

## Integrazione tra camera ToF e tecnica fotogrammetrica multi-immagine per il rilievo metrico

Filiberto Chiabrando (\*), Francesco Nex (\*\*), Dario Piatti (\*\*), Fulvio Rinaudo(\*\*)

(\*) Dipartimento di Scienze e Tecniche per i Processi di Inseadimento-Politecnico di Torino, Viale Mattioli 39  
10125 Torino, Tel. 011-5644380, Fax. 011-5644399, filiberto.chiabrando@polito.it

(\*\*) Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell’Ambiente e delle Geotecnologie-Politecnico di Torino  
C.so Duca degli Abruzzi 24- 10129 Torino, Tel. 011-5647657, 011-5647699  
francesco.nex@polito.it, dario.piatti@polito.it, fulvio.rinaudo@polito.it.

### Riassunto

Negli ultimi anni sono stati presentati vari articoli inerenti l’integrazione tra differenti tecniche di rilievo. L’idea che accomuna questi lavori è quella di superare gli elementi di debolezza delle singole tecniche integrandole fra loro per ottenere un risultato più completo ed affidabile. Nel presente articolo viene presentata l’integrazione tra dati acquisiti con camere basate sul tempo di volo (*Time of Flight - ToF*) e tecniche fotogrammetriche di *matching* multi-immagine per il rilievo metrico di manufatti architettonici. Le camere *ToF* rappresentano un sistema innovativo di acquisizione di nuvole di punti tridimensionali, paragonabili a quelle ottenibili mediante acquisizioni con strumenti LiDAR; tuttavia, il campo di misura è circoscritto a qualche decina di metri e i sensori presentano attualmente una risoluzione limitata a circa 40000 pixel. Come è noto, le tecniche di *matching* fotogrammetrico non sono in grado di generare nuvole di punti prive di errori grossolani in ogni condizione operativa, soprattutto in applicazioni terrestri: prese convergenti, brusche variazioni di profondità in corrispondenza di discontinuità geometriche o *texture* ridotte e *pattern* ripetitivi possono compromettere l’efficacia di questi algoritmi. Per superare tali problemi, alcuni autori hanno proposto di usare DSM approssimati ottenuti con restituzione manuale per ridurre la ricerca di punti omologhi. Il metodo proposto, invece, prevede di realizzare un modello di superficie con camera *ToF*, aumentando la velocità di acquisizione e riducendo il costo della strumentazione rispetto agli strumenti LiDAR. L’integrazione tra il dato *ToF* e la tecnica fotogrammetrica di *matching* multi-immagine permette di estrarre automaticamente in tre dimensioni i bordi geometrici degli oggetti rilevati. Tale risultato può essere utilizzato come dato di partenza nella produzione di elaborati grafici 2D (prospetti, piante, ecc.).

### Abstract

*In the last years several papers dealt with the integration of different techniques for the realization of correct surveys. In the present work, an approach based on the integration of data derived from a Time-of-Flight (ToF) camera combined with a multi-image matching technique for architectural survey is reported. ToF cameras, recently introduced in the market, allow to acquire 3D point clouds at video frame rates, comparable with LiDAR system, however their working range is limited to some tens of meters and the sensor resolution is nowadays limited to about 40000 pixel. Actually, especially for architectural purposes, the image matching techniques require an approximate Digital Surface Model (DSM) in order to “drive” the solution to the correct match; the more accurate is this model, the more correct (without blunders) is the solution. In order to overcome this problem, in some previous works the DSM generation is performed by a digital plotting. The suggested approach is based on the employment of a ToF camera for the generation of an approximate DSM to be used in a multi-image matching approach that allows the object breaklines to be automatically extracted. The achieved results could be successfully employed in the realization of traditional 2D drawings such as façades, plans and sections.*

## Introduzione

La produzione di rappresentazioni architettoniche solitamente richiede la descrizione geometrica puntuale della forma che si intende tracciare con una precisione adeguata alla scala della rappresentazione. Tradizionalmente le informazioni metriche di partenza per la rappresentazione vengono acquisite attraverso il rilievo topografico classico o quello fotogrammetrico, operazioni che incidono notevolmente sui costi e sui tempi di realizzazione di un rilievo metrico.

