

Camere ToF per il rilievo metrico: test e prime applicazioni

Filiberto Chiabrandò (*), 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.chiabrandò@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
dario.piatti@polito.it, fulvio.rinaudo@polito.it.

Riassunto

Le camere basate sul tempo di volo (*Time of Flight - ToF*), recentemente introdotte sul mercato, consentono di acquisire nuvole di punti tridimensionali da un solo punto di vista e con velocità assimilabili a quelle di una tradizionale videocamera. Tali strumenti sono caratterizzati da piccole dimensioni e costi ridotti rispetto ai comuni strumenti LiDAR. Tuttavia, oltre a presentare un campo di misura circoscritto a qualche decina di metri e sensori di risoluzione limitata a circa 40000 pixel, le misure di distanza che tali camere forniscono sono in genere affette da errori sistematici che degradano la qualità dei dati acquisiti. Per un'attenta valutazione degli effettivi errori sistematici che si possono riscontrare utilizzando questa tecnologia e delle sue potenzialità per il rilievo metrico, sono stati eseguiti alcuni test sperimentali sulla camera *SwissRanger* (SR)-4000. In particolare, nel presente articolo vengono trattati due aspetti principali. Il primo riguarda la calibrazione delle distanze misurate dalla SR-4000 e più in dettaglio: stima e modellazione dell'errore sulla misura di distanza (che si attesta intorno a 1 cm) e studio dell'influenza sulla precisione delle misure di distanza della riflettività della superficie dell'oggetto ripreso. Per analizzare quest'ultimo aspetto vengono presi in considerazione alcuni materiali di comune impiego negli ambienti interni e per la realizzazione di elementi architettonici, stimando, grazie ad un opportuno sistema, l'influenza che la loro differente riflettività ha sulle misure di distanza della camera. Il secondo aspetto riguarda un primo esempio di applicazione delle camere *ToF* al rilievo metrico di elementi architettonici. In particolare, si riporta un confronto tra il dato acquisito con la camera SR-4000 e quello ottenuto dal LiDAR triangolatore Mensi S10, che fornisce nuvole di punti con precisione sub-millimetrica da utilizzare come dato di riferimento. Infine, per dare un'idea delle potenzialità delle camere a tempo di volo per applicazioni architettoniche, si riporta un esempio di modellazione tridimensionale relativo ad un particolare architettonico rilevato con la camera *ToF*.

Abstract

Time-of-Flight (ToF) cameras, recently introduced in the market, allow to acquire 3D point clouds at video frame rates and from just one point of view. These devices are smaller and cheaper than LiDAR instruments. However, besides their working range is limited to some tens of meters and their resolution reaches about 40000 pixel, the distance measurements of these devices are often affected by some systematic errors which decrease the quality of the acquired data. In order to estimate the systematic errors of a ToF camera and to investigate its potentiality for metric surveys, some tests with the SwissRanger (SR)-4000 camera have been performed. In particular, two main aspects are treated in this paper. The first one deals with the calibration of the SR-4000 distance measurements, more in detail: the distance measurement error evaluation (about 1 cm) and a study of the influence on the distance measurement precision of the reflectivity of different materials (several materials commonly employed in the architectural artifacts have been tested). The second aspect deals with a first example about architectural object survey with ToF cameras. In particular,

a comparison between SR-4000 data and Mensi S10 data (reference data with sub-millimetric accuracy) is reported. Finally, a first example of ToF data modeling of an architectural element is shown in order to give an idea of the potentiality of these devices for architectural purposes.

Introduzione

Le camere a tempo di volo (anche dette *Range camera* o *Flash LiDAR*) sono in genere caratterizzate da una risoluzione di alcune migliaia di pixel ed da una *range* di misura che varia da alcune decine di centimetri fino ad un massimo di 30 metri. In questi ultimi anni, grazie ai loro costi ridotti ed alle dimensioni contenute, si stanno diffondendo come interessante alternativa ai tradizionali metodi di rilievo tridimensionale quali LiDAR e fotogrammetria.

Tali sensori sono in grado di fornire in tempo reale per ciascun istante di misura i seguenti dati: la nuvola di punti (x,y,z); l'immagine di distanza (*range image*); l'immagine di ampiezza (*amplitude image*); l'immagine di intensità (*intensity*) e, in alcuni casi, l'immagine di "confidenza" (*confidence map*), la quale contiene per ogni pixel un'indicazione sulla qualità della misura di distanza eseguita (Chiabrando et al. 2009).

