
Integrazione di Tecniche di Fotogrammetria e Laser Scanning per la modellazione 3D della carena di una imbarcazione

M. FIANI

Dipartimento di Ingegneria Civile,
Università di Salerno
e m.fiani@unisa.it

F. MENNA, S. TROISI

Dipartimento di Scienze Applicate,
Università Parthenope
e fabio.menna@uniparthenope.it
salvatore.troisi@uniparthenope.it

Key words > Fotogrammetria digitale, Laser Scanner, Ingegneria Navale, DSM, Modellazione 3D

Riassunto > In questa nota è descritta una applicazione sperimentale di integrazione e confronto di due metodologie di rilievo, la fotogrammetria digitale e il laser scanning terrestre, per applicazioni di reverse engineering nel settore della nautica e più in generale dell'Ingegneria Navale. Le due metodologie sono in grado di fornire in modo indipendente tutti gli elementi necessari per modellare l'oggetto del rilievo, ma è indubbio che la loro integrazione assicura i risultati migliori in termini di completezza e affidabilità.

La sperimentazione, condotta sulla carena di una barca a vela di 12 metri, ha fornito indicazioni sulle peculiarità e difficoltà di applicazione al caso di studio delle due metodologie di rilievo e delle strumentazioni utilizzate e ha dimostrato che l'integrazione di differenti metodologie è utile per risolvere alcuni problemi che si incontrano nell'uso di una singola.

La tecnica sperimentata si è dimostrata adatta al controllo geometrico della carena in relazione al progetto originale, con rispetto dell'accuratezza richiesta dal problema.

Per il rilievo fotogrammetrico è stata utilizzata una camera Nikon D100 con obiettivo 35 mm, mentre il rilievo laser scanning terrestre è stato effettuato con l'Optech ILRIS 36D, uno strumento a tempo di volo di grande portata e buone caratteristiche di velocità, che si presta, pur con alcuni limiti propri dei sistemi laser a tempo di volo, anche per rilievi di oggetti delle dimensioni della barca a vela utilizzata in questa prova.

Abstract > In this paper we describe an experimental application for the integration and comparison of two survey methodologies, digital photogrammetry and terrestrial laser scanning, for reverse engineering applications in the field of nautical science and more general in Naval Engineering. The two methodologies are able to provide independently all the key elements needed to model the surveyed object,

but their integration certainly ensures the best results in terms of reliability and completeness.

The experiment, carried out on the hull of a 12 meter long sailboat, has given important hints about the features of the two surveying methodologies and of the equipment that has been used and about the specific problems related to hull evaluation. It also has shown that laser scanning and photogrammetric techniques integration can be useful for solving problems that appear when using only one of them. The technique used in this test has been shown to be appropriate for the geometric control of hulls to compare the actual shape to the original design, and to check that the required accuracy constraints are satisfied.

The photogrammetric survey was carried out by means of a Nikon D100 digital camera equipped with a 35mm lens, whereas the scanning was performed with the laser scanner Optech ILRIS 36D, a device based on the Time of Flight (TOF) method which allows for long range and high speed scanning, also exploitable for surveying objects of large dimension as the sailboat used for the test, despite limitations characteristic of TOF laser instruments.

1. Introduzione

La creazione di modelli 3D assume oggi un'importanza sempre maggiore nei numerosi settori applicativi che ne usufruiscono. I campi di interesse sono molteplici anche se le caratteristiche dei modelli 3D prodotti possono essere molto differenti tra loro a seconda delle specifiche tecniche richieste. In settori come quello industriale, a esempio, di grande importanza è l'accuratezza e l'affidabilità delle misure, mentre in quello della conservazione dei beni culturali è da preferire un buon compromesso tra accuratezza e presentazione dei modelli per la loro divulgazione. Tra le tecniche di rilievo utilizzate per produrre modelli digitali delle superfici, alla tradizionale fotogrammetria si affianca da qualche anno la tecnica laser scanning. Nel settore del rilievo terrestre, gli strumenti laser a tempo di volo sono infatti ideali per rilievi a medie e grandi distanze (da 10 a 1000 m e oltre) in cui è richiesta una precisione di qualche millimetro sulla modellazione dell'oggetto rilevato.

La fotogrammetria è, d'altro canto, una tecnica ormai

collaudata per il rilievo puntuale di strutture tridimensionali, perchè la strumentazione, i tempi e i costi sono variabili controllabili e gestibili anche in funzione delle specifiche richieste (Gunn et al., 1988), (Ingram et al., 1989). L'utilizzo della fotogrammetria per la generazione di modelli densi di superficie è invece un po' meno diffusa nel settore terrestre, dove generalmente si preferiscono strumenti come il laser scanner per la loro versatilità e velocità di acquisizione, che permette di generare nuvole di punti dense in tempi rapidissimi. L'enorme mole di dati acquisiti necessita però di un'attenta fase di editing, filtraggio e registrazione delle scansioni in un unico sistema di riferimento (Reference System, RS).

Nel settore dell'ingegneria navale, per studiare i parametri idrodinamici della carena, si costruisce un modello in scala direttamente dal piano di costruzione, che contiene tutti gli elementi che definiscono la forma dello scafo. Tali modelli, con i quali si effettuano le prove in vasca, devono esserne la fedele attuazione, quindi nella loro realizzazione va posta particolare cura. I modelli in scala devono essere poi rilevati, per testarne la rispondenza all'idea progettuale, utilizzando metodologie che assicurino precisioni relative di circa 1:10.000 (Fraser, 1993; Fraser, 1998). Il rilievo di uno scafo al vero è viceversa richiesto esclusivamente quando si riscontrano anomalie nelle caratteristiche statiche e dinamiche rispetto a quelle di progetto o quando quest'ultimo non è disponibile.

La carena di una barca può assumere forme molto diverse in funzione del tipo di applicazione per la quale è stata costruita: a esempio una barca da regata ha una forma avviata poiché deve presentare valori dei coefficienti di resistenza al moto molto piccoli.

Attualmente, gli strumenti più usati nel campo dell'ingegneria navale sono i laser scanner, per la velocità di esecuzione del rilievo e per la grande quantità di informazioni che producono; l'integrazione con la fotogrammetria è comunque spesso necessaria per la fase di allineamento delle scansioni (Guidi et al., 2005).

Il rilievo fotogrammetrico e laser presentato in questa nota riguarda la carena di una barca a vela da regata, costruita in legno nel 1980, di lunghezza fuori tutto di circa 12 m, larghezza massima di 3,67 m e altezza di 3,2 m (inclusa la deriva).

Le misure sono state eseguite sul molo di un cantiere

nautico nel quale erano presenti altre barche messe a secco che, per la loro posizione rispetto a quella oggetto del test, hanno influenzato lo schema delle scansioni laser, delle prese fotogrammetriche e del rilievo topografico dei target. In figura 1 è mostrata la barca a vela Test, il cui nome è "Cuordileone".

Figura 1 - Barca a vela Test.

2. Il rilievo fotogrammetrico

2.1 Calibrazione del sistema fotocamera e acquisizione dei dati

Il rilievo fotogrammetrico della carena dell'imbarcazione è stato eseguito con una fotocamera digitale reflex NIKON D100 da 6Mpx con obiettivo di focale nominale 35 mm. La calibrazione del sistema corpo macchina-obiettivo è stata effettuata in laboratorio acquisendo le immagini di un test field tridimensionale, secondo lo schema di presa previsto dalla procedura della self-calibration mediante Bundle Block Adjustment in rete libera (Brown, 1971; Fraser, 1997; Beyer, 1992; Gruen & Beyer, 2001).