In questi ultimi anni l'introduzione della tecnica LiDAR ha velocizzato i tempi di acquisizione dei dati; tali strumenti, infatti, consentono di acquisire in tempi molto brevi le coordinate tridimensionali di un gran numero di punti dell'oggetto da rilevare. Tali informazioni da una parte hanno spinto i tecnici e gli enti preposti alla tutela e alla conservazione dei Beni Culturali a una rappresentazione che prevede l'utilizzo della modellazione tridimensionale che però non può prescindere a monte dai tradizionali disegni bidimensionali di piante prospetti e sezioni.

Per ottenere questi ultimi prodotti a partire da informazioni LiDAR sono però necessari lunghi tempi di elaborazione per l'estrazione dalle nuvole di punti delle linee di discontinuità che definiscono la geometria dell'oggetto rilevato. Tali processi risultano però non facilmente gestibili da utenti non esperti e inoltre i costi degli strumenti LiDAR sono ancora decisamente elevati.

Alla luce delle precedenti considerazioni, al fine di ottenere le informazioni utili per una corretta rappresentazione dell'oggetto ripreso, nel presente articolo si propone un approccio che ha come obiettivi elevata velocità di acquisizione, basso costo e generazione automatica delle principali linee di discontinuità dell'oggetto ripreso (*breaklines*).

Per ottenere tali risultati è stato previsto l'utilizzo di una camera *ToF* (*Time of Flight* o camera 3D), per l'acquisizione dei dati tridimensionali utili alla generazione di un modello approssimato di superficie (DSM) dell'oggetto ripreso, da impiegare come "superficie" di riferimento nell'approccio fotogrammetrico di *matching* multi-immagine che consente l'estrazione automatica di *breaklines*.

Come già riportato in precedenti articoli che prevedevano l'impiego di DSM generati da LiDAR (Nex, Rinaudo, 2009) i risultati del processo di *matching* consentono di ottenere un primo "brogliaccio" di restituzione utile alla definizione delle linee di discontinuità dell'oggetto ripreso.

Nei paragrafi successivi vengono riportate le fasi di acquisizione, l'elaborazione dei dati ed i primi risultati ottenuti.

## Le camere *ToF*

Le camere *ToF* anche chiamate camere 3D o *Range Camera*, da poco tempo introdotte sul mercato, rappresentano un innovativo strumento per l'acquisizione di dati tridimensionali, che permette di ottenere dati in parte comparabili con quelli degli strumenti LiDAR.

Tali camere sono in grado di fornire informazioni tridimensionali dell'oggetto ripreso con velocità di acquisizione pari a quelle delle comuni videocamere. Attualmente questi strumenti sono caratterizzati da sensori CCD/CMOS con risoluzioni di alcune decine migliaia di pixel e *range* di misura che variano dai 0.30 m fino ad un massimo di 30 m.

I principi di misura sui quali si basano le camere *ToF* sono sostanzialmente due: il primo si fonda sulla misura diretta del tempo di volo del segnale inviato dalla camera mediante l'utilizzo di un *array* di *single-photon avalanche diodes* (SPADs), rivelatori a stato solido realizzati in Silicio che, lavorando a conteggio di fotoni, permettono l'osservazione di sorgenti deboli ed altamente variabili senza introdurre alcun rumore di lettura (Rochas et al., 2003). Il secondo, sul quale si basa la maggior parte delle camere oggi in commercio, utilizza un segnale modulato in ampiezza e la distanza tra camera e oggetto viene determinata mediante il calcolo della differenza di fase tra il segnale emesso ed il segnale di riferimento (Lange, 2000).

La casa costruttrice di ogni camera 3D fornisce insieme allo strumento le caratteristiche standard di calibrazione che come riportato in (Chiabrando et al., 2009 e Kahlmann et al., 2008) a causa degli errori sistematici presenti in ogni singolo sensore devono essere riviste e ricalcolate in modo da limitare al massimo la presenza di tali sistematismi. A titolo esemplificativo in Tabella 1 si riportano le caratteristiche tecniche di alcune camere *ToF* attualmente in commercio.

