti involontari nel caso in cui la fotocamera/lente è mossa. Nel caso in cui debba essere usata la 2D-DIC, è raccomandato l'utilizzo di una lente telecentrica bilaterale al fine di mitigare piccoli errori dovuti a traslazioni fuori dal piano. Tuttavia, rotazioni fuori dal piano e grandi traslazioni fuori dal piano ancora causano errori nelle misure in 2D-DIC. La grandezza delle traslazioni fuori dal piano per le quali una lente bi-telecentrica possa compensare dipende dal FOV. Se una lente telecentrica non è disponibile o non è realizzabile, è raccomandato l'utilizzo di una lente a lunga lunghezza focale per massimizzare la SOD e, quindi, minimizzare gli errori causati dal movimento fuori dal piano.

Sebbene una lente telecentrica sia raccomandata per la 2D-DIC, lo stesso non vale per la 3D-DIC.

Sono preferite lenti con l'abilità di bloccare il movimento delle componenti (ad esempio l'anello di messa a fuoco, l'anello dei diaframmi) al fine di ridurre la probabilità di cambiare accidentalmente questi componenti dopo che sono stati posizionati dove desiderato.

2.2.2 Montaggio della fotocamera e della lente

2.2.2.1 Caratteristiche generali del sistema di montaggio

Costruire un sistema di montaggio robusto per fotocamera e lente con le seguenti caratteristiche generali:

- Includere sufficienti gradi di libertà per consentire un preciso adattamento della posizione e orientazione delle fotocamere/lenti (moduli di traslazione o rotazione, regolazioni del treppiede, ecc.).
- Se la posizione della fotocamera e/o l'orientazione necessita di essere adattata per la calibrazione, bisogna includere dei meccanismi appropriati nel sistema di montaggio (ad esempio un'asta che possa ruotare la fotocamera o un modulo di traslazione per traslare la fotocamera).
- Dopo che la posizione e l'orientazione finali sono stati determinati, bloccare tutte le componenti di movimento del sistema di montaggio. Quando si è parlato di lenti, già si è accennato alla presenza di diversi anelli di regolazione e di meccanismi che consentono di bloccare le componenti di movimento del sistema. Tuttavia, nel caso in cui si utilizzino fotocamere che non possono effettuare tali operazioni di blocco, si

potrebbe pensare di utilizzare del nastro adesivo per bloccare la posizione degli anelli di regolazione. Questi anelli dovrebbero essere bloccati dopo che il sistema di immagine sia allineato e focalizzato ma prima che il sistema sia calibrato.

- Per 2D-DIC, assicurare che l'asse ottico della fotocamera e della lente sia perpendicolare alla superficie del provino.
- Per 3D-DIC, montare le fotocamere in modo tale che sia ottenuto il FOV, la ROI dell'immagine e l'angolo stereo desiderati. Impostare il FOV in modo tale che la ROI dell'immagine sia la stessa in entrambe le fotocamere.

Impostare l'orientazione delle fotocamere con rilevatori rettangolari in modo tale che l'asse lungo dei rilevatori sia allineato con quello della ROI del provino. Se la ROI è bassa e larga, montare la fotocamera con orientamento orizzontale; se la ROI è alta e stretta, montare le fotocamera con orientamento verticale.

Impostare il piano stereo in modo tale che sia perpendicolare al piano del provino come illustrato nella Figura 1 **Posizione raccomandata di una coppia di fotocamere rispetto al provino. In questo caso si è assunto che gli assi lungo e corto della ROI del provino siano allineati con gli assi lungo e corto del provino stesso.**Questa orientazione riduce le grandi differenze di prospettiva ai bordi della ROI in ogni fotocamera.



Figura 1 Posizione raccomandata di una coppia di fotocamere rispetto al provino. In questo caso si è assunto che gli assi lungo e corto della ROI del provino siano allineati con gli assi lungo e corto del provino stesso.

- Per 3D-DIC, montare le fotocamere rigidamente insieme per evitare il movimento relativo tra le stesse. Ogni movimento di una fotocamera rispetto all'altra potrà portare ad errori nelle misure DIC e si renderà necessaria una nuova calibrazione.
- Montare il sistema combinato fotocamera/lente vicino al suo stesso centro di massa. Se la lente o la fotocamera è sostanzialmente più massiva dell'altra, montare verso l'elemento più massivo. Considerare di montare in due posti lungo l'asse ottico piuttosto che in uno solo al fine di minimizzare l'effetto leva-braccio. L'obiettivo, qualunque sia l'orientazione dell'asse ottico, è quello di far sì che il sistema sia il più bilanciato possibile in modo tale da non indurre errori nelle misure DIC.
- Stabilizzare e rilasciare la tensione dei cavi della fotocamera al fine di prevenire che essi tirino le fotocamere o che trasferiscano vibrazioni dell'ambiente al sistema. Se le fotocamere saranno spostate per la calibrazione, assicurarsi che i cavi siano allentati a sufficienza per consentire i riposizionamento della fotocamera.

- Assicurare che la struttura di supporto della fotocamera sia stabile. Se necessario, aggiungere pesi ai treppiedi o altre strutture di supporto al fine di prevenire il movimento della fotocamera.
- Minimizzare le vibrazioni che sono trasferite alle fotocamere: qualsiasi vibrazione venga trasferite alle fotocamere andrà direttamente ad aumentare il rumore di fondo delle misure DIC. Alcune vibrazioni, ma non tutte, possono essere percepite chiaramente dall'occhio umano andando a guardare le immagini dal vivo, specialmente se l'immagine è zoomata in modo che i singoli pixel siano visibili. Le vibrazioni di fotocamera e lente sono maggiormente visibili per SOD grandi piuttosto che per SOD piccoli. Per ridurre le vibrazioni, sono raccomandate le seguenti precauzioni:
 - Assicurare che il sistema di montaggio e le fotocamere non siano a diretto contatto con componenti soggetti a vibrazione (ad esempio compressori, macchine di test, ecc.).
 - Verificare che non ci siano vibrazioni trasmesse attraverso il pavimento (notare che le vibrazioni potrebbero provenire da attrezzature o macchinari presenti in altre stanze della struttura).
 - Se ci sono vibrazioni che vengono trasferite alle fotocamere, rinforzare il sistema di montaggio e aggiungere smorzatori.
 - Se la misura DIC e la configurazione della prova possono ospitare differenti SOD e lenti di differenti lunghezze focali, usare una SOD più corta e lenti di lunghezza focale più corta.

In 3D-DIC, il cosiddetto errore epipolare è un buon indicatore dell'eventuale presenta di un disallineamento o di vibrazione nei sistemi fotocamera/lente. Per esempio, se l'errore epipolare di una serie di immagini statiche è inizialmente piccolo a seguito della calibrazione ma poi aumenta nel tempo, questo potrebbe indicare la deriva di uno o di entrambi i sistemi di imaging. Se l'errore epipolare fosse ciclico nel tempo, questo potrebbe indicare la presenza di vibrazioni che influenzano i sistemi di imaging.

2.2.2.2 Tipi di sistemi di montaggio

Ci sono diversi tipi di sistemi di montaggio per fotocamere/lenti che sono appropriati per la correlazione digitale di immagini e la selezione di un sistema di montaggio dipende dalla

configurazione della prova meccanica e dai componenti disponibili in ciascun laboratorio. Spesso, è disponibile un sistema di montaggio standard, appropriato per un vasto insieme di configurazioni di prove meccaniche con l'acquisto di sistemi DIC commerciali, turn-key. Alternativamente, sistemi di montaggio personalizzati possono essere costruiti a partire da prodotti disponibili commercialmente. Per configurazioni di prove meccaniche con geometria complicata, accesso ristretto, o sistema di montaggio di fotocamere e lenti non comune potrebbero essere necessari componenti che siano specialmente progettati e fabbricati. Alcuni tipi comuni di sistemi commercialmente disponibili includono, ma non sono limitati a questi:

- Hardware ottico standard, come pali da 38 mm e associato hardware di montaggio, imbullonati a un tavolo ottico.
- Treppiedi rigidi. Per 3D-DIC, una singola asta può essere montata o su ciascuna estremità a un treppiede oppure può essere montata in corrispondenza del suo centro di massa a un singolo treppiede. In questo modo, le fotocamere sono montate rigidamente insieme e non su treppiedi indipendenti.
- Supporti da studio. Il montaggio di una fotocamera su un supporto da studio è simile a quello su un treppiede ma i primi hanno due vantaggi. Primo, la loro base è appesantita in modo che non si rendano necessari pesetti extra per stabilizzare il sistema. Secondo, sono progettati con molteplici gradi di libertà bloccabili, consentendo un facile adattamento dell'orientazione e della posizione della fotocamera.
- Sistemi di aste pre-fabbricate per variare le lunghezze con associati hardware di montaggio e assemblaggio.

2.2.3 Diaframma

Selezionare il diaframma sulla lente per ottenere il DOF desiderato. Per 3D-DIC, il diaframma dovrebbe essere lo stesso in entrambe le fotocamere.

Oltre a governare il DOF, il diaframma della lente governa quante luce entra nel sistema ottico. Comunque, tipicamente il diaframma è scelto basandosi sul DOF richiesto/desiderato e sia la luce esterna che l'esposizione sono adattate al fine di limitare la sfocatura e ottenere un contrasto efficiente. Più il diaframma è piccolo, ovvero più il rapporto focale indicato con il simbolo f è grande, più è grande il DOF. La dimensione del diaframma raccomandata o più semplicemente il rapporto focale raccomandato è dipendente dalla lente e dall'applicazione ma tipicamente è un valore che cade in un range di f/5.6-f/11.

2.2.4 Illuminazione ed esposizione

Dato un diaframma pre-determinato, selezionare l'illuminazione e un tempo di esposizione (minore del massimo tempo di esposizione possibile) per avere un sufficiente contrasto tra le regioni più chiare (bianche) e più scure (nere) del pattern DIC. Il contrasto dovrebbe essere uniforme su tutta la ROI dell'immagine, approssimativamente la stessa in entrambe le fotocamere (per 3D-DIC) e costante nel tempo. Per le configurazioni standard nella 3D-DIC, anche il tempo di esposizione dovrebbe essere lo stesso per entrambe le fotocamere.

2.2.4.1 Tipi di luci

In alcuni casi, come ad esempio prove lente o quasi statica e diaframma moderato, l'illuminazione della stanza è sufficiente. Comunque, il più delle volte, è richiesta un'illuminazione addizionale per avere un buon contrasto per un dato diaframma e tempo di esposizione. In questi casi, una luce bianca o una luce di una qualsiasi lunghezza d'onda funzionerà. È raccomandato, tuttavia, di evitare illuminazione che abbia un'intensità significativa nel range dell'infrarosso, in quanto questa potrebbe aumentare la temperatura del provino e quindi cambiarne il comportamento. La richiesta principale per l'illuminazione è che sia uniforme attraverso il FOV e costante nel tempo.

Alcune luci potrebbero oscillare (cioè cambiare intensità) alla stessa frequenza dell'alimentazione elettrica in corrente alternata (tipicamente 50-60 Hz). Similmente, per alcune luci LED, l'intensità della luce è controllata variando il ciclo di lavoro della luce, di nuovo tipicamente a 50 Hz. In ogni caso, se la frequenza di imaging (cioè il frame rate) fosse vicino o più veloce della frequenza di alimentazione elettrica in corrente alternata o della frequenza del ciclo di lavoro, allora l'intensità della luce (e quindi il contrasto delle immagini) potrebbe variare tra le immagini.

2.2.4.2 Posizionamento della luce

Spesso, per avere un buon contrasto tra il provino e l'obiettivo della calibrazione, si rendono necessarie illuminazioni ed esposizioni differenti.

Adattare l'intensità della luce, la sua posizione e/o il tempo dell'esposizione per scopi di calibrazione è una procedura comune ed è accettabile fintanto che la fotocamera, la lente e il montaggio non sono disturbati. In ogni caso, tali aggiustamenti saranno annullati prima che le misurazioni DIC siano effettuate.

Numerosi venditori forniscono luci integrate in modo robusto nel sistema di montaggio della fotocamera; questi sistemi sono progettati per consentire la regolazione delle luci senza disturbare le fotocamere. In alternativa, le luci possono essere montate su un telaio separato rispetto alle telecamere, oppure è possibile utilizzare un controllo remoto dell'illuminazione per ridurre la possibilità di un movimento involontario della fotocamera durante la regolazione delle luci.

2.2.4.3 Contrasto, intensità e guadagno

Poiché le proprietà metrologiche della correlazione digitale di immagini fanno altamente affidamento sui gradienti di immagine (e quindi sul contrasto), migliore è il contrasto (senza che l'immagine sia sovraesposta o sottoesposta), meno rumorosi saranno i risultati DIC. Per una fotocamera ad 8 bit, il contrasto minimo affinchè si abbia un rumore di fondo dello spostamento di circa 0.0005 pixel è approssimativamente del 20% (50 conteggi di livello di grigio tra le caratteristiche chiare e quelle scure), anche se tipicamente è preferito un contrasto di almeno il 50% (130 conteggi).

Anche se le immagini sembrano scure all'occhio umano, ci può essere un contrasto sufficiente nell'immagine per DIC.

Il contrasto potrebbe cambiare durante la prova nel momento in cui il provino è mosso e/o deformato. Perciò, bisogna assicurare che il contrasto sia sufficiente sia all'inizio che durante la durata della prova. Per fare questo, potrebbe essere richiesto di effettuare una prova preliminare su provini extra per confermare l'illuminazione e il contrasto per tutta la prova.

Se il contrasto medio nell'immagine cambia nel tempo durante la prova, si raccomanda il criterio di corrispondenza della somma normalizzata della media zero delle differenze quadrate (zero-mean normalized sum of square difference ZNSSD) per compensare i cambiamenti del contrasto.

Assicurare che nessuna ROI dell'immagine sia sovraesposta (cioè che l'intensità ad ogni pixel sia inferiore di quella massima della fotocamera) o sottoesposta (cioè che l'intensità ad ogni pixel sia superiore di quella minima della fotocamera), e che non ci sia nessuna bagliore nella ROI. Queste condizioni dovrebbero essere vere sia inizialmente sia quando il provino viene traslato e ruotato all'interno del volume 3D di movimento e/o deformazione previsto. Nella 3D-DIC, controllare entrambe le immagini per l'eventuale presenza di un bagliore, il quale potrebbe manifestarsi sia sotto forma di punti che di linee.

Non aumentare il guadagno delle fotocamere (a volte indicato come indice di esposizione o di "ISO setting". La conversione tra il numero di elettroni registrato dal rilevatore e il numero di conteggi nell'intensità del livello di grigio è un tentativo per aumentare il contrasto o l'intensità. Aumentare il guadagno incrementa il rumore della fotocamera che ovviamente non è un vantaggio per DIC.

2.2.5 Riscaldamento dell'hardware

Quasi tutte le fotocamere e le luci nel tempo diventano più calde della temperatura della stanza, anche le "fredde" luci LED. Il riscaldamento dell'hardware può impattare negativamente sulle misure DIC in molteplici modi, che includono ma non si limitano a questi:

- Cambiare le dimensioni e le posizioni dei rilevatori delle fotocamere e delle lenti a causa dell'espansione termica dei componenti degli stessi.
- Riscaldare la struttura di montaggio, la quale, in 3D-DIC, può portare a un cambiamento delle posizioni relative delle fotocamere durante la prova andando a negare la calibrazione.
- Indurre correnti convettive di aria (note comunemente come "onde calde") che rifrangono la luce tra il provino e il sistema di imaging.

Per mitigare gli effetti dell'espansione termica delle fotocamere, delle lenti e della struttura di montaggio, le fotocamere devono essere accese e utilizzate al frame rate target fino a quando

non hanno raggiunto una temperatura stabile. La calibrazione delle immagini e le immagini di misura DIC dovrebbero essere acquisite solo dopo che le fotocamere hanno raggiunto questo equilibrio termico.

Anche piccole variazioni di temperatura possono causare onde calde tra il provino e il sistema di imaging andando a rifrangere la luce e causare errori nelle misure DIC. Questi errori si manifestano come "dita" che variano sia temporalmente che spazialmente nei campi di spostamento e deformazione le quali, quando animate in un film, possono sembrare molto simili a delle fiamme.

Poiché gli errori causati dalle onde calde non sono facili da filtrare in una fase di post-processing è fortemente raccomandato di minimizzare le onde calde durante la fase di configurazione della prova prima che le immagini siano acquisite, usando uno più dei seguenti step preventivi. Similmente alle vibrazioni della fotocamera, la quantità di tempo e sforzo speso nel minimizzare le onde calde è direttamente commensurato alla grandezza degli errori causati dalle onde calde e alla precisione desiderata nelle misure DIC.

- Montare le luci sopra e dietro le fotocamere se possibile. Evitare di montare le luci tra le fotocamere e il provino. In particolare, evitare di montare le luci sotto il piano della telecamera/provino.
- Se le luci sono la sorgente delle onde calde e la durata della prova è breve, mantenere le luci spente il più possibile al fine di prevenire che le stesse si riscaldino troppo e accenderle solo per la durata della prova. Se invece la durata della prova fosse più lunga, accendere le luci solo quando le immagini vengono acquisite oppure aggiungere un ventilatore sulle luci per raffreddarle e omogeneizzare la temperatura dell'aria.
- Se le onde calde sono causate dalle fotocamere, raffreddare le stesse con un radiatore o un ventilatore. In alternativa, piazzare una lama d'aria davanti alle fotocamere per omogeneizzare l'aria tra le camere e il provino senza però soffiare aria direttamente sulle fotocamere. Bisogna infatti fare molta attenzione a non indurre nessun movimento e vibrazione sulla fotocamera e sulla struttura di montaggio nel momento in cui vi soffiamo aria con qualche dispositivo. In ogni caso, se decidiamo di usare un ventilatore per raffreddare le luci o le fotocamere, bisogna assicurare che la riduzione in termini di errori dovuti alle onde calde sia preponderante rispetto all'aumento in termini di errori dovuti al movimento della fotocamera.

2.3 Il Pattern DIC

2.3.1 Tipi di pattern DIC

Un'assunzione fondamentale quando si parla di DIC è che il movimento e la deformazione del pattern che viene ripreso replichi esattamente il movimento e la deformazione del provino sottostante. Alcune volte, le immagini della superficie del provino hanno esse stesse un pattern naturale che risulta essere adeguato alla DIC e pertanto, non è necessario applicare alcun pattern artificiale.

Come primo step, la superficie del provino può essere ripresa e il pattern naturale può essere valutato per accertare se esso abbia o meno le caratteristiche che verranno descritte successivamente. Se così sarà, non sarà necessario applicare un pattern DIC.

La maggior parte delle volte però, è necessario che un pattern venga applicato sulla superficie del provino. Tipicamente, sebbene non esclusivamente, i pattern applicati consistono in "macchioline" approssimativamente circolari di una dimensione che sia preferibilmente uniforme ma che siano in posizioni casuali.

La qualità di un pattern DIC è spesso valutata attraverso ispezioni manuali, visive delle immagini, dove un soggetto pratico ed esperto cerca le caratteristiche che verranno descritte nel seguito.

2.3.2 Caratteristiche generali dei pattern DIC

Sia i pattern naturali che quelli applicati devono avere le seguenti caratteristiche generali.

2.3.2.1 Dimensione

La dimensione caratteristica ottimale del pattern è di 3-5 pixel. Questa linea guida si applica sia alle caratteristiche chiare (bianche) sia a quelle scure (nere).

Ci sono molte definizioni della dimensione caratteristica e molti metodi per determinarla. Tuttavia, molto spesso è sufficiente una stima grezza nella quale il praticante DIC effettua uno zoom sull'immagine e approssima la dimensione caratteristica ad occhio. Bisogna fare attenzione al fatto che le caratteristiche del pattern con una dimensione inferiore ai 3 pixel rischia di introdurre errori nei risultati DIC. Questo errore è maggiormente pronunciato quando gli spostamenti sono piccoli a causa del più basso rapporto segnale-rumore. Nel caso, ad esempio, di una prova di compressione, le caratteristiche che hanno cominciato in corrispondenza del limite inferiore del range raccomandato per la dimensione, ad esempio 3 pixel, potrebbe essere "aliasato" nel momento in cui il pattern è compresso e le caratteristiche e le spaziature sono ridotte. Le caratteristiche che sono più grandi del necessario, cioè più di 5 pixel, invece, richiederanno dei subset più grandi e quindi andranno a degradare la risoluzione spaziale degli spostamenti e delle deformazioni, ma non andranno ad influenzare negativamente i risultati (cioè non aggiungeranno rumore).

In molte applicazioni, se il metodo di patterning selezionato porta ad ottenere dimensioni caratteristiche varie, allora è preferibile utilizzare delle caratteristiche che siano più grandi di quella ottimale al fine di limitare il numero di caratteristiche "aliasate". Si fa questo essenzialmente perché aggiungere del rumore a causa di caratteristiche "aliasate" è sicuramente peggiori di una risoluzione spaziale degradata a causa di caratteristiche più grandi.

La dimensione fisica caratteristica del pattern viene determinata sulla base della scala di immagine. Per esempio, data una scala di immagine di 20 px \cdot mm⁻¹, una dimensione target di 5 pixel per le caratteristiche passa a una dimensione fisica di (5 pixel)/(20 pixel mm⁻¹) = 0.25 mm. Notiamo inoltre che la dimensione fisica caratteristica richiesta per una data misura DIC dipende sia dal FOV che dalla risoluzione dell'immagine. Per un dato FOV e lente, una fotocamera con una risoluzione dell'immagine più bassa (ad esempio una fotocamera 1 MP) richiederà caratteristiche e spaziature più grandi rispetto a una fotocamera con una risoluzione più grande (ad esempio una fotocamera 12 MP).

Nella 3D-DIC, dove le telecamere sono ad angolo rispetto al provino, la scala dell'immagine (sulla superficie del provino) non è costante sul FOV di ciascuna fotocamera. Per assicurarsi che la caratteristica più piccola del pattern non venga "aliasata" in nessuna posizione della ROI di entrambe le telecamere, è necessario tenere in considerazione il cambiamento della scala dell'immagine attraverso il ROI. Pertanto, la posizione nella ROI di entrambe le telecamere,

dove la scala dell'immagine è la più piccola, dovrebbe essere trovata ed utilizzata per definire la caratteristica del pattern DIC più piccola possibile.

Dopo che la dimensione fisica desiderata delle caratteristiche del pattern DIC è stata calcolata a partire dalla scala di immagine, essa può essere confermata stampando un pattern sintetico su carta utilizzando una normale stampante da ufficio (se la stampante ha una risoluzione sufficiente per la dimensione del pattern desiderata) e riprendendo il pattern usando lo stesso sistema ottico della prova vera e propria al fine di assicurare che tutte le caratteristiche siano di 3-5 pixel in misura.

2.3.2.2 Variazione

Il pattern dovrebbe avere una variazione casuale sufficiente in modo tale che i subset nelle differenti regioni dell'immagine possano essere identificati in modo univoco.

I pattern regolari orientati (anisotropi) possono essere problematici per molti sistemi DIC e quindi, dovrebbero essere evitati a meno che non sia richiesto il movimento in una sola direzione. Per esempio, un pattern basato su una serie di linee periodiche di larghezze differenti può risultare in correlazione con il movimento normale delle linee ma non con il movimento parallelo delle stesse. Dunque, se si vuole utilizzare un pattern regolare, si potrebbe pensare di inserire degli elementi di randomizzazione come, ad esempio, punti marcatori casuali o di variare la larghezza delle periodiche linee regolari.

2.3.2.3 Densità

La densità del pattern dovrebbe essere approssimativamente del 50%, ovvero dovrebbe approssimativamente esserci la stessa area di pixel chiari (bianchi) e scuri (neri) in qualunque subset della ROI dell'immagine si prenda in considerazione. Se vengono utilizzate le "macchioline" di forma più o men circolare, ci si può aspettare una densità vicina al 25-40% a causa della spaziatura minima richiesta tra le stesse.

2.3.2.4 Qualità

La degradazione della qualità del pattern dovrebbe essere minimizzata e non poterla permettere di portare ad una decorrelazione durante le analisi.

Per i pattern DIC naturali, le sorgenti di degradazione del pattern includono, ma non sono limitate a queste, cambiamenti morfologici significativi e sviluppo di slip band sulla superficie del provino durante la deformazione plastica.

Per i pattern DIC applicati, le sorgenti di degradazione del pattern includono, ma non sono limitate a queste, scolorimento, screpolatura e debonding.

Effettuare delle prove preliminari su provini extra potrebbe essere richiesto al fine di verificare l'affidabilità di un pattern per tutta la durata della prova.

2.3.2.5 Riflessi

La lucentezza del pattern deve essere opaca e non lucida per evitare bagliori e riflessi speculari.

I riflessi speculari possono spesso essere nascosti in un pattern DIC altrimenti buono, cioè apparendo come punti luminosi artificiali in una o in entrambe le immagini della fotocamera. I riflessi speculari dipendono dall'orientazione e dalla posizione del provino rispetto alla sorgente di luce e alla fotocamera e possono cambiare se il provino è ruotato o traslato. Inoltre, nella 3D-DIC, i riflessi speculari spesso appaiono differenti in ciascuna fotocamera. Perciò, i riflessi speculari dovrebbero essere evitati.

Per ridurre i riflessi speculari potrebbe essere utilizzata luce polarizzata trasversale o luce diffusa. Se i riflessi speculari non potessero essere minimizzati sufficientemente attraverso l'illuminazione, sul pattern potrebbe essere applicato uno spray fotografico opacizzante. Tuttavia, in quest'ultimo caso bisogna verificare attentamente che lo spray non vada a degradare il pattern.

2.3.3 Caratteristiche dei pattern applicati

I pattern applicati, senza focalizzare l'attenzione sul metodo usato per crearli, dovrebbero avere le seguenti caratteristiche addizionali che non necessariamente si applicano ai pattern naturali.

Per le prove di trazione, prima di applicare un pattern ad un provino, si vanno a mascherare le sezioni di presa così che il pattern non sia applicato alle aree del provino che saranno afferrate nel telaio di carico. Questo aiuterà ad aumentare la forza di presa, a ridurre la probabilità che il

provino scivoli all'interno delle pinze e a prevenire l'ostruzione di queste ultime con materiale del pattern.

2.3.3.1 Conformità

Il pattern applicato dovrebbe essere sottile e conforme rispetto al provino così che esso non cambi il comportamento del provino che viene misurato durante la prova.

Se il pattern applicato fosse spesso e/o rigido se comparato al provino, le misure DIC basate sulle immagini del pattern potrebbero riflettere la deformazione del pattern piuttosto che la deformazione del materiali di interesse sottostante.

2.3.3.2 Legame

Dovrebbe esserci un buon legame tra il provino e il pattern applicato.

Prima che il pattern sia applicato, bisogna pulire il provino per consentire un buon legame tra i due. Per esempio, per metalli comuni (ad esempio acciaio e alluminio) può essere usato dell'acetone per rimuovere il grasso dalla superficie. Tuttavia, l'acetone lascia un residuo dopo che evapora e dunque si necessita una seconda pulizia con un altro solvente, come l'isopropanolo, che non lascia alcun residuo. Inoltre, se la superficie è molto liscia, si può considerare di sgrossarla con carta vetrata per favorire l'adesione del pattern applicato alla superficie del provino, sempre che tale trattamento non vada alterare le proprietà del provino.

Il debonding di un pattern applicato, come già accennato, può essere un problema insidioso. In alcuni casi, un pattern applicato potrebbe localmente slegarsi dal provino, rimanere ancora intatto e continuare a deformarsi indipendente dal provino. In questi casi, il fatto che il pattern si sia slegato potrebbe non essere cos' ovvio. Pertanto, nel caso in cui si utilizzi un pattern applicato, dopo la prova bisogna controllare attentamente il provino e il pattern stesso per vedere se ci sono indicazioni o evidenze che si sia avuto il debonding del pattern.

2.3.3.3 Fedeltà

Il pattern applicato deve muoversi e deformarsi in modo conforme alla superfice del provino.

Per i pattern basati sulla vernice, la duttilità della stessa dovrebbe essere allineata con la deformazione attesa. Cioè, per i provini che devono essere sottoposti a grandi deformazioni, la vernice dovrebbe essere più duttile possibile in modo che si allunghi con elevata fedeltà rispetto al provino sottostante senza che si crepi o si sleghi. A tale scopo, la prova dovrebbe essere eseguita immediatamente dopo la verniciatura. In alternativa, le singole caratteristiche (ad esempio le "macchioline") possono essere posizionate direttamente sul provino senza uno strato di vernice di base.

D'altra parte, se il provino è fragile e l'osservazione della propagazione della cricca è importante, la vernice dovrebbe essere la più fragile possibile così che la vernice si rompa nello stesso momento del provino. In questo caso, la vernice dovrebbe essere lasciata completamente a polimerizzare e può anche essere cotta (se la cottura non altera le proprietà del provino) per renderla ancora più fragile. In alternativa, le singole caratteristiche (ad esempio le "macchioline") possono essere posizionate direttamente sul provino senza uno strato di vernice di base così che la rottura del provino possa essere osservata direttamente.

Nel caso in cui si decida di non utilizzare uno strato di vernice di base e le singole caratteristiche vengono posizionate direttamente sul provino, assicurarsi che ci sia un contrasto sufficiente e che non ci siano riflessi speculari.

A volte, gli utenti DIC meno esperti pensano che un pattern di puntini laser basato sull'interferenza produca un buon pattern per la DIC. Tuttavia, questo tipo di pattern non riuscirà a mantenere una correlazione con il movimento del provino per grandi spostamenti e, pertanto, non è raccomandato per DIC.

2.3.3.4 Spessore

Il pattern dovrebbe essere di spessore uniforme.

Nella 3D-DIC, un pattern con una superficie ruvida può risultare nella stessa porzione del pattern sostanzialmente diverso tra le immagini della fotocamera sinistra e destra e questo può ostacolare la correlazione incrociata tra le due immagini. Nella 2D-DIC, un pattern con aree di differente spessore può provocare gradienti di deformazione artificiali attraverso le transizione tra le aree di diverso spessore.

2.3.4 Tecniche di patterning

Ci sono differenti tecniche disponibili per creare dei pattern appropriati per DIC, come stampini, timbri, strati di vernice incompleti, toner per stampanti o polveri fini per nominarne alcune. Tali tecniche sono limitate solo dall'immaginazione.

Al fine di facilitare la progettazione delle misurazioni DIC, la creazione di un tavolo di tecniche di patterning e la dimensione del pattern risultante è raccomandata per ogni praticante DIC o un laboratorio. Inoltre, sarebbe molto utile avere a disposizione una sorta di libreria con i pattern creati in modo tale che la dimensione e il contrasto di differenti pattern possa essere valutato velocemente con una fotocamera, lente e sistema di illuminazione preliminari.

Una volta che la tecnica di patterning è stata selezionata, modello un provino di scarto e riprendo il pattern per verificare che esso abbia la giusta dimensione, forma, distribuzione e densità. Le immagini dovrebbero essere prese nella configurazione di prova o in una configurazione fittizia che utilizza le stesse telecamere, lenti, SOD, angolo stero, ecc. della configurazione effettiva. Il provino di scarto dovrebbe essere dello stesso materiale del provino reale in quanto le tecniche di patterning possono produrre risultati differenti su materiali differenti. (Per esempio, le macchioline di vernice spray possono essere più larghe su un metallo, dove le goccioline di vernice si spargono, piuttosto che su cartone o carta, dove le goccioline di vernice sono assorbite dal materiale.

Capitolo 3 Preparazione per le misure

3.1 Routine di pre-calibrazione

3.1.1 Revisione della procedura di prova

Prima di preparare ed eseguire la prova meccanica con misurazioni DIC simultanee, rivedere la procedura di prova generale:

- Valutare la procedura di prova provvisoria da utilizzare e assicurarsi che nessuno step che intervenga dopo che il provino è stato modellato, ma prima che esso venga testato (ad esempio grippaggio e assemblaggio), danneggerà il pattern. Modificare la procedura di prova se necessario per ridurre la probabilità di graffiare o contaminare il pattern (ad esempio olio sulla superficie del provino).
- Assicurare che il telaio meccanico di carico sia propriamente regolato e calibrato.
- Rivedere la time line del processo di prova e assicurare che ci sia un tempo adeguato a tutti gli step, come riscaldare le fotocamere, riscaldare il telaio di carico (se necessario), calibrare il sistema DIC, rivedere la calibrazione, preparare e modellare il provino, testare il provino, ecc. Determinare in quale punto del processo di prova il provino debba essere modellato (se si usa un pattern applicato).
- Assicurare che le condizioni ambientali (ad esempio temperatura) saranno stabili durante il corso della calibrazione DIC e la prova meccanica.
- Considerare di aggiungere uno sfondo fisso dietro il campione di prova per prevenire che eventuali persone o oggetti che si muovano dietro il provino da testare influiscano negativamente sulle immagini.

3.1.2 Pulizia delle attrezzature

Assicurare che non ci sia alcun tipo di sporco, polvere o qualsiasi altre particella estranea sulla lente, sul rilevatore della fotocamera o sul target di calibrazione.

Spesso, l'aria pressurizzata è sufficiente a rimuovere polvere o particelle dalla lente e dal rilevatore. In ogni caso, bisogna seguire sempre le istruzione del produttore per la pulizia delle lenti o dei rilevatori della fotocamera.

Ogni volta che il sistema ottico è esposto, perché magari il copriobiettivo è rimosso e/o la lente è rimossa dalla fotocamera) bisogna fare molta attenzione a non introdurre dello sporco nel sistema ottico. Inoltre, bisogna fare molta attenzione a quando ci si occupa della pulizia delle lenti o dei rilevatori in quanto è molto facile che essi vengano danneggiati irreparabilmente.

3.1.3 Riscaldamento della fotocamera

Accendere le fotocamere e utilizzarle al frame rate target per consentire lori di riscaldarsi fino a una temperatura operativa stabile. Le fotocamere dovrebbero essere a una temperatura operativa stabile prima di qualsiasi calibrazione o prima che le immagini di misura DIC siano acquisite. Fare riferimento al manuale del venditore DIC per ulteriori informazioni riguardo le fotocamere da esso fornite.