Il principio di misura sul quale si basa la quasi totalità delle camere *ToF* attualmente in commercio è quello del tempo di volo del segnale mediante il calcolo della differenza di fase. In particolare, viene utilizzato un segnale modulato in ampiezza e la distanza tra camera e oggetto è determinata mediante il calcolo della differenza di fase tra il segnale emesso ed il segnale di riferimento all'interno dello strumento (Lange, 2000).

Nonostante gli accorgimenti presi dalle case costruttrici in fase di progettazione ed assemblaggio di questi sensori, le misure acquisite dalle camere *ToF* sono in genere affette da una serie di errori sistematici che degradano la qualità metrica del dato ottenuto (Falie et al., 2007, Kahlmann et al., 2006, Lindner e Kolb, 2006). Risulta quindi necessario eseguire delle operazioni di calibrazione delle misure fornite dalla camera utilizzata per poter ottenere dei dati il più possibile depurati da tali sistematismi.

Nei paragrafi seguenti vengono riportate alcune delle sperimentazioni eseguite con la camera *ToF* SR-4000 della *Mesa Imaging*: i risultati ottenuti al termine del processo di calibrazione delle distanze, l'influenza della riflettività del materiale colpito sulle misure di distanza ed un primo esempio di rilievo metrico e conseguente modellazione tridimensionale su un fregio architettonico.

La Camera *ToF* SR-4000

Nella sperimentazione eseguita è stata utilizzata la camera SR-4000 della *Mesa Imaging*. In Figura 1 sono riportate le sue principali caratteristiche (www.mesaimaging.com).

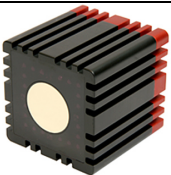
Dimensione in pixel del sensore [-]	176 (h) × 144 (v)	
Dimensione dei pixel [µm]	40	
Lunghezza d'onda del segnale con settaggi standard [nm]	850	
Range operativo di misura delle distanze con settaggi standard [m]	0.3 ÷ 5.0	
Massima velocità di acquisizione [fps]	54	
Dimensioni [mm]	65 × 65 × 68	
Peso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

Figura 1 – Caratteristiche tecniche della camera SR-4000.

Il principio di misura di tale camera è basato sul metodo a differenza di fase: essa emette un segnale modulato in ampiezza tramite alcuni LEDs (*Light Emitting Diodes*) posizionati intorno all'ottica e valuta, per ogni pixel del sensore CCD/CMOS di cui è costituita, la differenza di fase tra segnale di riferimento e segnale di ritorno dall'oggetto colpito. La misura di distanza per ogni pixel è determinata come una frazione di un ciclo completo del segnale modulato, dove la distanza corrispondente ad un ciclo completo (la cosiddetta "distanza non ambigua") è data dalla seguente espressione [1]:

$$D = \frac{c}{2f_{\text{mod}}} = \frac{\lambda}{2} \quad [1]$$

dove c è la velocità della luce, f_{mod} è la frequenza dell'onda modulata emessa e λ è la sua lunghezza d'onda.

Tutti i test e le sperimentazioni eseguite nel presente lavoro si riferiscono alla configurazione standard della camera, caratterizzata da una frequenza pari a 30 MHz, a cui corrisponde una distanza non ambigua massima pari a 5.00 m dall'oggetto acquisito. Altre versioni della SR-4000 utilizzano una frequenza del segnale pari a 15 MHz, che risulta in una distanza non ambigua di misura pari a 10 m con conseguente degrado della precisione di misura (Büttgen et al., 2005).

Calibrazione delle misure di distanza

Differenti test sono stati eseguiti per valutare le potenzialità metriche della SR-4000: valutazione del tempo di riscaldamento della camera (*warm-up*), stima della precisione delle misure di distanza in funzione dell'angolo di incidenza tra segnale emesso ed oggetto colpito, calibrazione fotogrammetrica, analisi del fenomeno di “*scattering*”, per i quali rimandiamo a Chiabrando et al., 2009 e Chiabrando et al., 2010.

Nel presente articolo ci soffermeremo su due aspetti principali: la valutazione degli errori sistematici di misura e un'analisi sistematica dell'influenza della riflettività dell'oggetto rilevato sulle misure di distanza della camera.