I target usati per la calibrazione sono stati disposti in modo da ricoprire uniformemente le immagini riprese e sono disposti su diversi piani. La maggior parte delle prese fotogrammetriche è stata effettuata da una distanza media pari a quella utilizzata per il rilievo dello scafo e alcune prese sono ruotate di $\pm 90^\circ$ rispetto ad altre, allo scopo di scorrelare i parametri di orientamento interno da quelli di orientamento esterno (Remondino & Fraser, 2006).

Per la stima dei parametri di orientamento interno sono stati utilizzati diversi software (Photomodeler, IWitness, Australis) che fanno fornito parametri di orientamento e distorsioni praticamente identici tra loro. In figura 2 è mostrato il poligono di calibrazione utilizzato nel test e lo schema delle prese fotogrammetriche.



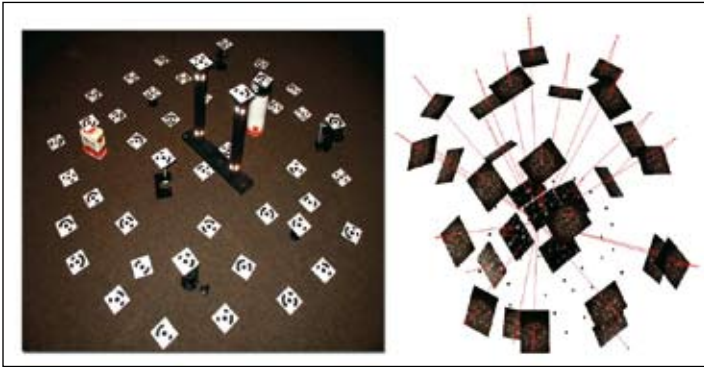


Figura 2 - Test field per la calibrazione della fotocamera.

Prima di effettuare le riprese dello scafo, sono stati posizionati circa trecentocinquanta *target* circolari autoadesivi del diametro di 6 cm, dei quali centosessanta codificati per il riconoscimento automatico. L'ubicazione di tali *target* è stata progettata in modo da delineare le linee fondamentali dello scafo, utilizzate in seguito per la definizione di un *RS* solidale con l'oggetto: linea di galleggiamento, piano diametrale, ruota di prua, deriva, etc.

La posizione di circa quaranta *target* è stata rilevata con una stazione totale *Leica TCRA 1102*, in modalità senza prisma, da due punti di stazione materializzati a terra, in un unico *RS* esterno allo scafo. I punti battuti su ciascuna murata sono stati rilevati dalla stazione posizionata sullo stesso lato e sono quindi "lanciati". Gli unici punti battuti da entrambe le stazioni e sui quali è stata effettuato un calcolo rigoroso di compensazione sono quello di collegamento a terra e alcuni *target* sferici posizionati sul piano diametrale; gli scarti quadratici medi ottenuti sulle coordinate di tali punti sono mediamente di 3 mm.

Al fine di controllare un eventuale sbandamento trasversale dell'imbarcazione e possibili torsioni del modello fotogrammetrico, in corrispondenza dell'estremità prodiera e poppiera sono stati calati due fili a piombo, le cui oscillazioni sono state smorzate disponendo i pesi in contenitori riempiti di liquido ad alta viscosità.

La presenza di un sottile strato di polvere sulla carena, dovuto alle operazioni di ordinaria manutenzione sulle barche circostanti, ha disegnato una trama naturale sufficientemente casuale da caratterizzare localmente la superficie (figura 3) e garantire il funzionamento degli algoritmi di *image-matching* senza necessità di ulteriore trattamento, come a esempio uso di opacizzanti e sovrapposizione di una trama.

E' stato acquisito un centinaio di fotogrammi a scala media 1:170, in modo di coprire con elevatissima sovrapposizione stereoscopica tutto lo scafo e di assicurare la presenza di un adeguato numero di prese convergenti. Il Ground Sample Distance, GSD, risultante è mediamente di circa 1.3 mm. Le operazioni di collocazione dei *target* e l'acquisizione dei fotogrammi sono state eseguite da due operatori e sono durate circa tre ore.

2.2 Elaborazione dei dati

I fotogrammi acquisiti sono stati elaborati con il software di fotogrammetria digitale *close range PhotoModeler* ver. 5.2.3 della *EOS Systems*. È stato eseguito l'orientamento relativo utilizzando i *target* codificati, che assicurano una maggiore precisione nella collimazione automatica (fino a 0.1 pixel), ottenendo residui inferiori al pixel nella compensazione in blocco dei fotogrammi.

Per dimensionare e inquadrare il modello nel sistema di riferimento esterno, sono stati utilizzati come punti fotografici di appoggio cinque *target* codificati, assegnando i pesi in funzione delle accuratze ottenute dalla compensazione del rilievo topografico di appoggio.

Successivamente, per referenziare il modello in un *RS* solidale all'oggetto, è stata effettuata una rototraslazione nello spazio con procedura ai minimi quadrati. Il nuovo sistema è definito mediante i seguenti elementi:

- il piano diametrale, individuabile dai *target* allineati sulla ruota di prua e sulla faccia prodiera e poppiera della pinna di deriva,
- la retta intersezione tra il piano individuato dalla linea di galleggiamento e il piano diametrale,
- un punto sulla retta, in corrispondenza della ruota di prua.

La terna cartesiana così definita è confrontabile (o meglio coincide) con quella utilizzata nel piano di costruzione dello scafo.

Il processo *Bundle Adjustment* ha fornito le coordinate di tutti i punti e i parametri di orientamento esterno delle camere che sono stati utilizzati nella successiva procedura di generazione del modello digitale della superficie (*Digital Surface Model, DSM*). In termini di residui, sui punti naturali, corrispondenti a elementi caratteristici dello scafo e collimati manualmente, si sono ottenuti valore di residui globali al massimo di 20 mm mentre nei punti in cui erano stati posti i *target* codificati, collimati in modo automatico, il valore massimo del residuo è risultato pari a 0.6 mm.

La generazione del DSM è stata eseguita mediante il software *Socet Set* ver. 5.3 della *BAE Systems*, utilizzando il modulo *Automatic Terrain Extraction, ATE*, specifico per l'estrazione dei modelli 2.5D tipici

della Fotogrammetria Aerea. Il modulo *ATE* utilizza un algoritmo basato sulla correlazione delle immagini con metodo *Area Based Matching, ABM*, che opera a livello di immagini piramidali (Remondino & Zhang, 2006). Sono implementate alcune funzioni per l'eliminazione automatica dei blunders che utilizzano più di due immagini per la determinazione delle coordinate spaziali dei punti.

Poiché l'oggetto del rilievo è, viceversa, 3D, è stato necessario definire almeno due diversi sistemi di riferimento corrispondenti ai due lati dello scafo. Inoltre, poiché il modulo *ATE* dà problemi in presenza di prese molto convergenti, è stato necessario utilizzare un terzo sistema; partendo da quello di riferimento solidale all'oggetto e utilizzato nel piano di costruzione dello scafo, sono state effettuate opportune rototraslazioni mediante il software *Photomodeler*, in modo da minimizzare i valori assoluti degli angoli di orientamento esterno (Menna & Troisi, 2007).