Il tempo necessario affinchè una fotocamera si riscaldi fino ad una temperatura costante dipende dalla fotocamera e dall'ambiente di laboratorio, così come dalla velocità di acquisizione delle immagini. Tipicamente, i tempi di riscaldamento variano da molti minuti a molte ore. Prima di usare una nuova fotocamera per la DIC, monitorare la temperatura della fotocamera durante il periodo di riscaldamento nell'ambiente di laboratorio previsto (o simile) alla velocità di acquisizione desiderata e notare il tempo richiesto per la temperatura per appiattirsi. Usare questo tempo di riscaldamento per le future misurazioni DIC che utilizzano quella fotocamera e quella velocità di acquisizione. Se quest'ultima cambierà, il tempo di riscaldamento dovrà essere nuovamente calcolato.

Se le fotocamere non fossero riscaldate, potrebbero essere introdotti degli errori nei risultati DIC a causa dell'espansione termica delle fotocamere e delle lenti e a causa della deriva indotta dall'espansione termica dei supporti della fotocamera.
3.1.4 Sincronizzazione

Per le misure 3D-DIC, assicurare che le due fotocamere siano sincronizzate l'una rispetto all'altra. Sia per la 2D-DIC che per la 3D-DIC, rivedere il piano di acquisizione dei dati e assicurare che nessun segnale esterno (cioè forza, estensimetri, ecc.) sia sincronizzato con la fotocamera(e) DIC.

La sincronizzazione delle fotocamere nella 3D-DIC è critica in quanto il ritardo tra le due fotocamere può portare ad errori nelle misure DIC.

La sincronizzazione delle due fotocamere può essere verificata in molti modi differenti che includono:

- Riprendere un provino che si muove che abbia un pattern DIC, correlare le immagini nel software DIC e verificare che l'errore epipolare sia accettabile basandosi sulla documentazione del software DIC.
- Riprendere una luce stroboscopica impostata alla stessa frequenza dell'acquisizione delle immagini.
- Riprendere un evento dinamico e assicurare che l'evento si verifichi nello stesso numero di frame di entrambe le fotocamere.
- Misurare il segnale stroboscopico o di esposizione proveniente dalle fotocamere su un oscilloscopio, se le telecamere emettono un segnale stroboscopico o di esposizione.

3.1.5 Applicazione del pattern DIC

Se si utilizza un pattern DIC applicato (in contrasto con la superficie naturale del provino), applicare il pattern DIC selezionato al provino.

Applicare due segni detti fiducial marks o fiducials a una distanza nota l'uno dall'altro su una porzione del provino che sia all'interno del FOV ma al di fuori della ROI critica. Valutare l'incertezza nella distanza tra i fiducials. Questi fiducials possono essere usati approssimativamente per verificare la calibrazione della fotocamera. Altri fiducial marks possono poi essere utili, ad esempio, per ruotare i risultati di misura DIC al sistema di coordinate del provino.

3.1.6 Revisione della pre-calibrazione del sistema

Questo è il momento di effettuare le regolazioni e fissare qualsiasi problema con la configurazione della misurazione DIC, così che siano ottenute le migliori immagini possibili. Una volta che le immagini di calibrazione sono state acquisite, pochissimi sono gli aspetti del sistema DIC che possono essere modificati senza andare a riacquisire le immagini di calibrazione. Questo significa che se un qualsiasi tipo di regolazione, adattamento è stato fatto all'hardware del sistema ottico (fotocamere e lenti), allora le precedenti immagini acquisite devono essere scartate e deve essere acquisito un nuovo set di immagini di calibrazione. Cura e tempo durante questa fase della procedura possono salvare una straordinaria quantità di tempo successivamente.

3.1.6.1 Posizione del provino e delle fotocamere

Posizionare il provino nel telaio di prova. Posizionare le camere per ottenere il FOV desiderato, la ROI dell'immagine e l'angolo stereo (nel caso della 3D-DIC). Impostare il fuoco e il diaframma sulle lenti.

Per essere certi che il provino sia nel mezzo del DOF e che il fuoco sia costante attraverso la ROI, cominciare con il diaframma completamente aperto e regolare il fuoco in modo tale da trovare i limiti del DOF. Con il diaframma aperto, il DOF è limitato; in questo modo è più facile vedere quando il provino va fuori fuoco. Una volta che il focus è impostato, chiudiamo via via il diaframma sino a quando non si raggiunge il DOF desiderato.

3.1.6.2 Verificare il sistema ottico

Verificare il FOV, il fuoco e il DOF andando a traslare il provino all'interno della regione del FOV nella quale ci si aspetta che esso si muova e si deformi durante la prova.

3.1.6.3 Bloccare le componenti regolabili

Regolare l'orientazione dei filtri di polarizzazione nel caso in cui si stia usando la luce polarizzata trasversale. Bloccare la lunghezza focale, per la lente zoom, e gli anelli del diaframma se sistemi di bloccaggio sono inclusi sulle lenti.

3.1.6.4 Revisione delle immagini

Rivedere l'immagine del pattern utilizzando un'immagine live o un immagine statica acquisita. Cercare attentamente:

- Bagliore
- Controllare se il pattern sia troppo grossolano (cioè ci siano più di 3 caratteristiche per la dimensione del subset prevista) o troppo fine (cioè ci siano caratteristiche che sono più piccole di 3 pixel)
- Difetti nel pattern applicato (ad esempio graffi, macchie, oggetti estranei)
- Regioni dell'immagine fuori fuoco
- Contrasto non sufficiente
- Illuminazione non uniforme (o attraverso il FOV, nel tempo, o tra due fotocamere nella 3D-DIC)
- Regioni sovraesposte o sottoesposte
- Sporco sulla lente o sul rilevatore della fotocamere
- Vibrazioni o altri movimenti della fotocamera (alcuni dei quali possono essere rilevati effettuando uno zoom sull'immagine live e cercando movimenti non casuali)

Per un controllo ancora più attento del sistema DIC, correlare le immagini statiche del provino in quanto spesso i risultati di correlazione possono far emergere problemi che non sono altrimenti facilmente rilevabili attraverso un ispezione visiva delle immagini. Per le misurazioni 2D-DIC, controllare le immagini sequenziali correlate. Per le misurazioni 3D-DIC, dato che fino a questo momento il sistema stereo non è stato ancora calibrato, usare un software 2D-DIC per controllare le immagini sequenziali provenienti da ciascuna delle due fotocamere correlate.

3.1.6.5 Accettare il sistema DIC

Se il sistema DIC è considerato accettabile, allora è possibile procedere con la fase di calibrazione. Se ci fosse una qualsiasi caratteristica nelle immagini che è ritenuta insoddisfacente, regolare il sistema DIC per eliminarla. Successivamente, ripete il processo in modo iterativo, fino a quando non sono ottenute immagini completamente soddisfacenti.

Una volta ottenute immagini soddisfacenti, non modificare il sistema e fare particolare attenzione a non urtare le fotocamere, le lenti o il sistema di montaggio. Anche l'aggiunta o la

rimozione dei copriobiettivi, ad esempio, può cambiare leggermente la posizione della fotocamere o il fuoco delle lenti.

3.2 Calibrazione

3.2.1 Scopo della calibrazione

L'obiettivo della calibrazione di un sistema 2D-DIC è di stabilire la scala dell'immagine, cioè il numero di pixel presenti in un immagine che corrisponde ad una certa distanza fisica sul provino, e di correggere le distorsioni della lente.

L'obiettivo della calibrazione di un sistema 3D-DIC è di determinare i parametri intrinsechi di ciascuna fotocamera (cioè scala dell'immagine, lunghezza focale, centro dell'immagine, distorsioni della lente, ecc.) tanto bene quanto i parametri esterni (cioè angolo stereo, distanza tra le fotocamere, distanza tra le fotocamere e l'oggetto, ecc.).

Se le deformazioni sono la QOI primaria, allora la calibrazione di un sistema 2D è spesso trascurata e considerata non necessaria in quanto la deformazione è una quantità senza unità di misura e, pertanto, non è richiesta la scala dell'immagine per calcolarla. Tuttavia, trascurando di correggere le distorsioni della lente si potrebbe aggiungere un errore negli spostamenti misurati e provocare un errore addizionale nelle deformazioni calcolate.

Quando si usa una 2D-DIC, rilevare la grandezza delle distorsioni della lente per un dato sistema ottico acquisendo e correlando le immagini del pattern DIC nel momento in cui esso trasla in piano attraverso il FOV. È importante che la traslazione resti strettamente perpendicolare all'asse ottico; altrimenti, a causa di un movimento fuori dal piano, verranno coinvolte false deformazioni. Se gli errori dovuti alle distorsioni della lente fossero trascurabili (cioè insignificanti se comparati al rumore di fondo nel suo complesso), allora la calibrazione 2D può essere omessa. Se tali errori, invece, fossero significativi, allora la calibrazione è fortemente raccomandata al fine di determinare i parametri intrinsechi della fotocamera e correggere le distorsioni della lente.

Se tutta la calibrazione di un sistema 2D-DIC fosse omessa per correggere le distorsioni della lente, è comunque raccomandata una calibrazione semplificata al fine di stabilire la scala dell'immagine. Un valore approssimato della scala dell'immagine può essere calcolato dividendo il FOV con la risoluzione della fotocamera. È raccomandato, inoltre, di verificare la scala dell'immagine in entrambe le direzioni orizzontale e verticale.

3.2.2 Step generali della calibrazione

Prima di cominciare il processo di calibrazione vero e proprio, assicurarsi che tutti gli step nella revisione della pre-calibrazione del sistema DIC siano stati completati.

3.2.2.1 Selezionare il target di calibrazione

Selezionare il target di calibrazione di una dimensione appropriata. Consultare il manuale del software DIC per eventuali raccomandazioni riguardo la selezione di un appropriato target di calibrazione.

Idealmente, il target di calibrazione dovrebbe essere approssimativamente delle stesse dimensioni del FOV o leggermente più piccolo. Se non è disponibile alcun target di calibrazione che sia approssimativamente di tali dimensioni, allora sono possibili altre due opzioni. Una prima possibilità è quella di stampare il target correttamente dimensionato su carta utilizzando una stampante standard da ufficio e usare colla o nastro adesivo per far aderire il target di calibrazione in carta su un piatto rigido. In questo caso, la spaziatura dovrebbe avere una precisione di 0.1 pixel. Una seconda possibilità è quella di usare un target più piccolo: ad ogni modo, il target non dovrebbe essere più piccolo di circa la metà del FOV. In questo caso, saranno richieste delle immagini di calibrazione addizionale al fine di avere un numero sufficiente di caratteristiche ben estratte nell'intero volume di lavoro del sistema ottico.

Il ridimensionamento delle coordinate e degli spostamenti DIC dai pixel alle unità fisiche (ad esempio millimetri) dipende completamente dall'accuratezza e precisione delle misure della spaziatura sul target di calibrazione. Se il ridimensionamento alle unità fisiche è un aspetto critico delle misurazioni, che deve essere necessariamente fatto, allora è raccomandato di usare dei target di calibrazioni che sono stati misurati indipendentemente e che siano metrologicamente riconducibili al Sistema Internazionale di Misura (SI).

3.2.2.2 Spazio di lavoro libero

Creare uno spazio di lavoro libero nel quale eseguire la calibrazione, così che il target di calibrazione selezionato possa essere tenuto, ruotato, inclinato e traslato secondo necessità (i requisiti saranno differenti per la calibrazione della 2D-DIC e della 3D-DIC) a una SOD che sia approssimativamente la stessa del provino.

Ci sono due strategie per creare uno spazio di lavoro libero:

- 1. Rimuovere il provino dal telaio di prova e spostare indietro le pinze (se necessario).
- 2. Muovere il sistema DIC. Se questo fosse necessario, allora sarebbe raccomandato:
 - Muovere il sistema lungo solo un singolo grado li libertà, come traslare l'impianto all'indietro lontano dal telaio di prova o ruotare l'asta sulla quale sono montate le due fotocamere. È anche consentito muovere il sistema lungo due o più gradi di libertà (ad esempio ruotando e traslando, o traslando lungo due direzioni) ma è una soluzione che non si preferisce alla prima.
 - Se possibile, calibrare le fotocamere nella stessa orientazione (cioè orizzontale o verticale) di quando saranno montate durante la prova. Se l'orientazione cambiasse tra la calibrazione e la prova, le ottiche all'interno della lente potrebbero spostarsi leggermente cambiando il fuoco, il diaframma, lo zoom, ecc.

Se il sistema DIC viene mosso, è imperativo che le due fotocamere stereo siano mosse come una coppia rigida e che non ci sia un movimento relativo tra le due. Assicurare che le due fotocamere siano rigidamente bloccate insieme durante qualsiasi regolazione della posizione dell'impianto stereo. Qualsiasi movimento relativo tra le due fotocamere, anche piccoli cambiamenti dell'ordine del micrometro, durante la calibrazione o quando si riposizionano le fotocamere a seguito della calibrazione, può provocare errori nelle misure DIC.

Dopo che il campione di prova e/o il sistema stereo vengono riposizionati nel punto in cui devono essere usati per effettuare le misure, è sempre raccomandata una verifica della

calibrazione per assicurare che durante tale spostamento non si siano verificati dei movimenti relati tra le due fotocamere.

3.2.2.3 Regolare l'illuminazione

Assicurare che il contrasto sia sufficiente e uniforme lungo l'intero target di calibrazione e che non ci sia alcun bagliore per tutte le posizioni e orientazioni del target desiderate. Queste condizioni dovrebbero essere vere per entrambe le fotocamere nel caso della 3D-DIC. Regolare l'illuminazione e/o il tempo di esposizione se necessario.

L'illuminazione e l'esposizione per le immagini di misurazione DIC reali del pattern DIC e per il target di calibrazione sono completamente indipendenti. Per esempio, alcuni target di calibrazione richiedono una retroilluminazione, la quale è necessariamente differente dall'illuminazione richiesta per le immagini del provino durante la prova meccanica. Inoltre, si può avere la necessità che l'illuminazione e/o l'esposizione siano regolate per differenti posizioni/orientazioni del target di calibrazioni. Inoltre, la luce polarizzata trasversale può essere utilizzata per eliminare bagliori dal target.

Osserviamo che mentre l'illuminazione e l'esposizione possono essere regolati, il diaframma e il fuoco non possono essere regolati tra le immagini di calibrazioni e tra le immagini di misurazione DIC del pattern DIC.

3.2.2.4 Acquisire immagini di calibrazione

Acquisire immagini di calibrazione in modo che ci siano caratteristiche ben estratte nell'intero volume di lavoro del sistema ottico, cioè un volume delineato dal FOV e dal DOF.

Sebbene ci siano leggere variazioni per diversi pacchetti software, tipicamente le posizioni e le orientazioni del target di calibrazione raccomandate per la 3D-DIC sono le seguenti:

- 1. Ruotare attorno all'asse orizzontale dell'immagine.
- 2. Ruotare attorno all'asse verticale dell'immagine.
- 3. Muoversi verso e lontano da ciascuna fotocamera, lungo il loro asse ottico.

- 4. Se il target di calibrazione è più piccolo del FOV, traslare orizzontalmente e verticalmente così che le caratteristiche dal target di calibrazione riempiano l'intero FOV di ciascuna fotocamera.
- 5. Ruotare di 90 gradi attorno all'asse ottico e ripetere gli step di sopra.
- Eseguire la combinazione delle posizioni e delle orientazioni di cui sopra (cioè ruotare attorno agli assi orizzontale e verticale simultaneamente mentre ci si muove lungo l'asse ottico).

Il numero di immagini di calibrazione richiesto o raccomandato dipende dal target di calibrazione e dal software DIC, variando da 8 a 50-100 immagini. I target di calibrazione tridimensionali (target che hanno caratteristiche su due piani differenti) possono richiedere un numero di immagini più basso dei target di calibrazione bidimensionali (target che hanno caratteristiche su un singolo piano). Consultare il manuale utente del software per procedure specifiche del software.

Idealmente, è raccomandato l'utilizzo di un supporto rigido per il target di calibrazione, in maniera molto simile a quanto accade al provino durante la prova meccanica, in modo tale da assicurare che il target di calibrazione sia stazionario quando le immagini vengono acquisite. Nei casi in cui l'utilizzo di un supporto rigido non è praticabile, mantenere i target di calibrazione con la mano è spesso anche accettabile. In questo caso, le mani devono essere assicurate a qualcosa di rigido e il tempo di esposizione deve essere limitato a 25 ms o meno per ridurre la sfocatura del movimento. Mantenere i target di calibrazione con la mano non è raccomandato nel caso di FOV più piccoli di circa 25 mm in quanto anche piccoli movimenti del target possono provare immagini sfocate.

È molto più importante avere immagini di alta qualità (cioè a fuoco, con buon contrasto, senza bagliori, che riempiono l'intero volume di lavoro del sistema ottico, ecc.) piuttosto che avere un elevato numero di immagini.

Alcuni pacchetti software mostrano una valutazione live della qualità dell'estrazione delle caratteristiche del target di calibrazione e acquisiscono un immagine solo se le caratteristiche sono ben estratte. Altri pacchetti software estraggono le caratteristiche solo dopo che tutte le immagini di calibrazione sono state acquisite. Sebbene la seconda metodologia qui illustrata consenta di ottenere un maggior numero di immagini, è bene precisare che molte di esse

dovranno poi essere scartate a causa della bassa qualità. Bisogna però stare attenti a non scartare tutte le immagini da una certa regione del volume di lavoro del sistema ottico.

Per la 3D-DIC, la procedura di calibrazione può essere intesa come un processo di minimizzazione che cerca di trovare il miglior set di parametri intrinsechi ed esterni, dato un set estratto di caratteristiche di calibrazione. Diversi pacchetti software hanno differenti metriche o "punteggi" per i valori dei parametri finali ottenuti dalla minimizzazione. Spesso, è possibile avere un punteggio migliore utilizzando poche immagini o un volume di lavoro più piccolo riempito dalle caratteristiche del target di calibrazione. Questo scenario è analogo all'ottenere un coefficiente di determinazione (valore R^2) più elevato di un adattamento polinomiale di un set di dati quando vengono utilizzati meno punti. Tuttavia, se nel processo di minimizzazione è utilizzato un numero ridotto di punti, i valori finali dei parametri possono non rappresentare fedelmente il sistema ottico.

Pertanto, è consigliabile prendere un numero di immagini sufficienti ad avere caratteristiche che riempiano il volume di lavoro del sistema ottico, anche se il "punteggio" della calibrazione con più immagini che coprono un volume più grande è peggiore di quello ottenuto con poche immagini che coprono un volume più piccolo.

3.2.2.5 Calibrare il sistema

Selezionare una fotocamera o un modello di distorsione della lente appropriato e calibrare il sistema con il software DIC di scelta. Riferirsi al manuale del software per dettagli sul processo di calibrazione.

3.2.2.6 Revisione dei risultati di calibrazione

Questa revisione dipende dal software utilizzato quindi come sempre consultare il manuale utente per specifici suggerimenti per il software DIC. Alcuni possibili aspetti dei risultati di calibrazione da rivedere (se il software fornisce l'accesso a tali aspetti) includono:

> Controllare le immagini o le caratteristiche che sono state rigettate e vedere se ci sono delle ragioni ovvie per cui ciò è accaduto. Questo è particolarmente istruttivo per i nuovi utenti e/o per gli utenti esperti che lavorano con configurazione hardware nuove. Questo può migliorare l'abilità dell'utente a

produrre immagini di calibrazioni di qualità migliore in futuro imparando cosa non fare (cioè l'utente può vedere gli effetti di un'illuminazione povera o dei riflessi, posizionamento delle dita o del supporto che bloccano la rilevazione di caratteristiche chiave del target, immagini sfocate, ecc.).

- Verificare che le rimanenti immagini accettate riempiano ancora il volume di lavoro del sistema ottico. Questo ci permette di assicurare che le immagini rigettate non provengano tute dalla stessa regione del volume o dallo stesso angolo del target di calibrazione.
- Verificare che le caratteristiche estratte dalle immagini accettate siano corrette.
 Per esempio, alcune volte, il software estrarrà una caratteristica che è in realtà uno sporco o un bagliore sul target di calibrazione.
- Comparare il punteggio della calibrazione da singole immagini con il punteggio della calibrazione finale. Nel caso in cui si usi la 3D-DIC, comparare anche il punteggio di calibrazione per una data immagine da ciascuna fotocamera. Considerare di rimuovere manualmente quelle immagini per le quali il punteggio individuale è significativamente più grande del punteggio globale o significativamente diverso tra le due fotocamere. In alternativa, considerare di rimuovere singole caratteristiche estratte così che il singolo punteggio dell'immagine sia messo alla pari del punteggio globale.
- Se possibile, salvare una copia dei punteggi di calibrazione delle singole immagini, oltre al punteggio globale e ai risultati di calibrazione. Questa informazione può essere utile in problemi di diagnosi successivi nell'analisi o in problemi con una fotocamera e lente contro altre.
- Alcuni pacchetti software DIC allerteranno l'utente di possibili errori di sincronizzazione dopo che la procedura di calibrazione sia completa. Gli errori di sincronizzazione solitamente si verificano solo se l'utente sta utilizzando un target di calibrazione mantenuto a mano e non da supporto in per il quale il movimento non è completamente bloccato quando le immagini sono acquisite, oppure se le vibrazioni stanno causando un significativo movimento della fotocamera. Come tool di diagnostica, se si sospetta la presenza di errori di sincronizzazione o di vibrazioni della fotocamera, si possono calibrare i parametri intrinsechi per ciascuna fotocamera singolarmente. Se ogni

fotocamera può essere calibrata singolarmente con un accettabile punteggio di calibrazione, ma i parametri esterni del sistema stereo non possono essere calibrati, oppure se il punteggio di calibrazione del sistema stereo non è accettabile se comparato ai punteggi delle singole calibrazioni della fotocamera, allora è probabile che ci sia un errore di sincronizzazione o vibrazioni della fotocamera.

Il controllo che l'utente ha e il numero di input definiti dall'utente in un processo di calibrazione varia con i differenti pacchetti software DIC. Per esempio, alcuni software consentono all'utente di selezionare la soglia per estrarre caratteristiche dal target di calibrazione o di definire il modello di distorsione della lente che è utilizzato; altri software si comportano come dei black box (cioè sistemi chiusi) con immagini di calibrazione come input e il modello di fotocamera calibrato e il punteggio di calibrazione come output.

3.2.2.7 Revisione dei parametri di calibrazione

Confrontare i valori dei parametri di calibrazione con i corrispettivi valori fisici.

Tipicamente i parametri da controllare includono;

- Centro dell'immagine: Per la maggior parte delle combinazioni tra fotocamere e lenti a lunghezza focale fissa, l'intersezione dell'asse ottico con il rilevatore dovrebbe essere vicino al centro del vettore del rilevatore (ad esempio se usassimo una fotocamera da 5 MP che è 2448 x 2048 pixel, il centro dell'immagine calibrata dovrebbe essere vicino a (1224,1024)). Questo dovrebbe essere vero per entrambe le fotocamere della coppia stereo, se viene utilizzato lo stesso tipo di fotocamera e di lente. Quando si usa una lente zoom, tuttavia, è comune per l'asse ottico essere lontano dal centro dell'immagine a causa della complessità delle ottiche all'interno della lente.
- Lunghezza focale della lente: La lunghezza focale calibrata della lente, in unità fisiche, può essere comparata alla riportata lunghezza focale della lente fisica. Notare che la lunghezza focale della lente fisica riportata dal produttore della lente può solo essere un valore approssimato della reale lunghezza focale della

lente (ad esempio un produttore può definire una lente da 50 mm quando in realtà la lunghezza focale è di 47.5 mm). Se la lunghezza focale calibrata della lente è riportata in pixel, essa può essere convertita alle unità fisiche moltiplicandola per la dimensione del pixel del rilevatore della fotocamera in unità fisiche.

- Angoli: L'angolo stereo riportato dovrebbe essere approssimativamente lo stesso dell'angolo fisico tra le due fotocamere. Gli altri due angoli dovrebbero essere approssimativamente zero se il piano stereo è perpendicolare al provino come già descritto quando si è parlato di orientazione standard del sistema stereo.
- **Distanza tra le due fotocamere:** La distanza in linea retta riportata tra le due fotocamere dovrebbe essere approssimativamente la stessa distanza tra i rilevatori delle due fotocamere.

Poiché i valori fisici sono spesso difficili da misurare in modo preciso, questa revisione è una valutazione molto ampia, per essere sicuri che i parametri di calibrazione siano nel corretto intervallo, piuttosto che un confronto molto preciso tra i parametri di calibrazione e i corrispondenti valori fisici. Inoltre, il monitoraggio di questi valori per sistemi che non vengono modificati/regolati può portare all'esperienza dell'utente e a intervalli più ristretti su ciò che è considerato accettabile.

3.3 Routine post-calibrazione

La routine post-calibrazione descritta in questa sezione ha tre scopi: verificare la calibrazione del sistema ottico, acquisire le immagini per l'analisi del rumore di fondo e effettuare una revisione finale del sistema DIC prima di condurre la prova meccanica con le misure DIC.

3.3.1 Immagini per verifica della calibrazione e analisi del rumore di fondo

3.3.1.1 Resettare il sistema

Riposizionare il provino se è stato rimoso per prendere le immagini di calibrazione. Se il sistema stereo è stato mosso per prendere le immagini di calibrazione, riposizionarlo nella sua posizione normale per vedere il provino ed essere sicuri di bloccare qualsiasi movimento di componenti sul sistema di montaggio.

3.3.1.2 Regolare l'illuminazione

Se l'illuminazione e/o l'esposizione sono state regolate per le immagini di calibrazione, regolare nuovamente l'illuminazione e/o l'esposizione per il pattern DIC sul provino.

3.3.1.3 Acquisire immagini statiche

Idealmente, le immagini statiche dovrebbero essere acquisite allo stesso frame rate usato per la prova e per la stessa durata della prova al fine di catturare le sorgenti rappresentative del rumore o dell'errore. Per esempio, vibrazioni ad alta frequenza non possono essere rappresentate se le immagini sono acquisite ad un basso frame rate. In alternativa, errori a bassa frequenza, come le onde calde o la deriva della fotocamera, non possono essere rappresentate se le immagini sono acquisite per un breve periodo. Inoltre, per alcune fotocamere, il rumore della fotocamera è una funzione del frame rate.

Tuttavia, acquisire immagini statiche allo stesso frame rate e per la stessa durata della prova duplica la quantità di dati che devono essere memorizzati e processati, il quale può essere non banale per molte misurazioni DIC, in cui sono accumulati gigabyte di immagini e dati processati. Perciò, il numero e il timing delle immagini statiche è spesso un compromesso tra la rappresentazione delle sorgenti di rumore presenti nella misurazione DIC e considerazioni pratiche sulla dimensione dei dati.

Una possibile strategia per minimizzare il numero di immagini richieste per il rumore di fondo è quella di acquisire una raffica di immagini al frame rate desiderato all'inizio e alla fine del tempo di durata della prova. In questo modo, sia le sorgenti di errore ad alta frequenza che a bassa frequenza sono catturate nelle immagini statiche.

3.3.1.4 Revisione delle immagini

Eseguire una revisione finale delle immagini e risolvere qualsiasi problema venga riscontrato.

3.3.1.5 Acquisire immagini di movimento del corpo rigido

Traslare rigidamente e ruotare il provino e acquisire immagini addizionali.

Le traslazioni/rotazioni applicate possono essere applicate sia con mano, nel caso in cui non si conoscano gli esatti spostamenti applicati, sia con moduli di traslazione/rotazione con micrometri, in modo tale che gli spostamenti applicati siano noti all'interno dell'incertezza del modulo.

Per la 2D-DIC, catturare sia le traslazioni nel piano sia quelle fuori dal piano e le rotazioni. I due gruppi di immagini devono essere mantenuti separati così che gli effetti del movimento in piano e fuori dal piano possano essere analizzati indipendentemente. Le immagini in piano saranno usate per verificare l'adeguata correzione delle distorsioni della lente e per calcolare il rumore di fondo delle QOIs. I movimenti fuori dal piano saranno usati per stimare gli errori di bias causati dal movimento fuori dal piano durante la prova meccanica.

3.3.2 Verifica della calibrazione

Correlare le immagini statiche e di traslazione rigida e verificare i risultati di calibrazione usando i metodi descritti in questa sezione. Se viene stabilito che la calibrazione non è soddisfacente sulla base delle seguenti metriche, migliorare la calibrazione prima di continuare. In caso contrario, accettare la calibrazione e procedere alla revisione della post-calibrazione del sistema.

Tale miglioramento potrebbe richiedere di regolare parametri specifici del software durante la procedura di calibrazione, di prendere immagini di calibrazione addizionali o di regolare l'hardware del sistema ottico (telecamere e lenti).

Nel caso in cui si effettuasse una regolazione della componente hardware del sistema ottico, le immagini precedentemente acquisite devono essere scartate, ne deve essere acquisito un set completamente nuovo e il processo di calibrazione deve essere rieseguito.

I parametri finali definiti dall'utente DIC, cioè dimensione del subset, dimensione dello step, deformazione virtuale, gauge size, ecc., non saranno selezionati prima che la prova meccanica reale sia eseguita e che l'analisi del rumore di fondo sia stata completata. Perciò, a questo punto, utilizzare le impostazione predefinite fornite dal software, o dal giudizio di un esperto o da esperienza passata, per selezionare parametri ragionevoli per la correlazione delle immagini statiche e di traslazione con lo scopo di verificare la calibrazione ed eseguire una revisione finale del sistema DIC.

3.3.2.1 Parametri intrinsechi

Lo scopo principale della verifica dei parametri intrinseci è verificare che le distorsioni della lente siano propriamente corrette. Correlare le immagini di traslazione acquisite e rimuovere il moto di corpo rigido. Le distorsioni della lente si manifesteranno sotto forma di ellissi nei plot del profilo di spostamento e deformazione.

La valutazione delle distorsioni della lente è soggettiva. Confrontare la grandezza degli errori provenienti dalle distorsioni della lente con il rumore di fondo totale degli spostamenti e delle deformazione. Se gli errori dalle distorsioni della lente sono significativi se comparati al rumore di fondo, regolare il tipo e/o la grandezza della correzione di distorsione nella procedura di calibrazione. Se le distorsioni non possono essere rimosse attraverso il processo di correzione nella procedura di calibrazione, allora bisognerà implementare una procedura di correzione personalizzata, rivedere la scelta del sistema ottico (lente e telecamera) e/o limitare la ROI dell'immagine, in termini di dimensionamento e movimento, alla sola porzione del FOV con un livello di distorsione accettabile.

Per la 2D-DIC, è importante che le immagini di traslazione siano strettamente perpendicolari all'asse ottimo. In caso contrario, con le distorsioni della lente verranno coinvolte false deformazioni a causa del movimento fuori dal piano e le immagini di traslazione non possono essere utilizzate per verificare le distorsioni della lente.

3.3.2.1 Parametri esterni

I parametri esterni sono applicabili solo per la 3D-DIC e non sono applicabili per la 2D-DIC. La metrica primaria per verificare i parametri esterni è l'errore epipolare. Dipendendo dal software DIC, l'errore epipolare può essere chiamato con un nome differente, come errore di proiezione, residuo tridimensionale, errore di intersezione o deviazione di correlazione. Ci sono leggere differenze in come queste metriche sono calcolate nei diversi pacchetti software ma il principio di base è universale.

Per verificare i parametri esterni, correlare le immagini statiche (e le immagini di traslazione se disponibili) acquisite e verificare che l'errore epipolare sia accettabile basandosi sulla documentazione del software DIC.

Non c'è una singola e fissata soglia per l'errore epipolare che separi calibrazioni "buone" da calibrazioni "cattive". Piuttosto, c'è una relazione diretta tra gli errori epipolari e gli errori nelle misure DIC: errori epipolari più grandi corrispondono a errori nelle misure DIC più grandi. Come regola generale, però, l'errore epipolare dovrebbe essere tipicamente nell'ordine del punteggio della calibrazione; se l'errore epipolare fosse significativamente più grande del punteggio di calibrazione, la causa di questo dovrebbe essere studiata e rettificata.

Alcuni pacchetti software DIC riportano solo l'errore epipolare medio sulla ROI dell'immagine mentre altri riportano l'errore epipolare per ogni subset. Se il software DIC riporta l'errore epipolare risolto spazialmente, allora l'errore epipolare può essere usato aggiuntivamente per valutare il pattern DIC e l'illuminazione.

Anche le distorsioni della lente, oltre ai parametri esterni, influenzeranno l'errore epipolare. Tuttavia, se le distorsioni della lente sono propriamente correte e i parametri intrinseci di calibrazione sono verificati, allora l'errore epipolare è correlato in primis ai parametri esterni di calibrazione.

3.3.2.3 Distanze assolute

Verificare che le misure DIC stiano riportando valori accurati per distanze assolute.

Alcune metriche suggerite includono, ma non sono limitate a:

- Fiducial Marks: Se vengono posizionati sul provino dei fiducial marks ad una distanza nota, confrontare la distanza tra i fiducial marks calcolati del software DIC nella correlazione di immagini statiche o di traslazione con la distanza conosciuta. Questa è solamente una valutazione approssimata, dato che la distanza calcolata dalla triangolazione è nota al massimo entro +/- 1 pixel, a causa della selezione manuale del dentro dei fiducial marks, e c'è anche qualche incertezza sulla distanza conosciuta.
- Spostamenti Applicati: Se gli spostamenti applicati sono noti per le immagini di traslazione rigida, confrontare i risultati DIC con gli spostamenti applicati. Questa è in genere solo una valutazione approssimativa, dato che, se viene utilizzato un modulo di traslazione standard micrometrico, la precisione dei risultati DIC è tipicamente superiore a quella degli spostamenti "noti".

