

IMMAGINI SFERICHE PER IL RILIEVO DI AMBIENTI INDOOR

SPHERICAL IMAGES FOR THE SURVEY OF INDOOR ENVIRONMENTS

N. Grasso

Politecnico di Torino, DIATI, Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, nives.grasso@polito.it

PAROLE CHIAVE: Camera panoramica, immagini sferiche, lenti fish-eye, SfM, parametri di calibrazione, ricostruzione 3D

KEY WORDS: Panoramic camera, spherical images, fish-eye lenses, SfM, calibration parameters, 3D reconstruction

RIASSUNTO

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole incremento nell'uso di immagini sferiche per la generazione di modelli tridimensionali. Oggigiorno esistono tantissimi software (commerciali o open source) dedicati al trattamento delle immagini, ma, solo alcuni software consentono l'elaborazione di questi dati; in particolare, i comuni software basati su algoritmi di computer vision non sono in grado di calcolare i parametri di orientamento interno (distanza focale, punto principale e distorsioni) di questi sistemi. Questo contributo si propone di analizzare le potenzialità dell'elaborazione di immagini sferiche per la ricostruzione di oggetti tridimensionali attraverso algoritmi di Structure from Motion (SfM), confrontando i risultati con quelli ottenuti dall'utilizzo delle singole immagini, e di valutare la possibilità di calcolare con gli stessi software i parametri di calibrazione delle singole camere. A tal fine, sono stati condotti alcuni test in ambiente indoor per mezzo della camera panoramica NCTech iSTAR Fusion. Il modello di riferimento per le analisi sull'accuratezza raggiunta è una nuvola di punti LiDAR, con la quale verranno confrontati i prodotti tridimensionali. Inoltre, verrà fatta una valutazione sui parametri di orientamento interno calcolati da differenti software.

ABSTRACT

In recent years there has been a considerable increase in the use of spherical images for the generation of three-dimensional models. Nowadays there are many software (commercial or open source) dedicated to the processing of images, but only some of them could process this data; in particular, the common software based on computer vision algorithms are not able to calculate the interior orientation parameters of these systems. This article attempts to analyze the potential of spherical images processing for the reconstruction of three-dimensional objects through Structure from Motion (SfM) algorithms, comparing the results with those obtained from the use of the individual plane images, and to evaluate the possibility to calculate with the same software the calibration parameters of the single cameras. Some tests were conducted in indoor environment through the use of the NCTech iSTAR Fusion panoramic camera. The reference model for the analysis on the achieved accuracy is a LiDAR point cloud, with which the three-dimensional products will be compared. In addition, an evaluation on the interior orientation parameters calculated from different software will be made.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole incremento nell'uso di immagini panoramiche per la rappresentazione del territorio a scopi turistici (Zara, 2004), per la documentazione metrica tridimensionale di ambienti urbani, beni archeologici (d'Annibale, 2011) e di ambienti indoor (Kwiatk et al., 2014), per l'automazione della navigazione di robot (Briggs et al., 2006) e per applicazioni combinate all'uso di laser scanner (Kang et al., 2009). Esistono molteplici metodi per la creazione di immagini panoramiche, come l'utilizzo di sistemi ottici fish-eye singoli o combinati (Figura 1a) o lenti con un ampio FoV (Field of View), l'unione di immagini per mezzo algoritmi di stitching raccolte attraverso la rotazione di una singola camera (Figura 1b) o sistemi composti da una lente e uno specchio con diverse curvature (sferico, conico, iperbolico o parabolico) (camere catadiottriche) su cui si riflette la scena (Figura 1c) (Kauhanen et al., 2012). In questo articolo, tuttavia, verranno analizzate immagini sferiche generate dallo *stitching* di quattro immagini acquisite simultaneamente con lenti fish-eye. In ambito fotogrammetrico, parlando di immagini sferiche ci si riferisce al panorama equirettangolare; per ogni punto di

stazione vengono acquisiti una serie di fotogrammi parzialmente sovrapposti, in modo tale da ricoprire l'intero orizzonte. Le immagini vengono poi riproiettate su una sfera virtuale che a sua volta è mappata su un piano, secondo la cosiddetta proiezione azimut-zenit o equirettangolare, ovvero latitudine-longitudine, chiamato anche panorama sferico (Fangi, 2012).