Camera	Sensore [pixel x pixel]	Range di misura [m]	Accuratezza [m]	Peso [kg]
CAM CUBE 2.0	204 x 204	0.3 ÷ 7.0	± 0.01 ÷ 0.03	1.438
SR-4000	176 x 144	0.3 ÷ 10.0	± 0.015	0.470
OPTRICAM DS10K-A	120 x 90	0.3 ÷ 10.0	± 0.03	n.a.
FOTONIC B 70	160 x 120	0.1 ÷ 7.0	± 0.015	1.049

Tabella 1 – Caratteristiche tecniche di alcune camere ToF commerciali.

Nel caso studio è stata utilizzata la camera *SwissRanger* (SR)-4000 della *Mesa Imaging*, le cui caratteristiche principali sono riportate in Figura 1 ([www.mesaimaging.com](http://www.mesaimaging.com)).

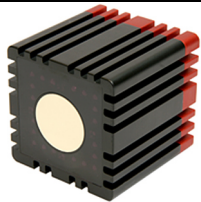
Dimensione in pixel del sensore [-]	176 (h) × 144 (v)	
Campo visivo [°]	43.6 (h) × 34.6 (v)	
Dimensione dei pixel [µm]	40	
Lunghezza d'onda del segnale con settaggi standard [nm]	850	
Range operativo di misura delle distanze con settaggi standard [m]	0.3 ÷ 5.0	
Massima velocità di acquisizione [fps]	54	
Dimensioni [mm]	65 × 65 × 68	
Peso [g]	470	

Figura 1 – Caratteristiche tecniche della camera SR-4000.

### Approccio di *matching* multi-immagine

Ormai da diversi anni la ricerca nel campo della fotogrammetria ha portato all'implementazione di efficienti algoritmi che consentono l'estrazione automatica di punti e linee da più immagini orientate (Nex e Rinaudo, 2010). In particolare, alla tradizionale stereoscopia si preferiscono approcci di tipo "multi-immagine", vale a dire approcci in cui vengono usate più di due immagini contemporaneamente. Solitamente, tali tecniche sono migliorate attraverso il vincolo epipolare (Nex e Rinaudo, 2010) che consente di ridurre l'area di ricerca dei punti omologhi su immagini adiacenti. Per ridurre ulteriormente l'area di ricerca dei punti omologhi, viene spesso utilizzata una superficie approssimata dell'oggetto: più è accurata la superficie di riferimento migliore sarà il risultato del *matching* stesso. Nel caso tipico della fotogrammetria aerea, essendo le differenze in quota relativamente piccole rispetto alla quota relativa di volo, è possibile utilizzare come DSM approssimati quelli che possono essere derivati in modo automatico grazie all'utilizzo di operatori di interesse. Questo approccio non può però essere utilizzato in campo architettonico a causa delle forti variazioni di quota (balconi, colonne, fregi, ecc.) e alle corte distanze di presa associate nella maggior parte dei casi a superfici omogenee che si riscontrano nelle facciate degli edifici storici. In questi casi, i DSM ottenuti per via interamente fotogrammetrica non sono sufficientemente accurati, con un conseguente aumento del numero di errori grossolani nella fase di *matching*. Per questo motivo è necessario ricorrere ad un DSM approssimato che sia in grado di descrivere al meglio l'oggetto ripreso: in particolare, la nuvola di punti fornita da una camera ToF si presta efficacemente a questo scopo.

### L'algoritmo utilizzato per l'estrazione delle *breaklines*

L'algoritmo proposto può essere sintetizzato in differenti fasi, riportate in Figura 1, nella quale le caselle campite in arancione indicano dove i dati derivati dalla camera ToF forniscono informazioni supplementari al processo di *matching*. Le immagini acquisite in numero sovrabbondante rispetto allo stretto necessario (di norma da 5 a 7) per poter essere utilizzate al meglio dell'algoritmo di *matching* devono essere disposte con una particolare configurazione geometrica (Figura 1 destra). Dopo l'acquisizione è necessario un pre-processamento delle immagini stesse, tale passaggio consiste in due fasi principali: correzione delle deformazioni prospettiche e filtratura con appositi algoritmi di *image-processing* per enfatizzare i bordi radiometrici. Per quanto riguarda la prima fase è stato utilizzato uno *smoothing* adattivo di tipo Gaussiano, mentre per il secondo pre-processamento è stato impiegato il filtro di Wallis (Wallis, 1976).