3.3.3 Revisione della post-calibrazione del sistema

Eseguire una revisione finale del sistema DIC. Se un qualsiasi aspetto del sistema DIC dovesse risultare insoddisfacente basandosi sulla revisione finale del sistema, regolare il sistema e revisionarlo nuovamente.

3.3.3.1 Rumore di fondo

Eseguire una breve analisi del rumore di fondo e verificare che il rumore di fondo delle QOIs sia accettabile.

Un'analisi completa del rumore di fondo richiederebbe moltissimo tempo e anche la conoscenza a priori della deformazione del provino, al fine di selezionare i parametri definiti dall'utente DIC come la dimensione del subset, la dimensione dello step, ecc. Ecco perché è raccomandata, prima di condurre la prova meccanica, un'analisi del rumore di fondo che sia breve.

Calcolare la deviazione standard spaziale delle QOIs a partire dalle immagini statiche acquisite precedentemente. Se le immagini sono state acquisite al frame rate desiderato della prova reale, calcolare anche la deviazione standard temporale. Verificare che le deviazioni standard (cioè il rumore di fondo) siano accettabili.

3.3.3.2 Onde calde

Controllare la presenza di eventuali onde calde nei plot del profilo dello spostamento a partire dalle immagini statiche. Se sono presenti onde calde significative, modificare la misurazione DIC e/o la configurazione della prova meccanica per minimizzarle.

3.3.3.3 Stabilità

Se dovesse passare un significativo lasso di tempo tra la calibrazione del sistema e l'esecuzione della prova meccanica, considerare di prendere nuovamente le immagini statiche e di ricontrollare la calibrazione della fotocamera. Un qualsiasi incremento nell'errore epipolare o nel rumore di fondo deve essere indagato e rettificato.

3.3.3.4 Altre verifiche

In aggiunta alle linee guida qui illustrate, singoli utenti o laboratori possono avere procedure addizionali interne che includano dettagli specifici delle configurazioni della prova meccanica, dell'attrezzatura e del software che sono comunemente utilizzati in ogni laboratorio. Come buona pratica, se dovessero essere adottate delle procedure interne, si raccomanda di documentare tali procedure e di stabilire dei criteri per determinare se una specifica calibrazione e/o un rumore di fondo siano accettabili per gli scopi perseguiti nella misurazione DIC. Questo aiuterà a prevenire perdite di tempo e di risorse nel completare le misurazioni DIC durante una prova meccanica, per poi realizzare solo successivamente che le immagini acquisite fossero insoddisfacenti.

Capitolo 4

Esecuzione della prova con misurazioni DIC

Una volta che tutti i dettagli della configurazione della misurazione DIC e della configurazione della prova meccanica sono stati finalizzati e le fotocamere sono state calibrate, la prova meccanica vera e propria può essere condotta. Prima di procedere però, rivedere tutti i sistemi di acquisizione dati, come:

- Il nome del file, la posizione e la capacità di archiviazione corretti per le immagini DIC siano stati impostati.
- La procedura di prova o la macro corretta siano stati selezionati.
- I segnali di forza e di altre misure provenienti dal modulo di prova vengono impostati per la registrazione e sono sincronizzati con le immagini DIC.
- L'attivazione del modulo di prova e/o delle immagini DIC è pronta. Bisogna sempre assicurarsi di aver acquisito almeno un immagine del provino prima che qualsiasi forza o spostamento venga applicato.
- Le luci sono accese, l'esposizione è corretta e il frame rate è corretto.

Capitolo 5 Elaborazione delle immagini DIC

5.1 Software DIC

Una volta che la prova meccanica è stata eseguita e le immagini DIC sono state acquisite, esse vengono elaborate usando un software DIC. Ci sono sia pacchetti DIC commerciali (tipicamente definiti closed-source) sia software sviluppati indipendentemente (tipicamente definiti open-source). La scelta del software dipende completamente dall'utente ed egli viene indirizzato al manuale del software per dettagli specifici su come usarlo.

5.2 Parametri definiti dall'utente

Ci sono molti parametri definiti dall'utente nella procedura di analisi DIC che devono essere selezionati. L'utente dovrebbe fare riferimento al manuale del software DIC di scelta per maggiori dettagli specifici del software.

5.2.1 Immagine di riferimento

La DIC segue il movimento, in senso lagrangiano, di una serie di punti di interrogazione definiti su un immagine di riferimento. Ci sono tre approcci per selezionare un immagine di riferimento:

Singola immagine di riferimento: L'approccio più semplice e preferito per selezionare un immagine di riferimento è usare un immagine all'inizio della serie di un provino indeformato prima dell'applicazione di una qualsiasi forza o spostamento. Il movimento o lo spostamento dei punti di interrogazione è quindi tracciato nel tempo attraverso la correlazione di immagini successive sino ad arrivare all'immagine di riferimento iniziale. È fondamentale che il riferimento sia acquisito prima dell'applicazione di una qualsiasi forza o spostamento. Altrimenti, le misure DIC correlate rispetto all'immagine di riferimento saranno influenzate da una quantità sconosciuta.

- Correlazione incrementale: In alcuni casi, il pattern DIC può cambiare significativamente durante il corso della prova, così che il pattern DIC del provino deformato non possa essere correlato di nuovo all'immagine di riferimento iniziale del provino indeformato. In questa situazione, può essere usata la correlazione incrementale, dove ogni immagine è correlata alla precedente, piuttosto che alla stessa iniziale immagine di riferimento del provino indeformato. La correlazione incrementale fornisce spostamenti incrementali tra ciascuna immagine: pertanto, gli spostamenti totali, a partire dall'immagine di riferimento iniziale, saranno dati andando a calcolare la somma degli spostamenti incrementali. Perciò, lo svantaggio di utilizzare la correlazione incrementale è nel rischio che gli errori negli spostamenti totali siano anch'essi sommati e quindi diventano via via più grandi maggiore è il numero delle immagini.
- Correlazione partizionata: Come compromesso tra l'utilizzo di una singola immagine di riferimento del campione indeformato e la correlazione incrementale, la serie di immagini può essere partizionata in sotto-serie e le immagini in ciascuna sotto-serie sono correlate all'immagine iniziale di quella sotto-serie. Quindi, le immagini 2-100 possono essere correlate all'immagine 100; le immagini 201-300 possono essere correlate all'immagine 200; ecc. Lo spostamento totale dell'immagine 300, rispetto all'immagine 1 del provino indeformato è quindi dato dallo spostamento dell'immagine 300 rispetto alla 200 più lo spostamento dell'immagine 100 rispetto alla 1. Quindi, andando ad aggiornare periodicamente l'immagine di riferimento invece di utilizzare l'immagine precedente come accade nella correlazione incrementale, l'errore accumulato viene ridotto.

5.2.2 Pre-filtraggio delle immagini

Applicare un filtro digitale passa-basso (ad esempio un filtro Gaussiano) alle immagine prima di correlarle al fine di ammorbidire i bordi di un pattern DIC particolarmente acuto può essere benefico. Bisogna però tenere anche in conto che in alcuni casi l'utilizzo di un filtro passabasso possa avere degli effetti dannosi, come ad esempio alterare i risultati. Perciò, i praticanti DIC dovrebbero essere giudiziosi nell'utilizzo dei filtri digitali.

I filtri passa-basso sono anche conosciuti per ridurre gli effetti delle caratteristiche del pattern DIC che sono più piccole di 3 pixel. Notare, perciò, che i filtri fisici anti-aliasing e i filtri digitali passa-basso sono fondamentalmente differenti. I primi prevengono l'aliasing nel mondo analogico, così che nessuna informazione aliasata sia codificata nelle immagini. I secondi provano a ridurre gli effetti dell'aliasing nel monto digitale, dopo che l'informazione aliasata è stata codificata nelle immagini.

Se un filtro fisico anti-aliasing è stato utilizzato durante l'acquisizione dell'immagine, il prefiltraggio digitale non è raccomandato.

5.2.3 Funzione di forma del subset

Alcuni pacchetti software DIC fissano la funzione di forma del subset che viene utilizzata, mentre altri consentono all'utente di scegliere questo parametro. Quando si selezione una funzione di forma, c'è un compromesso tra il filtraggio del rumore e l'accuratezza. Funzioni di forma di ordine più basso cancellano più rumore ma hanno un accuratezza nel complesso più bassa. Al contrario, funzioni di forma di ordine superiore (per esempio quadratiche, cubiche, ecc.) sono più accurate ma la deviazione standard della soluzione sarà più grande. Un secondo punto di vista consiste nell'utilizzare subset piccoli e ravvicinati con funzioni di forma di ordine basso. Un utente avanzato potrebbe esplorare le differenti opzioni e combinazione e valutare quale sia la migliore per la sua applicazione.

5.2.4 Interpolante

Per ottenere un'accuratezza sub-pixel delle misure DIC è richiesta l'interpolazione dell'intensità dell'immagine tra i pixel. Perciò, la qualità dell'interpolazione ha un'influenza significativa sulla precisione e sull'accuratezza delle misure DIC. I pacchetti DIC più commerciali hanno interpolanti ottimizzati.

5.2.5 Dimensione del subset

Parlando a grandi linee, un subset dovrebbe essere grande abbastanza da contenere informazioni sufficienti così che un subset possa essere distinto da tutti gli altri nella ROI. La regola pratica è che il subset deve contenere un minimo di tre caratteristiche del pattern DIC. Se le caratteristiche sono nell'intervallo ottimale delle dimensioni, che abbiamo visto essere 3-5 pixel, e la densità della caratteristica è approssimativamente del 50%, allora sono richiesti subset di una dimensione di circa 15 x 15 pixel² (cioè è realizzabile un minimo di tre transizioni tra caratteristiche del pattern chiare e scure in tutte le direzioni). Se le caratteristiche sono più grandi e/o la densità delle stesse è più bassa, la dimensione del subset deve essere aumentata.

Solitamente si raccomanda una dimensione del subset più grande pari a 21 x 21 pixel² come dimensione minima più pratica per le misurazioni DIC. Questo è particolarmente vero se la dimensione del pattern DIC e la densità sono variabili e non costanti sull'intera ROI.

5.2.6 Dimensione dello step

La dimensione dello step controlla la densità dei punti in cui vengono calcolati i dati DIC e in una certa misura influenza anche la risoluzione spaziale delle misure. Tipicamente, si consiglia una dimensione dello step che va da un terzo a un mezzo della dimensione del subset, così che i subset adiacenti si sovrappongano parzialmente, sebbene questo valore possa variare ampiamente a seconda dell'applicazione specifica. Come regola generale, se la sovrapposizione è maggiore di circa un terzo della dimensione del subset, allora i punti adiacenti non sono più considerati indipendenti, e diminuire ulteriormente la dimensione dello step non migliora la risoluzione spaziale delle misurazioni. Ad ogni modo, un piccolo step (in congiunzione a un piccolo subset) può consentire di ottenere dati vicino agli spigoli o ad altri punti critici del provino, anche se la sovrapposizione è grande e i subset adiacenti non sono indipendenti. In aggiunta, un piccolo step potrebbe essere richiesto per catturare la posizione del picco di una QOI (senza interpolazione) se essa varia velocemente lungo la ROI. (Notare, comunque, che la grandezza del picco di una QOI che varia spazialmente potrebbe essere ancora smorzata o sottostimata a causa delle effetto del filtro passa-basso, se la risoluzione spaziale non è sufficiente a catturare i gradienti delle QOIs). Se la QOI varia lentamente lungo la ROI, allora può essere usato uno step più grande così che si riduca il numero di punti di acquisizione dati e, perciò, ridurre il tempo di computazione. (Anche se la QOI varia lentamente lungo la ROI, si consiglia di utilizzare la massima dimensione dello step uguale a quella del subset al fine di generare un terreno dati quasi contino senza l'interpolazione).

5.2.7 Soglie

Un software DIC tipicamente consente all'utente di selezionare differenti soglie che sono utilizzate per determinare la qualità e la fiducia dei risultati di spostamento per ogni subset. Le sogli disponibili sono software-dipendenti, ma le due soglie principali includono il valore del criterio di corrispondenza e l'errore epipolare. Il primo è una misura di quanto la corrispondenza tra l'immagine di riferimento e un immagine deformata (o tra le fotocamere di sinistra e destra per la 3D-DIC) sia buona. Il secondo, il quale si applica solo alla 3D-DIC, è una misura di quanto bene i risultati di correlazioni sono in accordo con la calibrazione del sistema. Qualunque risultato di spostamento sia al di sopra dei valori di soglia viene rimosso dai risultati riportati. Aumentare i valori di soglia consente di mantenere più risultati di spostamento ma al costo di una maggiore incertezza nei risultati.

5.3 Calcoli della deformazione

Ci sono molti diversi approcci nel calcolare la deformazione a partire dagli spostamenti, che dipendono dallo specifico software DIC che viene utilizzato. In ogni approccio, ci sono differenti parametri definiti dall'utente che possono essere selezionati nel software. Fare riferimento al manuale dell'utente per dettagli espliciti su come le deformazioni sono calcolate nel software DIC di scelta. In questa sezione, è definita il virtual strain gauge e sono brevemente descritti molteplici esempi rappresentativi dei metodi di calcolo della deformazione.

5.3.1 Virtual Strain Gauge (VSG)

Un elemento chiave e comune a tutti gli approcci per il calcolo della deformazione è il virtual strain gauge (VSG). Il VSG, parlando a grandi linee, è la regione locale dell'immagine che è utilizzata per il calcolo della deformazione in una posizione specifica. È analogo, sebbene non direttamente uguale, all'area fisica che un estensimetro a foglio copre. La deformazione calcolata in un software DIC è la media o la media ponderata della deformazione rispetto al VSG.

La dimensione esatta del VSG dipende dal metodo di computazione della deformazione usato nello specifico software. Anche per un dato metodo di computazione della deformazione, la dimensione esatta del VSG non è ben definita. Tuttavia, ci sono diverse variabili chiave che influenzano tale dimensione, come la dimensione dello step, la dimensione del subset, la funzione di forma del subset, la finestra di deformazione, la funzione di forma della deformazione esatta del filtro. Anche la risoluzione spaziale delle misure della deformazione è strettamente correlata alla dimensione del VSG.

5.3.2 Esempi di metodi di calcolo della deformazione

Qui, sono brevemente descritti quattro approcci generali per il calcolo della deformazione, rappresentativi dei diversi approcci implementati nei diversi pacchetti software DIC. Inoltre, sono evidenziati gli effetti dei diversi parametri definiti dall'utente sulla dimensione del VSG.

5.3.2.1 Funzione di forma del subset

Un approccio si basa sul calcolo della deformazione a partire direttamente dalla funzione di forma del subset e dalla forma del subset deformato. In questo metodo, la dimensione del VSG è approssimativamente uguale alla dimensione del subset, dando origine a una delle dimensioni del VSG più piccole di tutti i metodi per il calcolo della deformazione. Inoltre, nessun pre-filtraggio è applicato agli spostamenti. Una piccola dimensione del VSG e la mancanza di un pre-filtraggio portano ad un alta risoluzione spaziale delle misure di deformazione ma anche a risultati di deformazione rumorosi.

Dopo aver calcolato le deformazioni, queste possono essere post-filtrate per ridurre il rumore. Un tipo comune di post-filtro è la media di un insieme locale di punti dati, spesso con una funzione di ponderazione Gaussiana. La regione di punti dati che è inclusa in questo filtro è chiamata finestra del filtro. La dimensione del VSG può essere approssimata dalla seguente equazione se $L_{window} > 0$:

$$L_{VSG} = (L_{window} - 1)L_{step} + L_{subset}$$
(2)

Dove L_{window} è la dimensione della finestra del filtro, L_{step} è la dimensione dello step e L_{subset} è la dimensione del subset.

Per determinare la dimensione del VSG in termini di unità fisiche, L_{VSG} deve essere diviso per la scala di immagine media.

5.3.2.2 Funzioni di forma degli elementi Finiti

Un secondo approccio segue da vicino i calcoli di deformazione utilizzati nell'analisi agli elementi finiti. Sulla ROI dell'immagine di riferimento è definita una mesh triangolare che usa i punti dati dello spostamento (forniti al centro dei subset) come nodi della mesh. Usando le funzioni di forma degli elementi finiti definite su ogni elemento triangolare, la deformazione è calcolata a partire dalla forma deformata di ciascun elemento. A questo punto, la dimensione del VSG è piccola, approssimativamente uguale alla dimensione degli elementi triangolari (la quale è governata dalla dimensione dello step) più la dimensione del subset. Se non è stato eseguito alcun pre-filtraggio degli spostamenti, i risultati di deformazione provenienti da questo metodo sono generalmente rumorosi. Perciò, le deformazioni sono spesso post-filtrate per ridurre il rumore. Un tipo comune di post-filtro è la media di un insieme locale di punti dati, spesso con una funzione di ponderazione Gaussiana. La regione di punti dati che è inclusa in questo filtro è chiamata finestra del filtro. La dimensione del VSG può essere approssimata dalla stessa equazione utilizzata precedentemente.

Come leggera variazione dell'approccio di cui sopra, invece di calcolare la deformazione su ogni elemento triangolare singolarmente usando solo i tre nodi dell'elemento, la deformazione può essere calcolata utilizzando una regressione ai minimi quadrati su una regione più grande (cioè esagonale) che copre diversi elementi triangolari. Questa regione più grande è chiamata finestra di deformazione e ancora una volta utilizzeremo la stessa equazione dove, però, L_{window} è rappresentativa della dimensione della finestra di deformazione e non del filtro. Nella regressione ai minimi quadrati, può essere applicata una funzione di ponderazione ai punti dati di spostamento contenuti all'interno della finestra di deformazione, per esempio con una distribuzione Gaussiana centrata al centro della finestra di deformazione e che decade verso i

bordi della stessa. Calcolando la deformazione su una finestra di deformazione più grande che usa più punti dati, i risultati di deformazione sono meno rumorosi e il post-filtraggio delle deformazioni calcolate potrebbe essere non necessario.

5.3.2.3 Funzione di forma della deformazione

Un terzo approccio consiste nell'adattare una funzione di forma della deformazione agli spostamenti, il quale fornisce una descrizione analitica del campo di spostamento. Le deformazioni sono quindi calcolata a partire dalle derivate spaziali di questa equazione analitica. Adattare gli spostamenti alla funzione di forma della deformazione serve anche a filtrare gli spostamenti. Perciò, questo processo di adattamento può essere come un pre-filtraggio degli spostamenti prima di calcolare le deformazioni. La funzione di forma della deforma della funzione di forma della deformazione.

La regione locale dei punti dati inclusa nell'adattamento è chiamata finestra di deformazione. Tipicamente, le deformazioni sono calcolata nel centro di tale finestra. Una funzione di ponderazione può essere applicata ai punti dati di spostamento contenuti all'interno della finestra di deformazione, per esempio con una distribuzione Gaussiana centrata nel centro della finestra di deformazione e che decade verso i bordi della stessa. Ancora una volta la dimensione del VSG è approssimata dall'equazione vista precedentemente.

5.4 Quantificazione dell'incertezza

5.4.1 Panoramica

Ci sono due tipi di errori nelle misure DIC, cioè gli errori di varianza e gli errori di bias. Gli errori di varianza (anche chiamati rumore) si riferiscono ad errori casuali centrati con una media di circa il valore vero di una QOI. I bias si riferiscono a un offset della media dal valore vero. Le sorgenti principali di rumore nelle misurazioni DIC sono il rumore della fotocamera e gli errori di corrispondenza durante il processo di correlazione. I bias possono essere introdotti appiattendo i gradienti spaziali di una QOI, da distorsioni della lente non corrette, da un'impropria calibrazione della fotocamera (ad esempio se ci fosse un movimento relativo tra

le fotocamere in un sistema stereo dopo la calibrazione ma prima della prova meccanica) e il movimento fuori dal piano nella 2D-DIC, per nominarne alcune. Stabilire l'incertezza delle QOIs, considerando sia gli errori di bias che di rumore, è critico per una valutazione e uso intelligenti dei risultati DIC. Senza una quantificazione dell'incertezza, è impossibile conoscere se il valore della QOI riportato sia significativo e rilevante o se è il risultato di un rumore casuale o di un bias, e perciò insignificante.

Tuttavia, il bias spesso non è noto e gli errori di varianza calcolati a partire da immagini statiche acquisite prima della prova potrebbero non rappresentare correttamente gli errori di varianza presenti durante la prova. Perciò, le metriche a disposizione di un utilizzatore DIC per quantificare l'incertezza, spesso producono un'incertezza minima di una QOI piuttosto che una vera incertezza. Qui vengono suggerite diverse opzioni per le metriche che definiscono l'incertezza ma esistono anche altre definizioni per applicazioni specifiche e per differenti QOIs. La componente chiave è giustificare e documentare alcune metriche e valori per l'incertezza delle QOIs.

5.4.2 Errori di varianza

Il termine "errore di varianza" è usato intercambiabilmente con "rumore" e il processo di quantificazione degli errori di varianza è spesso chiamato analisi del rumore di fondo. L'idea alla base dell'analisi del rumore di fondo è di correlare le immagini statiche di un pattern DIC, che sono state acquisite sotto le stesse condizioni delle immagini di prova. Con nessuna forza applicata o spostamento sul provino, tutte le QOIs misurate che richiedono deformazione sono errori. Nessuna di quelle QOIs misurate nella prova meccanica vera e propria inferiori alle QOIs misurate a partire dalle immagini statiche è indistinguibile dal rumore.

Una significativa quota parte di errori di varianza nelle misurazioni DIC è data dal rumore della fotocamera. Il rumore del rilevatore della fotocamera, cioè fluttuazioni nel tempo nell'intensità del livello di grigio di un pixel che osserva un oggetto fisso, contribuisce direttamente al rumore nei risultati DIC. Perciò, può essere utile quantificare il rumore della fotocamera indipendentemente dal quantificare il rumore dei risultati DIC. Questo è in genere necessario solo quando si valuta il nuovo hardware per la sua idoneità per la DIC.

Valutare il rumore di fondo è un processo iterativo che è tipicamente eseguito molteplici volte usando sequenzialmente metriche e procedure di analisi più robuste durante la progettazione e l'esecuzione delle misurazioni DIC. Per aiutare nella selezione della fotocamera e della lente, nella scelta della tecnica di patterning, ecc. può essere completata una valutazione rudimentale durante la progettazione preliminare delle misurazioni. Una seconda e veloce valutazione può poi essere fatta durante la revisione della pre-calibrazione del sistema DIC o durante la revisione finale del sistema, prima che la prova venga eseguita. Una terza valutazione del rumore di fondo è eseguita iterativamente durante la processazione delle immagini DIC dopo che la prova meccanica è stata eseguita, al fine di valutare l'effetto dei parametri definiti dall'utente e il compromesso tra rumore e bias.

Ai fini della rendicontazione, la valutazione finale e più completa del rumore di fondo deve essere fatta usando le stesse condizioni della prova meccanica, sia in termini di condizioni fisiche (ad esempio selezione della fotocamera e della lente, illuminazione, temperatura della fotocamera, ventole di raffreddamento o di miscelazione, macchina di prova accesa) che di procedure di elaborazione dati (cioè pre-filtraggio delle immagini, dimensione del subset, dimensione dello step, dimensione del VSG, filtraggio spaziale o temporale dei dati, ecc.). Questo significa che le stesse impostazioni DIC selezionate dall'utente e che sono utilizzate per l'analisi delle immagini del provino durante il movimento/deformazione devono anche essere usate per l'analisi delle immagini del rumore di fondo. Perciò, l'analisi finale del rumore di fondo è tipicamente completata dopo che le immagini della prova meccanica siano state analizzate ma usando immagini che sono state acquisite immediatamente prima della prova meccanica.

Utilizzare i parametri finali definiti dall'utente DIC, analizzare tutte le immagini statiche che sono state acquisite dopo il processo di calibrazione. Calcolare le QOIs nello stesso modo che è stato utilizzato per l'analisi delle immagini della prova meccanica.

Per quantificare l'errore di varianza delle QOIs possono essere usate due metriche differenti: una deviazione standard spaziale e una deviazione standard temporale. Per quantificare la variazione spaziale della QOI, calcolare la deviazione standard della QOI per ciascun immagine. Quindi mediare questa deviazione standard spaziale nel tempo per tutte le immagini statiche. Per quantificare la variazione temporale, calcolare la deviazione standard della QOI per ogni subset nel tempo. Quindi mediare questa deviazione standard temporale per ogni subset per tutti i subset nella ROI dell'immagine.

Sebbene apparentemente simili a prima vista, queste due metriche differenti dell'errore forniscono visioni diverse del rumore di fondo, enfatizzando sia il rumore che varia spazialmente che quello che varia temporalmente. È raccomandato calcolare sia la deviazione standard spaziale che quella temporale e valutare se una è significativamente più grande dell'altra. Tuttavia, le deviazioni standard spaziale e temporale sono tipicamente simili e pertanto per quantificare il rumore di fondo è possibile selezionare una metrica singola oppure la media delle due.

Tipicamente, la deviazione standard tra le direzioni verticale e orizzontale è simile. È dunque raccomandato calcolare la deviazione standard per la QOI in ciascuna direzione e selezionare il massimo o la media tra le direzioni.

Data la deviazione standard della QOI, determinare il rumore di fondo come una funzione della deviazione standard utilizzando l'esperienza di un soggetto esperto in materia. Per esempio, alcune applicazioni potrebbero richiedere che tutte le misurazioni con grandezze della variazione inferiori a tre volte la deviazione standard siano considerate rumore; altre applicazioni possono allentare tale requisito così che solo le misurazioni con grandezza della variazione inferiori a una deviazione standard siano considerate rumore.

5.4.3 Errori di bias

Gli errori di bias sono spesso difficili da quantificare perché il valore vero di una QOI è tipicamente non noto. Tuttavia, alcune sorgenti di bias possono valutate e descritte. È importante notare che queste valutazione sono necessarie ma non sufficienti a chiarire gli errori di bias. Detto in un altro modo, gli errori di bias possono essere rilevati attraverso queste valutazioni e nel caso devono anche essere riportati; tuttavia, anche nel caso in cui nessun errore di bias venga rilevato, errori di bias sconosciuti potrebbero ancora esistere.

Una metrica dell'errore di bias della QOI è la media della QOI a partire dalle immagini statiche. Una media che cambia nel tempo potrebbe indicare un bias a causa della deriva della fotocamera, del riscaldamento della fotocamera (cioè le fotocamere non hanno ancora raggiungo la temperatura di equilibrio durante il riscaldamento), delle onde calde, delle vibrazioni, ecc.

Gli errori bias dovuti alle distorsioni della lente non corrette possono essere valutati a partire dalle immagini di traslazione rigida, se il moto di corpo rigido è approssimativamente della stessa grandezza del movimento e/o deformazione del provino durante la prova reale. I bias dovuti alle distorsioni della lente si manifesteranno sotto forma ellittica nei plot del profilo delle deformazioni (e degli spostamenti se lo spostamento medio o lo spostamento applicato noto è sottratto dal campo). Questo tipo di bias è tipicamente più piccolo nel centro del FOV e più grande vicino ai bordi a causa della forma prevalentemente radiale delle distorsioni della lente.

Per la 2D-DIC, dovrebbe essere valutato l'errore bias dovuto al movimento fuori dal piano. Usando un corpo rigido, immagini di traslazione fuori dal piano e di rotazione, calcolare la QOI (qui è assunto che la QOI sia la deformazione in piano) come una funzione della traslazione/rotazione applicata. La deformazione dovrebbe essere zero per il movimento di corpo rigido così che qualsiasi deformazione misurata sia una combinazione del bias e del rumore. Stimare la quantità di traslazione/rotazione fuori dal piano che potrebbe essersi verificata o che si verifica durante la prova e riportarla. Confrontare l'errore di bias stimato dovuto al movimento fuori dal piano con il rumore di fondo calcolato a partire dalle immagini statiche. Se l'errore di bias è più grande degli errori di varianza, considerare di rivedere la configurazione della prova meccanica e ridurre il movimento fuori dal piano.

Bias possono essere introdotti nella QOI anche come risultato del filtraggio passa-basso. Infine, altri fattori come l'interpolante, l'aliasing e il rumore potrebbero causare errori di bias spazialmente periodo che possono essere non visibili nelle immagini statiche di un campione stazionario e non caricato.

5.4.4 Compromesso tra rumore e bias

Quando si selezionano i parametri definiti dall'utente, spesso c'è un compromesso tra il rumore nelle misurazioni e il bias dovuto a un eccessivo appiattimento dei dati. Grandi dimensioni di subset, funzioni di forma di ordine basso, grandi dimensioni del VSG, pre- o post-filtraggio dei dati, ecc. sono tutte caratteristiche che riducono il rumore nelle misurazione ma a scapito di agire come filtri passa-basso che potenzialmente introducono bias nelle misurazioni. Perciò, quando si selezionano i parametri definiti dall'utente, è importante valutare i loro effetti sia sugli errori di rumore che di bias. Spesso, la selezione finale dei valori dei parametri è un compromesso tra questi errori. La scelta tra misurazioni più rumorose ma senza bias e misurazioni meno rumorose ma sottostimate dipende dall'applicazione; spesso è richiesto un giudizio esperto per determinare quale set di parametri produca dei risultati appropriati per una data prova. Successivamente è presentata una metodologia per valutare il compromesso tra rumore e bias nella deformazione dato che la deformazione è una delle più comuni QOIs. Metodi simili potranno poi essere applicati alle altre QOIs.

La discussione del rumore contro il bias è strettamente legata alla discussione sulla risoluzione spaziale delle misurazioni DIC.

5.4.5 Studio del Virtual Strain Gauge

La deformazione è una quantità derivata, correlata alla variazione spaziale degli spostamenti. Ci sono diversi approcci per calcolare la deformazione a partire dagli spostamenti, ognuno dei quali dipende dallo specifico software DIC utilizzato. Una caratteristica comune è che si richiede all'utente di selezionare, direttamente o indirettamente, la dimensione del VSG. Lo studio del virtual strain gauge è il processo utilizzato per determinare una dimensione del VSG che sia appropriata e accettabile. Esso chiarisce anche se i gradienti spaziali di deformazione più grandi che si verificano nella prova siano catturati e aiuta nella determinazione di quale sia l'equilibrio ottimo tra il catturare gradienti spaziali di deformazione (cioè minimizzare il bias a causa di un eccessivo appiattimento) e il migliorare la risoluzione della deformazione (cioè minimizzare gli errori di varianza). Alcuni pacchetti DIC automatizzano questo processo, mentre con altri l'utente deve eseguirlo manualmente.

Vediamo quali sono gli step da seguire:

 Eseguire un analisi iniziale DIC su tutte le immagini della prova meccanica usando predeterminati parametri definiti dall'utente DIC basati sull'esperienza e sul giudizio esperto del fornitore. Selezionare l'immagine nella quale si è calcolato inizialmente il gradiente di deformazione più grande.

- Selezionare l'immagine di riferimento, un immagine a forza nominalmente nulla (acquisita dopo l'immagine di riferimento) e l'immagine con gradiente di deformazione più grande determinata nello step precedente.
- 3. Analizzare queste immagini con diverse impostazioni DIC, variando la dimensione del VSG che, come già visto, è influenzata solitamente da tre parametri che sono la dimensione del subset, la dimensione dello step e la finestra di filtro o di deformazione. A seconda del metodo di calcolo della deformazione, ci potrebbero essere altre variabili che influenzano il VSG, come ad esempio la funzione di forma del subset e la funzione di dorma della deformazione.
- 4. Estrarre una linea tagliata attraverso la regione con il più alto gradiente di deformazione. Plottare la deformazione lungo la linea per ognuna delle analisi eseguite nello step precedente. Assicurarsi che la linea non attraversi una rottura nel provino in quanto calcolare una deformazione lungo una rottura non è fisicamente significativo.
- 5. Man mano che la dimensione del VSG diminuisce, l'ampiezza massima della deformazione lungo la linea tagliata tipicamente aumenterà.
 - Se l'ampiezza massima della deformazione converge con ulteriori decrementi del VSG, allora è stata acquisita l'ampiezza della deformazione massima effettiva. Qualunque VSG che sia più grande del VSG più grande che risulta dalla convergenza andrà a sottostimare l'ampiezza effettiva della deformazione e introdurrà bias nei risultati di deformazione misurati.
 - Se l'ampiezza massima della deformazione non converge mai, anche con il più piccolo VSG consentito dal software, allora l'ampiezza della deformazione massima effettiva è sconosciuta. Al massimo, si può riportare che l'ampiezza massima della deformazione effettiva è più grande o uguale all'ampiezza della deformazione massima misurata. Questo significa che la deformazione riportata è in questo caso un limite inferiore per l'ampiezza della deformazione effettiva.

Se il VSG più piccolo consentito dal software non è sufficiente, la prova può essere ripetuta con un FOV più piccolo o un ingrandimento maggiore. Per una data dimensione dello step, dimensione della finestra di deformazione o di filtro, tutte definite in termini di pixel nel software DIC, un ingrandimento maggiore delle immagini produce una dimensione del VSG più piccola.

- 6. Man mano che la dimensione del VSG diminuisce, il rumore di deformazione tipicamente aumenta perché la quantità del filtraggio spaziale diminuisce. Il rumore può essere valutato qualitativamente dalle scansioni della linea usata nello step precedente. Per quantificare il rumore, calcolare la deviazione standard del campo di deformazione dell'immagine a forza nulla per ognuna delle analisi DIC eseguite.
- 7. La decisione finale su quale dimensione del VSG usare è un problema di un giudizio esperto. Se catturare il gradiente di deformazione più grande è critico per l'analisi DIC, allora un VSG piccolo potrebbe essere la scelta migliore, anche se il rumore è più grande. D'altro canto, se non ci sono gradienti di deformazione elevati, e/o un campo di deformazione più piatto e/o un incertezza ridotta sono più importanti che conoscere la deformazione massima nelle posizioni di elevato gradiente di deformazione, allora un VSG più grande potrebbe essere la scelta migliore. In alternativa, una combinazione di dimensioni del VSG differenti per diverse porzione della prova potrebbe essere appropriata (ad esempio una dimensione del VSG grande all'inizio della prova, quando il rapporto segnale/rumore per le deformazioni è basso e i gradienti di deformazione sono piccoli, e una dimensione del VSG piccola più tardi nella prova, quando il rapporto segnale/rumore per le deformazioni è più grande e si sono sviluppati gradienti di deformazioni).