Questa procedura risulta reversibile dal momento che insieme agli orientamenti esterni vengono rototraslati anche i punti utilizzati per l'orientamento delle immagini, fornendo così un set di punti doppi tra il nuovo *RS* per la generazione del *DSM* e quello relativo al piano di costruzione.

In figura 4 le parti dello scafo diversamente colorate corrispondono alle nuvole di punti misurate automaticamente nei tre differenti sistemi. Tali nuvole di punti sono state successivamente riportate nel *RS* del piano di costruzione mediante un software proprietario implementato in ambiente *MATLAB*.

Il DSM complessivo è stato generato su un grigliato regolare di punti con passo di 2 cm utilizzando circa ottanta fotogrammi. La strategia impiegata è la *Adaptive* e si è utilizzato il massimo numero possibile di coppie di fotogrammi. È stato fornito, come prima approssimazione del DSM, quello costituito dai "punti seme" costruito sulle coordinate dei *target* determinate con *Photomodeler*.

L'accuratezza delle coordinate spaziali per i punti ottenuti da restituzione multi-immagine può essere definita dalla relazione (Fraser, 1996):

$$\sigma_{XYZ} = \frac{q}{\sqrt{n}} S_f \sigma_{xy}$$

in cui:

S_f è il denominatore della scala media del fotogramma; σ_{xy} l'accuratezza nella misura delle coordinate immagine; n la numerosità delle immagini scattate da ogni stazione e q è un coefficiente dipendente dalla configurazione della rete, che assume valori compresi tra 0.4 e 0.8 per reti ben configurate, mentre risulta superiore a 1.5 per le altre.

Nel caso in esame, considerando che n è mediamente pari a 2 e che a q è stato assegnato un valore "cautelativo" pari a 1, considerata la disposizione delle camere nella rete fotogrammetrica, simmetrica rispetto all'oggetto (Fig. 4) e che infine l'accuratezza nella misura delle coordinate immagine può essere posta pari a un pixel, ne consegue una incertezza pari a 1 mm per le coordinate dei punti oggetto.

Il tempo necessario per l'elaborazione dei dati fotogrammetrici, riassumibile nelle seguenti fasi:

- calibrazione;
- orientamento delle immagini;
- restituzione di linee e elementi necessari per la definizione del RS solidale alla carena;
- generazione automatica delle nuvole di punti e loro inquadramento nel RS finale;
- generazione della mesh;

è risultato pari a circa trenta ore.

Figura 3 - Trama naturale della superficie della carena.



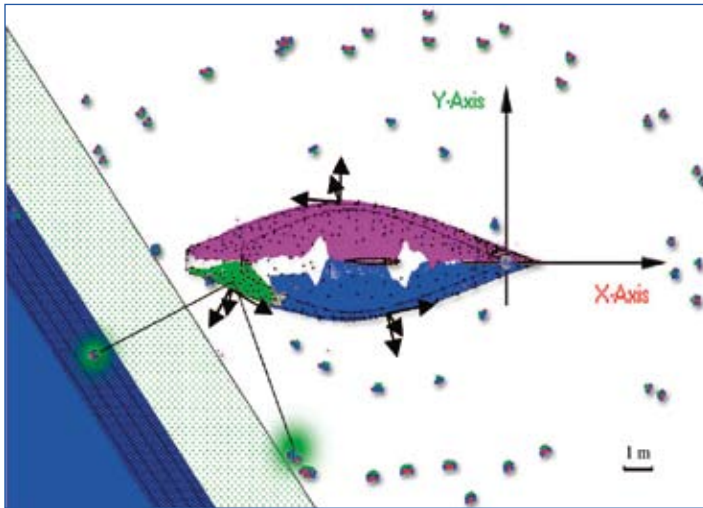


Figura 4 - Sistemi di riferimento utilizzati per il DSM.

3. Il rilievo laser scanning

3.1 Acquisizione dati LASER

Il rilievo laser è stato effettuato con lo scanner terrestre ILRIS 36D della Optech. Tale strumento è fornito di base rotante, che permette di acquisire scansioni panoramiche a 360°. La precisione strumentale nominale nella determinazione delle coordinate spaziali dei punti rilevati è pari a 8 mm a una distanza di 100 m dall'oggetto.

Le trentasei scansioni sono state effettuate da dieci stazioni posizionate tutto intorno allo scafo a una distanza media di 5 m da esso. La progettazione delle scansioni è stata effettuata in funzione del metodo scelto per l'allineamento, l'*Iterative Closest Point*, ICP, e risultano perciò molto sovrapposte.

Il passo di scansione è stato impostato da 2 a 5 mm e il diametro dello spot laser, alla distanza di 5 metri, è risultato inferiore al millimetro. In tabella 1 sono riportati alcuni dati riguardanti le scansioni, mentre in figura 5 è visibile l'ubicazione dei punti di stazione rispetto allo scafo. Il rilievo laser dalle dieci stazioni ha richiesto circa sei ore di lavoro.

La rumorosità dei punti laser è stata verificata analizzando in sezione un campione di punti in un'area limitata. In figura 6 si evidenzia come la variazione della misura del range sulla superficie dello scafo sia dell'ordine dei 40 mm.

Tabella 1: Dati relativi alle scansioni laser scanning.

STAZIONE	SCANSIONE	DURATA	N° PUNTI	PASSO DI SCANSIONE
AD	scanAD_1	9'	198720	4 mm (a 5 m)
	scanAD_2		476100	
	scanAD_3		370530	
A	scanA_24	14'	453051	4 mm (a 5 m)
	scanA_25		502681	
	scanA_26		502681	
	scanA_27		93588	
AS	scanAS_16	18'	175032	4 mm (a 5 m)
	scanAS_17		749892	
	scanAS_18		749892	
	scanAS_19		390390	
PRS	scanPRS_16	11'	410310	4 mm (a 5 m)
	scanPRS_17		763002	
	scanPRS_18		60237	
PR	scanPR_7	18'	1999712	2 mm (a 5 m)
PRD	scanPRD_21	22'	25.626	4 mm (a 5 m)
	scanPRD_22		705318	
	scanPRD_23		189645	
BD	scanBD_12	18'	310233	4 mm (a 5 m)
	scanBD_13		759506	
	scanBD_14		759506	
	scanBD_15		135564	
B	scanB_5	12'	407740	4.9 mm (a 5 m)
	scanB_6		498427	
	scanB_7		428830	
BS	scanBS_5	13'	144486	4.9 mm (a 5 m)
	scanBS_6		494882	
	scanBS_7		494882	
	scanBS_8		351094	
PO	scanPO_4	20'	2281995	2.4 mm (a 10 m)