Tutti i dati sono stati acquisiti con il software SR_3D_View acquistato insieme allo strumento; tale programma permette di impostare il tempo di integrazione delle misure e fornisce per ciascun *frame* le coordinate (X,Y,Z) dei punti acquisiti, l'immagine di ampiezza e quella di “confidenza” dell'oggetto ripreso. Inoltre, esso permette di stimare automaticamente il tempo di integrazione ottimale (“*auto integration time*”) della scena osservata in base al massimo valore di ampiezza presente nell'immagine. In tal modo si riduce la possibilità di avere pixel saturi e si ottiene un buon compromesso tra “rumore” di misura ed elevata velocità di acquisizione.

Valutazione degli errori sistematici

Il sistema scelto per la valutazione dei sistematismi delle distanze misurate dalla SR-4000 è stato appositamente progettato e realizzato presso il Laboratorio di Topografia del Politecnico di Torino. Tale sistema è costituito da un pannello in legno dello spessore di 20 mm e dimensioni pari a 1.85 m x 2.52 m, irrigidito da un'intelaiatura in alluminio e sostenuto ai lati tramite due tripodi regolabili in altezza e dotati di opportune ruote (Figura 2). Per l'esecuzione del test la camera è stata posizionata su treppiede fotografico dotato di livelle toriche per l'orizzontamento della stessa. Il pannello è stato reso verticale grazie a due fili a piombo posti ai suoi estremi. Le distanze tra camera e pannello

sono state accuratamente misurate utilizzando due metri metallici posizionati a terra. La configurazione con la quale sono state eseguite le misure è ben visibile in Figura 2 sinistra.

Prima del test è stato riscontrato che il pannello risultava non essere perfettamente piano; per tenere conto della sua reale geometria, è stato quindi realizzato un accurato modello tridimensionale del pannello utilizzando il laser scanner triangolatore S10 della Mensi (Figura 2 destra): sono stati acquisiti circa 780.000 punti con precisione sub-millimetrica, i quali sono poi stati utilizzati per stimare di volta in volta la distanza effettivamente esistente tra camera e porzione del pannello inquadrata. L'elaborazione dei dati è stata eseguita mediante un apposito algoritmo implementato in Matlab[®], grazie al quale è stato possibile valutare per ogni pixel l'errore nella misura di distanza tenendo conto della reale geometria del pannello e di realizzare un primo tentativo di modellazione degli errori stimati.

Dall'analisi dei risultati (Chiabrando et al., 2009) le discrepanze tra distanza reale e distanza misurata dalla camera presentano un massimo di 11 mm e un minimo di -8 mm.

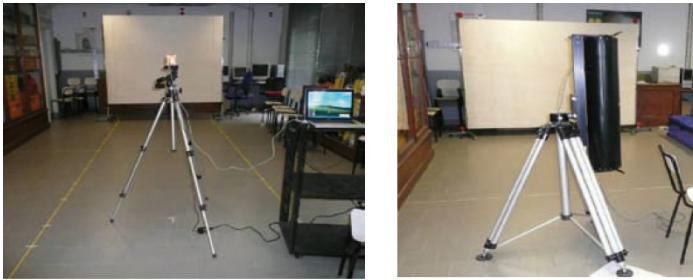


Figura 2 –
Acquisizione dei
dati con la camera
SR-4000 (sinistra) e
acquisizione LiDAR
del pannello con
Mensi S10 (destra).

Gli errori stimati sono stati modellati per aumentare l'accuratezza delle misure eseguite dalla camera; di seguito si riporta il modello proposto [2]:

$$e = \lambda_0 + \lambda_1 \cdot m \cdot \sin(\lambda_2 \cdot m + \lambda_3) \quad [2]$$

dove m è la distanza misurata dal singolo pixel; λ_0 è una costante; λ_1 rappresenta un fattore di scala che moltiplica il cosiddetto *wiggling-error*, modellato con una funzione sinusoidale (λ_2 rappresenta la frequenza angolare, λ_3 lo sfasamento). Il modello è stato quindi testato con procedura analoga a quella precedentemente descritta: grazie all'applicazione del modello distanziometrico per ogni singolo pixel, i valori assoluti delle variazioni tra distanza reale e distanza misurata dalla camera sono risultati inferiori rispetto a quelli che si ottengono senza l'applicazione dello stesso nell'intervallo di misura compreso tra 1.5 m e 4.0 m. Al momento (è in fase di studio un differente modello) per distanze tra 0.8 m e 1.5 m e maggiori di 4.0 m, si ottengono tuttavia delle discrepanze tra distanza reale e quella misurata dalla camera dopo l'applicazione del modello maggiori rispetto alle variazioni che si ottengono senza correzione (Figura 3).