Capitolo 6 Requisiti del reporting

Con tutte le variabili che devono essere selezionate in una prova meccanica con misurazioni DIC, come parametri del sistema fisico (cioè fotocamera, lente, metodo di patterning, ecc.) e parametri del processo di analisi dei dati (cioè dimensione del subset, dimensione del virtual strain gauge, ecc.), è fondamentale una giustificazione e documentazione delle scelte che sono state fatte. Le liste di cui sotto presentano i requisiti di reporting minimi e raccomandazioni per reporting più dettagliati. Tutta la documentazione dei dati DIC, sia report interni che articoli di giornale pubblicati, dovrebbe contenere questa informazione.

Alcune raccomandazioni di reporting potrebbero essere non necessarie per l'applicazione dei dati DIC presa in considerazione. La chiave, perciò, è di documentare tutte le informazioni rilevanti.

6.1 Parametri dell'hardware DIC

6.1.1 Richiesti

- Produttore e Modello della Fotocamera e Risoluzione dell'Immagine
- Produttore e Modello della Lente e Lunghezza Focale
 Nota 1: Se la lente ha una lunghezza focale variabile, riportare sia l'intervallo che la lunghezza focale utilizzata.
- FOV
- Scala dell'Immagine

Nota 1: Nella 3D-DIC, dove le fotocamere sono posizionate con una certa angolazione rispetto al provino, la scala dell'immagine non è costante nel FOV e può essere diversa nelle due fotocamere. Perciò, la scala dell'immagine della ROI dell'immagine dovrebbe essere riportata o come media per le due fotocamere, se la scala è quasi la stessa, o individualmente per ciascuna fotocamera, se la scala è significativamente diversa nelle due fotocamere.

- Angolo Stereo

Nota 1: Applicabile per la 3D-DIC; non applicabile per la 2D-DIC

- SOD
- Velocità di Acquisizione Immagini
- Tecnica di Patterning
- Dimensione Caratteristica Approssimata del Pattern

Nota 1: Specificare il metodo utilizzato per determinare la dimensione caratteristica. Notare che sia le regioni chiare (bianche) che le scure (nere) sono considerate caratteristiche.

6.1.2 Raccomandati

- Diaframma
- Rumore dell'Immagine

6.2 Parametri dell'analisi DIC

6.2.1 Richiesti

- Nome del Pacchetto Software DIC e Produttore

Nota 1: Se è utilizzato un codice sviluppato indipendentemente (non commerciale), è fortemente raccomandato verificare il codice usando immagini dal DIC Challenge [5]. Qualsiasi documentazione successiva delle misurazioni DIC che usa il codice dovrebbe riferirsi a questa verifica.

- Filtraggio dell'Immagine, se applicato.
- Dimensione del Subset

Nota 1: Preferibilmente, riportarla sia in termini di pixel che di unità fisiche (ad esempio millimetri) scalandola con la scala dell'immagine.

- Dimensione dello Step
Nota 1: Preferibilmente, riportarla sia in termini di pixel che di unità fisiche (ad esempio millimetri) scalandola con la scala dell'immagine.

- Funzione di Forma del Subset (ad esempio lineare, quadratica)
- Elaborazione dei Dati e Filtraggio per le QOIs

Nota 1: La deformazione è una delle più comuni QOIs. Parametri tipici da riportare includono:

- Pre-filtraggio degli spostamenti (spaziale e/o temporale), se applicato
- Formulazione della deformazione (cioè Lagrange, ingegneristica, logaritmica, ecc.)
- Finestra di deformazione
- Dimensione del virtual strain gauge

Nota 1: Preferibilmente, riportarla sia in termini di pixel che di unità fisiche (ad esempio millimetri) scalandola con la scala dell'immagine.

- Post-filtraggio delle deformazioni (spaziale e/o temporale), se applicato
- Rumore di Fondo e Bias delle QOIs
 - Nota 1: Per la 2D-DIC, dovrebbe essere riportato il bias causato dal movimento fuori dal piano.

6.2.2 Raccomandati

- Numero della Versione del Pacchetto Software DIC
- Parametri di calibrazione, come quelli mostrati nella lista successiva. Notare che i modelli per i parametri di calibrazione sono specifici del software. I parametri qui elencati rappresentano un modello particolare; i parametri importanti per il modello selezionato ed utilizzato devono essere sempre riportati.
 - Numero del modello e numero seriale del target di calibrazione utilizzato. (Questa informazione è utile per la tracciabilità e per chiarire qualsiasi errore nelle misurazioni che può essere associato a uno specifico, fisico target di calibrazione.)
 - Centro dell'Immagine

Nota 1: Riportarlo per entrambe le fotocamere se si utilizza la 3D-DIC.

- Lunghezza Focale

Nota 1: Riportarla per entrambe le fotocamere se si utilizza la 3D-DIC

- Modello di Correlazione della Distorsione della Lente e Parametri
- Angolo Stereo

Nota 1: Applicabile per la 3D-DIC; non applicabile per la 2D-DIC.

- Distanza tra le Fotocamere

Nota 1: Applicabile per la 3D-DIC; non applicabile per la 2D-DIC

- Metrica (Metriche) della Qualità della Calibrazione
- Interpolante
- Criterio di Corrispondenza

Capitolo 7 Digital Image Correlation (3D-DIC)

La correlazione digitale di immagini 3D (Three-dimensional Digital Image Correlation (3D-DIC) è una tecnica ottico-numerica no-contact che valuta il comportamento meccanico dinamico delle superfici di strutture e materiali, tra i quali abbiamo anche i tessuti biologici. 3D-DIC può essere usata per estrarre con alta precisione la forma e la mappa full-field di spostamenti e tensioni a diverse scale di lunghezza.

7.1 MultiDIC: Un toolbox open-source per la correlazione digitale di immagini 3D multi-view

Mentre esistono vari software commerciali e accademici 3D-DIC, in questo campo mancano dei pacchetti 3D-DIC che siano in grado di offrire soluzioni semplici di calibrazione e fusione dei dati per l'analisi multi-view, che è particolarmente desiderabile nelle applicazioni biomediche. Il toolbox MATLAB open-source MultiDIC è il primo software 3D-DIC specificatamente dedicato alle configurazioni multi-view. MultiDIC integra il software Ncorr [6] basato sul subset 2D-DIC con algoritmi di calibrazione opportunamente personalizzati [7] per ricostruire le superfici 3D partendo da più coppie di immagini stereo. MultiDIC contiene nuovi algoritmi per generare automaticamente mesh da più coppie stereo e per calcolare e visualizzare la forma 3D e la mappa full-field del movimento, della deformazione e della tensione. L'alto livello degli script permette agli utenti di effettuare analisi 3D-DIC con una minima interazione con la sintassi di MATLAB. Tuttavia, utenti esperti di MATLAB possono utilizzare funzioni e data-structures per scrivere script personalizzati per specifichi richieste sperimentali. La performance del MultiDIC è testata con un sistema low-cost sperimentale caratterizzato da una configurazione di 12 fotocamere a 360°. Il software e il sistema sono valutati attraverso la misurazione di un oggetto cilindrico di nota geometria soggetto a moto di corpo rigido e attraverso la misurazione dell'arto inferiore di un soggetto umano. Le scoperte confermano che la forma, il movimento, le deformazioni e le tensioni full-field possono essere misurate accuratamente e dimostrano la fattibilità di MultiDIC in applicazioni biomediche invivo multi-view.

7.1.1 Ricapitolazione concetti fondamentali per la DIC

La correlazione digitale di immagini (DIC) è una tecnica ottico-numerica non-contact full-field per misurare la forma, il movimento e la deformazione su quasi tutti i tipi di materiale, anche in configurazioni sperimentali estreme, purché la regione di interesse (ROI) sulla superficie del campione sia provvista di un pattern naturale o sintetico. Questo consente all'algoritmo DIC di abbinare un ampio set di punti corrispondenti nelle diverse immagini in base alla distribuzione dell'intensità locale dei pixel. Nello specifico, 2D-DIC definisce un subset di pixel attorno ad un punto di interesse in un immagine di riferimento e valuta i parametri che ne descrivono il movimento e la deformazione in una data immagine target. Nella 3D-DIC, due fotocamere vedono una ROI da angoli differenti (cioè una coppia di fotocamere stereo) e catturano una sequenza di immagini rappresentanti una configurazione di riferimento (tipicamente una configurazione indeformata) e un dato numero di configurazioni correnti (tipicamente le configurazioni deformate). Successivamente, è utilizzata la 2D-DIC per correlare un dato set di punti nelle due viste della configurazione di riferimento (correlazione spaziale) e tracciare questi punti per tutta la sequenza delle immagini stereo che rappresentano le configurazioni correnti (correlazione temporale). Gli insiemi dei punti d'immagine correlati sono successivamente utilizzati per ricostruire e tracciare la posizione 3D dei punti materiale della ROI durante il tempo, attraverso la triangolazione stereo (stereo-triangulation).

La DIC è stata originariamente sviluppata per la meccanica sperimentale, dove è diventata una tecnica standard per la caratterizzazione delle proprietà dei materiali e della risposta delle strutture ai carichi. Le capacità di analizzare deformazioni grandi, senza contatto e full-field della DIC, la rendono particolarmente adatta per le misurazione della deformazione e della forma per numerose applicazioni biomediche. I metodi DIC, dunque, sono stati utilizzati in combinazione con metodi avanzati di caratterizzazione inversa per identificare le proprietà meccaniche di materiali biologici naturali e sintetici e di parti del corpo.

Negli ultimi decenni, è stato svolto un lavoro sostanziale per migliorare le prestazioni degli algoritmi computazionali, per definire le buone pratiche per l'esecuzione di esperimenti e della calibrazione, per valutare gli errori di misurazione ed estendere le capacità della 3D-DIC.

Inoltre, ad oggi esistono diversi pacchetti software commerciali ed accademici. Tuttavia, ancora non è disponibile un software 3D-DIC specificatamente sviluppato per l'analisi multi-view, una caratteristica che è altamente desiderabile per le applicazioni biomediche. È difficile studiare la forma, il movimento e la deformazione dei tessuti e degli organi in-vivo a causa delle geometrie spesso complesse, delle ampie deformazioni che possono verificarsi e del rischio di movimenti indesiderati. Per superare queste sfide, spesso è utilizzata la ripresa simultanea multi-view.

Nella letteratura, sono stati proposti diversi sistemi multi-view DIC, dove molteplici fotocamere con campi di vista (FOV) parzialmente sovrapposti consentono la ripresa di ampie porzioni della superficie di un oggetto. La moltitudine di fotocamere può essere disposta in un vettore 2D quando c'è bisogno di misurare grandi oggetti quasi piani. In alternativa, per oggetti non piani, le fotocamere sono piazzate attorno all'oggetto a 360°, per ottenere la forma 3D dell'intero oggetto (come illustrato in Figura 2 Schema di un sistema stereo multi-view. Una matrice circolare di fotocamere (in tinta trasparente) che circondano l'oggetto, con evidenziate due coppie stereo contigue (in tinta unita) che condividono un comune FOV sulla superfici dell'oggetto. La ROI per ogni coppia è rappresentata con puntini sulle superfici dell'oggetto, e la ROI sovrapposto per le due coppie è rappresentata in tinta unita.). In particolare, si è fatto riferimento a quest'ultima configurazione.



Figura 2 Schema di un sistema stereo multi-view. Una matrice circolare di fotocamere (in tinta trasparente) che circondano l'oggetto, con evidenziate due coppie stereo contigue (in tinta unita) che condividono un comune FOV sulla superficie dell'oggetto. La ROI per ogni coppia è rappresentata con puntini sulle superfici dell'oggetto, e la ROI sovrapposto per le due coppie è rappresentata in tinta unita.

Inoltre, nella ricerca scientifica, la riproducibilità, la verifica e la validazione sono fondamentali. E solo strumenti software open-source consentono un'immersione nella struttura di lavoro che questi aspetti richiedono. Inoltre, un software open-source rende possibile la personalizzazione, che è importante da quando ogni applicazione scientifica offre le proprie sfide uniche computazionali e sperimentali. C'è quindi un urgente bisogno di software open-source che includano algoritmi specificatamente sviluppati per la 3D-DIC multi-view, la quale consente una personalizzazione e un facile adattamento alle diverse configurazioni sperimentali.

7.2 Caratteristiche fondamentali della 3D-DIC multi-view

7.2.1 Background teorico

I due problemi chiave presenti nell'implementazione delle configurazioni multi-view sono la calibrazione del sistema (richiesta per la triangolazione stereo) e la fusione dei dati (richiesta per combinare i risultati proveniente da coppie stereo multiple). Per ciascuna fotocamera della coppia stereo, la calibrazione consente di trovare i parametri intrinsechi (che definiscono le caratteristiche geometriche ed ottiche della fotocamera) e i parametri esterni (che definiscono la posizione e l'orientazione della fotocamera rispetto al sistema di coordinate di riferimento). Insieme, i parametri intrinsechi ed esterni servono a descrivere la trasformazione subita dalle mappe di ciascun punto materiale 3D P(X, Y, Z) nel sistema di coordinate globale nel suo punto di immagine sul sensore della fotocamera $I(x_P, y_P)$, in accordo al modello ottico del pinhole (foro stenopeico). Nello specifico, le coordinate (X, Y, Z) sono prima trasformate rigidamente nelle coordinate (X_C, Y_C, Z_C) nel sistema di coordinate della fotocamera attraverso:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}$$

Dove R_{ij} (*i*, *j* = 1, 2, 3) e T_X , T_{Y_j} , T_Z sono rispettivamente le componenti della matrice di rotazione e del vettore di traslazione.

Successivamente, le coordinate del punto di immagine normalizzato (ideale) sono calcolate come:

$$x = X_C/Z_C$$
; $y = Y_C/Z_C$

Poi, i parametri intrinsechi della fotocamera, cioè le lunghezze focali in pixel $[f_x, f_y]$, le coordinate del punto principale (del centro ottico) $[C_x, C_y]$ e il coefficiente di inclinazione $s = f_y \cdot tan\alpha$, dove α è l'angolo tra gli assi orizzontale e verticale del sensore ($\alpha = s = 0$ se gli

assi sono perpendicolari), sono utilizzati per calcolare le coordinate del punto di immagine $I(x_P, y_P)$, nel sistema di coordinate del sensore, attraverso:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Successivamente, combinando la prima e la terza equazione, e assumendo inoltre che s = 0, si ottiene che:

$$x_p = f_x \frac{R_{11}X + R_{12}Y + R_{13}Z + T_x}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + T_z} + C_x$$
$$y_p = f_x \frac{R_{21}X + R_{22}Y + R_{23}Z + T_y}{R_{31}X + R_{32}Y + R_{33}Z + T_z} + C_y$$

Queste possono essere riarrangiate nella forma:

$$x_p = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$
$$y_p = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

Essa rappresenta la base del metodo di Trasformazione Lineare Diretta (Direct Linear Transformation (DLT)) che permette la calibrazione implicita della fotocamera. Il metodo deriva l'insieme dei parametri (non fisici) L_j (j = 1, 2, ..., 11) risolvendo un sistema lineare di equazioni, basato su una singola immagine che contiene un insieme non piano di punti di calibrazioni le cui posizioni s(X, Y, Z) sono note con un'elevata accuratezza. Il metodo DLT, tuttavia, si basa su un modello idealizzato di fotocamera senza distorsioni, il quale potrebbe dare risultati imprecisi, soprattutto quando sono utilizzate lenti ad elevata distorsione o di bassa qualità.

La tecnica di calibrazione stereo maggiormente utilizzata nei metodi 3D-DIC è il metodo Bundle Adjustment (BA) di regolazione del fascio. BA è un metodo di calibrazione esplicito che consente di stimare sia i parametri intrinsechi sia quelli esterni attraverso osservazioni ripetitive di punti di scena sparsi in differenti direzioni di visione. BA consente la correzione della distorsione della lente basata su un modello di distorsione non lineare. Nello specifico, le coordinate del punto di immagine idealizzato (x, y) nella terza equazione, sono rimpiazzate dalle coordinate normalizzate distorte (x_d, y_d) , definite da:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix}$$

Dove $r^2 = x^2 + y^2$, $[k_1, k_2, k_3]$ sono i parametri di distorsione radiale, $[p_1, p_2]$ sono i parametri di distorsione tangenziale e il parametro di inclinazione nella terza equazione può essere diverso da zero.

Un BA di successo tipicamente richiede un elevato numero di immagini (approssimativamente 50) per un target di calibrazione piano acquisito in diverse orientazioni e posizioni nel FOV di entrambe le fotocamere. Sebbene BA sia altamente accurato e sia tipicamente la prima scelta per calibrare un sistema a doppia fotocamera, la pratica associata di calibrare una fotocamera rispetto ad una data fotocamera "master" può limitarne l'applicabilità ai sistemi stereo multiview. Per calibrare un elevato numero di coppie di fotocamere, ogni coppia deve essere calibrata separatamente. Quindi, le immagini di un dato insieme di marcatori o di una superficie maculata, le quali possono essere viste da ciascuna coppia contigua di fotocamere, sono utilizzate per:

- 1. Trovare la trasformazione geometrica tra le coppie.
- 2. Combinare i dati nel sistema di coordinate reciproche.

Questo processo deve essere ripetuto per ogni coppia di fotocamere addizionale. Chiaramente, questo approccio consuma molto tempo, specialmente nel caso in cui sia richiesto un elevato numero di fotocamere o quando le posizioni della fotocamera cambiano durante una sessione di collezione dati, causando potenzialmente l'accumulazione dell'errore. Inoltre, questo metodo non permette di combinare dati provenienti da coppie di fotocamere per le quali il FOV non si sovrappone.

In opposizione, il metodo DLT può usare l'acquisizione di una singola immagine di un target di calibrazione 3D (non piano) piazzato nella scena, catturato da tutte le fotocamere del sistema multi-view. Questa disposizione consente di calibrare ogni fotocamera rispetto ad un sistema di riferimento associato al target 3D, consentendo così una fusione automatica dei dati, anche nei casi dove il FOV di coppie di fotocamera differenti non si sovrappone. La limitazione principale di questo approccio è che il target di calibrazione solitamente copre solo una porzione del volume di valore e questo potrebbe avere degli effetti negativi sull'accuratezza dei risultati di calibrazione, anche quando sono adottate procedure di correzione della distorsione.

7.2.2 Panoramica del MultiDIC

Uno degli obiettivi fondamentali è quello di superare le limitazioni sopra accennate e che riguardano i metodi esistenti multi-view. A questo scopo, presentiamo il MultiDIC, un software open-source per analizzare le immagini stereo multi-view e ottenere le forme 3D e gli spostamenti full-field, le deformazioni e le tensioni. È stata inoltre sviluppata una procedura per la calibrazione stereo multi-view e la fusione dei dati, la quale consente di modificare la posizione delle fotocamere a seconda della necessità, senza che sia richiesto un processo di recalibrazione troppo lungo.

MultiDIC utilizza il software open-source 2D-DIC chiamato Ncorr, il quale è stato precedentemente verificato e validato attraverso l'elaborazione di più insiemi standard di immagini sintetiche e sperimenti. Per la calibrazione, è stato utilizzato un approccio che combina sia il metodo BA che quello DLT in step differenti al fine di sfruttare i vantaggi di ognuno dei metodi. In modo particolare, BA è utilizzato per ottenere i parametri di distorsione e di inclinazione, i quali possono essere usati per correggere l'effetto della distorsione dei punti di immagine estratti sia dalle immagini di calibrazione stereo sia dalle immagini dell'oggetto maculato. BA è richiesto una sola volta per fotocamera, fintanto che le impostazioni interne della fotocamera restino inalterate. DLT è poi utilizzato sui punti di immagine non distorti per recuperare i parametri interni (senza distorsione) ed esterni (posizione della fotocamera), combinati ai parametri DLT. I parametri DLT fanno riferimento a un comune sistema di coordinate globale associato all'oggetto di calibrazione 3D, il quale è visto simultaneamente da tutte le fotocamere. Poiché per ciascuna fotocamera è richiesta una singola immagine, DLT può essere usato anche per controllare la stabilità del sistema nel momento in cui gli esperimenti sono prolungati nel tempo e per ricalibrare velocemente il sistema nel caso in cui esso sia intenzionalmente o accidentalmente mosso. Inoltre, questa logica consente di mantenere eventualmente le immagini originali e saltare lo step di correzione della distorsione nei casi in cui le immagini sono ottenute con ottiche e sensori di alta qualità, o se è noto che le distorsioni siano trascurabili rispetto alla precisione richiesta per l'applicazione specifica.

Quando è richiesto un elevato numero di viste, i sistemi di ripresa possono diventare proibitivamente costosi. Pertanto, qui si fa riferimento a un sistema non costoso che usa moduli di fotocamera low-cost, con i quali sono testate le capacità del toolbox. Qui andiamo dapprima a presentare il flusso di lavoro del MultiDIC, gli algoritmi implementati in esso, la configurazione sperimentale e le procedure di analisi dei dati. Poi, sono riportati e discussi i risultati di diverse prove che vanno sia a validare lo strumento in esame ma anche a mostrare le sue capacità. Infine, la misurazione sull'arto inferiore di un soggetto umano dimostra le tipiche informazioni su forma e deformazione ottenibili negli studi in-vivo.

7.2.3 Materiali e metodi

7.2.3.1 Panoramica dell'architettura del software e degli algoritmi

MultiDIC è una libreria open-source (concessa in licenza da Apache 2.0) scritta in MATLAB, un linguaggio di programmazione largamente in uso tra ingegneri e scienziati.

MultiDIC è stato progettato come una libreria flessibile di funzioni e script che gli utenti possono liberamente adattare a secondo dei loro requisiti sperimentale. L'implementazione come toolbox consente agli utenti di eseguire analisi 3D-DIC a di visualizzare i risultati attraverso interfacce utente (user interfaces UIs) che non richiedono l'interazione diretta con la sintassi di MATLAB. Come tali, queste interfacce utente forniscono l'accesso alle funzionalità più comuni e ne consentono l'utilizzo agli utenti non esperti del codice. Per la personalizzazione, gli utenti competenti di MATLAB possono anche utilizzare delle funzioni autonome e strutture dati per scrivere script personalizzati e analizzare gli ampi insiemi dati semi-automaticamente.

Come già detto, MultiDIC integra il software open-source 2D-DIC chiamato Ncorr con incluso l'algoritmo BA e implementato l'algoritmo DLT in MATLAB dagli autori, per eseguire la ricostruzione di superfici 3D a partire da molteplici coppie di immagini stereo. Inoltre, esso contiene algoritmi per unire le superfici e per calcolare gli spostamenti 3D full-field, le deformazioni, le tensioni e il moto di corpo rigido (rigid-body motion (RBM)). In aggiunta, sono offerte funzioni di visualizzazione e di plotting, le quali integrano strumenti provenienti dal toolbox open-source GIBBON. La Figura 3 mostra il flusso di lavoro dell'intera procedura 3D-DIC. Nello step 0 opzionale, sono calcolati i parametri di distorsione e di inclinazione usando BA su immagini multiple di un pattern piatto a scacchiera. Questi parametri possono essere usati per correggere l'effetto della distorsione sui punti rilevati sia dalle immagini dell'oggetto di calibrazione che dalle immagini dell'oggetto maculato. Lo step 1 comprende il calcolo dei parametri di calibrazione DLT di ciascuna fotocamera, utilizzando immagini di un oggetto di calibrazione 3D visto simultaneamente da tutte le viste possibili. Lo step 2 prevede la corrispondenza dei punti su insiemi di immagini stereo dell'oggetto maculato usando la 2D-DIC. Nello step 3, i parametri di calibrazione dallo step 1 sono utilizzati per eseguire una triangolazione stereo, la quale trasforma i punti 2D corrisposti nello step 2 per ciascuna coppia di fotocamere nelle mesh triangolari 3D. Inoltre, questo step può prevedere l'unione delle superfici multiple ottenute.





Infine, lo step 4 coinvolge algoritmi per la computazione e la visualizzazione dello spostamento full-field, la deformazione, la tensione e il RBM. I metodi implementati in ciascuno di questi step sono spiegati successivamente.

7.2.3.2 Correzione della distorsione

Lo scopo fondamentale di questo step è di trovare i parametri per correggere le distorsioni della lente e l'inclinazione che influenzano le immagini acquisite. Questo step deve essere eseguito una volta per fotocamera e non ha bisogno di essere ripetuto se la posizione della fotocamera viene cambiata, purché i parametri intrinsechi della stessa restino inalterati.

Viene utilizzato il Toolbox di Calibrazione della Fotocamera di MATLAB, il quale è basato su lavori precedenti, per valutare i parametri intrinsechi della fotocamera, che includono i parametri di distorsione, usando il metodo BA. Nello specifico, da ogni fotocamera sono acquisite immagini multiple di un pattern piano a scacchiera. Poi, l'algoritmo utilizza BA per minimizzare gli errori complessivi di ri-proiezione dei punti d'angolo del pattern a scacchiera. Il modello implementato consente la computazione di fino a sei parametri: tre per la distorsione radiale, due per la distorsione tangenziale e uno per l'inclinazione, come specificato nella terza e nella sesta equazione. Questi parametri sono utilizzati successivamente prima della ricostruzione 3D nello step 3, per correggere i punti rilevati sia nelle immagini di calibrazione stereo sia nelle immagini maculate.

7.2.3.3 Calibrazione stereo

In questo step, è stabilita la mappatura tra i punti di immagine 2D e i punti del mondo 3D, usando la quinta equazione. Poiché ogni punto fornisce due equazioni, è richiesto un minimo di 6 punti per ottenere l'insieme di 11 parametri DLT. Tuttavia, è preferito un numero di punti maggiore, così che si riducano gli errori sperimentali risolvendo un sistema sovra determinato attraverso la minimizzazione dei minimi quadrati.

In pratica, questo step richiede un oggetto di calibrazione 3D (non piano) che abbia punti di controllo le cui posizioni 3D siano note con una sufficiente accuratezza. L'uso di un oggetto 3D con assialsimmetria (in questo caso un cilindro) rappresenta la soluzione ottimale per un sistema multi-view a 360°, dato che le immagini dell'oggetto di calibrazione possono essere acquisite da tutte le fotocamere simultaneamente. Le immagini di calibrazione sono poi analizzate usando MultiDIC per rilevare i punti di immagine (x_P, y_P) che corrispondono ai punti di controllo dell'oggetto di calibrazione e per ordinarli e abbinarli alle loro posizioni 3D (X, Y, Z). Successivamente, i parametri DLT L_j (j = 1, 2, ..., 11) e gli errori di ricostruzione associati sono calcolati e plottati.

7.2.3.4 2D-DIC delle coppie di immagini stereo

In questo step, il quale deve essere condotto per ciascuna coppia di fotocamere, i punti di immagine corrispondenti sono rilevati usando la 2D-DIC su insiemi di immagini di un oggetto maculato acquisito da due viste angolate, come illustrato in Figura 4. Primo, è selezionata un'immagine di riferimento, tipicamente l'immagine acquisita nella configurazione indeformata da una delle viste. Secondo, è selezionata una ROI, la quale corrisponde a un'area dell'oggetto la quale è visibile da entrambe le viste. Terzo, è ottenuta una griglia di punti all'interno della ROI in accordo alla dimensione del subset e alla spaziatura selezionata, e i punti corrispondenti sono rilevati sulle immagini rimanenti usando Ncorr. Ncorr è un software 2D-DIC open-source basato sul subset i cui risultati di validazione delle sue performance metrologiche sono testate con immagini provenienti dalla Challenge 2D-DIC. Brevemente, 2D-DIC implementa una funzione di forma di primo ordine per descrivere la trasformazione del subset, il criterio di correlazione dei minimi quadrati C_{LS} come funzione costo di correlazione, il metodo Inverse Compositional Gauss-Newton come ottimizzatore non lineare e il metodo Reliability-guided (guidato dall'affidabilità) per propagare l'analisi sulla ROI, partendo dai punti definiti dall'utente.

Inoltre, è definita una mesh triangolare sulla griglia di punti ed è salvata per lo step di ricostruzione 3D. Nello specifico, lo step 2 del MultiDIC serve come involucro per Ncorr, il quale consente agli utenti di selezionare le coppie di fotocamera per l'analisi e disegnare la ROI. Questi dati sono automaticamente trasferenti dentro Ncorr per ulteriori analisi, e i punti di immagine corrispondenti, insieme ai coefficienti di correlazione associati, sono restituiti per definire la mesh triangolare, per plottare i risultati e per salvare le variabili necessarie per la ricostruzione 3D.

La Figura 4 illustra come Ncorr sia capace di ottenere un'elevata accuratezza di correlazione (piccoli valori di C_{LS}) sulla maggior parte delle ROI selezionate ad eccezione del bordo destro, dove la funzione lineare potrebbe non descrivere accuratamente la trasformazione del subset in questa porzione della superficie. In questo caso, è stato scelto un numero di fotocamere sufficientemente grande (cioè ROI stretta per ciascuna coppia di fotocamere) per assicurare un'elevata accuratezza nella correlazione, anche su forme complesse.



Figura 4 Corrispondenza dei punti di immagini stereo usando 2D-DIC. Mostrate porzioni di un oggetto cilindrico maculato ripreso da fotocamere posizionate con uno spostamento angolare di 30° tra di loro. Sono mostrati i punti di immagine corrispondenti rilevati usando DIC all'interno della ROI sulle immagini di riferimento (a sinistra) e corrente (a destra) con colori che raffigurano i valori del coefficiente di correlazione.

7.2.3.5 Ricostruzione 3D

In questo step, gli insiemi dei parametri DLT $L_j^{C_k}$ e $L_j^{C_l}(j = 1, 2, ..., 11)$ associate alle fotocamere C_k e C_l (k e l rappresentano gli indici delle fotocamere in una specifica coppia stereo) sono utilizzati per trasformare ogni coppia di punti di immagine corrispondenti, dalle loro coordinate di immagine $(x_p^{C_k}, y_p^{C_k})$ e $(x_p^{C_l}, y_p^{C_l})$, nelle coordinate 3D (X, Y, Z), riarrangiando la quinta equazione nella forma:

Dove:

$$U = \begin{bmatrix} x_p^{\ C_k} - L_4^{\ C_k} \\ y_p^{\ C_k} - L_8^{\ C_k} \\ x_p^{\ C_l} - L_4^{\ C_l} \\ y_p^{\ C_l} - L_8^{\ C_l} \end{bmatrix}; \quad P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} L_1^{\ C_k} - L_9^{\ C_k} x_p^{\ C_k} & L_2^{\ C_k} - L_{10}^{\ C_k} x_p^{\ C_k} & L_3^{\ C_k} - L_{11}^{\ C_k} x_p^{\ C_k} \\ L_5^{\ C_k} - L_9^{\ C_k} y_p^{\ C_k} & L_6^{\ C_k} - L_{10}^{\ C_k} y_p^{\ C_k} & L_7^{\ C_k} - L_{11}^{\ C_k} y_p^{\ C_k} \\ L_1^{\ C_l} - L_9^{\ C_l} x_p^{\ C_l} & L_2^{\ C_l} - L_{10}^{\ C_l} x_p^{\ C_l} & L_3^{\ C_l} - L_{11}^{\ C_l} x_p^{\ C_k} \\ L_5^{\ C_l} - L_9^{\ C_l} y_p^{\ C_l} & L_6^{\ C_l} - L_{10}^{\ C_l} y_p^{\ C_l} & L_7^{\ C_l} - L_{11}^{\ C_l} y_p^{\ C_l} \end{bmatrix}$$

Successivamente, la soluzione dei minimi quadrati per P è ottenuta da:

$$P = [A^T A]^{-1} A^T U$$

Di conseguenza, da ciascuna coppia stereo è ottenuta una nube di punti 3D. Poiché le coordinate dei punti di controllo sulla calibrazione sono espresse nel sistema di coordinate globale per tutte le coppie di fotocamere, tutte le nubi punti sono ricostruite automaticamente nel sistema di coordinate globale, senza il bisogno di eseguire una procedura di trasformazione delle coordinate addizionale.

Inoltre, ciascun insieme delle coordinate di N punti ricostruiti $[X_n, Y_n, Z_n]$ (n = 1, 2, ..., N)sull'oggetto di calibrazione, e le vere coordinate associate $[X_n^{(t)}, Y_n^{(t)}, Z_n^{(t)}]$ possono essere utilizzate per calcolare gli errori di ricostruzione $[\Delta X_n^{(t)}, \Delta Y_n^{(t)}, \Delta Z_n^{(t)}]$ come:

$$\Delta X_n^{(t)} = X_n - X_n^{(t)} ; \quad \Delta Y_n^{(t)} = Y_n - Y_n^{(t)} ; \quad \Delta Z_n^{(t)} = Z_n - Z_n^{(t)}$$

Dopo di che, l'errore medio ε_M e l'errore quadratico medio (root mean square (RMS) error) ε_R sono definiti come:

$$\varepsilon_M = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N \Delta X_n\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N \Delta Y_n\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N \Delta Z_n\right)^2}$$

$$\varepsilon_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (\Delta X_n)^2 + (\Delta Y_n)^2 + (\Delta Z_n)^2}$$

7.2.3.6 Unione delle superfici



Figura 5 Esempio di unione di superfici. (a) Le mesh 3D verdi e blu sono state ricostruite a partire da due coppie di fotocamere adiacenti. (b) Le regioni di sovrapposizione sono identificate e le facce sono rimosse dai contorni fino a quando la sovrapposizione non viene risolta ed esiste un gap minimo tra le superfici. Il gap, il quale ha bisogno di essere riempito con nuovi triangoli, è messo in evidenza da una linea magenta. (c) Il gap è riempito con nuove facce triangolati applicando localmente la triangolazione di Delaunay, usando solo vertici esistenti nei dati originali.