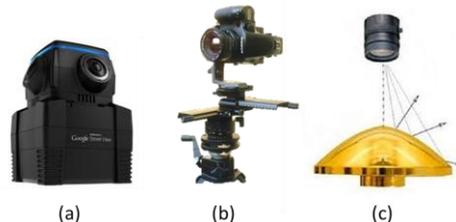


Figura 1. Sistemi ottici per l'acquisizione di immagini panoramiche: (a) sistema composto da quattro lenti fish-eye che acquisiscono le immagini simultaneamente; (b) camera che acquisisce immagini attraverso la rotazione sul punto di stazione; (c) camera catadiottrica composta da sistema ottico e specchio su cui si riflette la scena.

In questo modo i poli della sfera saranno rappresentati da due linee rette e parallele (Canella, 2013). Analogamente alla fotogrammetria piana, è possibile estrarre delle informazioni metriche da più fotogrammi equirettangolari in seguito ad accurate operazioni di orientamento e all'uso di specifiche equazioni di collinearità (Barazzetti et. al., 2010). L'utilizzo di questi dati, infatti, richiede una definizione precisa del centro di proiezione; tale configurazione del sistema concentrico assicura che tutte le prospettive delle singole immagini (piane) siano identiche e consente di costruire un'immagine panoramica (Pontinen, 2004). Tuttavia, risulta alquanto difficile creare un sistema tale che soddisfi i requisiti dell'acquisizione concentrica. Se le distorsioni geometriche delle singole camere possono essere calibrate e corrette, al contrario, nulla si può fare se le immagini non sono state acquisite concentricamente, in quanto le differenze di prospettiva non vengono eliminate. Tali errori non possono essere corretti senza la ricostruzione di un modello 3D della scena. In alcuni casi, tuttavia, anche se le differenze prospettiche delle immagini sono accentuate, i più recenti software consentono di unirle con precisione sufficiente (Kauhanen et al., 2012).

Ad oggi sono molteplici i software commerciali che consentono la generazione di immagini sferiche a seguito dell'unione dei singoli fotogrammi (anche con parametri di calibrazione sconosciuti) per mezzo di algoritmi matematici di stitching. Tuttavia, un'analisi accurata dei risultati mostra come questi fotogrammi possano presentare notevoli deformazioni qualora non vengano considerate correttamente le varie distorsioni delle lenti.

L'introduzione di questo tipo di tecnologia, visti gli innumerevoli campi di applicazione, ha spinto la Computer Vision (CV) ad incentrare le ricerche sullo sviluppo di processi automatici di riconoscimento di punti omologhi e matching per la generazione di nuvole di punti sfruttando e modificando opportunamente procedure e algoritmi già consolidati in fotogrammetria piana.

Questo contributo si propone di analizzare le potenzialità dell'elaborazione di immagini panoramiche, acquisite con il sistema NCTech iSTAR Fusion, composto da quattro camere fish-eye, per la ricostruzione di oggetti tridimensionali attraverso algoritmi di Structure from Motion (SfM).

Il principale obiettivo è quello di valutare le accuratezze dei prodotti ottenuti utilizzando sia le immagini panoramiche che le singole immagini piane, e di calcolare tramite procedure di autocalibrazione i parametri di orientamento interno e le distorsioni delle quattro camere, confrontando i risultati con quelli ottenuti dall'utilizzo di diversi software. Di seguito, verranno quindi descritti lo strumento utilizzato e la metodologia di elaborazione dei dati. Successivamente i dati metrici ottenuti verranno confrontati con un modello di riferimento ottenuto da acquisizioni laser scanner. I parametri di calibrazione interna calcolati dai diversi programmi di SfM saranno infine comparati tra loro.

2. ANALISI DI DATI METRICI OTTENUTI DA IMMAGINI SFERICHE

2.1 Strumenti e caso studio

Al fine di comparare modelli generati da immagini sferiche, sono state eseguite anche delle acquisizioni LiDAR. Nel caso specifico le procedure descritte hanno interessato la costruzione 3D del laboratorio di fotogrammetria del Politecnico di Torino - DIATI.

All'interno dell'ambiente sono stati disposti 24 markers (Figura 2), che sono stati rilevati con stazione totale. Tali markers sono

stati impiegati per l'orientamento delle scansioni e dei panorami sferici, nonché come punti di riferimento per la verifica delle accuratezze delle nuvole di punti.