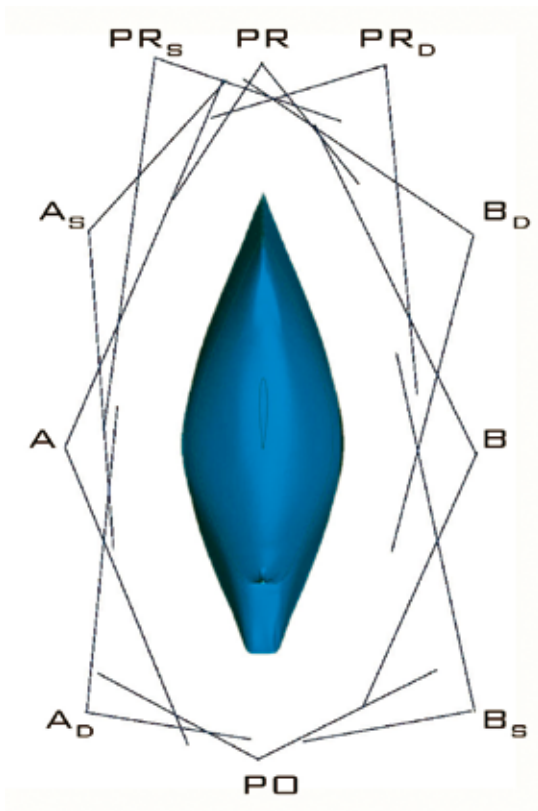
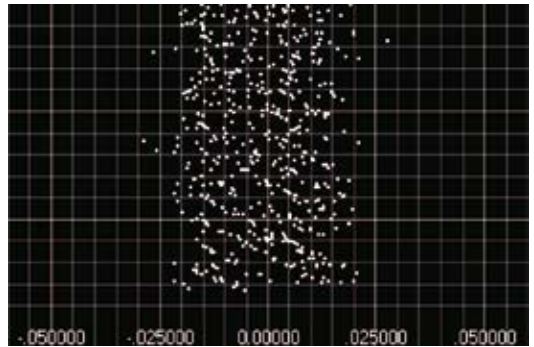
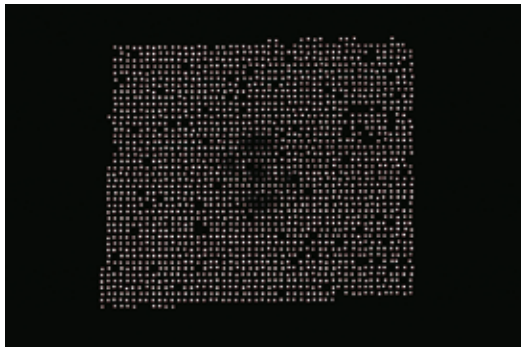


Figura 5 - Ubicazione delle stazioni laser

Figura 6a - Campione di punti utilizzato per l'analisi del rumore sul range.

Figura 6b - Sezione del campione di punti (valori in m).



3.2 Elaborazione dei dati LASER

3.2.1 Allineamento con metodo Iterative Closest Point - ICP

L'elaborazione delle scansioni laser è stata eseguita con il *software Polyworks* della *Innovmetric*. La base rotante dello scanner è dotata di *encoder* che misurano le rotazioni dello strumento restituendo una nuvola di punti, che può essere considerata riferita a un unico *RS* per ogni punto di stazione. Dapprima, sono state quindi allineate automaticamente tutte le scansioni effettuate da ciascuna stazione ottenendo dieci distinte nuvole di punti, ciascuna con proprio sistema di riferimento legato allo strumento.

Successivamente sono state allineate tra loro le dieci nuvole di punti, aventi grande sovrapposizione l'una con l'altra, corrispondenti alle diverse parti dello scafo: fianco destro, fianco sinistro, prua e poppa, ottenendo così quattro "blocchi".

Questa operazione è stata effettuata mediante l'algoritmo *ICP*, implementato nel modulo *IMAlign* del *software* (Soucy & Laurendeau, 1995) utilizzando anche punti non appartenenti allo scafo (a esempio tacche di sostegno, candelieri e albero), in modo da avere superfici multiforme. L'algoritmo *ICP*, se le superfici da allineare sono costituite da forme lisce, può infatti portare a errati allineamenti anche in presenza di ottimi parametri di convergenza che farebbero pensare a un corretto risultato (Guidi et al., 2005). Nel modulo *IMAlign* l'allineamento avviene tra coppie di *mesh* poligonali previa generazione di un grid regolare di punti il cui passo è stato fissato a 5 mm.

Per fornire all'algoritmo un primo allineamento approssimato, è stata utilizzata la procedura di rototraslazione per punti omologhi implementata nel *software*, servendosi delle *intensity images* (figura 7) per individuare i *target* fotogrammetrici. Alcune scansioni, riguardanti la parte poppiera, hanno presentato problemi di allineamento per il fatto che il timone era stato accidentalmente ruotato durante il rilievo; si è dovuto quindi procedere alla rimozione di tale appendice dalla nuvola di punti in fase di *editing*.

Nelle procedure di allineamento si sono ottenute delle deviazioni standard inferiori al centimetro eccetto per quelle relative alla prua e alla poppa dove si sono raggiunti valori di circa 18 mm.

La *mesh* complessiva è stata composta mediante l'allineamento dei quattro blocchi con procedura *ICP*, mantenendo fisso il *RS* di uno dei blocchi. Infine, la *mesh* è stata sottoposta alla fase di *editing* per eliminare appendici e oggetti estranei alla carena. Il tempo richiesto per l'elaborazione dei dati laser, dalla generazione delle *mesh* al loro allineamento, è stato pari a circa trenta ore.

Nella figura 8 si mostra il risultato dell'allineamento di tutte le scansioni laser dopo la fase di *editing*.



Figura 7 - Intensity image di una porzione di barca.

3.2.2 Orientamento con Reference Points - RPs da fotogrammetria

Un metodo alternativo di generazione di modelli tridimensionali fa uso di una procedura integrata sperimentata insieme a quella standard dell'*ICP*. Sono state utilizzate per questa prova solo due nuvole di punti relative alle stazioni A e B, le quali coprono interamente rispettivamente i lati sinistro e destro della barca.

Per riportare le nuvole di punti nello stesso *RS* della fotogrammetria, sono stati calcolati i baricentri dei punti laser contenuti nel cerchio più esterno dei *target*; tali punti sono stati considerati centri dei *target*. Poiché le loro coordinate sono note nel sistema di riferimento della fotogrammetria, è possibile calcolare i parametri di rototraslazione spaziale con variazione di scala tra laser e fotogrammetria. Per ogni lato dello scafo sono stati calcolati quindici centri di *target* (figura 9).

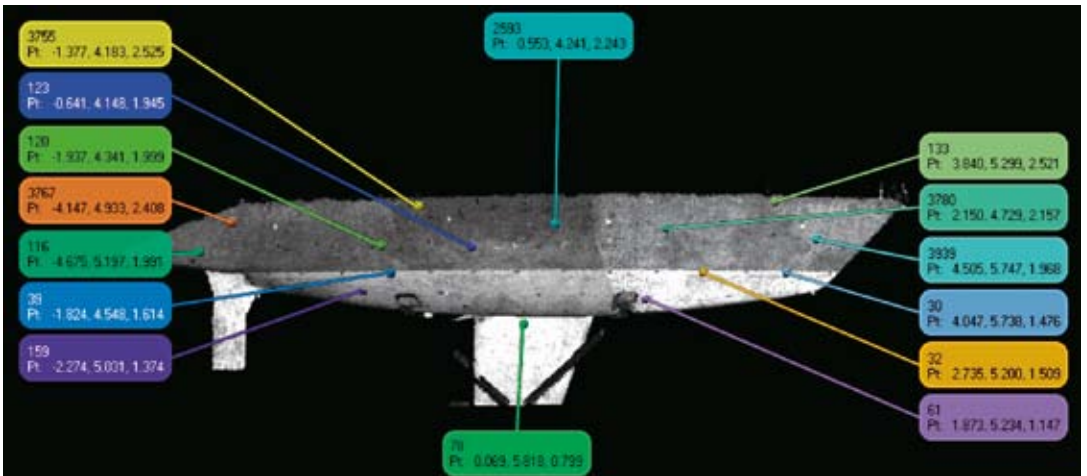
I residui massimi delle trasformazioni a sette parametri sono risultati inferiori a 7 mm su entrambi i lati. I parametri calcolati sono stati applicati alle nuvole di punti ottenendo il modello completo già referenziato e scalato. Questa procedura è stata eseguita con lo stesso *software* implementato in ambiente *MATLAB* già utilizzato per portare i diversi *DSM* fotogrammetrici in uno stesso *RS*.