La tassellazione definita nello step 2 è qui usata per formare gli insiemi delle mesh 3D triangolari. Le mesh ottenute da ciascuna coppia di fotocamera sono indipendenti, non connesse l'una all'altra e possono sovrapporsi localmente. Al fine di costruire un'unica superficie continua, c'è bisogno di risolvere la sovrapposizione tra le mesh e di cucire insieme le mesh adiacenti. Un esempio schematico per risolvere la sovrapposizione e per unire due superfici adiacenti è mostrato in Figura 5.

Per risolvere la sovrapposizione, è stato sviluppato un algoritmo per cui le facce ridondanti sono rimosse iterativamente dai contorni delle regioni di sovrapposizione fino a che esista un gap minimo definito dall'utente tra le mesh. Per selezionare quali facce rimuovere, sono utilizzate le seguenti euristiche:

- 1. Il coefficiente di correlazione C_{LS} , che rappresenta la qualità della corrispondenza di ogni vertice (rimuovendo dapprima i vertici con coefficiente di correlazione più povero).
- 2. La distanza tra le mesh nella regione di sovrapposizione (rimuovendo dapprima le facce che hanno una distanza dall'altra mesh più grande).
- La differenza nell'orientazione locale tra le mesh nella regione di sovrapposizione (rimuovendo dapprima le facce che hanno uno spostamento angolare dall'altra mesh più grande).
- 4. Una combinazione di 1, 2, 3 con pesi opzionali.

Una volta che la sovrapposizione è risolta, come raffigurato in Figura 5 (b), le mesh sono unite introducendo nuove facce lungo il gap, connettendo i vertici originali da entrambe le mesh, come rappresentato in Figura 5 (c). L'algoritmo usa solo i vertici che esistono nei dati originali. L'introduzione di nuovi vertici non è dunque desiderabile, poiché questi non possono essere tracciati nelle configurazioni deformate e non possono fornire misure di spostamento e deformazione affidabili. Inoltre, non si preferisce mantenere tutti i punti ed effettuare nuovamente la mesh delle regioni che si sovrappongono in quanto questo porta ad una mesh più densa e spesso di qualità inferiore, e potrebbe portare a una superficie frastagliata nelle regioni in cui le superfici non possono essere unite accuratamente. La cucitura del gap è eseguita applicando localmente la triangolazione di Delaunay tra i vertici sui confini delle mesh, il quale massimizza l'angolo minimo dei triangolari sovrapposte possano essere unite con successo usando solo i vertici originali, nonostante si abbiano dimensioni dell'elemento differenti.

7.2.3.7 Post-processing

In questo step, le coordinate 3D dei vertici della mesh triangolare nelle configurazioni di riferimento e corrente sono utilizzati per derivare lo spostamento full-field, la deformazione e la tensione. Per ciascun elemento triangolare e per ciascuna configurazione, il tensore del gradiente di deformazione F è calcolato usando una variazione del metodo Triangular Cosserat Point Element (TCPE). Assumendo un campo di deformazione omogeneo in ciascun elemento, questo metodo ottiene il campo di deformazione finita (non lineare) con la stessa risoluzione

spaziale della misurazione DIC e indipendentemente dai punti dati adiacenti e dalle derivate numeriche.

La configurazione di riferimento di un dato elemento triangolare è denotata dai vettori posizione $\{P_1, P_2, P_3\}$ dei suoi tre vertici, e i valori di questi vettori di posizione nella configurazione corrente sono denotati da $\{p_1, p_2, p_3\}$. Inoltre, le configurazioni di riferimento e corrente sono caratterizzate dai vettori direttori $\{D_1, D_2, D_3\}$ e $\{d_1, d_2, d_3\}$ rispettivamente, definiti come:

$$D_{1} = P_{2} - P_{1} ; D_{2} = P_{3} - P_{1} ; D_{3} = \frac{D_{1} \times D_{2}}{|D_{1} \times D_{2}|}$$
$$d_{1} = p_{2} - p_{1} ; d_{2} = p_{3} - p_{1} ; d_{3} = \frac{d_{1} \times d_{2}}{|d_{1} \times d_{2}|}$$
$$D_{1} \times D_{2} \cdot D_{3} = 2A$$

In modo tale che D_3 e d_3 siano versori di lunghezza unitari normali al piano del triangolo nelle sue configurazioni di riferimento e corrente rispettivamente, e A sia l'area del triangolo di riferimento. Poi, i vettori reciproci di riferimento { D^1, D^2, D^3 } sono definiti come:

$$D^{1} = \frac{D^{2} \times D^{3}}{2A}$$
; $D^{2} = \frac{D^{3} \times D^{1}}{2A}$; $D^{3} = \frac{D^{1} \times D^{2}}{2A} = D_{3}$

Così che $D^i \cdot D_j = \delta^i{}_j$ dove $\delta^i{}_j$ è il simbolo delta di Kronecker. Di conseguenza, il tensore del gradiente di deformazione è definito da:

$$F = \sum_{i=1}^{3} d_i \otimes D^i$$

Dove \otimes è il prodotto tensoriale. *F* trasforma, dalla configurazione di riferimento a quella corrente, qualsiasi linea di materiale nell'elemento triangolare, inclusi i vettori direttori e le direzioni principali, così che esso soddisfi le seguenti relazioni:

$$d_i = FD_i$$
$$n_i = FN_i$$

Successivamente, i tensori destro e sinistro di deformazione di Cauchy-Green ($C \ e \ B$ rispettivamente) e gli associati tensori di deformazione finita di Green-Lagrange e Eulero-Almansi ($E \ ed \ e$ rispettivamente), sono definiti da:

$$C = F^{T}F$$
; $B = FF^{T}$
 $E = \frac{1}{2}(C - I)$; $e = \frac{1}{2}(I - B^{-1})$

Dove I è il tensore identità del secondo ordine. Inoltre, le decomposizioni spettrali di questi tensori sono date da:

$$C = \lambda_1^{2} (N_1 \otimes N_1) + \lambda_2^{2} (N_2 \otimes N_2) + \lambda_3^{2} (N_3 \otimes N_3)$$
$$B = \lambda_1^{2} (n_1 \otimes n_1) + \lambda_2^{2} (n_2 \otimes n_2) + \lambda_3^{2} (n_3 \otimes n_3)$$
$$E = E_1 (N_1 \otimes N_1) + E_2 (N_2 \otimes N_2) + E_3 (N_3 \otimes N_3)$$
$$e = e_1 (n_1 \otimes n_1) + e_2 (n_2 \otimes n_2) + e_3 (n_3 \otimes n_3)$$

Dove λ_i sono le tensioni principali, N_i e n_i sono le direzioni principali nelle configurazioni di riferimento e corrente, ed E_i e e_i sono le deformazioni principali di Green-Lagrange e di Eulero-Almansi, rispettivamente. Dato che ogni elemento triangolare è piano, una delle tensioni principali deve essere uguale a uno (ad esempio $\lambda_3 = 1$) e una delle deformazioni principali deve essere uguale a zero (ad esempio $E_3 = e_3 = 0$). Inoltre, le loro direzioni associate sono normali alla superficie del triangolo ($N_3 = D_3$ e $n_3 = d_3$). Si noti come, sebbene le deformazioni siano più utilizzate comunemente parlando, le tensioni spesso sono preferite nel caso di ampie deformazioni, dato che la loro definizione è unica mentre, oltre a quelle sopra descritte, esistono numerose definizioni di deformazione (ad esempio deformazioni della classe di Seth-Hill e deformazioni di Bazant).

Inoltre, la dilatazione *J*, che corrisponde al cambiamento dell'area della superficie del triangolo, è data da:

$$J = \det(F) = \lambda_1 \lambda_2$$

Quando la deformazione include grandi movimenti, spesso si desidera sottrare il medio RBM così che la deformazione possa essere visualizzata senza grandi movimenti dell'oggetto. Perciò, il medio RBM è stimato per ciascuna configurazione usando l'approccio della minimizzazione dei minimi quadrati (sovrapposizione rigida).

MultiDIC offre funzioni per la visualizzazione dinamica degli spostamenti, tensioni e deformazione (grandezza e direzione), cambiamento dell'area della superficie, così come misure addizionali come il coefficiente di correlazione e la texture del colore dalle immagini originali.

7.2.3.8 Configurazione sperimentale

È stato progettato e realizzato un impianto di fotocamere stereo a 360°, per sostenere 30 fotocamere (Raspberry Pi Camera Module V2, con un sensore Sony IMX219 da 8 megapixel 3.674 x 2.760 mm2 CMOS, connesso a Raspberry Pi Zero-w) in un cerchio di 700 mm di diametro, come mostrato in Figura 6. Gli oggetti che devono essere ripresi sono posizionati nel centro del cerchio dove possono essere illuminati uniformemente da matrici circolari di strisce LED flessibili. Tutte le fotocamere sono connesse da un hub Ethernet e controllate in modo sincrono da un PC. Per gli esperimenti descritti, sono state posizionate dodici fotocamere coassialmente in modo tale da formare dodici coppie stereo con uno spostamento angolare di 30° e in modo che la distanza tra ogni coppia di fotocamere contigue sia circa di 181 mm. Questo angolo stereo è abbastanza piccolo da fornire sia una porzione di sovrapposizione sufficiente sia un livello accettabile di distorsione tra le coppie di immagini, e allo stesso tempo abbastanza grande da permettere misurazioni fuori dal piano accurate. Il sistema è molto economico (< € 1.000 totali, includendo le 12 fotocamere, i cavi, i LED, l'hub Ethernet, le alimentazioni elettriche e i materiali di costruzione per l'impianto). È stato preparato un oggetto di calibrazione 3D attraverso la tornitura di un cilindro di alluminio lungo 250 mm e diametro 114 mm, per raggiungere un diametro uniforme per tutta la lunghezza del cilindro. Questo cilindro è stato poi avvolto in un foglio adesivo con un pattern rappresentante una griglia di punti quadrati neri (quadrati di 4 mm per 4 mm, 12 mm di spaziatura), come mostrato in Figura 6 (a).



Figura 6 Configurazione sperimentale. (a) L'impianto a 360° che sostiene le unità delle fotocamere Raspberry Pi, una delle quali è mostrata ingrandita in (b). Ciascuna coppia di fotocamere adiacenti [C₁, C₂], [C₂, C₃]... [C₁₂, C₁], costituisce una coppia stereo (P₁, P₂... P₁₂). L'oggetto di calibrazione è piazzato al centro dell'impianto ed è illuminato utilizzando fasce LED flessibili, le quali sono mostrate ingrandite in (c). Un modulo motorizzato di traslazione (d) è stato posizionate sotto l'oggetto di calibrazione per la validazione sperimentale.

7.2.3.9 Valutazione della performance metrologica

Per valutare gli errori associati alla calibrazione stereo indipendentemente dal processo DIC, è stato eseguito un esperimento, in cui le posizioni 3D dei centroidi dei punti neri sull'oggetto di calibrazione sono state analizzate prima e dopo aver applicato uno spostamento di 5 mm con

un modulo lineare motorizzato (Zaber Technologies A-LSQ075B-E01, errore del micro step massimo di 0.5 µm) come mostrato sul fondo del cilindro nella Figura 6 (a) e nella Figura 6 (d). I punti 3D ricostruiti sono stati poi sovrapposti alle loro posizioni di riferimento andando a stimare il RBM ottimale tra loro. Le distanze euclidee tra i punti corrispondenti rappresentano gli errori della calibrazione stereo.

Il prossimo insieme di esperimenti di verifica ha coinvolto un oggetto di prova 3D maculato, il quale è stato preparato applicando un foglio adesivo con un pattern a macchie (cerchi neri di 1.4 mm stampati in un pattern casuale su foglio bianco) sul cilindro in alluminio (vedi Figura 4). La superficie del cilindro è stata ripresa utilizzando l'impianto di fotocamere e analizzato usando MultiDIC. La performance dell'algoritmo 3D-DIC completo e il sistema sperimentale sono stati valutati analizzando l'accuratezza della forma ricostruita, l'errore di unione tra le coppie di fotocamere, l'errore dello spostamento, l'errore della deformazione.

L'accuratezza della misurazione della forma è stata valutata andando a confrontare il diametro del cilindro ricostruito al diametro misurato utilizzando un calibro ad alta precisione (accuratezza di ±0.01 mm). Poi, gli errori di unione tra le superfici ricostruite da differenti coppie di fotocamere è stato valutato ricostruendo una porzione della superficie visibile da tre fotocamere adiacente (come la regione di sovrapposizione illustrata in Figura 3. La fotocamera centrale (C_2) è stata definita come la fotocamera di riferimento per due coppie: [C_2, C_1] e [C_2, C_3], in modo tale che venga usato lo stesso punto griglia di riferimento per entrambe le coppie. Le nuvole di punti 3D ricostruite dalle due coppie di fotocamere dovrebbero essere teoricamente identiche. Perciò, qualsiasi distanza tra di esse rappresenta un errore di unione.

Ancora, il cilindro maculato è stato traslato utilizzando un modulo lineare motorizzato attraverso 10 step con incremento di 0.1 mm e gli errori di spostamento sono stati calcolati andando a confrontare gli spostamenti misurati utilizzando 3D-DIC e quelli misurati utilizzando il modulo. Inoltre, le deformazioni 3D, che dovrebbero essere teoricamente nulle, sono state analizzate per valutare l'accuratezza complessiva della misurazione di deformazione.

Infine, per dimostrare la capacità dei metodi proposti per misurare in-vivo forme e deformazioni, è stata misurata la superficie dell'arto inferiore di un soggetto umano (femmina sana di 34 anni). È stato realizzato uno stampo maculato personalizzato incidendo al laser un foglio di gomma con lo stesso pattern a macchie descritto sopra. È poi stato applicato uno strato

di inchiostro per tatuaggi bianco temporaneo (ProAiir, ShowOffs Body Art LLC., USA) sulla superficie della pelle per migliorare il contrato e creare un background omogeneo. La parte inferiore della gamba del soggetto è stata ripresa mentre il soggetto eseguiva uno stretching della plantarflessione della caviglia (dalla posizione più dorsiflessa a quella più plantarflessa). La procedura sperimentale è stata approvata dal Committee on the Use of Human sas Experimental Subjects of the Massachussetts Institute of Technology (COUHES protocol: 1101004280).

Tutte le analisi DIC sono state eseguite usando un raggio del subset di 20 pixel e una dimensione dello step di 10 pixel a un rapporto di 10 pixel/mm. Tutti i risultati rappresentano dati grezzi. Non è stata applicata alcuna procedura di filtraggio o di appiattimento.

7.2.4 Risultati della prova su arto inferiore di un soggetto umano

Parameter	Original image	After distortion correction	
f_X	2611.7 ± 5.8	2611.9 ± 5.7	
f_y	2615.4 ± 5.6	2615.7 ± 5.5	
C_x	1246.5 ± 34.5	1247.7 ± 36.4	
C_y	1627.7 ± 16.9	1627.2 ± 17.4	
\$	-1.37 ± 0.37	-1.37 ± 0.34	
k_1	0.17862 ± 0.01803	0.00002 ± 0.0001	
<i>k</i> ₂	-0.295 ± 0.167	0.002 ± 0.001	
<i>k</i> 3	-0.19 ± 0.45	0.00 ± 0.00	
p_1	0.00015 ± 0.00023	0.00004 ± 0.00006	
p_2	0.00068 ± 0.00066	0.00009 ± 0.00001	

7.2.4.1 Parametri intrinsechi della fotocamera ed errori di ricostruzione 3D

Tabella 1 Statistiche dei parametri intrinsechi stimati.

La Tabella 1 riporta la media \pm la deviazione standard (STD) dei parametri intrinsechi calcolati utilizzando il metodo BA per le dodici fotocamere. Per ciascuna fotocamera, sono state acquisite 50 immagini di un pattern piano a scacchiera con 15 x 20 quadrati neri e bianchi di 10 x 10 mm². Il numero di cifre significative per ciascun parametro è basato sulla sua stima

dell'errore, come calcolato dall'algoritmo BA. I parametri di distorsione calcolati usando le immagini originali sono stati utilizzati per correggere la distorsione sui punti dell'immagine rilevata. I punti corretti sono stati poi utilizzati nuovamente per stimare i parametri. Perciò, i parametri di distorsione nella colonna a destra della Tabella 1 rappresentano i valori della distorsione residua. I valori degli errori di ricostruzione 3D ε_M ed ε_R , ottenuti per tutte le coppie di fotocamera utilizzando DLT con e senza la correzione della distorsione, sono riportati nella Tabella 2.

Pair number	Camera	With DC ¹		Without DC ¹	
		$\varepsilon_{M}[mm]$	$\varepsilon_R[mm]$	$\varepsilon_M[mm]$	$\varepsilon_R[mm]$
1	[1,2]	0.002	0.051	0.003	0.446
2	[2,3]	0.003	0.045	0.005	0.375
3	[3,4]	0.001	0.058	0.009	0.357
4	[4,5]	0.001	0.059	0.007	0.364
5	[5,6]	0.001	0.046	0.003	0.332
6	[6,7]	0.002	0.034	0.003	0.343
7	[7,8]	0.003	0.055	0.008	0.425
8	[8,9]	0.002	0.041	0.006	0.366
9	[9,10]	0.002	0.042	0.003	0.345
10	[10,11]	0.002	0.042	0.004	0.338
11	[11,12]	0.001	0.054	0.003	0.414
12	[12,1]	0.003	0.038	0.006	0.442
All camera	5	0.002	0.047	0.005	0.379

¹DC = Distortion Correction

Tabella 2 Errori di ricostruzione per tutte le coppie di fotocamere.

7.2.4.2 Prova di calibrazione stereo



Figura 7 Analisi dell'errore di calibrazione stereo. Sono stati analizzati due insiemi di immagini dell'oggetto di calibrazione (prima e dopo lo spostamento di 5 mm) (a). Le posizioni 3D dei punti di controllo sull'oggetto di calibrazione, come ricostruito nel primo insieme (cerchi neri vuoti) e le loro posizioni misurate nel secondo insieme (spostate) sovrapposte al primo insieme (plottato con colori che rappresentano la distanza assoluta tra loro). (b) Le statistiche dell'errore per tutti i punti di controllo, ottenute con e senza la correzione della distorsione, nelle direzioni x, y e z, e la grandezza dell'errore (magnitude (Mgn)). I plot sulla destra riportano la mediana (linea rossa), il 25 esimo e 75 esimo quartile (box blu), e gli outlier (croci rosse). La linea verde tratteggiata rappresenta l'errore zero e la linea magenta tratteggiata rappresenta l'errore RMS.

La Figura 7 riporta gli errori di calibrazione stereo, rappresentati da distanze euclidee tra i punti corrispondenti dell'oggetto di calibrazione misurato in due configurazioni e sovrapposto rigidamente. La Figura 7 (a) illustra la grandezza degli errori dei singoli punti e la Figura 7 (b) riassume le componenti 3D degli errori ottenute con e senza la correzione della distorsione. Gli errori medi sono stati molto piccoli sia con che senza la correzione della distorsione $(\sim 10^{-14} mm)$ ma la RMS delle grandezze di errore è stata più piccola quando è stata impiegata la correzione della distorsione (0.017 mm) rispetto a quando non è stata impiegata (0.026 mm).

7.2.4.3 Prove 3D-DIC di un oggetto rigido maculato

Gli errori riportati in questa sezione sono associati all'intera procedura 3D-DIC. La correttezza della misurazione della forma è stata valutata confrontando il diametro del cilindro ricostruito al diametro di 114.00 mm (che include il foglio adesivo) misurato utilizzando il calibro. La media \pm STD del diametro misurato utilizzando il 3D-DIC è stato di 113.93 \pm 0.27 e di 113.91 \pm 0.56 mm, con e senza la correzione della distorsione, rispettivamente.

Gli errori di unione tra le superfici ricostruite a partire da due differenti coppie di fotocamere sono mostrate in Figura 8 (a).



Figura 8 Risultati 3D-DIC di un cilindro rigido maculato. (a) Errore di unione rilevato come la distanza euclidea tra i punti ricostruiti a partire da due coppie di fotocamere adiacenti (come, ad esempio, la regione di sovrapposizione in Figura 2); (b) Risultati da un insieme di 10 traslazioni imposte (d₀) con un incremento di 0.1 mm. Gli spostamenti misurati (sopra), gli errori di spostamento (centro) e la grandezza della deformazione di Green-Lagrange (basso) sono plottati come barre di errore che rappresentano ± una STD su tutti i punti dati; (c) La distribuzione della grandezza di deformazione di Green-Lagrange plottata su metà del cilindro, per lo step di spostamento di 0.5 mm.

I punti ricostruiti sono plottati con colori che rappresentano la grandezza della distanza euclidea tra due insiemi. Le medie \pm STD degli errori sono state 0.06 ± 0.03 mm e 0.08 ± 0.06 mm con e senza la correzione della distorsione, rispettivamente. Come atteso, la correzione della

distorsione ha migliorato l'accuratezza dell'unione maggiormente nelle estremità inferiori e superiori della ROI, corrispondenti alle aree marginali delle immagini.

Gli spostamenti e gli errori di spostamento sono riassunte nella Figura 8 (b) (sopra e centro) come funzione dello spostamento imposto. La Figura 8 (c) mostra la distribuzione della grandezza della deformazione lungo la metà del cilindro, per lo step di spostamento di 0.5 mm, mentre le statistiche per tutti gli step di spostamento sono riassunte nella Figura 8 (c) (sotto).

7.2.4.4 Prova 3D-DIC in-vivo di un segmento di corpo deformabile

Nella Figura 9 sono mostrati i risultati illustrativi della misurazione in-vivo 3D-DIC.



Figura 9 Prova di un segmento di corpo in-vivo. Mappe di correlazione. Sotto-figure (a)-(d) mostrano immagini da fotocamere adiacenti nelle configurazioni di riferimento (a, b) e deformate (c, d). La ROI è plottata con colori che rappresentano il coefficiente di correlazione e le porzioni zoomate sono ingrandite negli inserti.

L'intera superficie della regione del polpaccio della gamba è stata ripresa cinque volte mentre il soggetto eseguiva la plantarflessione della caviglia. I risultati della prima e dell'ultima configurazione sono illustrati nella Figura 9 e nella Figura 10.



Figura 10 Prova di un segmento di corpo in-vivo. Deformazioni. L'intera superficie ricostruita a 360° a partire dalle 12 fotocamere è mostrata nelle sue configurazioni di riferimento (a) e deformata (b). I colori della faccia rappresentano i valori delle tensioni principali λ_1 (b) e λ_2 (c), e le linee nere rappresentano le direzioni principali N_1 (b) e N_2 (c). E' stata aggiunta illuminazione per visualizzare meglio i contorni della superficie.

La Figura 9 illustra i risultati 2D-DIC per una coppia stereo. La Figura 9 (a) mostra l'immagine di riferimento, sulla quale è stata definita la griglia di punti. Le immagini nella Figura 9 (b-d) rappresentano gli stati deformati di (a). Notiamo che la distorsione dell'immagine rispetto ad (a) è dovuta alla prospettiva in (b), alla deformazione in (c) e alla prospettiva e alla deformazione in (d). La Figura 10 plotta l'intera superficie ricostruita dalle 12 fotocamere nelle configurazioni di riferimento (a) e deformate (b e c), le quali corrispondono alle stesse configurazioni mostrate in Figura 9. I colori sulla superficie rappresentano i valori locali della prima e della seconda tensione principale, e le linee nere rappresentano le loro direzioni, con lunghezze proporzionali alla grandezza della tensione.

I campi di deformazione sono visibilmente piatti, nonostante essa sia stata calcolata indipendentemente su ciascuna faccia triangolare e nonostante non sia stato applicato nessun filtraggio e appiattimento ai dati grezzi, contrariamente ai comuni schemi di calcolo DIC. È possibile poi ottenere figure animate che plottano i valori dinamici della grandezza di

spostamento, di deformazione di Lagrange, le tensioni principali, il cambiamento dell'area di superficie e l'effetto della sottrazione di RBM.

7.2.4.5 Discussione

Questo capitolo descrive, dunque, i principali algoritmi implementati in MultiDIC, un toolbox 3D-DIC di MATLAB di nuova concezione per sistemi multi-fotocamera. I metodi e il sistema sono stati progettati per superare alcune delle limitazioni che si presentano con le tecniche di calibrazione e di fusione dei dati comunemente utilizzate nella 3D-DIC. Un vantaggio primario del MultiDIC è che esso consente un processo di calibrazione semplice anche quando si utilizza un elevato numero di fotocamere, senza perdere la capacità di compensare le distorsioni della lente. Di conseguenza, il nuovo metodo offre la flessibilità di modificare le posizioni delle fotocamere durante gli esperimenti senza richiedere un sostanziale e addizionale tempo di ricalibrazione.

Le capacità metrologiche di MultiDIC sono state validate da molteplici prove sperimentali usando una configurazione multi-camera low-cost. Gli errori associati al metodo di calibrazione stereo proposto sono stati esaminati indipendentemente dalla procedura DIC, analizzando le posizioni 3D dei punti di controllo dell'oggetto di calibrazione in due configurazioni. Si è visto come gli errori fossero più piccoli nel caso di correzione della distorsione piuttosto che nel caso di non correzione. Questi errori sono relativamente bassi considerando la grande dimensione dell'oggetto di calibrazione, il grande FOV delle fotocamere e il basso costo dell'attrezzatura.

Successivamente, gli errori metrologici associati all'intera procedura 3D-DIC multi-view sono stati valutati misurando la forma, lo spostamento e l'errore di deformazione con un oggetto cilindrico maculato. Le misurazione della forma hanno fornito errori più piccoli di 0.01 mm in riferimento al diametro del cilindro. Anche gli errori di unione e di spostamento ricavati sono risultati essere nell'ordine di 0.01 mm e, dunque, comparabili agli errori di calibrazione stereo. Inoltre, le deformazioni misurate come risultato di un RBM sono state nel range di 10⁻³ il quale è sufficientemente accurato nel nostro caso ed è accettabile nella maggior parte delle applicazioni biomediche, nelle quali sono coinvolte grandi deformazioni. Ancora, l'errore di deformazione è relativamente basso considerando che, contrariamente agli schemi di calcolo DIC comunemente adottati, non è stato applicato alcun tipo di filtraggio o appiattimento dei dati grezzi.

Il toolbox MultiDIC e l'impianto delle fotocamere sono stati utilizzati per misurazioni in-vivo per illustrare ulteriori capacità del sistema. È stato mostrato che il comportamento dinamico dell'intera superficie del segmento di gamba di un soggetto umano può essere ricostruito, che può essere ottenuto un campo di deformazione piatto a partire da dati grezzi e che possono essere tracciate grandi deformazioni. I risultati in Figura 10 e nelle eventuali figure animate possono mostrare come la forma dell'arto inferiore del soggetto cambia a causa della concentrazione dei muscoli del polpaccio e della plantarflessione della caviglia. Questo test è servito come prova di principio, e non intendeva fornire alcun risultato fisiologico o biomeccanico.

La limitazione principale di questo studio è stata unicamente nel fatto che le prove di performance metrologiche sono state eseguito usando dei moduli di fotocamere low-cost. Perciò, le accuratezze fin qui fornite sono adeguate solo per certe applicazioni. In ogni caso, ci si aspetta che l'intera procedura superi le prestazioni quando vengono utilizzate fotocamere e lenti di alta qualità. L'uso di un hardware low-cost è stato motivato dall'elevato numero di fotocamere richiesto ed è stato comunque incoraggiato da studi precedenti che hanno dimostrato la fattibilità di utilizzo di fotocamere consumer-grade. Un'altra limitazione è che, in questo studio, è stata utilizzata una sola configurazione multi-view e un solo oggetto di calibrazione. Tuttavia, il toolbox può essere facilmente adattato a qualsiasi configurazione multi-view, purché venga utilizzato un oggetto di calibrazione con una geometria adatta.

7.3 **DICe**

DICe è uno strumento open source per la correlazione delle immagini digitali (DIC) destinato all'uso come modulo in un'applicazione esterna o come codice di analisi autonomo. Le sue capacità principali sono la computazione full-field degli spostamenti [8] e delle deformazioni [9] a partire da sequenze di immagini digitali e il tracciamento del movimento di corpo rigido di determinati oggetti. Le immagini analizzate sono tipicamente di un campione di materiale sottoposto a un esperimento di caratterizzazione ma DICe è utile anche per altre applicazioni (per esempio, il tracciamento della traiettoria).

DICe è differente rispetto ad altri codici DIC disponibili per le seguenti caratteristiche:

- Primo, il subset può essere di forma arbitraria. Questo consente il tracciamento di oggetti oblunghi che altrimenti non sarebbero tracciabili con un subset quadrato.
- DICe include anche un metodo di ottimizzazione semplice che non usa i gradienti di immagine (questo metodo è utile per quegli insiemi di dati che sono impossibili da analizzare con gli algoritmi più tradizionali, per esempio oggetti senza macchioline, immagini con poco contrasto e dimensioni del subset piccole < 10 pixel).
- Infine, DICe include una formulazione DIC well-posed che affronta le instabilità associate al problema del punto di sella in DIC.

Capitolo 8 Esempio applicativo MultiDIC

In questo capitolo, andremo ad analizzare, da un punto di vista maggiormente pratico e applicativo, il flusso di lavoro che bisogna seguire nel MultiDIC [10], il quale è stato già precedentemente rappresentato in Figura 3. In particolare, andando a sfruttare immagini precedentemente acquisite, sfrutteremo gli script di cui si costituisce il MultiDIC per ottenere grafici funzionali alla nostra applicazione, per poi discuterne i risultati. Si tratta di una prima fase applicativa del toolbox open-source 3D-DIC di MATLAB, al fine di capirne le potenzialità.

8.1 Preparazione

MultiDIC è stato sviluppato su MATLAB. I toolbox richiesti per poter condurre le analisi sono i seguenti:

- Image Processing Toolbox
- Statistics and Machine Learning Toolbox
- Computer Vision System Toolbox

MultiDIC include il software 2D-DIC Ncorr, il quale richiede un compiler MEX (C++).

Per condurre un'analisi 3D-DIC completa sono necessari i seguenti elementi:

- Un insieme di immagini di calibrazione stereo, nel quale è ripreso un oggetto di calibrazione 3D da tutte le fotocamere. Attualmente, per il toolbox, si richiede che l'oggetto di calibrazione sia cilindrico o semi-cilindrico con punti neri su un background bianco.
- Un insieme di immagini dell'oggetto di prova maculato il quale è ripreso da tutte le fotocamere in una configurazione di riferimento (indeformata) e una configurazione deformata.

Un insieme di immagini di un pattern piano a scacchiera, necessario solo nel caso in cui sia richiesta la correzione della distorsione. Generalmente, si richiede un numero di immagini vicino a 50, con il pattern a scacchiera che viene mosso e ruotato rispetto a ciascuna fotocamera, in modo tale da coprire l'intero FOV. Inoltre, bisogna eliminare le immagini in cui il bordo è tagliato e quelle che risultano sfocate.

Per il primo esempio applicativo, si è fatto riferimento all'insieme delle immagini contenute nella cartella MultiDIC-master > sample data ottenuta effettuando il download di MultiDIC.

I dati includono le immagini scattate da due fotocamere, qui denominate 201 e 202. La cartella BAcheckerboardImages contiene un totale di 50 immagini di cui 25 immagini di un pattern a scacchiera scattate per ciascuna delle due fotocamere, necessarie per la correzione della distorsione, relativa allo STEP 0 del flusso di lavoro. La cartella calibrationObjectImages contiene le immagini di calibrazione stereo per entrambe le fotocamere e il file MATLAB contenente le coordinate reali dei punti di controllo della calibrazione. Queste immagini sono necessarie per eseguire lo STEP 1. La cartella speckledObjectImages contiene le immagini dell'oggetto maculato per l'analisi: sono incluse 5 immagini per ciascuna fotocamera, ognuna rappresentante una configurazione diversa. In particolare, abbiamo che la prima immagine relativa alla fotocamera 201 rappresenta la configurazione di riferimento.

Il flusso di lavoro è composto da 5 step, ognuno dei quali è eseguito utilizzando un main script. Gli script hanno permesso di condurre una completa analisi 3D-DIC senza dover interagire direttamente con la sintassi MATLAB.

8.1.1 STEP 0: calcolare i parametri di distorsione

Il main script relativo a questo step è quello che ha consentito di calcolare i parametri di distorsione per entrambe le fotocamere.

Lo script esegue le seguenti operazioni principali:

- Stimare i parametri della fotocamera partendo da molteplici immagini di un pattern a scacchiera.
- Utilizzare questi parametri per correggere la distorsione dell'immagine.

Plottare i parametri della fotocamera e gli errori di riproiezione, prima e dopo la correzione.

I parametri di distorsione trovati in questo step, possono essere utilizzati per correggere la distorsione su tutte le immagine prese dalla stessa fotocamera, fintanto che i parametri intrinsechi non vengono cambiati (cioè, la fotocamera può essere mossa ma il fuoco non deve essere cambiato). In particolare, questi parametri possono essere utilizzati nello STEP 1p e nello STEP 3 per correggere la distorsione sulle immagini di calibrazione e su quelle dell'oggetto maculato, rispettivamente.

Entrando più nel dettaglio del nostro esempio applicativo, per la fase di calcolo dei parametri della distorsione è stato utilizzato un pattern piano a scacchiera con 15 x 20 quadrati neri e bianchi con lato di 10 mm, come illustrato nella Figura 11. Inoltre, si è utilizzato un modello di distorsione che comprendesse la distorsione tangenziale, l'inclinazione e tre coefficienti per la distorsione radiale.



Figura 11 Esempio di tutte le 25 immagini del pattern a scacchiera, riprese dalla fotocamera 201.

A questo punto, lo script ci restituisce una figura che mostra i parametri intrinsechi ed esterni, e gli errori di riproiezione di ciascuna fotocamera (abbiamo due finestre di cui una mostra i risultati prima della correzione della distorsione e un'altra dopo la correzione della distorsione), come mostrato in Figura 12. Inoltre, per ciascuna fotocamera lo script restituisce una figura che mostra i punti riproiettati e le statistiche dell'errore di riproiezione su ciascuna immagine (una figura per le immagini originali e una figura dopo la correzione della distorsione), come mostrato invece in Figura 13.