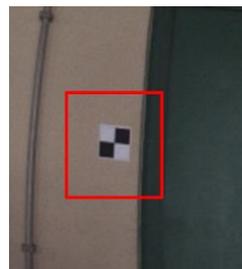


Figura 2. Esempio di marker, 10x10 cm, utilizzato per l'orientamento delle nuvole di punti.

Le immagini sono state acquisite con la camera NCTech iSTAR Fusion dotata di quattro sensori *circular fish-eye* e un sensore CMOS a pieno formato da 10 megapixel. Il software proprietario Immersive Studio, consente l'elaborazione dei dati per la generazione delle immagini panoramiche da 16 megapixel, con un FoV di 360° X 275°. La camera è stata installata su un treppiede ma sono state eseguite prese fotografiche a differenti altezze, poichè, in caso contrario, acquisendo le immagini dalla stessa quota, i relativi parametri di orientamento esterno presenterebbero la stessa Z_0 , pertanto agli oggetti ad un'altezza $Z=Z_0$ corrisponderebbe una linea epipolare orizzontale, che non potrebbe essere utilizzata per le misure di oggetti sull'orizzontale (Luhmann et. al, 2004).

Grazie all'utilizzo di un'ottica fish-eye, gli intervalli di acquisizione delle immagini, consentono di avere tra uno scatto e l'altro una buona zona di sovrapposizione, necessaria per le operazioni di stitching. Da ogni acquisizione si ricavano quattro foto con risoluzione 687 x 916 pixel (Figura 3) e un panorama equirettangolare da 16 megapixel (5656 x 2828 pixel) (Figura 4).

All'interno della camera è inserito il certificato di calibrazione relativo ai quattro sensori, di cui si conosce soltanto la lunghezza focale di 2,67 mm, ma non gli altri parametri. A tal proposito, come verrà descritto successivamente, si sono volute elaborare le singole immagini, oltre a quelle sferiche, al fine di stimare l'insieme dei parametri relativi a ciascuna camera.



Figura 3. Esempio di quattro immagini acquisite simultaneamente da una acquisizione fotografica con la camera NCTech iSTAR.

La nuvola di riferimento è stata acquisita con il laser a modulazione di fase FARO Focus 3D, che raggiunge l'accuratezza di +/- 0.002 m ed un'ampiezza di acquisizione tra 0.6m fino a 130m. Le scansioni sono state eseguite da sei punti di stazione (Figura 5) ottenendo un modello finale formato da circa 65 milioni di punti.

Le scansioni sono state processate per mezzo del software proprietario FARO Scene e sono state orientate rispetto ad un sistema locale utilizzando i markers misurati. L'errore di registrazione delle scansioni è minore di 0.010 m ed è compatibile con le accuratezze della rete topografica e dello

strumento stesso. La nuvola di riferimento così ottenuta è stata comparata successivamente con le altre ottenute dalle acquisizioni fotografiche con il software open source CloudCompare. (<http://www.danielgm.net/cc/>).



Figura 4. Immagine panoramica generata dalle elaborazioni di quattro immagini piane, per mezzo di algoritmi di stitching, con il software Immersive Studio.

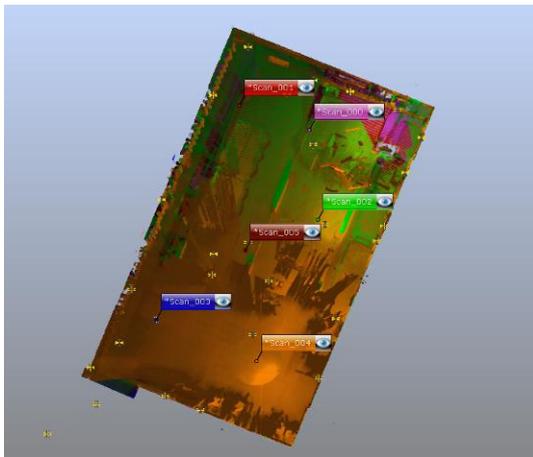


Figura 5. Nuvola LiDAR ottenuta dalla registrazione di sei scansioni all'interno dell'ambiente oggetto di studio

2.2 Elaborazione dei dati

In questo lavoro vengono presentati alcuni test eseguiti con l'obiettivo di valutare la possibilità di acquisire e utilizzare immagini sferiche per la modellazione tridimensionale e di comparare questi prodotti con quelli ottenuti da differenti software utilizzando quattro immagini piane acquisite simultaneamente, al fine di determinarne l'efficacia e le debolezze. L'idea portante è quella di elaborare i dati acquisiti utilizzando l'approccio della SfM implementato in differenti software.