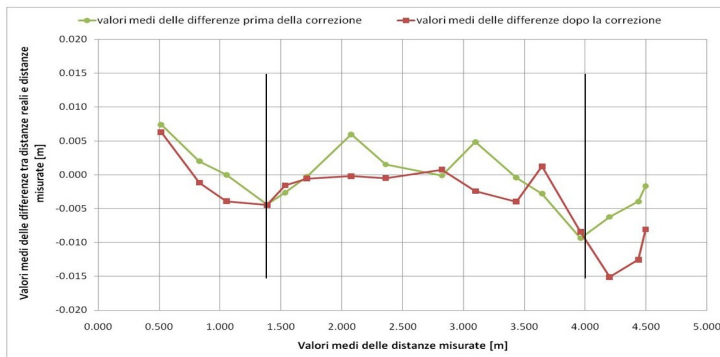


Figura 3 – Valore medio delle differenze di tutti i pixel considerati (7921) prima e dopo l'applicazione del modello distanziometrico.

Alla luce dei risultati ottenuti e dato che l'intervallo di misura 1.5÷4.0 m è quello di maggiore interesse per le applicazioni che intendiamo sperimentare con la camera 3D (rilievo archeologico ed architettonico, modellazione di piccoli oggetti,...), si può affermare che il modello proposto consente di ottenere risultati più che soddisfacenti.

Influenza della riflettività dell'oggetto rilevato sulle misure di distanza

La precisione della misura di distanza nelle camere *ToF* è inversamente proporzionale all'ampiezza del segnale riflesso (Büttgen et al., 2005), che dipende a sua volta dalla riflettività dell'oggetto colpito, oltre che da fattori quali tempo di integrazione delle misure, distanza camera-oggetto e illuminazione dell'ambiente circostante. Per meglio analizzare le potenzialità della camera per il rilievo metrico è stato eseguito un test sull'influenza della riflettività del materiale rilevato sulle

misure di distanza ottenute dalla SR-4000. A tal fine è stato costruito un sistema che permette di posizionare oggetti piani di differenti dimensioni di fronte alla camera (Figura 4).



Kodak R27 scuro	
Kodak R27 chiaro	
Faesite	
Legno laminato	
Cortongesso intonacato	
Metallo laccato	
Marmo pietra Etrusca	
Granito Rosso Balmoral	
Pietra	
Granito	
Marmo pietra Orsera	

Figura 4 – Sistema utilizzato per l'alloggiamento dei materiali rilevati ed elenco di alcuni dei materiali analizzati.

La camera è stata posizionata ad una distanza pari a circa 1.80 m dal sistema utilizzato per l'alloggiamento dei materiali e grazie al software SR_3D_View sono stati acquisiti con tempo di integrazione automatico 50 *frame* per ogni singolo materiale analizzato. I campioni utilizzati sono stati scelti tra i comuni materiali impiegati per le costruzioni architettoniche antiche e recenti (Figura 4).

È stato eseguito un confronto tra il piano stimato grazie all'utilizzo delle coordinate di 5 punti rilevati con il metodo dell'intersezione in avanti sul materiale di volta in volta posizionato nell'alloggiamento e il piano risultante dal rilievo con la camera *ToF*.

Dall'analisi dei risultati ottenuti (Chiabrando et al., 2010) si evince che le differenze tra il piano stimato dal rilievo topografico e quello ottenuto dal rilievo con camera *ToF* si attestano sull'ordine dei 3 mm alla distanza considerata, valore più che accettabile per le nostre applicazioni e in accordo con la stima di accuratezza di misura (Figura 3).

I risultati sono quindi incoraggianti per quanto riguarda l'applicazione su oggetti reali, fatta eccezione per alcuni materiali (Marmo Pietra Orsera e Granito rosso Balmoral) per i quali, a causa dell'elevata riflessione nei confronti del segnale della camera, si è verificato un numero elevato di pixel saturi e, conseguentemente, di misure nulle o errate.