Figura 12 Esempio di parametri intrinsechi ed esterni, ed errori di riproiezione della fotocamera 201, prima della correzione della distorsione.



Figura 13 Esempio che mostra la relazione tra i punti rilevati (Detected Points) e riproiettati (Reprojected Points) e associati errori di riproiezione (px) per l'immagine 5 della fotocamera 201.

Le stesse figure sono state ovviamente ottenute anche per la fotocamera 202. I risultati relativi ai parametri intrinsechi di ciascuna fotocamera, prima e dopo la correzione della distorsione, sono riassunti all'interno delle seguenti tabelle :
	Fotocamera 201	
Parametri	Immagine originale	Dopo la correzione della distorsione
fx	2607.8 ± 0.98	2608.7 ± 0.98
fy	2610.9 ± 0.97	2611.9 ± 0.97
Cx	1274.7 ± 0.43	1275.7 ± 0.44
Су	1604.7 ± 0.5	1602.5 ± 0.54
k1	0.1529 ± 0.001308	-0.0002013 ± 0.001269
k2	-0.0118 ± 0.01351	0.001398 ± 0.01323
k3	-0.9933 ± 0.04163	-0.000992 ± 0.04066
p1	$-0.002839 \pm 8.51e-05$	$-0.0002428 \pm 6.717e-05$
p2	$0.0004425 \pm 7.35 \text{ e-}05$	$9.617e-05 \pm 5.526e-05$
S	-2.087 ± 0.05437	-0.03582 ± 0.05334

Tabella 3 Parametri intrinsechi fotocamera 201 prima e dopo la correzione della distorsione.

	Fotocamera 202	
Parametri	Immagine originale	Dopo la correzione della distorsione
fx	2622.9 ± 1	2623.2 ± 1
fy	2628.1 ± 1	2628.4 ± 1
Сх	1247.5 ± 0.44	1249.9 ± 0.46
Су	1646.4 ± 0.55	1645.6 ± 0.6
k1	0.1818 ± 0.001115	-0.0002484 ± 0.00106
k2	-0.3694 ± 0.009481	0.00184 ± 0.009197
k3	0.02602 ± 0.02444	-0.002577 ± 0.02386
p1	$-0.0001732 \pm 8.92e-05$	$-8.663e-05 \pm 7.069e-05$
p2	$0.0002959 \pm 6.76e-05$	$0.0002333 \pm 5.377e-05$
S	-0.6396 ± 0.05694	-0.005956 ± 0.05684

Tabella 4 Parametri intrinsechi fotocamera 202 prima e dopo la correzione della distorsione.

Arrivati a questo punto, lo script ci dà la possibilità di eliminare alcune delle immagini che sono caratterizzate dall'avere gli errori di riproiezione (px) più grandi. In particolare, ciò che fa lo script in MATLAB è calcolare l'errore medio per ciascun immagine e confrontarlo con un valore soglia dell'errore medio, calcolato automaticamente dallo script sulla base degli errori di riproiezione. A questo punto se l'errore medio di una determinata immagine sarà più grande

del valore soglia, allora la stessa sarà eliminata. In questo caso, per entrambe le fotocamere (201 e 202) sono state eliminate 5 immagini dalle 25 di partenza, assumendo come valore soglia dell'errore medio rispettivamente 0.58695 px e 0.50971 px.

Fatto questo, l'analisi vista precedentemente, che porta alla determinazione dei parametri di distorsione, viene eseguita nuovamente, fornendo figure del tutto simili a quelle viste precedentemente, con l'unica differenza che adesso saranno utilizzate 20, e non più 25, immagini del pattern piano a scacchiera per ciascuna delle due fotocamere. Ancora una volta, i parametri intrinsechi delle due fotocamere definitivi sono raccolti all'interno delle seguenti tabelle:

	Fotocamera 201	
Parametri	Immagine originale	Dopo la correzione della distorsione
fx	2604.2 ± 1.1	2605.1 ± 1.1
fy	2607.3 ± 1	2608.3 ± 1
Cx	1274.6 ± 0.43	1275.4 ± 0.44
Су	1609.2 ± 0.52	1607.3 ± 0.56
k1	0.1521 ± 0.001297	-0.0001901 ± 0.00126
k2	-0.02215 ± 0.01339	0.00153 ± 0.01314
k3	-0.9473 ± 0.0412	-0.001829 ± 0.04031
pl	$-0.001967 \pm 8.69 \text{e-} 05$	$-0.0002004 \pm 6.851e-05$
p2	$0.0004891 \pm 7.40 \text{ e-}05$	$8.214e-05 \pm 5.578e-05$
s	-1.992 ± 0.05505	-0.02907 ± 0.0545

 Tabella 5 Parametri intrinsechi fotocamera 201 prima e dopo la correzione della distorsione, a seguito dell'eliminazione delle immagini con gli errori di riproiezione che superano il valore soglia dell'errore medio pari a 0.58695 px.

	Fotocamera 202	
Parametri	Immagine originale	Dopo la correzione della distorsione
fx	2617.9 ± 0.89	2618.2 ± 0.9
fy	2622.6 ± 0.89	2622.8 ± 0.9
Сх	1246.6 ± 0.41	1248.3 ± 0.43
Су	$1647.8.7 \pm 0.53$	1647.3 ± 0.57
k1	0.1761 ± 0.001143	-0.0002352 ± 0.001095
k2	-0.2931 ± 0.01048	0.002065 ± 0.01023
k3	-0.2083 ± 0.02909	-0.004341 ± 0.02864

p1	$\textbf{-0.000454} \pm 8.89 e\textbf{-05}$	$-5.316e-05 \pm 7.021e-05$
p2	$0.0006618 \pm 6.66 \text{ e-}05$	$0.0001723 \pm 5.26e-05$
S	-1.582 ± 0.055	-0.02079 ± 0.05455

 Tabella 6 Parametri intrinsechi fotocamera 202 prima e dopo la correzione della distorsione, a seguito dell'eliminazione delle immagini con gli errori di riproiezione che superano il valore soglia dell'errore medio pari a 0.50971 px.

8.1.2 STEP 1: calcolare i parametri DLT (calibrazione stereo)

Lo STEP 1 consente di trovare i parametri di calibrazione per ciascuna fotocamera necessari a stabilire la mappatura tra i punti di immagine 2D e i punti del mondo 3D, basandosi sulle immagini dell'oggetto di calibrazione e sulle posizioni note dei punti di controllo dell'oggetto di calibrazione. L'oggetto di calibrazione 3D per un'analisi multi-view si preferisce sia un oggetto cilindrico o semi-cilindrico con punti neri su un background bianco. In questo caso, è stato utilizzato un oggetto cilindrico il cui diametro è di 114 mm, l'altezza di 250 mm e ricoperto da un foglio adesivo con un pattern rappresentante una griglia di punti quadrati neri di 4 mm per 4 mm e 12 mm di spaziatura, le cui colonne sono identificate tutte da un numero.

Entrando più nel dettaglio, il main script relativo allo STEP 1, in una fase iniziale, richiede di selezionare le immagini dell'oggetto di calibrazione per ciascuna delle due fotocamere (201 e 202). Se le immagini sono basate su un modello di colori RGB, lo script le trasforma in una scala di grigi, come illustrato in Figura 14 (a).

Dopo aver deciso la cartella in cui predestinare il salvataggio dei parametri DLT, lo script richiede di selezionare il file MATLAB contenente le coordinate 3D dei punti di controllo dell'oggetto di calibrazione. A questo punto, viene aperta un'interfaccia utente che consente di disegnare un poligono attorno alla regione d'interesse, la quale comprende la porzione di immagine che contiene i punti di controllo della calibrazione, come illustrato in Figura 14 (b).



Figura 14 (a) Immagine dell'oggetto di calibrazione ripresa dalla fotocamera 201 trasformata in scala di grigi. (b) Immagine del poligono disegnato attorno alla regione d'interesse contenente i punti di calibrazione relativamente alla fotocamera 201.

Seppure le immagini di cui sopra, fanno unicamente riferimento alla fotocamera 201, la stessa operazione sarà poi ripetuta anche per l'immagine dell'oggetto di calibrazione ripresa dalla fotocamera 202. In particolare, la regione d'interesse per la fotocamera 201 comprende i punti di calibrazione che vanno dalla colonna 2 alla 10. Invece, per la fotocamera 202, essa comprende i punti di calibrazione che vanno dalla colonna 5 alla 12. Saranno proprio questi, ovvero il numero della prima colonna e l'ultimo numero della colonna, i successivi parametri di input dello script. A questo punto, sono calcolati il numero di punti e le posizioni dei centroidi dei quadrati neri del pattern e sono plottati sull'immagine come mostrato in Figura 15. In questa fase, l'utente ha la possibilità di modificare il valore soglia dell'intensità di grigio, dal quale i punti neri sono identificati, al fine di ottenere posizioni dei centroidi che siano più accurate. In questo caso, dato che le immagini sono state acquisite con condizioni di illuminazione e di contrasto adeguate, i valori iniziali consigliati dallo script, 131 per la fotocamera 201 e 135 per la fotocamera 202, possono essere considerati corretti.

Dopo aver confermato il valore di soglia dell'intensità di grigio, i centroidi vengono fissati, per poi essere numerati in modo crescente, per colonna, da sinistra verso destra, e per riga, dal basso verso l'alto. I punti, così ordinati, sono rappresentati sull'immagine come mostrato in Figura 16.



Figura 15 Centroidi rilevati sulla base del valore soglia del livello di grigio (gray level threshold) tra le regioni bianche e nere.



Sorted points, camera 201. Click on the figure to continue

Figura 16 Centroidi ordinati per colonne e per righe.

8.1.3 STEP 1p: calcolare gli errori di ricostruzione

Lo STEP 1p può essere considerato uno step opzionale e non necessariamente richiesto per completare l'analisi DIC. Ad ogni modo, trattandosi di una fase di studio del toolbox Multi-DIC, si è deciso comunque di eseguire tale step. Esso sfrutta i risultati salvati nello STEP 1, in termini di parametri DLT, per ricostruire le posizioni 3D dei punti di controllo dell'oggetto di calibrazione a partire dai corrispondenti punti delle immagini ottenute dalla coppia di fotocamere [201 202]. Fatto questo, lo step è utilizzato per valutare gli errori di ricostruzione del precedente step di calibrazione.

Entrando più nel dettaglio, il main script relativo allo STEP 1p, in una fase iniziale, richiede di selezionare le structures salvate nello STEP 1, per la coppia di fotocamere [201 202]. Lo script richiede di selezionare le coppie di fotocamere per le quali sia possibile definire una regione di sovrapposizione nel FOV delle stesse. In questo caso specifico, tuttavia, abbiamo a disposizione un'unica coppia di fotocamere.

Dopo aver deciso la cartella in cui predestinare il salvataggio dei risultati relativi agli errori di ricostruzione, lo script ci dà la possibilità di sfruttare i risultati ottenuti nello STEP 0 in modo tale da rimuovere la distorsione dai punti di calibrazione. Una volta selezionata la cartella nella quale sono stati salvati i parametri di distorsione, lo script fornisce i punti 3D ricostruiti e i corrispondenti errori di ricostruzione, come mostrato nella Figura 17 e Figura 18.



Figura 17 Punti 3D dell'oggetto di calibrazione che sono stati ricostruiti utilizzando le immagini provenienti dalla coppia di fotocamere [201 202].

Reconstruction error statistics for all pairs [mm]



Figura 18 Errori di ricostruzione plottati per la coppia di fotocamere [201 202] (a sinistra) e loro statistiche riportate sotto forma di blocchi (a destra).

Ricordiamo che l'errore medio ε_M e l'errore quadratico medio (root mean square error (RMSE)) ε_R sono definiti dalle seguenti equazioni, che mettono, per l'appunto, a confronto le coordinate dei punti ricostruiti e le vere coordinate associate:

$$\varepsilon_{M} = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^{N} \Delta X_{n}\right)^{2} + \left(\sum_{n=1}^{N} \Delta Y_{n}\right)^{2} + \left(\sum_{n=1}^{N} \Delta Z_{n}\right)^{2}} = 0.00334$$
$$\varepsilon_{R} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} (\Delta X_{n})^{2} + (\Delta Y_{n})^{2} + (\Delta Z_{n})^{2}} = 0.0607$$

8.1.4 STEP 2: 2D-DIC con Ncorr

Il main script corrispondente allo STEP 2 consente di analizzare le immagini stereo dell'oggetto maculato utilizzando 2D-DIC. In particolare, per eseguire questo script viene utilizzato il software Ncorr. Questo STEP può essere eseguito prima o dopo lo step 1 ma in ogni caso deve essere eseguito per ciascuna coppia di fotocamere e deve essere completato prima che possano essere ricostruiti i punti 3D e le superfici nello STEP 3. Per ciascuna coppia di fotocamere, si

ha che una delle due deve essere considerata come la fotocamera di riferimento mentre l'altra deve essere considerata come la fotocamera "deformata". Questo significa che le immagini prese dalla fotocamera "deformata" sono analizzate come versioni deformate delle immagini prese dalla fotocamera di riferimento.

In questo esempio applicativo specifico, lo stesso oggetto è stato utilizzato sia come oggetto di calibrazione sia come campione maculato. È bene precisare, tuttavia, che questo è soltanto un caso particolare, in quanto, quasi sempre, l'oggetto di calibrazione e il campione maculato sono oggetti completamente diversi. Ancora una volta specifichiamo che lo script sarà eseguito avendo a disposizione solamente una coppia di fotocamere [201 202].

Entrando più nel dettaglio, il main script relativo allo STEP 2, in una fase iniziale, richiede di selezionare le cartelle all'interno delle quali sono salvate le immagini dell'oggetto maculato, di cui la prima cartella sarà quella associata alla fotocamera di riferimento (in questo caso la fotocamera 201) mentre la seconda sarà associata alla fotocamera deformata (in questo caso la fotocamera 202). Per ciascuna delle due fotocamere sono state scattate simultaneamente 5 immagini. Lo script, dunque, ci restituisce una figura che mostra le coppie di immagini scattate dalle fotocamere in tempi diversi, come mostrato in Figura 19. Nella parte inferiore possiamo notare anche una barra che ci consente di scorrere le coppie di immagini.



Image set for DIC. Press the play button to preview all images, press the stop button to stop animation, and then press any key in the command window to continue

Figura 19 Esempio delle coppie di immagini scattate dalla fotocamera 201 (a sinistra) e dalla fotocamera (202) in istanti temporali diversi (in questo caso si osserva l'immagine 3 di entrambe le fotocamere).

Il flusso di lavoro del software Ncorr prevede che i primi due passi da eseguire siano impostare l'immagine di riferimento e l'immagine attuale (o più immagini attuali). Il main script relativo a questo step prevede che l'immagine di riferimento sia la prima immagine della fotocamera di riferimento (cioè l'immagine 1 della fotocamera 201). Invece, per quel che riguarda le immagini attuali, considera tutte le immagini selezionate inizialmente e le numera in maniera ordinata partendo da quelle della fotocamera di riferimento sino ad arrivare a quelle della fotocamera "deformata". Dunque, in questa applicazione avremo a disposizione 10 immagini attuali.

Il passo successivo consiste nel definire la regione di interesse (ROI) sull'immagine di riferimento, assicurandosi che la stessa sia visibile in tutte le immagini di entrambe le fotocamere. Dato che questa è la prima analisi 2D-DIC condotta sull'oggetto maculato, si è utilizzata l'opzione *New* che permette di disegnare un poligono attorno alla ROI. Tuttavia, a scopo informativo, possiamo dire che esistono altre due possibilità per selezionare la ROI:

 Saved nel caso in cui si è già condotta un'analisi con una determinata ROI ma, ad esempio, se ne vuole eseguire un'altra con diverse opzioni in Ncorr come la dimensione del subset o la spaziatura.



- Ncorr nel caso in cui si voglia disegnare la ROI direttamente in Ncorr.

Figura 20 ROI definito secondo l'opzione New e mostrata in Ncorr.



Figura 21 Raggio del Subset (Subset Radius) e spaziatura tra di essi (Subset Spacing) selezionati in Ncorr.

A questo punto, appare la finestra di Ncorr all'interno della quale verrà eseguita l'analisi. Il primo passo di fondamentale importanza per l'intera analisi DIC è quella di impostare i parametri DIC, come il raggio del subset e la spaziatura tra gli stessi. Inizialmente, tali valori sono impostati di default ma all'utente è lasciata la possibilità di selezionare le impostazioni ottimali. La componente di spaziatura è scelta unicamente per ridurre il carico computazionale. L'opzione più importante è sicuramente quella legata alla scelta del raggio del subset. Sebbene ci sia un'ampia letteratura disponibile per scegliere correttamente la dimensione del subset, la maggior parte delle conclusioni si basa su osservazioni euristiche ed empiriche. In particolare, l'idea principale è di selezionare il subset più piccolo possibile che non produca dati di spostamento rumorosi e che, dunque, soddisfi l'assunzione che la deformazione sia omogenea all'interno di esso. Per garantire tutto ciò, si è selezionato un raggio del subset grande



Figura 22 Posizionamento definitivo dei semi e valore del coefficiente di correlazione.

abbastanza da contenere almeno 3 macchioline lungo la sua altezza e la sua larghezza, al fine di contenere caratteristiche uniche e identificabili, e una spaziatura pari alla metà del raggio del subset, come mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. Dopo una serie di iterazioni si è arrivati a definire:

Subset Radius = 20 pixels

Subset Spacing = 10 pixels

Sebbene non di fondamentale importanza, per aumentare la velocità computazionale del processo, si è impostato un sistema multithreading che utilizzi 4 processori.

Si passa, poi, all'esecuzione dell'analisi DIC vera e propria. Innanzitutto, bisogna definire sulla ROI selezionata le posizioni dei cosiddetti "semi" (seeds). Il posizionamento dei semi è molto importante. La prima richiesta è che i semi siano piazzati in modo tale da essere visibili chiaramente da tutte le immagini e questo deve essere controllato dall'utente andando a scorrere le immagini all'interno della seed preview. La seconda richiesta è che i semi siano piazzati non troppo vicini agli spigoli e in modo tale che la ROI sia divisa equamente (questa richiesta è valida soltanto nel caso in cui si utilizzi un sistema multithreading). Ad ogni modo, se il posizionamento dei semi è stato effettuato in maniera scorretta o si verifica un qualsiasi tipo di errore (ad esempio il coefficiente di correlazione tra i subset attorno ai semi rilevati è troppo grande), il software Ncorr fornisce un messaggio di allerta, indicativo che i semi devono essere posizionati in modo diverso. Il posizionamento dei semi in questo applicativo è mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

Dato che il coefficiente di correlazione è una buona misura del buon posizionamento dei semi, nonché della corrispondenza dei punti, nella Tabella 7 si sono riassunti tali valori relativamente ad un solo processore (nel caso specifico al numero 1).

Immagini	Coefficiente di correlazione
1	1.6138e-30
2	0.0061994
3	0.0067017
4	0.0063127
5	0.0064251
6	0.017045
7	0.016288
8	0.017463
9	0.016897
10	0.016012

 Tabella 7 Valori dei coefficienti di correlazione delle immagini attuali rispetto all'immagine di riferimento relativamente al processore 1.



Figura 23 Plot dei punti di corrispondenza tra l'immagine di riferimento e l'immagine attuale 10 (la 5 della fotocamera "deformata" 202), i cui colori sono rappresentativi del coefficiente di correlazione.

È possibile notare come il coefficiente di correlazione della prima immagine sia praticamente nullo dato che le immagini correlate sono praticamente identiche. Inoltre, notiamo come i coefficienti di correlazione delle ultime cinque immagini, ovvero delle immagini scattate dalla fotocamera "deformata" 202, siano di un ordine di grandezza superiore rispetto a quelli delle prime cinque immagini, ovvero delle immagini scattate dalla fotocamera di riferimento 201. Ad ogni modo, i coefficienti di correlazione assumono tutti valori molto piccoli, a conferma del buon posizionamento dei semi.

Trattandosi di un'analisi 2D, nel nostro specifico applicativo, si è saltata la fase relativa alla visualizzazione degli spostamenti e al calcolo delle deformazioni, il cui significato fisico sarebbe di difficile interpretazione. Pertanto, l'analisi con il software Ncorr, a questo punto, può essere considerata completata.

Tuttavia, il main script non è stato ancora eseguito del tutto. Infatti, abbiamo ancora la possibilità di plottare i risultati relativi ai coefficienti di correlazione come mostrato in Figura 23. In particolare, si è presa in considerazione la corrispondenza tra i punti dell'immagine di riferimento e i punti dell'immagine attuale numero 10, ovvero l'ultima ripresa dalla fotocamera "deformata". Ricordando che in questo esempio di applicazione non abbiamo una vera e propria

deformazione dell'oggetto in esame ma consideriamo semplicemente le immagini della fotocamera "deformata" come configurazioni deformate dell'oggetto rispetto alla configurazione di riferimento, possiamo in linea generale affermare che i valori più alti del coefficiente di correlazione sono ottenuti in quelle regioni dove la deformazione a causa dell'angolo stereo è più grande. L'influenza dell'angolo stereo sulla deformazione percepita dell'oggetto si evince, infine, dalla Figura 24.



Figura 24 Zoom sulla parte inferiore del pattern maculato che ricopre l'oggetto per l'immagine di riferimento e l'immagine attuale per far evincere l'influenza dell'angolo stereo sulla deformazione percepita.

8.1.5 STEP 3: ricostruzione 3D

Il main script corrispondente allo STEP 3 utilizza i risultati dello STEP 1 (parametri di calibrazione stereo (parametri DLT) per ciascuna fotocamera) e dello STEP 2 (punti corrispondenti delle immagini dell'oggetto maculato) ed eventualmente anche dello step 0 (parametri di distorsione per ciascuna fotocamera) e calcola i punti 3D risultanti per ciascuna coppia di fotocamere. In particolare, per ciascuna coppia di fotocamere, sarà ricostruita una superficie 3D e le diverse superfici ottenute saranno unite insieme, tenendo in conto che le mesh triangolari calcolate in questo STEP possono sovrapporsi localmente. Pertanto, lo script implementa un metodo per consentire la risoluzione della sovrapposizione della mesh e creare un'unica superficie continua.



Figura 25 Plot della mesh triangolare della superficie 3D ricostruita per la coppia 1 (pair 1) di fotocamere 201 e 202. È possibile ispezionare il comportamento dinamico utilizzando il pulsante play o la barra sottostante.

In questo esempio applicativo specifico, tuttavia, è possibile notare come a seguito dell'analisi condotta nello STEP 2, si abbia a disposizione, tra i risultati salvati, una sola structure relativa ai risultati 2D-DIC e questo perché tutti i dati e tutte le immagini raccolte fino a questo momento fanno riferimento a un'unica coppia di fotocamere che è la [201 202]. Pertanto, da questo step dobbiamo aspettarci di ricostruire un'unica superficie 3D, per mezzo dell'algoritmo DLT, senza osservare alcuna sovrapposizione tra mesh.

Entrando più nel dettaglio, il main script relativo allo STEP 3, in una fase iniziale, richiede di selezionare tutte le structures relative ai risultati dell'analisi 2D-DIC condotta nello step precedente per ciascuna coppia di fotocamere. Quindi, come già detto, in questo caso avremo un'unica structure relativa alla coppia [201 202]. A questa si aggiunge la selezione della cartella contenente i parametri DLT ottenuti nello STEP 1 e la possibilità di scegliere se rimuovere la distorsione o meno: in questo caso la scelta è stata affermativa, dato che comunque i parametri di distorsione sono stati ottenuti nello STEP 0 e il numero di punti non è così grande da causare un dispendio di tempo eccessivo nella computazione. La selezione dei parametri di distorsione fa sì che sia i punti 2D sia i parametri DLT siano corretti sulla base di essi. A questo punto, dato



Figura 26 Plot delle superfici triangolari i cui colori rappresentano il coefficiente di correlazione combinato (a sinistra) e la grandezza della deformazione (a destra).

che non è richiesta l'unione di più superfici, in quanto non possibile con i dati a disposizione, lo script ci restituisce il plot della mesh triangolare della superficie completa sotto forma di figura di animazione di cui si può osservare il comportamento dinamico. In particolare, come emerge anche dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, si può osservare in 5 istanti temporali diversi in quanto 5 è il numero di immagini dell'oggetto maculato riprese da ciascuna fotocamera nello STEP 2.

8.1.6 STEP 4: post-processing

Il main script corrispondente allo STEP 4 consiste dapprima nel caricare i punti 3D ricostruiti nello step precedente e successivamente nel calcolare lo spostamento, il RBM e le deformazioni per ciascuna delle 5 configurazioni dell'esempio applicativo.

A questo punto, lo script ci consente di selezionare tutti quei parametri che vogliamo plottare. In particolare, avremo che ogni misura selezionata sarà plottata separatamente in una figura d'animazione, dove può essere visto il comportamento statico/dinamico della misura in questione. In questa applicazione si è deciso di plottare i seguenti risultati, come mostrato nella Figura 26:

- Coefficiente di correlazione combinato (Combined correlation coefficient).
- Grandezza della deformazione (Strain Magnitude).

In particolare, per quel che riguarda il coefficiente di correlazione combinato, notiamo come esso assuma i valori più alti in corrispondenza della zona a destra della ROI selezionata nello STEP 2 per l'immagine di riferimento. Inoltre, la scala di grandezza del coefficiente di correlazione è del tutto paragonabile a quella della Figura 23.

Notiamo poi come la grandezza della deformazione sia pressoché costante su tutta la superficie 3D ricostruita e con valori dell'ordine di 10⁻³. Questo risultato è rappresentativo del fatto che l'analisi in questione è stata condotta su un oggetto cilindrico che non ha subito una deformazione vera e propria per mezzo di una prova meccanica ma le cui immagini della fotocamera 202 sono state semplicemente considerate come configurazioni deformate dell'immagine di riferimento. Pertanto, la deformazione visualizzata in figura non è altro che l'errore di misura dei dati.

8.2 Linee guida consigliate per condurre al meglio un esperimento in vero attraverso un'analisi in MultiDIC

MultiDIC è un toolbox MATLAB open-source dedicato alle configurazioni multi-view. La ripresa simultanea multi-view è di fondamentale importanza in quelle applicazioni in cui studiare la forma, il movimento e la deformazione dell'oggetto in questione è molto difficile a causa delle geometrie complesse e delle ampie deformazioni che possono verificarsi.

Per verificare il toolbox MultiDIC si potrebbe pensare di configurare un esperimento reale in cui siano soddisfatte determinate condizioni che tengano in conto non solo degli obiettivi che si vogliono raggiungere ma anche contenere i costi dell'attrezzatura. Trattandosi di un'analisi multi-view si deve pensare di utilizzare un set di fotocamere tutte uguali tra loro disposte a 360° attorno all'oggetto. In particolare, l'oggetto di calibrazione prima e maculato poi, devono essere posizionati al centro di questo cerchio in modo da essere illuminati uniformemente, ad esempio, da matrici circolari di strisce LED flessibili, le quali devono essere posizionate sopra e dietro

le fotocamere. È possibile pensare poi di utilizzare uno o più ventilatori per soffiare aria nella regione tra le fotocamere e l'oggetto al fine di omogeneizzare la temperatura e ridurre eventuali errori indotti dalle onde di calore. Il numero di fotocamere e la distanza dal centro del cerchio lungo il quale sono disposte devono essere tali per cui l'angolo stereo sia abbastanza piccolo da fornire sia una porzione di sovrapposizione del FOV sia un livello accettabile di distorsione tra le coppie di immagini. È necessario che tutte le fotocamere siano connesse da un hub Ethernet e controllate in modo sincrono da un PC.

L'obiettivo è anche quello di creare un sistema che nel complesso sia il più economico possibile: pertanto, non dobbiamo necessariamente utilizzare delle ottiche che siano a bassa distorsione ma possiamo utilizzare moduli di fotocamera low-cost con i quali testare le capacità del toolbox. Infatti, con MultiDIC abbiamo la possibilità di correggere la distorsione delle fotocamere. Per fare questo è necessario acquisire per ciascuna delle fotocamere un elevato numero di immagini, approssimativamente 50, di un target di calibrazione piano in diverse orientazioni e posizioni in modo tale da coprire l'intero FOV. Nel caso specifico, si può pensare di acquisire immagini di un pattern piano a scacchiera mantenendolo semplicemente con mano con *Numero Quadrati Neri x Numero Quadrati Bianchi* noti e di cui sia nota la dimensione del lato. Questo step, come visto, sfrutta il metodo Bundle Adjustment (BA) come tecnica di calibrazione stereo. Tuttavia, noti i limiti di questa tecnica nel caso di sistemi multiview in termini di tempo computazionale, accumulo dell'errore in caso di riposizionamento delle fotocamere durante una sessione di collezione dati, MultiDIC combina BA al metodo DLT, che necessita dell'acquisizione di una singola immagine di un target di calibrazione 3D.

Il toolbox MultiDIC richiede che l'oggetto di calibrazione 3D sia cilindrico o semi-cilindrico con punti neri su un background bianco. Possiamo dunque pensare di utilizzare un oggetto di calibrazione cilindrico, ottenuto ad esempio mediante operazione di tornitura di un grezzo in alluminio, ricoperto da un foglio adesivo con un pattern rappresentante una griglia di punti quadrati neri di cui sono note le dimensioni e la spaziatura, le cui colonne sono tutte identificate da un numero. Le immagini possono essere tranquillamente acquisite basandosi su un modello di colori RGB in quanto lo script stesso di MultiDIC consentirà la trasformazione in scala di grigi. A queste immagini è necessario abbinare un file MATLAB contenente le coordinate 3D dei punti di controllo dell'oggetto di calibrazione.

Il prossimo passo consiste nel definire l'oggetto di prova maculato e l'esperimento da condurre. La prova deve essere tale da giustificare l'utilizzo di un software come MultiDIC sia per sfruttarne le potenzialità sia per giustificare i costi legati all'attrezzatura dell'ambiente di prova nel caso di un analisi multi vista.

8.2.1 Raccolta delle immagini consigliata per MultiDIC

Per una più corretta raccolta delle immagini del pattern a scacchiera e dell'oggetto di prova nei diversi step è consigliabile salvare le immagini in formato JPEG all'interno di cartelle denominate semplicemente con il numero identificativo della fotocamera (ad esempio nel caso si utilizzino 12 fotocamere disposte a 360° si potrebbe pensare di creare cartelle da 1 a 12). Per le immagini del pattern a scacchiera si utilizzi come prefisso sempre il numero della fotocamera con la quale l'immagine è stata acquisita e come suffisso un numero identificativo dell'istante temporale in cui è stata acquisita (dovendo acquisire 50 immagini per la fotocamera 1 potremmo andare da 1_01 a 1_50). Per le immagini dell'oggetto di prova le considerazioni sono le stesse se non il fatto che il numero del suffisso deve essere identificativo dello step della prova. Per le immagini dell'oggetto cilindrico di calibrazione, dato che viene acquisita una singola immagine per ciascuna delle fotocamere, basterà salvarle con il numero identificativo della fotocamera con la quale l'immagine è stata acquisita.

Capitolo 9 Esempi applicativi DICe

In questo capitolo, andremo ad analizzare gli step che bisogna seguire utilizzando il software open-source DICe per condurre un analisi 3D-DIC a partire da immagini precedentemente acquisite. Ricordiamo che i risultati principali ottenibili attraverso il software DICe sono la computazione full-field degli spostamenti e delle deformazioni e saranno, pertanto, quelli maggiormente analizzati più da vicino nei prossimi esempi applicativi.

9.1 Preparazione

In queste applicazioni, DICe è stato utilizzato come codice autonomo per l'analisi 3D-DIC: questo significa che esso è stato semplicemente scaricato e utilizzato con la sua GUI (Graphical User Interface).

Per condurre un'analisi 3D-DIC completa con il software DICe sono necessari i seguenti elementi:

- Un insieme di immagini di calibrazione stereo, nel quale è ripreso un oggetto di calibrazione 2D. In particolare, per il software, possiamo scegliere tra tre diverse possibilità per performare la calibrazione delle fotocamere:
 - Griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco).
 - Griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti bianchi su background nero).
 - Pattern a scacchiera
- Un insieme di immagini dell'oggetto di prova maculato il quale è ripreso dalle fotocamere in una configurazione di riferimento e una o più configurazioni deformate.

È possibile notare come, a differenza del toolbox MultiDIC, nella scelta dell'oggetto di calibrazione, non siamo vincolati nell'utilizzo di un oggetto 3D che sia cilindrico o semicilindrico.

Al termine dell'analisi condotta su DICe i risultati verranno salvati all'interno di una working directory. Da qui in poi, per l'analisi dei risultati utilizzeremo Paraview. Si tratta di un applicazione open-source per la visualizzazione e l'analisi di grandi dataset.

9.1.1 Primo esempio applicativo DICe

Per il primo esempio applicativo, si è fatto riferimento all'insieme delle immagini contenute nella cartella DICe_examples > stereo_d_sample ottenuta effettuando il download della versione 2.0-beta [11].

I dati includono le immagini scattate da due fotocamere per le quali _0 è il suffisso identificativo della fotocamera di sinistra e _1 è il suffisso identificativo della fotocamera di destra.

9.1.1.1 Calibrazione

In questo primo esempio applicativo, per la fase di calibrazione sono state utilizzate immagini di una griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco) 14 x 10 con una spaziatura tra i punti di 7 mm. In particolare, sono state acquisite 66 immagini per ciascuna delle due fotocamere. L'oggetto 2D di calibrazione è mantenuto con mano ed è posizionato in diversi modi rispetto alle fotocamere in modo tale da riempirne il FOV. Le caratteristiche del pattern utilizzato devono essere inserite manualmente, come illustrato in Figura 27, sulla base di uno schema preimpostato in cui sono visualizzate le grandezze caratteristiche del pattern.