Come detto in precedenza, i test sono stati condotti utilizzando alcuni dei software commerciali più popolari: Agisoft Photoscan Professional (APP), che è una soluzione avanzata di analisi delle immagini, prodotto dalla compagnia russa Agisoft LLC, 3DF Zephyr (3Df), prodotto dalla compagnia italiana 3Dflow (www.3dflow.net), l'ultimo programma rilasciato dalla compagnia Bentley, ContextCapture (CC) (www.acute3d.com/contextcapture/), che è l'evoluzione del programma Aute3D, ad oggi acquistato dalla Bentley, ed infine, l'open source VisualSFM (VS).

Il processo di estrazione di informazioni metriche è condotto da questi software in maniera quasi automatica ed è basato su algoritmi della fotogrammetria e della computer vision, che permettono di processare facilmente e velocemente un gran numero di immagini, con un limitato intervento dell'operatore e una limitata influenza sulla nuvola di punti finale. I software

analizzati sono soluzioni commerciali e proprietarie, pertanto non è possibile conoscere la vera natura degli algoritmi che utilizzano; al contrario, VS (Wu, 2011), che integra l'algoritmo CMVS/PMVS (Furukawa, 2010), è un applicativo open source, in cui tutte le fasi del procedimento sono note grazie alle informazioni divulgate dagli sviluppatori stessi e dalla comunità scientifica che ne fa uso. Questi software differiscono tra loro negli algoritmi utilizzati per le elaborazioni delle immagini, per la fase di matching e nel settaggio dei parametri di elaborazione. Tuttavia, tutti questi software conducono all'allineamento delle immagini, alla generazione della nuvola densa e, successivamente, alla produzione di una mesh e all'estrazione di modelli digitali di elevazione e ortofoto. Generalmente, il dato di input richiesto da questi applicativi per la ricostruzione del modello tridimensionale sono le sole immagini acquisite e alcuni punti di controllo, dal momento che non è necessario impostare in precedenza i parametri di orientamento interno ed esterno delle camere.

La prima fase di elaborazione dei dati è spesso compiuta tramite l'uso dell'algoritmo SIFT (Scale Invariant Feature Transform) (Lowe, 2004). Successivamente, utilizzando i punti di controllo, viene eseguito un orientamento (Chiabrando et al., 2015). La nuvola di punti densa 3D è solitamente prodotta utilizzando l'algoritmo multi-view stereo, che permette di estrarre nuvole di punti tridimensionali dettagliate e di trasformarle in una mesh.

2.2.1 Generazione delle nuvole dense di punti 3D

Tra i software a disposizione, l'unico a predisporre di un modulo dedicato per elaborare immagini sferiche è APP. Il processo di elaborazione del dato per la generazione delle nuvole di punti 3D è analogo a quello relativo all'utilizzo di immagini piane; la sostanziale differenza risiede nell'impossibilità di definire i parametri di calibrazione della camera. Infatti, l'informazione riguardante la caratteristica di ciascuna camera è già stata applicata durante il processo di stitching eseguito dal software Immersive Studio, pertanto non sono necessarie ulteriori informazioni riguardanti i parametri di orientamento interno. Come avviene negli altri casi, Agisoft Photoscan ricerca i punti comuni nelle immagini di input e li combina automaticamente tra loro. A questo punto, il software calcola la posizione del punto di stazione di ogni fotogramma e il suo orientamento esterno da cui si ottengono una nuvola di punti sparsi e le posizioni delle camere. Successivamente il procedimento non differisce da quello classico e, in seguito all'allineamento delle immagini, viene generata una nuvola di punti densa a partire dalle posizioni stimate della camera e dalle immagini.

In questo caso specifico sono state acquisite immagini da 28 stazioni all'interno dell'ambiente, ottenendo pertanto 28 immagini sferiche e le relative 112 immagini piane.

A seguito dell'elaborazione delle immagini sferiche (Figura 6), il prodotto presenta un'accuratezza sui Check Points inferiore ai 2 cm. Tuttavia, la nuvola densa ottenuta risulta alquanto rumorosa ed è stato necessario provvedere ad un'accurata operazione di filtraggio manuale (Figura 7).