Il tempo necessario per la generazione del modello finale con questa procedura integrata ha richiesto circa dodici ore per la parte fotogrammetrica e due ore per l'inquadramento delle due nuvole di punti nel *RS* fotogrammetrico e generazione della *mesh*.



Figura 8 - Risultato dell'allineamento delle scansioni.

Figura 9 - Lato destro. Punti doppi per la trasformazione a sette parametri.



4. Confronto dei risultati

Sono stati confrontati i risultati ottenuti con le tre metodologie utilizzando come *reference* il modello fotogrammetrico. Affinché il confronto tra i prodotti permetta di evidenziare effettivi scostamenti tra i due modelli, questi devono essere ovviamente riferiti alla stessa terna cartesiana.

Nel nostro caso, la definizione del *RS* confrontabile con quello del piano di costruzione è risultata agevole con la tecnica fotogrammetrica grazie all'utilizzo di *marker* autoadesivi di piccole dimensioni collocati in punti significativi dello scafo, mentre non è stata effettuata per il modello laser. In generale, infatti, per misurare punti notevoli con strumenti come gli scanner, che non hanno un apparato di collimazione, è necessario utilizzare dei *target* volumetrici (tipo sfere, coni o altri solidi di forma nota) da modellare con procedure e algoritmi di *best fitting*.

Nel test sono state impiegate alcune sfere di diametro di 6 cm ma, poiché lo scanner impiegato presenta un rumore elevato sul *range* (figura 6), le operazioni di *best fitting* delle sfere non hanno fornito risultati affidabili per la definizione dei loro centri. Risultati probabil-

mente migliori per il *best fitting* si sarebbero ottenuti utilizzando dei *target* volumetrici di maggiori dimensioni che tuttavia non sarebbero stati facilmente posizionabili sullo scafo e avrebbero inoltre provocato ostruzioni prospettiche sulla superficie, con conseguenti buchi nei dati. L'alternativa adottata, consistente, come detto, nell'utilizzo delle *intensity images* del laser sui *target* fotogrammetrici, si è dimostrata valida. I confronti che seguono sono stati effettuati in ambiente GeoMagic Studio 8, in cui sono stati costruiti sia il modello fotogrammetrico che quello laser dopo aver effettuato un leggerissimo *smoothing* sui dati. Gli scostamenti tra due superfici o tra punti e superfici sono computati come distanza più breve dalla *mesh* costruita come superficie di riferimento.

4.1 Laser ICP - Fotogrammetria

Per poter eseguire il confronto, i due modelli sono stati allineati con *ICP* prendendo quello fotogrammetrico, già orientato nel *RS* del piano di costruzione, come superficie di riferimento.

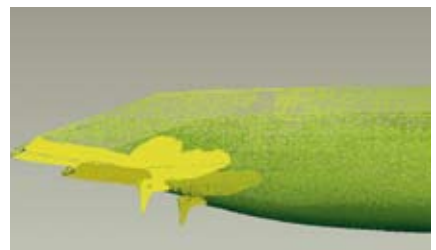
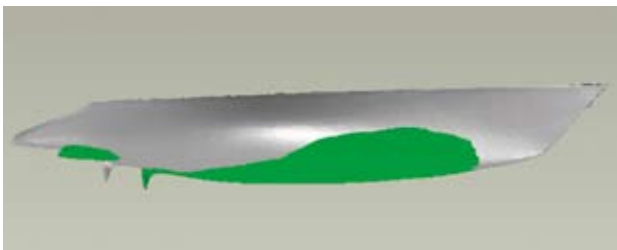
La convergenza della procedura *ICP* è ricercata, secondo il principio dei *Minimi Quadrati Lineari (MQL)*, minimizzando la sommatoria dei quadrati dei vettori scostamento tra i punti del modello da orientare e quelli della superficie di riferimento.

Poiché gli algoritmi di allineamento delle nuvole di punti implementati nei *software* commerciali sono pensati per allineare dati omogenei, cioè ottenuti con la stessa metodologia, se tra i due modelli è presente un fattore di scala, il risultato potrebbe non essere veritiero. In genere, un fattore di scala diverso tra i due modelli conduce a un risultato in cui i due modelli si intersecano, poiché la media dei vettori scostamento deve essere nulla per il principio dei *MQL* (figura 10).

Il risultato del confronto effettuato con il *software GeoMagic* è mostrato in figura 11 dove sono ben visibili gli scostamenti tra le due superfici.

Si noti come il modello laser sia "esterno" a quello fotogrammetrico nella parte inferiore dello scafo (colori della scala dal giallo all'arancio che corrispondono a valori positivi), mentre nella parte superiore delle murate il comportamento è opposto (colori in tonalità dell'azzurro, corrispondenti a valori negativi).

Figura 10 - Esempi dell'effetto dell'allineamento tra due modelli differenti solo in scala.



Fanno eccezione alcune zone colorate nei toni scuri dell'azzurro appartenenti alla parte inferiore, in cui il modello fotogrammetrico è stato costruito per interpolazione perché la presenza delle tacche ha ostacolato il processo di *image-matching*. Lo scostamento medio sul fondo è di circa 1 cm e raggiunge un massimo di circa 2.5 cm. Gli scostamenti sui bordi delle *mesh* possono raggiungere anche valori notevolmente maggiori (vari centimetri) ma non sono significativi di reali differenze tra i due modelli.

Il confronto tra i *target* rilevati con la stazione totale e il modello fotogrammetrico ha evidenziato uno scostamento massimo di 7 mm, con media di 1 mm e deviation standard (dev.st.) di 3 mm; lo stesso confronto effettuato con il modello laser presenta invece uno scostamento massimo di 10 mm, media 4 mm e dev.st. 4 mm.

4.2 Laser RPs - Fotogrammetria

La nuvola di punti laser relativa ai dati rilevati dalle due stazioni A e B è già stata sottoposta a trasformazione a sette parametri ed è quindi nello stesso *RS* del modello fotogrammetrico. Il confronto è stato effettuato sulla *mesh* costruita con le stesse procedure già seguite. I risultati del confronto tra la *mesh* laser e quella fotogrammetrica sono visibili in figura 12, nella quale si evidenzia come l'allineamento ottenuto tenendo conto della diversa scala porti a una migliore aderenza tra i due modelli: le zone a scostamento positivo, dove il modello laser è esterno a quello fotogrammetrico (in giallo), sono distribuite in tutto lo scafo, così come avviene per le zone colorate in blu che vedono la superficie laser interna rispetto a quella fotogrammetrica. Gli scostamenti sul fondo dello scafo sono diminuiti come entità ed estensione rispetto al precedente confronto.