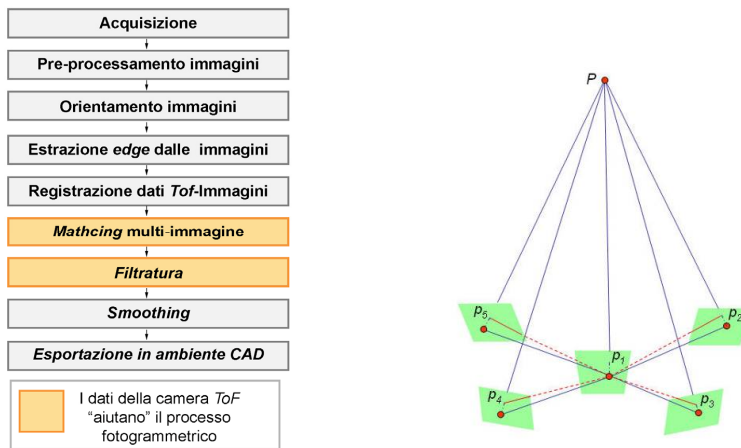


Figura 2 – Processo per l'estrazione delle *breaklines* (*sx*) e configurazione ottimale per l'acquisizione delle immagini (*dx*).

Il processo che porta all'estrazione delle *breaklines* può essere così sintetizzato: come prima operazione viene applicato l'algoritmo A<sup>2</sup>SIFT (*Auto-Adaptive Scale Invariant Feature Transform*) per l'estrazione dei punti di legame (*Tie Points*), successivamente viene utilizzato il metodo del *Least Median Square* per evitare errori nel processo di orientamento relativo ed infine viene eseguita la triangolazione aerea (*Bundle Block Adjustment*). Per l'orientamento delle immagini di norma viene stabilito il sistema tipico utilizzato in fotogrammetria terrestre (asse delle z normale al piano della facciata).

Al termine di queste prime elaborazioni viene eseguita una prima estrazione delle *breaklines*, eseguita attraverso l'operatore di Canny sull'immagine di riferimento. Successivamente, dopo aver georiferito anche i dati provenienti dalla camera *ToF*, è possibile avviare il processo di *matching*. L'algoritmo utilizza un algoritmo di *cross correlation* (Zhang, 2005) per un primo *matching* e successivamente algoritmi di *matching* relazionale e di *matching* ai minimi quadrati per incrementare la completezza e la qualità dei risultati ottenuti. Grazie a questo algoritmo i punti dominanti di ogni *breakline* sono abbinati ai loro omologhi presenti in tutte le immagini, in questo modo è possibile ricostruire l'esatta posizione tridimensionale di ogni *breakline*.

Infine, per eliminare gli errori dovuti all'eventuale non corretto funzionamento dell'algoritmo, si procede con il processo di filtratura e quindi di *smoothing* al fine di ricondurre ciascuna *breakline* ad un insieme di linee e curve regolari.

I risultati vengono infine trasformati in un comune file vettoriale (*dxf*) per poter essere visualizzati ed editati nei principali software CAD commerciali.

### Acquisizione dei dati e integrazione

La sperimentazione è stata eseguita su una finestra del Castello del Valentino (Figura 3 sinistra), sede della Facoltà di Architettura del Politecnico di Torino. Nei seguenti paragrafi sono riportate le fasi di acquisizione e di trattamento dati ed i risultati ottenuti.

#### *Acquisizione ed elaborazione delle nuvole di punti con la camera ToF*

Dopo il preriscaldamento della camera (Chiabrando et. al., 2009), grazie al software di gestione *SR\_3D\_View* sono state eseguite delle acquisizioni ad una distanza dalla finestra pari a circa 3.5 metri (Figura 3 centro). Viste le dimensioni dell'oggetto ripreso è stato necessario procedere con diverse acquisizioni al fine di acquisire tutte le informazioni necessarie.