Per quanto riguarda l'elaborazione delle immagini sferiche con gli altri software, questi le analizzano come se fossero comuni immagini piane, non riuscendo quindi a ricostruirne la geometria di presa.

Analogamente, anche i fotogrammi piani sono stati elaborati, al fine di ricavare i parametri di calibrazione di ciascuna camera ed ottenere contemporaneamente un modello di paragone a quello precedentemente creato. A tal fine è stato possibile estrarre queste informazioni da un numero maggiore di

software; tuttavia, a causa della bassa risoluzione delle immagini e della geometria delle lenti fish-eye, che non tutti i software riconoscono, si è giunti ad un risultato accettabile solo elaborando i dati con APP e CC. Al contrario, 3Df non è stato in grado di allineare le immagini se non 33 di esse, ma in maniera visibilmente errata, mentre VS scartava le immagini relative a quattro delle sei pareti della stanza, generando una nuvola scarsamente densa solo di due di esse.

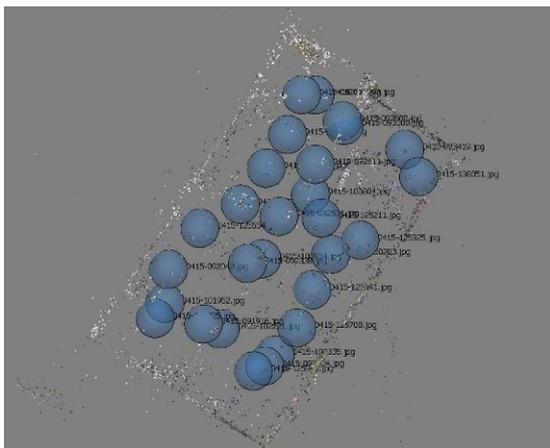


Figura 6. Allineamento delle immagini sferiche

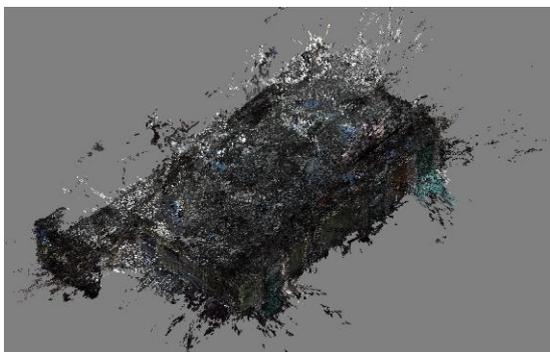


Figura 7. Nuvola di punti densa 3D generata dall'elaborazione di immagini sferiche dell'ambiente indoor

La ragione di tali problemi può essere ricercata, oltre che nella particolarità delle lenti, nella presenza di una parete in parte finestrata, che ha influito pesantemente sulla generazione del risultato finale, e potrebbe essere facilmente risolta dall'oscuramento delle fonti di luce. Infatti, in presenza di fonti luminose, anche lievi, le immagini risultano sovraesposte, indipendentemente dall'impostazione del valore di esposizione della camera in fase di acquisizione.

Risultati migliori sono stati ottenuti con APP e CC; tuttavia, non è stato possibile allineare tutte le 112 immagini, bensì nel primo caso ne sono state utilizzate 101, nel secondo solamente 67. Anche in quest'ultimo caso si è riscontrata la difficoltà di gestire le immagini della parete in parte finestrata. A tal proposito, le comparazioni avverranno solo in riferimento alle altre cinque pareti e i modelli verranno depurati da quella finestrata.

La densità delle nuvole generate è ovviamente funzione di ciascun software, ma in tutti i casi risulta sufficiente per descrivere la geometria e i dettagli dell'ambiente rilevato. Nella seguente Tabella 1 è riportato un prospetto (in termini di milioni di punti) delle nuvole generate; i valori sono relativi alle nuvole filtrate manualmente dal rumore.

	Photoscan pano	Photoscan plane	ContextCapture plane
Punti	< 2,7	<1,2	< 0,3

Tabella 1. Numero di punti delle singole nuvole (espresso in Milioni).