Prime applicazioni di rilievo metrico e modellazione 3D

Per analizzare le effettive potenzialità della camera utilizzata è stato eseguito un test di acquisizione su un oggetto architettonico (Figura 5). Per valutare l'accuratezza della nuvola di punti acquisita dalla SR-4000, è stato anche eseguito un rilievo con il LiDAR triangolatore Mensi S10. Oltre al fregio, per consentire una corretta georeferenziazione delle due nuvole di punti, sono stati posizionati attorno all'oggetto sette *target* di forma cubica (Figura 5). Sono quindi stati acquisiti, ad una distanza di circa 2.0 m, 50 *frame* con la camera *ToF* mentre con il Mensi S10 è stato realizzato un rilievo del fregio con passo pari a 2 mm e precisione sub-millimetrica.

Dopo aver "corretto" le misure di distanza della SR-4000 in corrispondenza dei *target* con il modello distanziometrico proposto ed aver adottato un unico sistema di coordinate per entrambe le nuvole di punti mediante una rototraslazione spaziale, sono state calcolate le differenze in direzione ortogonale al fregio tra i punti rilevati con il LiDAR (utilizzato come riferimento in quanto di un ordine di grandezza più accurato) e quelli rilevati con la camera *ToF*. Alla distanza di misura considerata, in corrispondenza del fregio si ha un valor medio delle differenze pari a 0.006 m, che si riduce a 0.001 m applicando il modello distanziometrico proposto. Tale risultato conferma sia l'efficacia del modello proposto sia le grandi potenzialità delle camere 3D per il rilievo metrico. Infine, è stato eseguito un primo test di modellazione tridimensionale sui dati acquisiti.



Figura 5 – Acquisizione con camera ToF (sinistra) e con LiDAR triangolatore Mensi S10 (destra).

A partire dalla nuvola di punti della SR-4000 (Figura 6 sinistra) corretta con il modello distanziometrico, sono stati dapprima eliminati gli *outlier*, successivamente si è proceduto alla realizzazione della *mesh* (Figura 6 centro) ed al relativo *editing*; infine è stato prodotto un *rendering* fotorealistico (Figura 6 dx) del modello texturizzato.



Figura 6 – Nuvola di punti derivata dalla camera ToF (sx), mesh (centro) e modello finale texturizzato (dx).

Conclusioni

Dalle esperienze eseguite si evince che le camere *ToF* possono essere considerati validi ed efficaci strumenti utili al rilievo metrico di manufatti architettonici.

Si è dimostrato che con un opportuna procedura di calibrazione è possibile ridurre l'influenza degli errori sistematici di misura e che, fatta eccezione per il rilievo di materiali eccessivamente riflettenti, tale strumento è in grado di fornire dati comparabili a quelli ottenibili da strumentazione LiDAR e da tecniche fotogrammetriche, con grandi vantaggi in termini di costi e velocità di acquisizione. Le sperimentazioni stanno proseguendo sia per migliorare il modello di correzione delle distanze sia riguardo al rilievo metrico di oggetti di dimensioni maggiori, per i quali è necessario elaborare opportuni algoritmi di registrazione di nuvole di punti acquisite con camere *ToF*.

Bibliografia

- Büttgen B., Ogier T., Lehman M. (2005), "CCD/CMOS Lock-in pixel for range imaging: challenges, limitations and state-of-the-art". *Proceedings of 1st Range Imaging Research Day*, Zurich, Switzerland: 21-32.
- Chiabrando F., Nex F., Piatti D., Rinaudo F. (2010), "Integration of TOF camera and multi-image matching approach for Cultural Heritage survey". *Proceeding of ISPRS Archives*, Vol. XXXVIII/5: 143-148.
- 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.
- Falje D., Buzuloiu V. (2007), "Noise characteristics of 3D Time-of-Flight cameras". *Proceedings of IEEE Symposium on Signals Circuits & Systems (ISSCS)*, Iasi, Romania: 229-232.
- 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.
- 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.
- Lindner M., Kolb A. (2006), "Lateral and depth calibration of PMD-distance sensors". *Proceedings of ISVC*, Lake Tahoe, NV, USA: 524-533.