Dopo aver opportunamente elaborato i dati (Chiabrando et al., 2009), le differenti nuvole di punti sono state registrate utilizzando l'algoritmo ICP implementato in Geomagic Studio<sup>®</sup>; in tal modo è stato possibile ottenere un unico modello della finestra. A partire da questo risultato (Figura 3 destra) è stato realizzato il DSM utilizzato nel processo di *matching*.



Figura 3 – Finestra del Castello del Valentino oggetto della sperimentazione (sx), fase di acquisizione con camera ToF (centro), modello finale al termine della registrazione delle diverse nuvole di punti, utilizzato per il processo di *matching* (dx).

#### *Acquisizione delle immagini e processo di matching*

Per l'acquisizione delle immagini è stata utilizzata la camera *Canon Eos-5D Mark II* con ottica da 24 mm. Seguendo la configurazione riportata nella Figura 2 (destra) sono state acquisite cinque immagini. Per l'estrazione delle *breaklines* è quindi stato seguito lo schema riportato in Figura 2 (sinistra), con i risultati riportati in Figura 4 (sinistra), che dimostrano la buona riuscita del processo di *matching* proposto. Grazie a tale processo è stata estratta la posizione di ben 32566 punti dominanti, dei quali solo un esiguo numero è stato eliminato durante il processo di filtratura (3 %). Dopo lo *smoothing* le *breaklines* sono state esportate in ambiente CAD (Figura 4 centro e destra).



Figura 4 – Breakline estratte sull'immagine di riferimento (sx), risultato finale del processo di *matching* (centro, dx).

## Conclusioni

I risultati ottenuti dimostrano le grandi potenzialità della metodologia di integrazione proposta tra camera *ToF* e tecnica fotogrammetrica multi-immagine e confermano ancora una volta che la strada vincente nel rilievo architettonico dei Beni Culturali (e non solo) è l'integrazione delle diverse tecniche. L'estrazione automatica delle *breaklines* è di grande aiuto alla tradizionale rappresentazione per l'architettura, anche se non garantisce ancora un prodotto "finito" per la documentazione. A titolo esemplificativo è stato realizzato un prospetto della finestra in esame (Figura 5): tale prodotto è stato ottenuto dopo un accurato editing e limitate integrazioni dei risultati del *matching*.

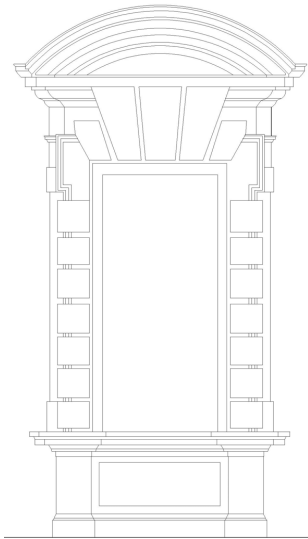


Figura 5 –  
Rappresentazione  
bidimensionale della  
finestra oggetto della  
sperimentazione.

## Bibliografia

- Chiabrando F., Chiabrando R., Piatti D., Rinaudo F. (2009), "Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera". *Sensors*, 9: 10080-10096.
- Kahlman T., Remondino F., Ingensand H. (2006), "Calibration for increased accuracy of the range imaging camera SwissRanger". *Int. Soc. Photogramm. Remote Sens.*, XXXVI: 136-141.
- Nex, F., Rinaudo, F., (2010), "Photogrammetric and LiDAR integration for the cultural heritage metric surveys". *Proceeding of ISPRS Archives*, XXXVIII: 490-495.
- Lange R. (2000), *3D Time-of-Flight distance measurement with custom solid state image sensors in CMOS/CCD-technology*. Ph.D. Thesis, University of Siegen, Siegen, Germany.
- Rochas A., et al., (2003), "First Fully Integrated 2-D Array of Single-Photon Detectors in Standard CMOS Technology". *IEEE Photonic. Technol. Lett.*, 15:963-965.
- Wallis R. (1976), "An approach to the space variant restoration and enhancement of images," *Proc. Symposium on Current Mathematical Problems in Image Science*: 329- 340.
- Zhang L. (2005), *Automatic Digital Surface Model (DSM) generation from linear array images*. Thesis Diss. ETH No. 16078, ETH Zurich IGP Mitteilung N. 90.