Come si può osservare dalla tabella, la nuvola più densa è stata ottenuta da APP ed è quella generata a partire dalle immagini sferiche con più di 2,7 milioni di punti. Utilizzando le immagini piane, al contrario, le nuvole generate sono molto meno dense, in particolare quella di CC (Figura 8(a)) è formata da un terzo dei punti rispetto a quella di Photoscan. Inoltre anche l'accuratezza sui punti diminuisce: dalle elaborazioni su CC risulta un'accuratezza media sui Check Point di circa 8 cm, mentre in APP resta inferiore ai 2 cm.

Risulta quindi necessaria una più profonda analisi dei parametri di configurazione del software, che potrebbero aver influenzato negativamente il risultato. La nuvola densa ottenuta dall'elaborazione delle immagini piane con APP, risulta anch'essa piuttosto rumorosa e, come per l'altro prodotto dello stesso software, è stato necessario sottoporla ad una procedura manuale di eliminazione degli outliers, (Figura 8(b)).

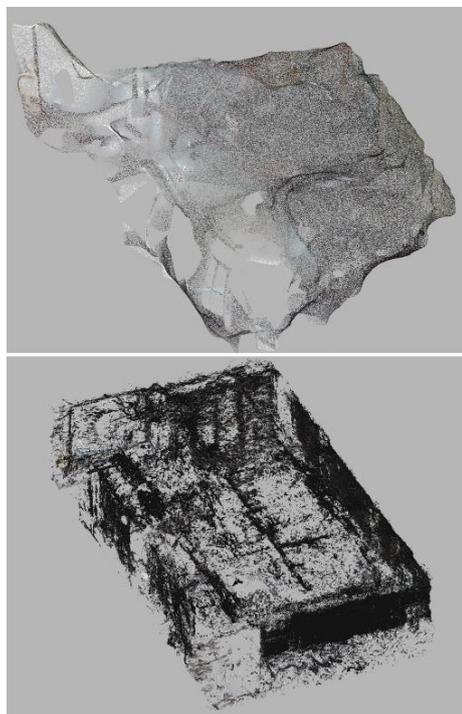


Figura 8. Nuvole dense di punti generate a partire dalle immagini piane con i software ContextCapture (a) e Photoscan (b).

3. ANALISI DEI RISULTATI

3.1 Parametri di orientamento interno e distorsioni

Uno degli obiettivi di questo contributo è quello di stimare i parametri di orientamento interno delle singole camere e le differenti distorsioni, vista inoltre la particolare geometria delle lenti fish-eye.

Un primo tentativo di calcolo dei parametri di calibrazione delle quattro camere è stato condotto utilizzando lo strumento specifico "Camera Calibrator" implementato nel software Matlab e un pannello a scacchiera (Aicardi et al., 2014). Questo tool è in grado di estrarre questi parametri e le distorsioni delle

ottiche a partire da un minimo di 10 fotografie di un pannello a scacchiera di dimensioni note. Il procedimento è del tutto automatico ed è stato ripetuto per ciascuna camera. I valori così ottenuti sono stati inizialmente inseriti come dato di input nel processo di elaborazione delle immagini piane per la generazione delle nuvole di punti. Tuttavia, la soluzione di ciascuno dei software utilizzati (APP, CC e 3Df) non convergeva verso un risultato accettabile. Si è quindi scelto di non impiegare questi parametri se non come termine di paragone con quelli stimati dai software di ricostruzione 3D. Gli strumenti basati su algoritmi di SfM consentono, infatti, di ricavare in maniera automatica, oltre alla geometria di presa delle immagini, anche i parametri di calibrazione interna delle camere.

3.2 Comparazione delle nuvole di punti

Ulteriori analisi sono state eseguite utilizzando il software CloudCompare su una parte delle nuvole di punti utilizzando come dato di riferimento quello ottenuto dal rilievo laser scanner. Come precedentemente anticipato, le comparazioni tra i vari prodotti hanno interessato solo alcune facciate pareti dello spazio indoor, escludendo la facciata finestrata. Ciò garantisce che il risultato statistico della comparazione sia veritiero rispetto all'affidabilità della geometria generata a partire dalle immagini.

Un risultato quantitativo è dato dal calcolo della distanza minima tra ogni punto del modello utilizzando l'algoritmo Nearest Neighbour. Il software consente inoltre di calcolare valori statistici, quali la distanza minima, massima, media e la deviazione standard.

Questi valori sono riportati in Tabella 2. La Figura 9 rappresentano la mappa delle differenze sulle facciate.