Si sottolinea però che nella prima metodologia di allineamento sono state utilizzate le nuvole di punti di tutte le scansioni, mentre nella seconda soltanto i dati relativi a due punti di stazione.

Si evidenzia inoltre un effetto che nel confronto precedente non era manifesto, proprio perché erano state considerate tutte le scansioni: nella zona centrale delle murate si notano delle forme ellittiche in cui la superficie laser è interna a quella fotogrammetrica.

Tale effetto, manifestatosi a seguito del confronto, era comunque già risultato visibile in certe posizioni della nuvola di punti laser corrispondenti a particolari condizioni di illuminazione (figura 13). I dati di *range* in quel settore ellittico sono leggermente sovrastimati (quasi un centimetro). Tale comportamento si nota sui dati delle stazioni laterali A e B nella parte centrale delle murate, mentre per le altre stazioni è meno accentuato e si verifica in posizioni leggermente diverse.

Il confronto tra i *target* rilevati con la stazione totale e il nuovo modello laser evidenzia in questo caso uno scostamento massimo di 8 mm, media nulla e una dev.st. di 4 mm. La media nulla trovata negli scostamenti tra i dati topografici e la *mesh* laser è ovviamente il risultato logico delle operazioni effettuate per la trasformazione a sette parametri.

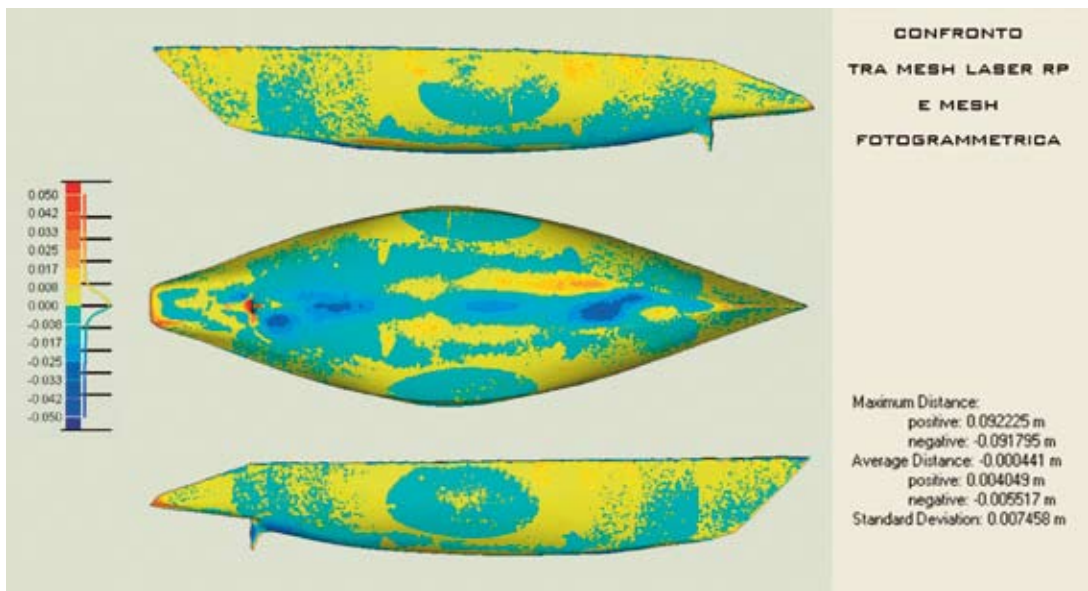
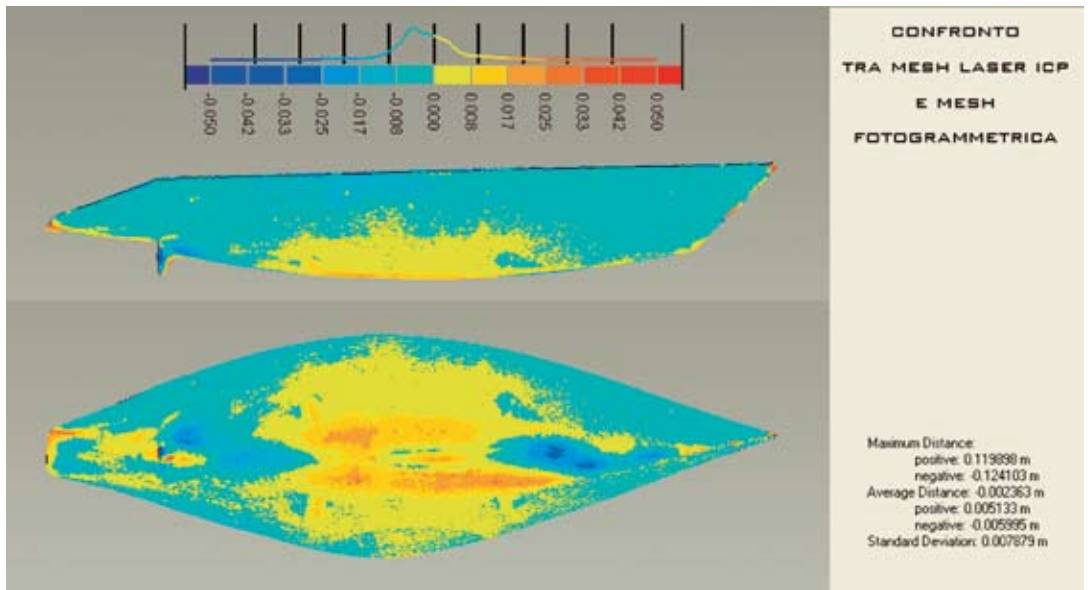
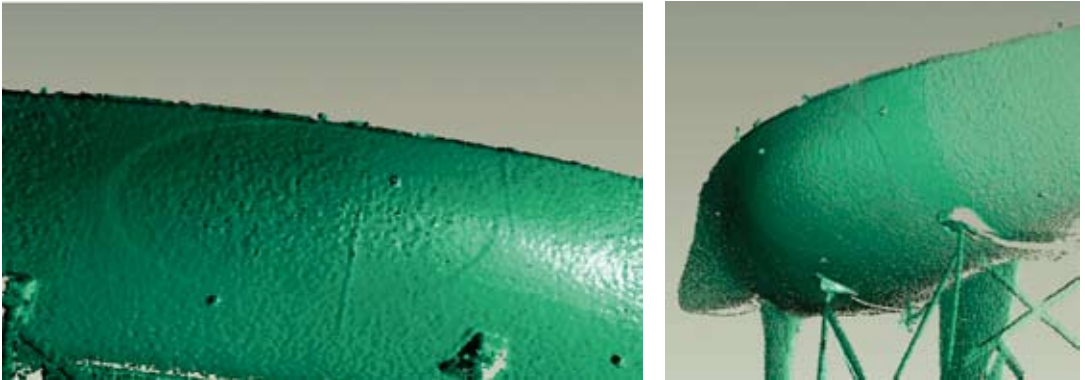


Figura 11 - Scostamento tra mesh laser allineata con ICP e mesh fotogrammetrica.

Figura 12 - Scostamento tra mesh laser registrata con RPs e mesh fotogrammetrica.



4.3 Confronto con il piano di costruzione e analisi di simmetria della carena

Per confrontare i modelli ottenuti con il piano di costruzione, poiché quest'ultimo era disponibile in copia cartacea, è stato rasterizzato a 300 d.p.i. e successivamente corretto, mediante funzioni polinomiali, dagli effetti di distorsione procurati dallo scanner.