In linea generale, per eseguire la fase di calibrazione utilizzando il software DICe, è necessario dapprima selezionare la cartella dove sono contenute le immagini di calibrazione. DICe cercherà automaticamente di determinare la convenzione che è stata utilizzata per nominare i file e compilerà automaticamente la sezione a sinistra della Figura 27 in cui sono contenute le caratteristiche delle immagini selezionate, come l'indice di partenza, l'indice finale e

l'estensione del file. Se questa fallisce, dovremo intervenire manualmente nel modificare i nomi dei file.



Figura 27 Calibrazione delle fotocamere. Visualizzazione delle caratteristiche delle immagini selezionate e dei parametri del pattern 2D utilizzato.



Figura 28 Preview dell'immagine 47 per le due fotocamere. L'immagine 47 fallisce nella calibrazione in quanto, con l'auto threshold selezionato, il software non riesce ad individuare correttamente i marker di calibrazione.

Per vedere l'estrazione dei marker di calibrazione per una particolare immagine, possiamo notare come nella colonna sinistra della Figura 27 sia presente una funzionalità di preview. Se l'estrazione dei marker è effettuata correttamente, il bordo delle immagini sarà verde, rosso altrimenti, come mostrato in Figura 28. In questo caso specifico, ci si rende conto, andando a scorrere la preview delle immagini, che per la maggior parte di esse, il software non riesce ad individuare un numero di punti di calibrazione sufficiente. Questo accade in quanto i parametri di threshold, selezionati in automatico dal software, non portano a rilevare i punti in basso a sinistra del pattern. Pertanto, si è proceduti andando a deselezionare l'auto threshold e selezionando, dopo un processo iterativo, un valore della thresholding costant pari a 35 (counts), che consente di estrarre con successo i marker per quasi tutte le immagini.

A questo punto, possiamo scorrere la preview per vedere quali immagini falliscono nella calibrazione oppure eseguire la calibrazione vera e propria. Ovviamente, maggiore è il numero delle immagini, più accurata sarà la calibrazione a fronte di un costo computazionale più grande. Performata la calibrazione la prima volta, si sono ottenuti i seguenti risultati:

 $rms \ error = 0.32956 \ px$

 $avg \ epipolar \ error = 0.205687 \ px$

Per una calibrazione stereo, l'errore epipolare dovrebbe essere più piccolo di 0.5 px. Errori epipolari grandi si verificano quando una o più immagini introducono errori di riproiezione troppo grandi. Sebbene i risultati ottenuti in questo caso siano già abbondantemente accettabili, si è deciso comunque di esplorare il file cal.xml per vedere se ci fossero immagini con errore epipolare maggiore di 0.5 o che avessero fallito nella calibrazione. Dopo aver deselezionato queste immagini, si è performata la calibrazione una seconda volta. Sia l'errore quadratico medio, sia l'errore epipolare, non subiscono un grande impatto, quindi accettiamo la calibrazione.

Dopo aver effettuato la calibrazione, i risultati sono salvati nella working directory. In particolare, viene creato un file di testo denominato "cal" in cui sono contenute tutte le informazioni relative alla fase di calibrazione appena effettuata in termini di errore epipolare per ciascuna delle immagini analizzate e di parametri intrinsechi per ciascuna delle due fotocamere. I parametri intrinsechi della fotocamera di sinistra e di destra sono riassunti all'interno della Tabella 8:

Parametri	Fotocamera di sinistra	Fotocamera di destra
fx	6637.06	6648.3

fy	6639	6647.9
Cx	981.06	1006.6
Су	609.92	566.21
k1	0.084654	0.067533
k2	-2.7626	1.5708
k3	59.863	-114.41
p1	0	0
p2	0	0

Tabella 8 Parametri intrinsechi della fotocamera di sinistra e di destra

9.1.1.2 Analisi 3D-DIC

Per effettuare l'analisi 3D-DIC sono state acquisite 4 immagini di un oggetto di prova maculato, 2 per ciascuna fotocamera di cui una immagine è rappresentativa della configurazione di riferimento mentre l'altra della configurazione deformata.

L'analisi 3D-DIC vera e propria sarà eseguita attraverso la GUI principale di DICe. Dapprima dovremo selezionare l'immagine di riferimento per ciascuna delle due fotocamere e successivamente l'immagine deformata. Per quel che riguarda le immagini di riferimento, queste saranno visualizzate l'una accanto all'altra in due finestre separate, come mostrato in Figura 29.

In particolare, in questa fase è di fondamentale importanza selezionare le opzioni che si vogliono seguire per condurre l'analisi 3D-DIC. In questo caso specifico, abbiamo selezionato:

- Subset-based full-field (spostamenti e deformazioni) come modalità di analisi.
- Feature matching come metodo di inizializzazione per effettuare la correlazione tra le immagini.
- *SSSIG threshold* = 150 che definisce il livello di contrasto.
- subset size = 31 pixels.
- step size = 15 pixels.
- Translation (inserito di default) e normal stretch come funzioni di forma.
- Compute strain con *gauge size* = 45 *pixels*.
- Nessuna operazione di filtraggio.



Figura 29 Immagini di riferimento per la fotocamera di sinistra e per la fotocamera di destra (primo esempio applicativo).



Figura 30 Focus sulla dimensione del subset e dello step nell'immagine di riferimento della fotocamera di sinistra (primo esempio applicativo).



Figura 31 Asse X del sistema di riferimento inserito utilizzando l'opzione "use best fit plane".

Per la definizione della dimensione del subset e dello step in DICe, il cui focus è mostrato in Figura 30, si è fatto riferimento alle stesse convenzioni utilizzate nell'analisi MultiDIC, ovvero che il subset debba essere grande abbastanza da contenere almeno 3 macchioline lungo la sua larghezza e la sua altezza e che lo step sia assunto pari circa alla metà del subset.



Figura 32 Rendering di una porzione dell'oggetto di prova in cui ogni punto è rappresentativo di un subset (a sinistra) e rendering ottenuto con il filtro Delaunay 2D con parametro Alpha impostato a 1.5 (a destra).

A questo punto, attraverso il comando "use best fit plane" andiamo a definire all'interno dell'immagine di riferimento della fotocamera di sinistra l'asse X rappresentativo del sistema di riferimento che verrà utilizzato, come mostrato in Figura 31. In particolare, il punto verde indica l'origine del sistema di riferimento mentre il punto rosso la fine dell'asse X. DICe ci dà la possibilità di utilizzare l'asse così definito come asse Y andando a selezionare l'opzione "treat axis as y-axis".

Adesso abbiamo tutto il necessario per far eseguire al software l'analisi 3D-DIC. Dalla Console ci possiamo rendere conto come la prima operazione effettuata sia la correlazione tra le immagini della fotocamera di sinistra e quella di destra.

9.1.1.3 Post-processing in Paraview

Per la visualizzazione e l'elaborazione dei risultati ottenuti attraverso l'analisi 3D-DIC utilizzeremo l'applicazione Paraview. Il primo passo consiste nel selezionare il file contenente i risultati, il quale viene salvato nella working directory al termine della fase di analisi, sotto la denominazione DICe_solution.e.

Fatto questo, all'interno dell'interfaccia grafica di Paraview compare una porzione dell'oggetto di prova maculato, in cui ogni punto è rappresentativo di un subset, come mostrato a sinistra nella Figura 32. Per visualizzare meglio si è deciso di utilizzare il filtro Delaunay 2D il quale consente di coprire i buchi dell'immagine precedente. Si è deciso, poi, di passare alla visualizzazione della superficie con gli spigoli e di cambiare l'impostazione del parametro Alpha del filtro a 1.5, il quale comanda l'output dello stesso: verranno visualizzati solo gli spigoli e i triangoli contenuti all'interno di una sfera centrata nei vertici della mesh. Il risultato definitivo di questa procedura è mostrato a destra nella Figura 32.

Così come accade in MultiDIC, in Paraview abbiamo la possibilità di visualizzare diversi risultati dell'analisi. Focalizzando l'attenzione sugli spostamenti, possiamo notare come Paraview ci dia diverse possibilità:

- DISPLACEMENT_: è lo spostamento del subset dalla prospettiva della fotocamera di sinistra.
- MODEL_DISPLACEMENT_: è lo spostamento fisico del punto nello spazio 3D in termini del sistema di riferimento definito in Figura 31.

- STEREO_DISPLACEMENT_: è lo spostamento del subset dalla prospettiva della fotocamera di destra.

Con Paraview abbiamo la possibilità di selezionare un qualsiasi punto della porzione dell'oggetto di prova e visualizzarne un qualsiasi risultato. In Figura 33 abbiamo selezionato un punto che fosse orientativamente vicino al punto verde (origine del sistema di riferimento) selezionato in Figura 31 e abbiamo impostato come risultato visibile quello relativo al model coordinates notando come il punto selezionato fosse molto vicino all'origine, che si trova leggermente a sinistra.

Se osserviamo l'andamento di sigma illustrato in Figura 34 è possibile notare come nell'angolo in alto a sinistra esso assuma un valore pari a -1. Questo significa che tale subset per qualche ragione non è stato tracciato, e quindi dovremmo tornare indietro e modificare SSSIG threshold, oppure quei punti non sono visibili da entrambe le fotocamere.

In questo caso specifico, avendo a disposizione un'unica immagine deformata, tutti i risultati ottenuti, tra cui anche il model displacement magnitude in Figura 35, sono relativi a un unico step nel tempo. Le stesse considerazioni fatte attraverso sigma possono essere fatte anche con il model displacement ma anche considerando un punto in quella zona e valutandone il VSG XX, VSG XY e VSG YY che sono tutti identicamente nulli.



Figura 33 Model Coordinates X. Coordinate X, Y, Z di un punto in prossimità dell'origine del sistema di riferimento.



Figura 34 Sigma. Valore di Sigma in un generico punto.



Figura 35 Model Displacement Magnitude. Componenti X, Y, Z del Model Displacement Magnitude in un generico punto.

9.1.2 Secondo esempio applicativo DICe

Le immagini utilizzate per questo secondo esempio applicativo DICe sono state scaricate a partire dai DIC Challenge Datasets > 3D-DIC (Stereo-DIC).

Le immagini acquisite fanno riferimento a una traslazione rigida di un piatto [12] con caratteristiche 3D di dimensioni note, come mostrato in Figura 36. La figura mostra le dimensioni del piatto progettato con caratteristiche 3D che includono due triangoli con angoli a 45°, due mezzi cilindri in direzioni perpendicolari e un piatto quadrato rialzato.

Le immagini di calibrazione e di traslazione sono state scattate sia per un sistema stereo che utilizza lenti da 16 mm (Tamron) sia per uno che utilizza lenti da 35 mm (Edmund Optics). Tuttavia, poiché per le fotocamere da 35 mm, le immagini a disposizione dell'oggetto maculato permettono di selezionare una configurazione di riferimento e una sola configurazione deformata, si è deciso di focalizzare l'attenzione ed effettuare l'analisi solo per le immagini acquisite dalla coppia di fotocamere da 16 mm.

Ad ogni modo, per una ragione di contesto, illustriamo il setup delle due coppie di fotocamere, visibile in Figura 37. Poiché le lenti da 16 mm necessitano di essere posizionate più vicine (280 mm di SOD dal piatto, 140 mm di distanza tra le fotocamere) per avere un FOV equivalente a quello delle lenti da 35 mm, esse sono state posizionate leggermente al di sopra della linea mediana del campione e in modo che guardino verso il basso. Le fotocamere di 35 mm sono state posizionate più indietro (648 mm di SOD dal piatto, 254 mm di distanza tra le fotocamere), al di sotto del setup delle fotocamere di 16 mm e in modo che guardino verso l'alto per evitare le onde di calore provenienti dalle fotocamere frontali. Il campione è stato dipinto con un sottile strato di vernice bianca e macchiato a mano utilizzando un pennarello Sharpie. La grandezza delle macchioline è grande abbastanza da assicurare che essa non venga aliasata, con una dimensione media di 7.7 px. Sono state posizionate luci a LED sopra e dietro le fotocamere per minimizzare possibili onde di calore nelle immagini a causa delle luci stesse. È stato posizionato un ventilatore per soffiare aria nella regione tra il campione e le fotocamere al fine di omogeneizzare la temperatura dell'aria e ridurre gli errori a causa delle onde di calore. Sia lo stadio delle fotocamere sia quello del campione sono stati posizionati su un tavolo ottico mobile per ridurre gli effetti delle vibrazioni dell'edificio.



Figura 36 Dimensioni del piatto e delle caratteristiche 3D. Le dimensioni sono in pollici.



Figura 37 Setup dello stadio Aerotech e dei due sistemi di fotocamere, con lenti da 16 mm avanti e lenti da 35 mm più indietro. È mostrato il sistema di riferimento per il piatto.

Il piatto è stato montato su uno stadio Aerotech con un encoder ad alta precisione e un controllo della posizione. Lo stadio è impostato per traslare unicamente lungo le direzioni X e Z (spostamenti U e W) per un certo numero di step e una quantità note e mostrate in Tabella 9 **Spostamenti U e W [mm] del piatto**.. Lo step 18 riporta lo stadio all'origine.

Step Number	Stage W Mean [mm]	Stage U Mean [mm]
1	0	0
2	10	0
3	20	0
4	-10	0
5	-20	0
6	0	-10
7	0	-20
8	0	10
9	0	20
10	-10	-10
11	-20	-20
12	10	10
13	20	20
14	10	-10
15	20	-20
16	-10	10
17	-20	20
18	0	0

Tabella 9 Spostamenti U e W [mm] del piatto.

9.1.2.1 Calibrazione

Seppure l'analisi 3D-DIC vera e propria sia stata condotta unicamente per le fotocamere da 16 mm, a causa della mancanza di immagini per tutti gli step per le fotocamere da 35 mm, la fase di calibrazione è stata condotta per entrambe le coppie di fotocamere. La convenzione utilizzata per designare sia le immagini di calibrazione sia quelle di traslazione ha previsto l'utilizzo del suffisso _0 per la fotocamera di sinistra e _1 per la fotocamera di destra. Per la fase di calibrazione, sono state utilizzate immagini di una griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco) 14 x 10 con una spaziatura tra i punti di 10 mm.

In particolare, per entrambi i sistemi stereo, sono state acquisite 50 immagini per ciascuna delle due fotocamere includendo diversi movimenti e orientazioni al fine di riempire il FOV. L'oggetto 2D di calibrazione è mantenuto con mano ma il tempo di esposizione dell'immagini è inferiore a 25 ms al fine di minimizzare la sfocatura.

Per il sistema stereo costituito dalle fotocamere con lenti di 35 mm, la fase di calibrazione è stata condotta utilizzando l'Auto-Threshold con valori compresi tra 120-125, avendo notato, scorrendo la Preview, che la maggior parte delle immagini non fallivano nella calibrazione. Una volta performata sono stati ottenuti i seguenti risultati:

rms error = $0.079961 \, px$

avg epipolar error = 0.127527 px

Essendo l'errore epipolare inferiore a 0.5 px ed essendo state saltate durante la calibrazione solo 12 immagini delle 100 analizzate, tali risultati sono stati accettati. I parametri intrinsechi delle fotocamere sono riassunti nella Tabella 10:

Parametri	Fotocamera _0 35 mm	Fotocamera _1 35 mm
fx	10666	10750
fy	10645	10727
Cx	1176.1	1034.7
Су	914.81	1062.1
k1	0.023714	0.070417
k2	-1.1351	-4.1222
k3	68.612	76.082
p1	0	0
p2	0	0

Tabella 10 Parametri intrinsechi delle fotocamere con lenti da 35 mm.

Per il sistema stereo costituito dalle fotocamere con lenti da 16 mm, la fase di calibrazione è stata condotta, come nel caso precedente, con l'Auto-Threshold con un valore di 202 per tutte le immagini selezionate. Una volta performata sono stati ottenuti i seguenti risultati:

$$rms \ error = 0.1111 \ px$$

avg epipolar error = 0.164739 px

Essendo l'errore epipolare inferiore a 0.5 px ed essendo state saltate durante la calibrazione solo 4 immagini delle 100 analizzate, tali risultati sono stati accettati. I parametri intrinsechi delle fotocamere sono riassunti nella Tabella 11:

Parametri	Fotocamera _0 16 mm	Fotocamera _1 16 mm
fx	4745.3	4729.4
fy	4736.3	4719.0
Cx	1221.7	1228.4
Су	1046.4	999.83
k1	-0.27023	-0.268
k2	0.21776	0.090756
k3	-1.0215	-0.9454
pl	0	0
p2	0	0

Tabella 11 Parametri intrinsechi delle fotocamere con lenti da 16 mm.

9.1.2.2 Analisi 3D-DIC

Come già detto, l'analisi 3D-DIC vera e propria è stata condotta unicamente sulle immagini di traslazione acquisite per il sistema stereo costituito dalle fotocamere con lenti di 16 mm. In accordo al numero di step di traslazione eseguiti con lo stadio Aerotech, sul quale il piatto con le caratteristiche 3D è posizionato, si hanno a disposizione 18 immagini di traslazione per ciascuna delle due fotocamere. Di queste, la prima immagine acquisita sia per la fotocamera _0 che per la fotocamera _1 è impostata come immagine di riferimento mentre tutte le altre sono impostate come immagini deformate. La coppia di immagini di riferimento è rappresentata in Figura 38 mentre in Figura 39 osserviamo le dimensioni del subset e dello step utilizzate per l'analisi.

Per condurre l'analisi 3D-DIC in DICe sono state impostate le seguenti opzioni:

- Subset-based full-field come modalità di analisi.
- Feature Matching come metodo di inizializzazione.
- *SSSIG threshold* = 150 impostato di default.



Figura 38 Immagini di riferimento per fotocamera _0 e fotocamera _1 (secondo esempio applicativo).



Figura 39 Focus sulla dimensione del subset e dello step nell'immagine di riferimento della fotocamera di sinistra (primo esempio applicativo).

- subset size = 51 pixels.
- step size = 25 pixels.
- Translation come funzione di forma.
- Compute strain con *gauge size* = 75 *pixels*.
- Nessuna operazione di filtraggio.

Facendo un confronto con il primo esempio applicativo, si può notare come si siano scelti una dimensione del subset e dello step più grandi. Il motivo fondamentale di questa scelta non è legato molto alla valutazione empirica secondo la quale almeno 3 macchioline devono essere contenute lungo la larghezza e altezza del subset, ma è legata soprattutto alle maggiori dimensioni del campione e alla volontà di ridurre il più possibile il costo computazionale, considerato anche che questa volta non abbiamo un solo step ma ne abbiamo 17 (escluso lo step iniziale di partenza).

A questo punto, come si evince dalla **Figura 40**, attraverso il comando "use best fit plane" si è definita l'origine del sistema di riferimento, nonché l'orientazione dell'asse X, e lo si è fatto in modo tale che questo andasse a coincidere il più possibile con quello visibile in Figura 37.



Figura 40 Asse X del sistema di riferimento definito sull'immagine di riferimento della fotocamera_0.
9.1.2.3 Post-processing in Paraview

La visualizzazione e l'elaborazione dei risultati ottenuti attraverso l'analisi 3D-DIC è condotta utilizzando l'applicazione Paraview. Selezionato il file contenente i risultati DICe_solution.e, per visualizzare meglio il piatto con le caratteristiche 3D si è utilizzato, come nel primo esempio applicativo, il filtro Delaunay 2D, si è passati alla visualizzazione della superficie con gli spigoli e si è cambiata l'impostazione del parametro Alpha del filtro a 4. Il risultato finale è mostrato in Figura 41. È possibile notare come la ricostruzione delle caratteristiche 3D non sia perfettamente accurata, in particolar modo per il triangolo orientato lungo l'asse X. Tuttavia, questo risultato è prevedibile dal momento che ci sono punti del campione che non sono rilevati da entrambe le fotocamere e che si stanno analizzando soltanto le immagini scattate da una sola coppia di fotocamere.



Figura 41 Rendering di una porzione dell'oggetto di prova in cui ogni punto è rappresentativo di un subset (a sinistra) e rendering ottenuto con il filtro Delaunay 2D con parametro Alpha impostato a 4 (a destra).

Dato che la prova condotta sul campione ha previsto traslazione unicamente lungo l'asse X e Z (spostamenti U e W), nella fase di post-processing ci si è concentrati maggiormente sulla valutazione del model displacement nei diversi step temporali per un generico punto del campione. Trattandosi, infatti, di una traslazione rigida, la valutazione dello spostamento di un punto piuttosto che di un altro differisce di circa lo 0.1 %. La Figura 42 mostra il risultato di MODEL DISPLACEMENT Magnitude per tutto il campione con focus su un generico punto di cui sono visualizzati le componenti degli spostamenti rispettivamente lungo l'asse X, l'asse Y e l'asse Z al time 2 su Paraview, corrispondente allo step 3.



Figura 42 Model Displacement Magnitude del campione. Focus su un generico punto di cui sono visualizzate le componenti di spostamento in corrispondenza dello step 3 della prova.

L'obiettivo fondamentale per quest'analisi è stato quello di raccogliere tutte le informazioni relative alle componenti di spostamento U, V, W [mm] di un generico punto del campione in Paraview e confrontarle con gli spostamenti reali applicati dallo stadio Aerotech al piatto misurati dall'encoder ottico e già indicati in Tabella 9 **Spostamenti U e W [mm] del piatto**.. Tuttavia, mentre gli spostamenti applicati da Aerotech sono unicamente nelle direzioni X e Z, dall'analisi 3D-DIC per un generico punto, abbiamo la comparsa di una componente di spostamento in direzione Y. Questo risultato potrebbe essere indicativo di un disallineamento tra il sistema di riferimento definito attraverso il comando "use best fit plane" e quello definito sul campione durante la prova, visibile in Figura 37. Inoltre, osservando quelli che sono gli andamenti delle componenti di spostamento per lo stadio Aerotech (Figura 43) e per le fotocamere da 16 mm (Figura 44), ci si rende conto che mentre per le fotocamere l'andamento di U è praticamente identico a quello per lo stadio e l'andamento di V, seppur presente, è sempre

prossimo allo zero, l'andamento di W è simmetrico ed opposto. Quindi, piuttosto che utilizzare le singole componenti di spostamento, si è deciso di confrontare il modulo degli spostamenti, intesi come somma vettoriale delle componenti, per lo stadio Aerotech e per le fotocamere da 16 mm. Per fare questo, in Excel sono stati raccolti i dati relativi alle componenti di spostamento del generico punto per tutti gli step e si sono ricavati i seguenti risultati:



Figura 43 Andamento degli spostamenti medi U e W [mm] per lo stadio Aerotech su cui è montato il piatto.



Figura 44 Andamento degli spostamenti U, V e W [mm] valutati per un generico punto sulla ricostruzione 3D del campione in Paraview a partire dalle immagini delle fotocamere da 16 mm.



Figura 45 Confronto tra i moduli degli spostamenti, intesi come somma vettoriale delle singole componenti, per lo stadio Aerotech e le fotocamere da 16 mm.



Figura 46 Errore relativo percentuale tra i moduli degli spostamenti.

Dalle Figura 45 e Figura 46 si evince come gli spostamenti ottenuti attraverso l'analisi 3D-DIC siano del tutto paragonabili a quelli reali applicati attraverso lo stadio Aerotech e misurati attraverso l'encoder ottico. In particolare, l'errore relativo percentuale più grande nella valutazione del modulo dello spostamento viene commesso nello step 15, corrispondente alla

traslazione simultanea in direzione Z di 20 mm e in direzione X di -20 mm. Tale errore è pari a 1,094 % e, pertanto, è possibile affermare che il software DICe abbia eseguito l'analisi 3D-DIC in modo corretto e che sia affidabile nella valutazione degli spostamenti nel caso di prove di sola traslazione rigida del campione.

Capitolo 10 Esperimento di prova di trazione su un provino piatto

10.1 Introduzione all'esperimento

Presso il Politecnico di Torino è disponibile attrezzatura e sono presenti laboratori adatti a condurre un analisi tramite correlazione digitale di immagini. Lo scopo di questo esperimento è osservare come si comporta un software open-source come DICe per la misurazione di spostamenti e deformazioni relativi ad un provino durante una prova meccanica piuttosto che un software chiuso. Inoltre, i risultati ottenuti sono poi stati sfruttati per evidenziare le potenzialità della 3D-DIC rispetto alla 2D-DIC per analisi di deformazione durante prova meccanica, nonché fornire delle linee guida su come meglio condurre un esperimento in vero.

Nonostante la disponibilità di cui sopra detto, l'emergenza COVID-19 non ha dato la possibilità di condurre un esperimento del tutto nuovo. Questo ha portato alla scelta di utilizzare immagini per l'analisi DIC ottenute a seguito di un precedente esperimento condotto sempre presso uno dei laboratori del Politecnico di Torino.

L'esperimento condotto in laboratorio è una prova di trazione non distruttiva in controllo di spostamento condotta su un provino piatto in acciaio fissato tra due morsetti in posizione orizzontale. Le immagini di calibrazione e di prova sono state scattate da una coppia di fotocamere uguali posizionate relativamente l'una di fianco all'altra rispetto al provino, definendo di fatto una fotocamera di sinistra e una fotocamera di destra. Per l'illuminazione dell'ambiente di prova non sono state utilizzate luci a LED, ma la classica illuminazione tramite lampade a 230 V alla frequenza di 50 Hz. Non sono poi stati utilizzati ventilatori per soffiare in continuo aria nella regione tra le fotocamere e il provino.

10.2 Calibrazione

Inizialmente, la nomenclatura delle immagini di calibrazione non era adatta per poter essere utilizzata dal software open-source DICe, perché pensata per un software chiuso interno al Politecnico di Torino. Pertanto, è stato necessario modificare la nomenclatura delle immagini di calibrazione prevedendo il suffisso _0 per la fotocamera di sinistra e _1 per la fotocamera di destra. Per la fase di calibrazione, sono state utilizzate immagini di una griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco) 12 x 9 con una spaziatura tra i punti di 4 mm. In particolare, per ciascuna delle due fotocamere sono state acquisite 85 immagini di calibrazione le cui diverse orientazioni nello spazio sono state ottenute semplicemente muovendo con mano il blocco su cui era posizionato il pattern.

La fase di calibrazione è stata condotta utilizzando l'Auto-Threshold avendo notato, scorrendo la Preview, sia che la maggior parte delle immagini non fallivano nella calibrazione, sia che i valori di soglia utilizzati non cadessero in un range limitato ma fossero diversi: 107, 140, 155, 207. Una volta performata sono stati ottenuti i seguenti risultati:

 $rms \ error = 2.375 \ px$

avg epipolar error = 4.69798 px

L'errore epipolare in una calibrazione stereo dovrebbe essere più piccolo di 0.5 px. La possibile causa di un errore epipolare così grande, nonché la diversità netta dei valori di soglia, in questo caso specifico può essere una delle seguenti o la combinazione di tutte o alcune di esse:

- Il mancato utilizzo di luci LED a favore della classica illuminazione artificiale a lampade a 230 V alla frequenza di 50 Hz non ha consentito di minimizzare possibili onde di calore nelle immagini;
- Il mancato utilizzo di un ventilatore non ha consentito di omogeneizzare la temperatura dell'aria tra fotocamere e campione;
- Un possibile tempo di esposizione troppo grande del pattern ha portato ad ottenere sfocatura nelle immagini;

 L'utilizzo della mano piuttosto che un tavolo ottico nella movimentazione nello spazio del pattern è senza dubbio la soluzione più comoda ma può al contempo condurre ad errori di riproiezione troppo grandi.

Esplorando il file cal.xml per vedere quali e quante fossero le immagini con errore epipolare maggiore di 0.5 o che avessero fallito nella calibrazione si è scelto di eliminare le immagini con errore epipolare maggiore di 2 al fine di ottenere un buon compromesso tra l'aver performato una buona calibrazione (non ottimale) e l'aver considerato un buon numero di immagini. Tutto questo ha portato a deselezionare 88 immagini delle 170 di partenza e performando una seconda volta la calibrazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

rms error = $0.57398 \, px$

avg epipolar error = 0.922129 px

L'errore quadratico medio e l'errore epipolare hanno subito un grande impatto a seguito della deselezione e, seppure l'errore epipolare continui ad essere maggiore di 0.5 la calibrazione si è considerata accettata. Si fa notare, tuttavia, come un qualunque tentativo di miglioramento dell'errore epipolare fissando un limite massimo per lo stesso di 0.5 px sarebbe possibile solo considerando 20 delle 150 immagini di calibrazione acquisite. I parametri intrinsechi della fotocamera di sinistra e di destra sono riassunti all'interno della :

Parametri	Fotocamera di sinistra	Fotocamera di destra
fx	8778.2	10676
fy	8798.8	10699
Cx	661.38	506.89
Су	809.66	927.77
k1	-1.276	-1.0669
k2	139.86	152.97
k3	-3501	-7184.8
p1	0	0
p2	0	0

Tabella 12 Parametri intrinsechi della fotocamera di sinistra e di destra.

10.3 Analisi 3D-DIC

Per condurre l'analisi 3D-DIC sul provino piatto soggetto a prova di trazione non distruttiva in controllo di spostamento si hanno a disposizione 351 immagini per ciascuna delle due fotocamere. Di queste, la prima immagine acquisita sia per la fotocamera _0 che per la fotocamera _1 è impostata come immagine di riferimento mentre tutte le altre sono impostate come immagini deformate. La coppia di immagini di riferimento è rappresentata in Figura 47 mentre in Figura 48 osserviamo le dimensioni del subset e dello step utilizzate per l'analisi. Per condurre l'analisi 3D-DIC in DICe sono state impostate le seguenti opzioni:

- Subset-based full-field come modalità di analisi;
- Feature Matching come metodo di inizializzazione;
- *SSSIG threshold* = 150 impostato di default;
- *subset size* = 26 *pixels*;
- *step size* = 13 *pixels*;
- Translation e normal stretch come funzioni di forma;
- Compute strain con *gauge size* = 45 *pixels*;
- Nessuna operazione di filtraggio.

Il provino piatto per l'analisi 3D-DIC è stato ricoperto con vernice bianco e macchiato con macchioline di dimensioni molto variabili da qualche decimo a poco più di una decina di pixel. Pertanto, la scelta delle dimensioni del subset non è strettamente legata alla regola empirica secondo la quale 3 macchioline debbano essere contenute lungo la larghezza e l'altezza del subset, ma è legata soprattutto alla non omogeneità nelle dimensioni e nella distribuzione delle macchioline e al costo computazione dell'analisi stessa, in quanto abbiamo 350 step.

A questo punto, come si evince dalla **Figura 40**, attraverso il comando "use best fit plane" si è definita l'origine del sistema di riferimento, nonché l'orientazione dell'asse Y, e lo si è fatto in modo tale che questo andasse a coincidere il più possibile con la direzione di applicazione del carico sul provino durante la prova di trazione. Inoltre, dato che il fuoco delle fotocamere non è unicamente sul provino ma anche su una porzione della macchina di trazione, si è reso necessario definire una regione di interesse per condurre l'analisi DIC.



Figura 47 Immagini di riferimento per fotocamera_0 e fotocamera_1 (prova di trazione).



Figura 48 Focus sulla dimensione del subset e dello step nell'immagine di riferimento della fotocamera di sinistra (prova di trazione).



Figura 49 Asse Y del sistema di riferimento e ROI definiti sull'immagine di riferimento della fotocamera_0 (prova di trazione).

10.4 Post-processing in Paraview

La visualizzazione e l'elaborazione dei risultati ottenuti attraverso l'analisi 3D-DIC è condotta utilizzando l'applicazione Paraview. Una migliore visualizzazione in Paraview della regione di interesse selezionata precedentemente nell'analisi 3D-DIC in DICe è ottenuta, come negli esempi applicativi, attraverso il filtro Delaunay 2D. Tuttavia, in questo caso sperimentale, trattandosi di un provino piatto per prova di trazione, l'impostazione del parametro Alpha assume un ruolo meno rilevante. Infatti, essendo l'analisi stereo condotta con un impianto a 2 fotocamere non si riesce a cogliere lo spessore del provino. Questo sarebbe stato invece possibile attraverso un analisi Multi-DIC. Tuttavia, è bene precisare che nonostante queste osservazioni, dato che l'obiettivo principale è cogliere spostamenti e soprattutto deformazioni durante la prova di trazione, una visione che sia prevalentemente 2D del provino è più che sufficiente. Dunque, si potrebbe pensare di effettuare un'analisi 2D-DIC. Tuttavia, in un'analisi 2D-DIC ci si preoccupa di allineare perfettamente l'unica fotocamera con il provino piatto mentre effettuare un'analisi 3D-DIC ci permette di mediare le misure delle due fotocamere ottenendo, di fatto, dei risultati in termini di spostamenti e deformazioni nelle direzioni X e Y

che siano più accurati e al contempo cogliere una deformazione tridimensionale (anche nella direzione Z). Impostando il parametro Alpha del filtro a 0, che comunque è il valore che consente una completa triangolazione del provino, il risultato finale ottenuto è mostrato in Figura 50.



Figura 50 Rendering della regione di interesse del provino piatto sottoposto a prova di trazione in cui ogni punto è rappresentativo di un subset (a sinistra) e rendering ottenuto con il filtro Delaunay 2D con parametro Alpha impostato a 0 (a destra).