Test	APP (imm. Panoramica)	APP (imm. Piane)	CC (imm. Piane)
Distanza massima	1.086 m	1.132 m	1.327 m
Distanza minima	0 m	0 m	0 m
Distanza media	0.025 m	0.018 m	0.224 m
Dev. Standard	0.058	0.059	0.229

Tabella 2. Valori statistici derivati dalla comparazione tra i dati laser scanner e le nuvole di punti generate a partire dalle immagini.

3.3 Discussione

Il processo di ricostruzione del modello tridimensionale a partire dalle immagini sferiche rispetta lo stesso procedimento seguito per le immagini piane; tuttavia, una prima importante considerazione da fare in fase di elaborazione dei dati, riguarda la rapidità con cui APP è in grado, nella fase iniziale, di allineare le immagini e, successivamente, di generare la nuvola di punti densa.

Da una prima analisi delle nuvole, si osserva come, nel caso di APP, vi siano aree a bassa densità di informazione, in particolare in corrispondenza del soffitto e del pavimento. Un'ulteriore criticità, risiede nella presenza di un alto numero di outliers, potrebbero, quindi, essere condotti alcuni test riguardo ad algoritmi di filtraggio che automatizzino la procedura.

La nuvola generata con CC appare subito molto distante dal modello di riferimento, com'è stato confermato successivamente dalle comparazioni con la nuvola LiDAR. In questo caso, come per i software 3Df e VS, occorrerebbe garantire la possibilità di definire la tipologia della sistema ottico.

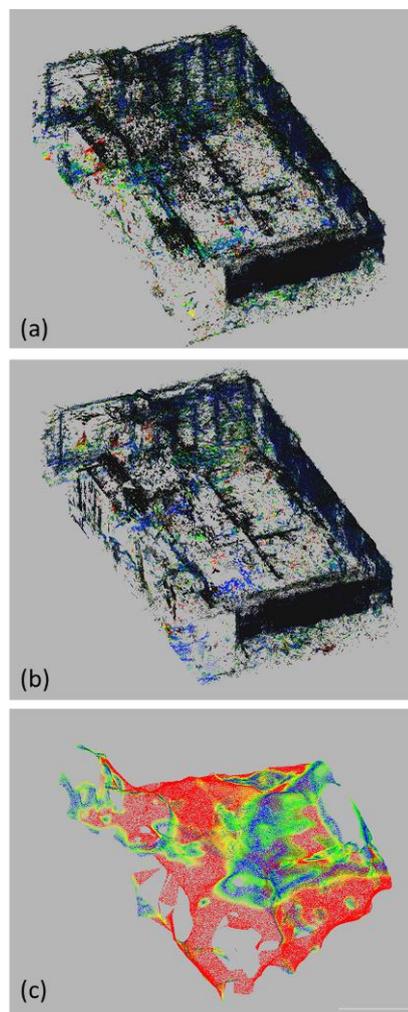


Figura 9. Mappa delle differenze tra la nuvola LiDAR e i risultati delle elaborazioni con (a) APP (immagini sferiche), (b) APP (immagini piane), (c) CC (immagini piane).

Per quanto riguarda la calibrazione delle camere, i valori stimati dei parametri, tramite i differenti algoritmi, si scostano notevolmente tra loro. Queste differenze potrebbero essere determinate, anche in questo caso, dall'impossibilità, nel definire in CC e Matlab la tipologia di lenti impiegata per le acquisizioni. Questo problema ha sicuramente influito anche nella definizione delle geometrie di presa e si traduce in un errato allineamento delle immagini e nella generazione di una nuvola di punti non accurata.

Non avendo risolto il problema della stima di questi parametri, ci si propone di ricorrere a software basati sulla fotogrammetria tradizionale per un calcolo più rigoroso di questi valori.

Comparando le immagini relative alle differenze tra la nuvola LiDAR e i risultati delle elaborazioni (Figura 9), si ha una dimostrazione visiva di quanto queste ricostruzioni si discostino dal modello di riferimento. Inoltre, la lettura dello scarto tra le nuvole di punti 3D realizzate a partire dalle immagini e le scansioni laser permette di ottenere un dato sul quale è possibile effettuare delle considerazioni. Infatti dalla comparazione tra le nuvole di APP e quella laser emerge che circa il 70% dell'area analizzata ha uno scostamento variabile tra 0 e 0,03 m dalla superficie di riferimento. In alcune aree dell'ambiente, quelle in prossimità dell'arredamento interno si nota uno scostamento

molto elevato dovuto probabilmente allo spostamento di alcuni oggetti d'arredo da parte dell'operatore durante le acquisizioni delle immagini. Al contrario, analizzando la nuvola ottenuta con CC l'80% della nuvola ha uno scostamento maggiore di 0,13 m.