In figura 14 è visibile il disegno di progetto, rappresentato secondo le consuete normative di disegno navale, che prevedono il tracciamento solo di metà scafo per le imbarcazioni simmetriche come quella sotto test. In figura, le sezioni trasversali poppiere sono disegnate sulla destra e quelle prodiera a sinistra.

Per confrontare le sezioni trasversali del piano di costruzione con quelle dei modelli fotogrammetrico e laser, questi ultimi sono stati sezionati con piani trasversali in corrispondenza dei valori definiti da progetto (figura 15). Le sezioni ottenute sono state quindi sovrapposte al piano di costruzione "georeferenziato" nello stesso RS utilizzato per i modelli.

Dal confronto effettuato, è risultato evidente che sia il modello fotogrammetrico che quello laser sono leggermente più interni rispetto a quello di progetto nella parte inferiore della carena, mentre sono coincidenti nella parte centrale e superiore delle murate.

Dall'analisi dei modelli è possibile infine ottenere utili informazioni sulla forma della carena, che potrebbe presentare differenze significative rispetto a quella di progetto. Nel caso in cui il comportamento manovriero dello scafo presenti anomalie, si può, infatti, sospettare la presenza di una asimmetria rispetto al piano diametrale; un tipico esempio di comportamento anomalo è quello che si verifica quando il natante devia dal percorso rettilineo in assenza di cause perturbatrici (vento e corrente) pur avendo il timone al centro, oppure quando una barca a vela tende a stringere la bolina in modo diverso sulle due mura.

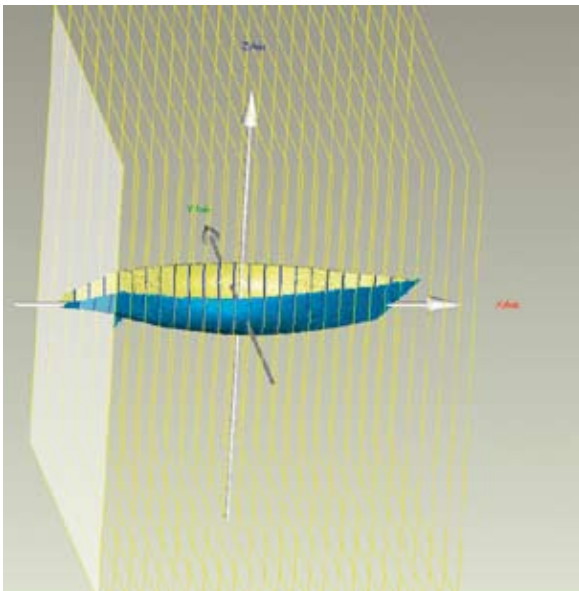
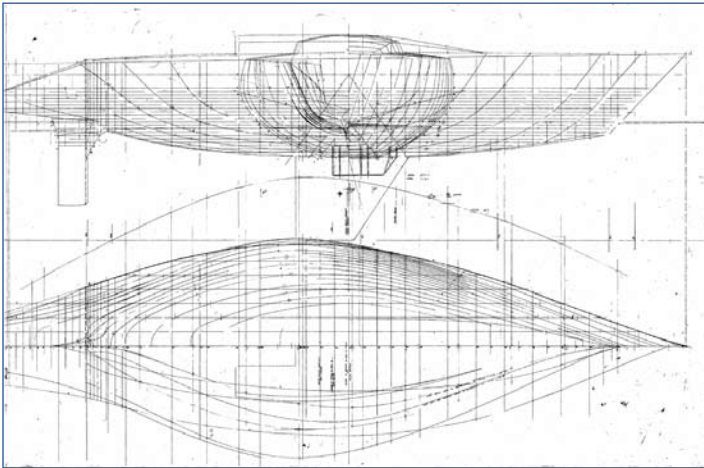
L'individuazione del piano diametrale permette quindi di effettuare un'analisi di simmetria, allo scopo di evidenziare eventuali differenze tra la parte sinistra e quella destra della carena, e più in generale dello scafo. L'individuazione di punti di riferimento per la determinazione del

Figura 13 - Aree con ranges anomali.

piano diametrale sulle imbarcazioni è però un problema aperto, soprattutto su carene senza un'evidente svasatura sul fondo come nel caso in esame. L'importanza di queste analisi suggerisce l'idea di proporre la materializzazione di appositi contrassegni sullo scafo durante la fase della loro costruzione sia per facilitare eventuali operazioni di controllo di qualità che per la progettazione di possibili modifiche dello scafo al vero. Nel caso in esame, data la mancanza dei suddetti contrassegni, sono stati utilizzati punti che, per progetto, dovevano giacere sul piano diametrale, ma non si esclude la possibilità che per problemi insorti in fase di costruzione, di montaggio della deriva, di sue modifiche e/o possibili urti, tali elementi non rispettino più l'idea progettuale.

Figura 14 - Piano di costruzione.

Figura 15 - Esempio di sezioni fatte sui modelli.

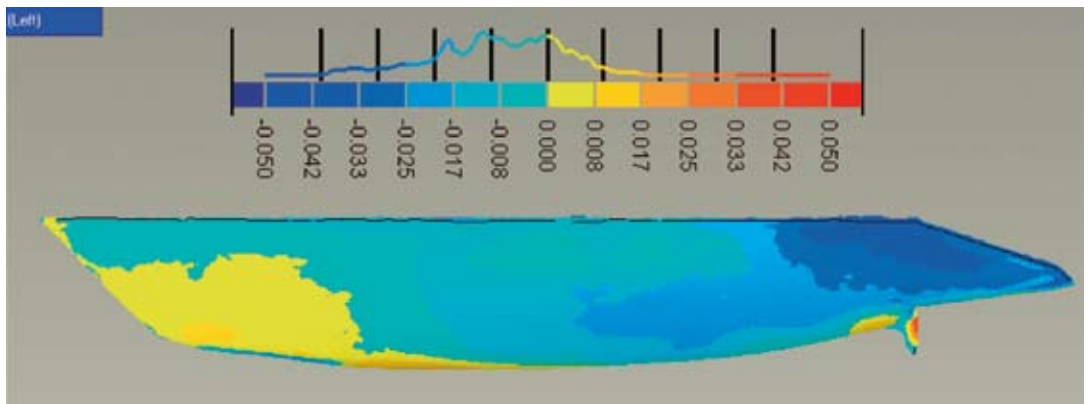
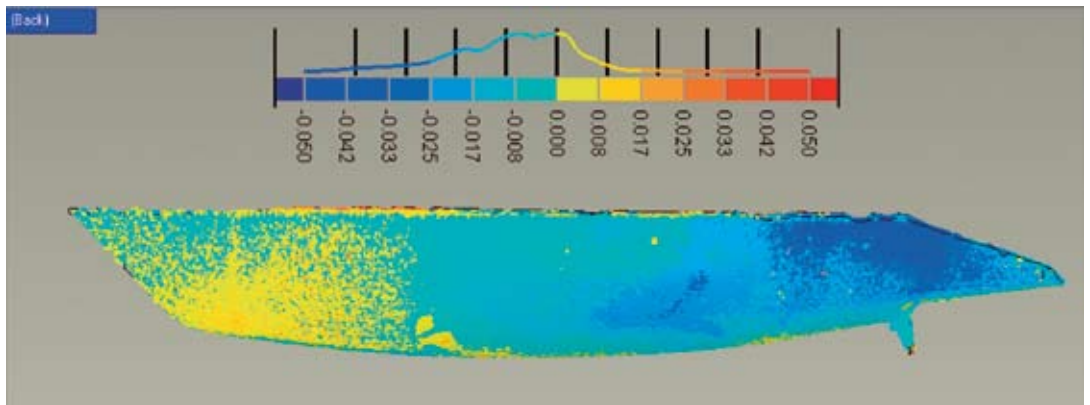