Per l'analisi di spostamenti e deformazioni del provino durante la prova di trazione, sono stati selezionati 3 punti, uno centrale, uno a sinistra e uno a destra le cui posizioni sono state definite in Tabella 13 rispetto al centro della regione di interesse. La visualizzazione degli stessi è mostrata in Figura 51. È possibile notare innanzitutto come essendo il punto centrale della ROI non coincidente con un nodo della triangolazione del provino, si è considerato come punto centrale per l'analisi il punto ad esso più vicino. Essendo poi la ROI definita per l'intera porzione visibile del provino piatto, compresa quella fissata tra i due morsetti in posizione orizzontale, come punto di sinistra e di destra sono stati scelti due punti alla stessa distanza dal centro e al contempo, distanti dal confine sinistro e destro della ROI di una quantità tale da ricadere all'interno della lunghezza utile del provino piatto. In particolare:

$lunghezza_ROI = 45 mm$

$$x_punto_sinistra_da_confine_ROI = \frac{lunghezza_ROI}{2} - x_da_centro = 8.5 mm$$

 $x_punto_destra_da_confine_ROI = \frac{lunghezza_ROI}{2} - x_da_centro = 8.5 mm$

Punti	X_da_centro (mm)	Y_da_centro (mm)	Z_da_centro (mm)
Punto Centrale	0.398	-0.184	0
Punto Sinistra	-14	-0.678	0
Punto Destra	14	-0.622	0

Tabella 13 Distanze dei punti selezionati per l'analisi di spostamenti e deformazioni durante la prova di trazione rispetto al punto centrale della ROI definita.



Figura 51 Visualizzazione della posizione dei 3 punti utilizzati per l'analisi di spostamenti e deformazioni.

10.4.1 Analisi di spostamenti durante la prova di trazione

Dato che il numero di immagini acquisite durante la prova di trazione è di 351 per ciascuna delle fotocamere, si ha a che fare con un numero di step temporali per l'analisi pari a 350,

escludendo la configurazione di riferimento per ciascuna delle due fotocamere. Pertanto, in una prima analisi si è deciso di utilizzare uno step di analisi pari a 7, raccogliendo di fatto i dati di spostamento e deformazione per 51 step temporali.

Si focalizza dapprima l'attenzione sugli spostamenti in direzione X e Y, che sono quelli rilevati con maggiore accuratezza dalla 3D-DIC. In particolare, si visualizza per ciascuno di essi la mappa degli spostamenti attraverso il field MODEL DISPLACEMENT in Paraview per time 349 corrispondente all'ultimo step di analisi della prova di trazione e un grafico che ne mostra l'andamento nel tempo per ciascuno dei punti di analisi. Si ricorda che essendo la prova non distruttiva, in corrispondenza dell'ultimo step di analisi non si verifica la rottura del provino.



Figura 52 MODEL_DISPLACEMENT_X nel provino piatto in corrispondenza dello step 350.



Figura 53 Grafico che mostra l'andamento nel tempo degli spostamenti in direzione X per il provino piatto.



Figura 54 MODEL_DISPLACEMENT_Y nel provino piatto in corrispondenza dello step 350.



Figura 55 Grafico che mostra l'andamento nel tempo degli spostamenti in direzione Y per il provino piatto.

Osservando le figure precedenti, è possibile notare innanzitutto come ovviamente gli spostamenti lungo la direzione normale del provino Y, lungo la quale viene applicato lo spostamento allo stesso dalla macchina di trazione, siano di un ordine di grandezza superiore rispetto a quelli lungo la direzione trasversale X. Osservando l'andamento nel tempo degli spostamenti in direzione X e Y, rispettivamente in Figura 53 e in Figura 55, si nota come la strizione del provino piatto avvenga tra lo step 175 e il 200. I valori degli spostamenti in corrispondenza dello step 175, di inizio strizione del provino piatto, sono riassunti per i punti di analisi nella Tabella 14:

Punti	X_Displacement (mm)	Y_Displacement (mm)
Punto Centrale	0.203398	-0.676084
Punto Sinistra	0.234117	-0.716676
Punto Destra	0.162942	-0,646725

Tabella 14 Valore degli spostamenti in direzione X e Y per i punti di analisi in corrispondenza dello step 175 di inizio strizione del provino piatto.

Si osserva infine come gli spostamenti in direzione X siano tutti positivi, dato che i punti di analisi selezionati si trovano al di sopra della linea di mezzeria longitudinale del provino piatto,

e come gli spostamenti in direzione Y siano tutti negativi dato che il provino è messo in trazione da sinistra.

Si focalizza adesso l'attenzione sugli spostamenti in direzione Z. Si è già detto come effettuare un analisi 3D-DIC piuttosto che una 2D-DIC permetta di cogliere una deformazione che sia tridimensionale e al contempo di eliminare il problema di allineamento della fotocamera col provino piatto. Tuttavia, come si è già capito nel momento in cui si è parlato dell'impostazione del parametro Alpha di filtro, l'utilizzo di un impianto stereo-DIC composto da due fotocamere, per l'acquisizione di immagini di un provino piatto soggetto ad una prova meccanica di trazione non consente di cogliere con precisione lo spessore del provino stesso. Questo porta ad aspettarsi che sicuramente gli spostamenti in direzione Z, così come le deformazioni, siano determinati meno accuratamente che nelle direzioni X e Y.



Figura 56 MODEL_DISPLACEMENT_Z nel provino piatto in corrispondenza dello step 350.



Figura 57 Grafico che mostra l'andamento nel tempo degli spostamenti in direzione Y per il provino piatto e la tendenza di tali spostamenti a crescere nel tempo.

Osservando la Figura 56 si può notare come, esclusa una piccola zona in corrispondenza del confine della regione di interesse vicino al morsetto sinistro della macchina di trazione, la mappa del MODEL_DISPLACEMENT_Z sia uniforme. Questa informazione si riesce a captare anche dalla Figura 57 in cui, per tutti gli step, gli spostamenti in direzione Z sono molto vicini tra di loro, osservando anche che questi sono di un ordine di grandezza più piccoli di quelli in direzione X. Gli spostamenti in direzione Z in corrispondenza dello step 350 dell'analisi sono riassunti in Tabella 15:

Punti	Z_Displacement (mm)
Punto Centrale	-0.056416
Punto Sinistra	-0.066566
Punto Destra	-0.074977

Tabella 15 Valore degli spostamenti in direzione Z per i punti di analisi in corrispondenza dello step 350.

Dalla Figura 57 si potrebbe affermare che seppure la 3D-DIC sia in grado di cogliere una deformazione tridimensionale, fallisce nella definizione dello spostamento in Z per le motivazioni viste ed eventuali altre fonti di rumore che verranno analizzate nel paragrafo successivo. Tuttavia, è più corretto affermare che seppure la valutazione dello spostamento in

Z non sia accurata come quella in X e in Y, la 3D-DIC riesce comunque a rilevare la tendenza di tale spostamento a crescere nel tempo, peculiarità questa che non appartiene alla 2D-DIC.

10.4.2 Analisi di deformazioni durante la prova di trazione

Per quanto detto riguardo gli spostamenti in Z nel paragrafo precedente, in questa fase di studio si è deciso di focalizzare l'attenzione unicamente sulle deformazioni in direzione X e Y. In particolare, si visualizza la mappa delle deformazioni attraverso il field VSG_STRAIN in Paraview per lo step 350 e un grafico che ne mostra l'andamento nel tempo. È bene precisare che la mancanza di una storia di carico non ha permesso di ottenere la classica curva sforzo-deformazione relativa alla prova di trazione, nonché ricavare il modulo elastico dell'acciaio utilizzato per la realizzazione del provino piatto e il suo carico di snervamento. Non ha senso parlare poi di carico di rottura dato che si tratta di una prova non distruttiva.



Figura 58 VSG_STRAIN_XX nel provino piatto in corrispondenza dello step 350.



Figura 59 Grafico che mostra l'andamento nel tempo della deformazione in direzione X.



Figura 60 VSG_STRAIN_YY nel provino piatto in corrispondenza dello step 350.



Figura 61 Grafico che mostra l'andamento nel tempo della deformazione in direzione Y.

Come già emerso dall'analisi degli spostamenti, osservando i grafici per le deformazioni si osserva come la strizione avvenga in corrispondenza dello step 175. In particolare, dalla Figura 58 emerge come la zona in cui il provino piatto striziona maggiormente è in corrispondenza di un intorno del punto destro di analisi selezionato in partenza. Tale aspetto emerge osservando le stesse immagini acquisite durante la prova di trazione per la fotocamera di destra definita con il suffisso _1 nella sua configurazione di riferimento e nella sua configurazione deformata allo step 350, rappresentate in Figura 62. I valori di deformazione in corrispondenza dello step 175



Figura 62 Immagini della configurazione di riferimento (a sinistra) e configurazione deformata allo step 350 (a destra) del provino piatto acquisite dalla fotocamera _1.

per i 3 punti di analisi sono riassunti nella Tabella 16 mentre in Tabella 17 si è deciso di riportare i valori di deformazione in corrispondenza dello step 350.

Punti	VSG_STRAIN_XX	VSG_STRAIN_YY
Punto Centrale	-0.001013	0.002327
Punto Sinistra	-0.001556	0.002889
Punto Destra	-0.001399	0.002845

Tabella 16 Valore delle deformazioni in direzione X e Y per i punti di analisi in corrispondenza dello step 175 di inizio strizione del provino piatto.

Punti	VSG_STRAIN_XX	VSG_STRAIN_YY
Punto Centrale	-0.059331	0.089017
Punto Sinistra	-0.078297	0.124258
Punto Destra	-0.091099	0.136584

 Tabella 17 Valore delle deformazioni in direzione X e Y per i punti di analisi in corrispondenza dello step 350 di fine

 analisi della prova di trazione del provino piatto.

Dalla Figura 59 e dalla Figura 61 si riesce a ricavare un informazione molto importante riguardo la velocità di deformazione del provino. Infatti, ciò che abbiamo a disposizione non è la classica curva sforzo-deformazione ma una curva che ci dice in corrispondenza di ciascuno step temporale, ricordando che si è utilizzato uno step di analisi pari a 7, quanto vale la deformazione. Dai grafici emerge come, fintanto che si è in elasticità la velocità di deformazione risulta essere molto piccola in quanto, essendo la prova condotta in controllo di spostamento, è come se il provino si muovesse alla stessa velocità della macchina di trazione. Nel momento in cui si entra in plasticità, si passa nei 175 step successivi alla strizione, a valori di deformazione di due ordini di grandezza maggiori. In particolare, volendo calcolare la velocità media di deformazione per uno dei tre punti di analisi dallo step 1 allo step 175 e dallo step 176 al 350 in direzione X e Y si è proceduti nel seguente modo:

$$strain_rate_dir_j = \frac{VSG_Strain_Dir_{i+7} - VSG_Strain_Dir_i}{7} \qquad i = 1, 7, 14, 21, \dots, 143$$

 $average_strain_rate_dir_up_to_step_175 = \frac{\sum_{j=1}^{26} strain_rate_dir}{26}$ j = 1, 2, 3, ..., 51

$$average_strain_rate_dir_up_to_step_350 = \frac{\sum_{j=27}^{51} strain_rate_dir_26}{26}$$

I valori delle velocità di deformazione sono riassunti nella Tabella 18 e nella Tabella 19:

Punti	avg_strain_rate_X_up_to_step_1	avg_strain_rate_Y_up_to_step_1
	75 (step ⁻¹)	75 (step ⁻¹)
Punto Centrale	-7.333 E-06	1.550 E-05
Punto Sinistra	-1.326 E-05	2.175 E-05
Punto Destra	-1.153 E-05	1.754 E-05

Tabella 18 Valore medio della velocità di deformazione in direzione X e Y dallo step 1 allo step 175.

Punti	avg_strain_rate_X_up_to_step_3 50 (step ⁻¹)	avg_strain_rate_Y_up_to_step_3 50 (step ⁻¹)
Punto Centrale	-3.381 E-04	5.025 E-04
Punto Sinistra	-4.425 E-04	7.015 E-04
Punto Destra	-5.192 E-04	7.772 E-04

Tabella 19 Valore medio della velocità di deformazione in direzione X e Y dallo step 176 allo step 350.



Figura 63 Focus sui valori di deformazione in X in fase di elasticità utilizzando uno step di analisi pari a 7.

Effettuando uno zoom sulla zona di elasticità relativamente alla deformazione lungo X come mostrato in Figura 63, in cui è stato fissato come limite per la deformazione un valore pari allo 0.001 (con riferimento ai valori in Tabella 16), ci si rende conto come la deformazione non cresca costantemente nel tempo ma ci sia una sorta di andamento oscillatorio. Parlando dello spostamento in direzione Z si è affermato che ci sono eventuali fonti di rumore che non consentono di definire con accuratezza, neanche da un punto di vista macroscopico, l'andamento dello spostamento nel tempo. Le cause alla base dell'uno e dell'altro problema ancora una volta possono essere legate alle condizioni di illuminazione e di aereazione dell'ambiente di prova. In particolare, si è pensato che l'utilizzo della classica luce a lampade a 230 Volt alla frequenza di 50 Hz possa aver causato delle oscillazioni nella luminosità durante l'acquisizione delle immagini di prova, provocando di fatto delle alterazione nell'omogeneità dell'illuminazione delle immagini, che deve essere garantita con costanza durante un analisi 3D-DIC. Un'altra causa possibile potrebbe essere la risoluzione stessa delle immagini acquisite dalle due fotocamere: infatti mentre per i casi di studio di caratterizzazione del software DICe si sono utilizzate delle immagini con una risoluzione 2448 x 2048 con un peso di alcuni MB, nella prova di trazione condotta in laboratorio sono state utilizzate immagini con una risoluzione 1280 x 1024 con un peso di circa 1 MB. Dato che queste possibili cause di errore non possono essere eliminate in una fase di post-processing si è deciso per la fase di elasticità della deformazione in X di aumentare la risoluzione temporale a fronte di una bassa risoluzione spaziale adottando uno step di analisi unitario, come mostrato in Figura 64.



Figura 64 Focus sui valori di deformazione in X in fase di elasticità utilizzando uno step di analisi pari a 1.



Figura 65 Focus sui valori di deformazione in Y in fase di elasticità.

Effettuando uno zoom sulla zona di elasticità relativamente alla deformazione lungo Y come mostrato in Figura 63, in cui è stato fissato come limite per la deformazione un valore pari allo 0.003 (con riferimento ai valori in Tabella 16), ci si rende conto che un andamento oscillatorio è sempre presente ma meno accentuato. Pertanto, per la fase di elasticità in direzione Y, che rappresenta la direzione principale di carico del provino piatto, DICe rileva una deformazione che macroscopicamente cresce costantemente nel tempo.

Per quanto riguarda invece la fase di plasticità, che va dallo step 176 al 350 della prova di trazione, effettuando uno zoom relativamente alle deformazioni lungo X e Y, come mostrato rispettivamente in Figura 66 e in Figura 67, si può affermare che esse crescono nel tempo senza presentare alcun comportamento oscillatorio. Questo è indicativo della potenzialità di DICe a seguito di un analisi 3D-DIC su un provino piatto soggetto a prova di trazione di rilevare le grandi deformazioni della plasticità con un grado di accuratezza maggiore delle piccole deformazioni in elasticità. Questo accade perché l'influenza delle possibili cause di rumore nella valutazione delle deformazioni diventa, all'aumentare delle stesse, sempre meno rilevante.



Figura 66 Focus sui valori di deformazione in X in fase di plasticità.



Figura 67 Focus sui valori di deformazione in Y in fase di plasticità.

10.5 Linee guida consigliate per condurre al meglio un esperimento in vero attraverso un'analisi in DICe e sue potenzialità per l'analisi di una prova meccanica

Aver condotto un analisi di una prova di trazione condotta su un provino piatto presso il Politecnico di Torino consente di effettuare alcune considerazioni su quali siano le migliori linee guida da seguire per condurre al meglio un esperimento in vero utilizzando il software open-source DICe, facendo qualche confronto con le linee guida consigliate nel caso in cui l'analisi sia effettuata in MultiDIC.

Il software open-source DICe prevede l'utilizzo di un'unica coppia di fotocamere per l'acquisizione delle immagini dell'oggetto di calibrazione e dell'oggetto di prova. Abbiamo visto che MultiDIC è un software open-source per l'analisi multi-vista fortemente raccomandato nei casi in cui studiare la forma, il movimento e la deformazione dell'oggetto di prova è molto difficile a causa delle geometrie complesse e delle ampie deformazioni che possono verificarsi. Dato che in una prova meccanica in generale (nello specifico si è effettuata una prova di trazione su un provino piatto) la geometria dell'oggetto di prova così come il movimento dello stesso possono considerarsi abbastanza semplici, l'analisi in DICe è da preferirsi a quella in MultiDIC. In più, si è visto come nonostante l'utilizzo di sole due fotocamere non consenta di cogliere con accuratezza lo spessore del provino, in una prova meccanica una visione che sia prevalentemente 2D del provino è più che sufficiente. Infatti, si è visto come seppure non si riesca a determinare lo spostamento nella terza direzione Z con lo stesso grado di accuratezza degli spostamenti in X e Y, il software consente di cogliere la tendenza di tale spostamento a crescere nel tempo. A queste osservazioni se ne può aggiungere un'altra di natura economica: avendo a disposizione la storia di carico durante la prova meccanica, l'analisi in DICe consente di ottenere con precisione le caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato con un costo inferiore a quello necessario per condurre la stessa analisi in MultiDIC. Inoltre, nel confronto con una 2D-DIC, si è visto come l'utilizzo di due fotocamere consenta di mediare la misura delle stesse, aumentando di fatto la precisione ed eliminando il problema di allineamento della fotocamera con il provino. Tutto questo a fronte del costo aggiuntivo di un'unica fotocamera uguale a quella che si sarebbe utilizzata per un analisi 2D-

DIC. Queste motivazioni giustificano il fatto che un'analisi 3D-DIC di una prova meccanica è da preferirsi sempre ad un'analisi 2D-DIC.

Dalla discussione dei risultati ottenuti a seguito dell'analisi 3D-DIC della prova di trazione, si è osservato come l'illuminazione e l'aereazione dell'ambiente di prova siano aspetti fondamentali da considerare. Essi, infatti, hanno portato a scartare più della metà delle immagini di calibrazione acquisite e possono aver provocato quel rumore che ha portato ad ottenere un comportamento oscillatorio delle deformazioni nel tempo in elasticità. In maniera analoga a quanto accade per MultiDIC, affinchè l'illuminazione e il contrasto siano adeguati, è possibile posizionare luci a LED sopra e dietro le fotocamere per minimizzare possibili onde di calore nelle immagini a causa delle luci stesse. Per omogenizzare la temperatura dell'aria nella regione tra il campione e le fotocamere e ridurre errori dovuti ad eventuali onde di calore, posizionare un ventilatore in modo che soffi aria in tale regione.

Per quel che riguarda la calibrazione, a differenza di quanto accade in MultiDIC, non siamo vincolati nell'utilizzo di un oggetto di calibrazione cilindrico o semi-cilindrico. Infatti, per performare la calibrazione delle fotocamere, possiamo scegliere tra tre diverse possibilità di un oggetto di calibrazione 2D:

- Griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco);
- Griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti bianchi su background nero);
- Pattern a scacchiera.

Tuttavia, per una questione strettamente correlata alla possibilità in DICe di selezionare manualmente i parametri di threshold e una migliore visualizzazione dei punti speciali ad angolo, è preferibile utilizzare la prima delle possibilità proposte in cui si abbiano *Numero Colonne x Numero Righe* noti, spaziatura tra i punti nota e posizione degli speciali punti ad angolo nota. L'oggetto 2D di calibrazione può essere mantenuto con mano e deve essere posizionato con diverse orientazioni rispetto alle fotocamere in modo tale da riempirne il FOV. Nel fare questo il tempo di esposizione deve essere limitato, solitamente a pochi ms e uguale per entrambe le fotocamere, per ridurre la sfocatura del movimento.

La fase di calibrazione condotta per l'esperimento in vero della prova di trazione ha mostrato come le diverse possibili fonte di errore avessero inficiato la qualità delle immagini di calibrazione e nonostante l'aver effettuato la calibrazione una seconda volta, andando ad eliminare quelle immagini che avessero fallito o per le quali l'errore epipolare fosse maggiore di 2, non si è riusciti a contenere l'errore epipolare medio al di sotto di 0.5. Pertanto, la linea guida che si può pensare di fornire per la fase di calibrazione è quella di acquisire dapprima le immagini del pattern di calibrazione e poi effettuare la calibrazione stessa attraverso il software utilizzato, sia esso chiuso o open-source. Infatti, la fase di calibrazione è l'unica che ci consente di capire se nell'attrezzare l'ambiente di prova si sta sbagliando o nel posizionamento delle fotocamere, o nella scelta e nel posizionamento dell'illuminazione, o nel posizionamento di ventilatori per l'aereazione o nell'esposizione del pattern di calibrazione. Solo dopo aver corretto eventuali errori e performata una buona calibrazione, ha senso procedere con l'acquisizione delle immagini della prova meccanica.

Sia lo stadio delle fotocamere sia quello del campione devono essere eventualmente supportati da strutture che consentano di smorzare e dunque minimizzare possibili vibrazioni provenienti dall'edificio.

10.5.1 Raccolta delle immagini consigliata per DICe

Per una più corretta raccolta delle immagini dell'oggetto di calibrazione e dell'oggetto di prova nei diversi step è consigliabile salvare le immagini acquisite in formato TIFF (Tagged Image File Format) o BMP, piuttosto di un semplice JPG. Le immagini devono essere denominate in modo tale da distinguere facilmente quelle acquisite dalla fotocamera di sinistra da quelle acquisita dalla fotocamera di destra, nel caso in cui le fotocamere siano posizionate l'una accanto all'altra. Stesso discorso nel caso in cui le fotocamere fossero posizionate verticalmente l'una sopra l'altra. Per tutte le immagini si utilizzi il suffisso _0 per identificare la fotocamera di sinistra e con il suffisso _1 per la fotocamera di destra. Per quel che riguarda le immagini dell'oggetto di calibrazione, si possono utilizzare dei prefissi in modo tale che il numero di cifre del prefisso sia lo stesso per la prima e l'ultima immagine. Ad esempio, da 01 a 99 o da 001 a 150. Per le immagini dell'oggetto di prova possiamo utilizzare un qualsiasi prefisso che sia indicativo dello step della prova in corrispondenza del quale l'immagine è stata acquisita.

Conclusioni

In questa tesi di laurea è stata fornita un'introduzione generale sugli aspetti principale da tenere in considerazione nel momento in cui è necessario analizzare principalmente una prova meccanica tramite la tecnica di correlazione digitale di immagini, altrimenti detta DIC. Trattandosi di un argomento complicato da illustrare nella sua completezza, dato che le varianti nelle applicazioni possono essere molteplici, così come mostrato da quelle biomediche di MultiDIC, si è cercato di dotare il lettore di una conoscenza teorica di base su quali sono le molteplici caratteristiche fondamentali su cui focalizzare l'attenzione nei diversi step che devono susseguirsi in un'analisi DIC. Pertanto, parte di questo lavoro si può tranquillamente porre come base teorica di partenza per chiunque voglia condurre misurazioni DIC, definendo chiaramente le aspettative e i requisiti della prova meccanica e gli obiettivi delle misurazioni stesse.

Lo studio di questa tesi, inoltre, nasce dalla necessità di definire un'alternativa valida all'utilizzo presso il Politecnico di Torino di software chiusi per l'analisi 3D-DIC di prove meccaniche. Proprio per questo motivo, in una fase preliminare di studio ci si è data la possibilità di studiare le potenzialità e al contempo convalidare due strumenti open-source attraverso una serie di prove ed esperimenti: si tratta della libreria di MATLAB MultiDIC, che utilizza per l'analisi multi-vista il software open-source di analisi 2D-DIC Ncorr, e il software DICe.

La calibrazione è uno step fondamentale ogni qualvolta si performa un'analisi 3D-DIC. Si è visto che la tecnica di calibrazione utilizzata maggiormente nei metodi 3D-DIC è il Bundle Adjustment (BA) che consente di stimare sia i parametri intrinsechi sia quelli esterni. Tali parametri, raccolti in questo lavoro all'interno di tabelle per ciascuna delle fotocamere utilizzate, comprendono lunghezze focali in pixel $[f_x, f_y]$, le coordinate del centro ottico $[C_x, C_y]$, i parametri di distorsione radiale $[k_1, k_2, k_3]$ e i parametri di distorsione tangenziale $[p_1, p_2]$.

MultiDIC è stato valutato attraverso uno studio esterno consistito nella misurazione in-vivo dell'arto inferiore di una femmina sana di 34 anni mentre compie una plantarflessione e un nuovo studio in cui l'oggetto di prova è lo stesso oggetto cilindrico di calibrazione utilizzato nel primo studio. Per quest'ultimo caso, per ciascuna coppia di fotocamere, è stata fissata una fotocamera di riferimento e una fotocamera "deformata", così che le immagini prese da quest'ultima possano essere considerate come versioni deformate delle immagini prese dalla fotocamera di riferimento. Per valutare la performance dell'algoritmo 3D-DIC e il sistema sperimentale si è analizzata l'accuratezza della forma ricostruita, l'errore di unione tra le coppie di fotocamere, l'errore dello spostamento e l'errore della deformazione. Si è visto come il processo di calibrazione per MultiDIC sia abbastanza semplice nonostante l'elevato numero di fotocamere, senza perdere la sua capacità di correggere le distorsioni della lente, dando così il vantaggio di modificare le posizioni delle fotocamere durante le prove senza richiedere un sostanziale e addizionale tempo di ricalibrazione. L'analisi 3D-DIC delle prove ha fornito errori nella misurazione della forma del cilindro di calibrazione più piccoli di 0.01 mm. Gli errori di unione e di spostamento sono stati sempre nell'ordine di 0.01 mm. Le deformazioni misurate per entrambe le prove sono state dell'ordine di 10⁻³: per la prova di plantarflessione questo risultato è da considerarsi sufficientemente accurato ed accettabile nella maggior parte delle applicazioni biomediche, nelle quali sono coinvolte grandi deformazioni; per la prova condotta su cilindro questo risultato è da considerarsi coerente con il fatto di non avere una vera e propria deformazione del cilindro, dato che la configurazione deformata non è altro che la vista della fotocamera accoppiata alla fotocamera di riferimento. Pertanto, MultiDIC si presenta come software open-source per l'analisi multi-vista fortemente raccomandato nei casi in cui studiare la forma, il movimento e la deformazione dell'oggetto di prova è molto difficile a causa delle geometrie complesse e delle ampie deformazioni che possono verificarsi.

DICe è stato valutato attraverso una prova di trazione condotta su un provino a forma di D e una traslazione rigida di un piatto con caratteristiche 3D di dimensioni note montato su uno stadio Aerotech con un encoder ad alta precisione e un controllo della posizione. Il primo caso di studio è stato principalmente utilizzato per esplorare il software DICe in termini di comandi e interfaccia, tipo di risultati salvati a seguito delle fasi di calibrazione e di analisi 3D-DIC delle immagini e analisi dei grandi dataset attraverso l'applicazione open-source Paraview. Il secondo caso di studio è stato utilizzato per la convalida del software, tenendo di fatto in considerazione che i risultati principali ottenibili in attraverso DICe sono la computazione fullfield degli spostamenti e delle deformazioni. Per questo motivo, in Paraview, i field sui quali si è focalizzata l'attenzione sono stati il MODEL DISPLACEMENT e il VSG STRAIN. Innanzitutto, è emerso come nella fase di calibrazione, a differenza di MultiDIC, non si è vincolati nell'utilizzo di un oggetto 3D che sia cilindrico o semi-cilindrico: infatti, nella maggior parte dei casi si preferisce acquisire immagini di calibrazione stereo nelle quali è ripreso un oggetto di calibrazione 2D che sia una griglia simmetrica di punti con speciali punti ad angolo (punti neri su background bianco) mantenuto e posizionato con diverse orientazioni rispetto alla coppia di fotocamere con mano. L'analisi 3D-DIC della traslazione rigida del piatto ha mostrato come gli spostamenti ottenuti siano del tutto paragonabili a quelli reali e noti applicati attraverso lo stadio Aerotech e misurati attraverso l'encoder ottico. In particolare, l'errore relativo percentuale massimo compiuto nella valutazione del modulo dello spostamento è stato dell'1,094%. Inoltre, seppure le traslazioni siano state impostate unicamente nelle direzioni X e Z del sistema di riferimento scelto per il piatto durante la prova, dall'analisi 3D-DIC compare una componente di spostamento in direzione Y. Questo risultato, indicativo di un possibile disallineamento tra il sistema di riferimento definito sull'oggetto di prova e quello definito attraverso il comando in DICe "use best fit plane", non è da considerarsi un errore. Infatti, essendo DICe un software per l'analisi 3D-DIC, ci restituirà sempre spostamenti e deformazioni che in una direzione sono molto piccoli o addirittura nulli rispetto a quelli grandi e principali nelle altre due direzioni. La sua peculiarità è comunque cogliere la tendenza di tali spostamenti: infatti, l'andamento dello spostamento in direzione Y, seppur presente, è sempre prossimo allo zero.

L'ultima fase di studio aveva come obiettivo quello di realizzare un esperimento innovativo invero in laboratorio presso il Politecnico di Torino. Tuttavia, l'emergenza COVID19 non ha reso questo possibile e si è fatto riferimento ad immagini acquisite da un precedente esperimento condotto in laboratorio sempre presso il Politecnico di Torino. L'esperimento è una prova di trazione non distruttiva in controlla di carico condotta su un provino piatto in acciaio fissato tra due morsetti in posizione orizzontale. L'analisi 3D-DIC della prova di trazione è stata condotta attraverso DICe. In generale, è possibile affermare che per l'analisi di una qualsiasi prova meccanica sia preferibile utilizzare DICe piuttosto che MultiDIC, dato che la geometria del provino così come gli spostamenti dello stesso possano essere considerati abbastanza semplici. A questo è possibile aggiungere una considerazione economica legata ad una maggiore difficoltà nella preparazione di un ambiente di prova per condurre un'analisi attraverso MultiDIC. Osservazioni sulla calibrazione e sull'analisi 3D-DIC dei risultati hanno poi consentito di stabilire delle linee guida su come meglio condurre un esperimento in-vero attraverso un'analisi in DICe e le sue potenzialità per l'analisi di una prova meccanica. La calibrazione delle 150 immagini acquisite per ciascuna delle due fotocamere ha fornito come risultato ultimo un errore epipolare che fosse molto più grande del limite di 0.5 accettabile per una qualsiasi analisi 3D-DIC e nonostante si siano eliminate più della metà delle immagini aventi un errore epipolare maggiore di due, non si è riusciti a rientrare in quel range. Si è notato come la mancata illuminazione a LED, l'assenza di ventilatori, un tempo di esposizione alle fotocamere troppo grande possano essere tra le cause principali di un errore epipolare così grande: le prime due cause sono legate alla presenza di possibili onde di calore, nonché per la prima, la presenza di oscillazioni nella luminosità, mentre l'ultima è legata alla sfocatura delle immagini. Pertanto, ogni qualvolta si conduce un esperimento in-vero è corretto dapprima condurre la calibrazione, controllare che l'errore epipolare sia minore di 0.5, magari scartando poche immagini, e solo successivamente acquisire le immagini della prova meccanica. L'analisi di spostamenti e deformazioni durante i 350 step della prova di trazione ha messo in evidenza come DICe consenta di individuare l'inizio della fase di transizione elasto-plastica, individuata nello step 175. In particolare, effettuando uno zoom sulla zona di elasticità relativamente alla deformazione lungo è emerso un andamento oscillatorio della deformazione nel tempo, il quale è risultato essere più accentuato per le deformazioni più piccole lungo X rispetto a quelle lungo la direzione di carico del provino Y. Effettuando uno zoom sulla zona di plasticità, invece, si può affermare che le deformazioni crescono nel tempo senza presentare alcun comportamento oscillatorio. DICe è dunque in grado di cogliere le grandi deformazioni della plasticità con un grado di accuratezza maggiore rispetto alle piccole deformazioni dell'elasticità e questo è dovuto a tutte le possibili fonte di rumore, la cui influenza, all'aumentare delle deformazioni, diventa sempre meno rilevante. Un provino piatto soggetto ad una prova di trazione, sviluppo uno stato di deformazione triassiale. Tuttavia, l'utilizzo di un provino piatto e di sole due fotocamere non consente di cogliere lo spostamento in Z con lo stesso grado di accuratezza dello spostamento in X e in Y: infatti, gli spostamenti in Z sono di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelli in X e, pertanto, l'effetto del rumore è ancora più importante. Tuttavia, una visione che sia prevalentemente 2D del provino è più che sufficiente, dato che DICe riesce a cogliere la tendenza dello spostamento in Z a crescere nel tempo. Pertanto, un'analisi 3D-DIC per una prova meccanica è da preferirsi sempre ad una 2D-DIC, in quanto mediare le misure di due fotocamere consente di aumentare la precisione e al contempo eliminare il problema di allineamento della fotocamera con il provino.

Appendice A Flow-Chart per le Misurazioni e le Analisi DIC

Questa appendice presenta un flow chart dei punti principali da considerare quando si progettano, si eseguono e si analizzano le misurazioni DIC performate durante la prova meccanica di un provino piano.



Figura A.1 Flow chart che illustra i passaggi principali coinvolti durante la conduzione delle misurazioni DIC in combinazione con la prova meccanica di un provino piano (parte 1).



Figura A.2 Flow chart che illustra i passaggi principali coinvolti durante la conduzione delle misurazioni DIC in combinazione con la prova meccanica di un provino piano (parte 2).
Bibliografia e sitografia

- [1] Solav, D., & Kevin M., M. (2018). MultiDIC: An Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation. IEEE.
- [2] www.github.com/MultiDIC/MultiDIC.
- [3] www.docs.paraview.org/en/latest/.
- [4] International Digital Image Correlation Society (iDICs) (2018). A Good Practices Guide for Digital Image Correlation.
- [5] www.sem.org/dicchallenge.
- [6] Blaber, J., & Antoniou, A. (2017). Ncorr: Instruction Manual Version 1.2.2. Georgia Institute of Technology.
- [7] www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms#1_1. (2018).
- [8] Turner, D. Z. An overview of the gradient-based local DIC formulation for motion estimation in DICe.
- [9] Turner, D. Z. An overview of the virtual strain gauge formulation in DICe.
- [10] Solav, D. (2018). MultiDIC: Instruction Manual Version 1.0. Massachusetts Institute of Technology.
- [11] www.github.com/dicengine/dice/releases.
- [12] Sandia National Laboratories. Stereo-DIC Challenge Plate Analysis Discussion Document.