Per indagare sulla eventuale presenza di asimmetria è necessario confrontare il modello ricostruito a partire dal rilievo di uno dei due lati dell'imbarcazione con il simmetrico del restante lato rispetto al piano diametrale. Tale operazione è stata effettuata sui tre modelli (i due laser con i diversi allineamenti e quello fotogrammetrico), confrontando il lato destro specchiato con il lato sinistro preso come riferimento. Le figure 16, 17 e 18 mostrano i risultati di tali confronti, effettuati in ambiente *GeoMagic*, dai quali si evidenzia un sostanziale accordo tra i tre modelli e la minore larghezza della parte destra poppiera rispetto a quella sinistra (fino a 4 cm).

Nel caso in esame, l'asimmetria di 4 cm riscontrata è infatti difficilmente attribuibile all'incertezza nella definizione del piano diametrale, dal momento che il massimo dei residui nel calcolo dello stesso, con la procedura MQL, è risultato pari a soli 2 mm.

Figura 16 - Modello Laser con RPs: confronto lato destro specchiato – lato sinistro.

Figura 17 - Modello fotogrammetrico: confronto lato destro specchiato – lato sinistro.



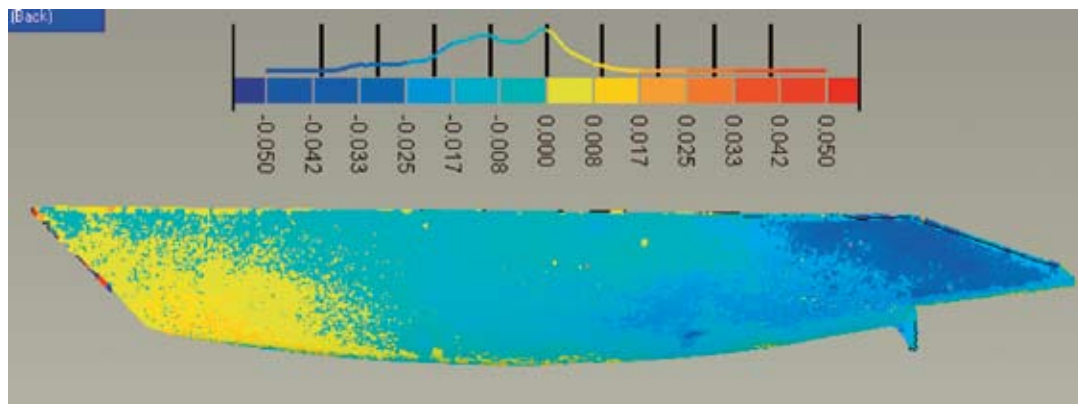


Fig 18 - Modello Laser con ICP: confronto lato destro specchiato – lato sinistro.

5. Conclusioni

I confronti effettuati in questo test confermano l'affidabilità dei metodi di rilievo utilizzati e allo stesso tempo evidenziano le differenze tra il metodo fotogrammetrico e quello laser. Entrambe le metodologie possono essere adottate per raggiungere le accuratezze necessarie per il controllo di particolari opere ingegneristiche, quali lo scafo di un'imbarcazione, anche se entrambe richiedono particolari accorgimenti per essere pienamente affidabili.

Per portare le nuvole di punti delle varie scansioni laser in un unico sistema di riferimento è necessario che le scansioni abbiano adeguata sovrapposizione, in modo da tenerne una come riferimento e sottoporre le altre a rototraslazioni nello spazio mediante opportuni algoritmi, quali l'*ICP*. La convergenza e l'affidabilità del risultato raggiunto con l'algoritmo *ICP* dipende tuttavia fortemente dalla sovrapposizione tra le scansioni e dalla forma delle superfici.

Bisogna in ogni caso considerare la componente *random*, dovuta all'incertezza della misura, poiché, anche se le singole scansioni sono molto accurate, la propagazione dell'errore di allineamento potrebbe produrre, nella nuvola di punti complessiva, deviazioni più o meno sensibili che allontanano il modello risultante dalla superficie reale.

Si è inoltre evidenziato come l'integrazione dei dati fotogrammetrici con quelli laser apporti una notevole semplificazione delle procedure di allineamento di questi ultimi, rendendo inutili elevate sovrapposizioni tra le scansioni, e fornisca altresì risultati migliori rispetto a quelli ottenibili con l'uso del solo dato laser.

Si mette in risalto poi il ruolo giocato in questo test dalla radiometria delle risposte laser, che ha permesso l'individuazione dei centri dei *target* da usare per le trasformazioni tra i differenti sistemi di riferimento. Sono state infine evidenziate importanti problematiche nel settore del *reverse engineering* relativamente all'individuazione sugli scafi di riferimenti che consentano il confronto con il progetto originale.

Bibliografia

- Beyer, H.A., 1992. Accurate Calibration of CCD-Cameras, 1992. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition 1992(CVPR92), Champaign, Illinois, pp. 96-101.
- Brown, D.C., 1971. Close-range camera calibration. PE&RS, Vol. 37(8), pp.855-866.
- Fraser, C.S., 1993. A resume of some industrial applications of photogrammetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 48(3), 12-23.
- Fraser, C.S., 1996. Network design. In: Close-range Photogrammetry and Machine Vision, Atkinson (Ed.), Whittles Publishing, UK, pp.256-282.
- Fraser, C.S., 1997. Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 52, pp.149-159.
- Fraser, C.S., 1998. Some thoughts on the emergence of digital close range photogrammetry. Photogrammetric Record, 16 (91), pp. 37-50.
- Gruen A., Beyer, H.A., 2001. System calibration through self-calibration. In: Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Gruen and Huang (Eds.), Springer Series in Information Sciences 34, pp. 163-194.
- Guidi, G., Micoli, L.L., Russo, M., 2005. Boat's hull modeling with low-cost triangulation scanners. In: Proceedings of Videometrics VIII - SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, Vol. 5665, pp. 28-39.
- Gunn, M.J., Hicks, R.S., 1988. Industrial photogrammetry – its application to shipbuilding. Marine Technology, 253, pp. 229-236.
- Ingram, H., Dudeck, F.K., 1989. Photogrammetry as an advanced planning tool for naval shipyards. Presented paper, 26th Annual Technical Symposium, Association of Scientists and Engineers.
- Menna, F., Troisi, S., 2007. Photogrammetric 3D modelling of a boat's hull. In: Proceedings of the Optical 3D measurement techniques VIII, Zurich, Switzerland, Vol II, pp. 347-354.
- Remondino, F., Fraser, C.S., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden, Germany, pp. 266-272.
- Remondino, F., Zhang, L., 2006. Surface reconstruction algorithms for detailed close-range object modeling. IAPRS&SIS, 36(3), pp. 117-121.
- M. Soucy, D. Laurendeau, 1995. A general surface approach to the integration of a set of range views. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol 4, n. 17, pp. 344-358.