Tuttavia, nell'osservazione dei risultati, occorre tener conto dei limiti della procedura proposta, in quanto gli algoritmi di Nearest Neighbour potrebbero condurre a risultati fuorvianti in caso di nubi rumorose e geometrie complesse.

4. CONCLUSIONI

L'utilizzo delle immagini panoramiche su APP ha molteplici vantaggi: le procedure di calibrazione e orientamento sono poco onerose sia dal punto di vista computazionale che in termini di tempo impiegato; la visione a 360°, da più punti di vista, consente un controllo ottimale dello spazio da rappresentare; è possibile, inoltre, integrare i panorami con foto di dettaglio per la misura e la modellazione di eventuali particolari. Le prime verifiche metriche sono state finalizzate alla comparazione tra le distanze di punti omologhi definiti dai marker predisposti; dall'analisi dei dati ne consegue che lo scarto tra le distanze tra i marker misurati sui panorami sferici e quelli misurati sulle nuvole di punti non supera i 2 cm. Lo studio proposto ha permesso di valutare pregi, difetti e potenzialità della fotogrammetria sferica, che potrebbe trovare impiego per il rilievo di spazi architettonici interni. Il semplice utilizzo delle attrezzature necessarie, la facile trasportabilità, la rapidità di acquisizione delle prese fotogrammetriche necessarie per la realizzazione dei panorami sferici e i ridotti tempi di elaborazione dei dati, fanno di questa metodologia una buona alternativa ai classici metodi di rilievo. Tuttavia ad oggi sono ancora pochi i software disponibili sul mercato in grado di elaborare questo tipo di dati; inoltre si ritiene doveroso orientare la ricerca sugli algoritmi di calcolo dei parametri di calibrazione e delle distorsioni dei differenti sistemi ottici.

BIBLIOGRAFIA

Riferimenti da giornali o atti di convegno

Aicardi I., Lingua A., Piras M., 2014. Evaluation of Mass Market Devices for the Documentation of the Cultural Heritage. *Inter. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, pp. 17-22.

Briggs, A., Li, Y., Scharstein, D., & Wilder, M., 2006. Robot navigation using 1d panoramic images. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on* (pp. 2679-2685). IEEE.

Chiabrando, F.; Donadio, E.; Rinaudo, F. 2015. SfM for orthophoto generation: A winning approach for cultural heritage knowledge. *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 1, pp. 91-98.

D'Annibale, E., 2011. Image Based Modeling from Spherical Photogrammetry and Structure for Motion. The Case of the Treasury, Nabatean Architecture in Petra. *Geoinformatics FCE CTU*, 6, 62-73.

Fangi, G., 2012. La fotogrammetria sferica, una nuova tecnica per il rilievo dei vicini. *Archeomatica*, 1(2).

Kang, Z., Li, J., Zhang, L., Zhao, Q., & Zlatanova, S., 2009. Automatic registration of terrestrial laser scanning point clouds using panoramic reflectance images. *Sensors*, 9(4), 2621-2646.

Kauhanen, H., & Rönholm, P., 2012. Image Acquisition Constraints for Panoramic Frame Camera Imaging. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 397-402.

Kwiatek, K., & Tokarczyk, R., 2014. Photogrammetric Applications of Immersive Video Cameras. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 211.

Lowe, D., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. Journal of Computer Vision*, Vol. 60, pp. 91-110.

Luhmann, T., & Tecklenburg, W., 2004. 3-D object reconstruction from multiple-station panorama imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/W16), 8.

Pöntinen, P., 2004. On the geometrical quality of panoramic images. *International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35, B5.

Zara, J. (2004). Virtual reality and cultural heritage on the web. In *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence* (pp. 101-112).

Riferimenti da libri

Smith, J., 1989. *Space Data from Earth Sciences*. Elsevier, Amsterdam, pp. 321-332.

Furukawa, Y., Curless, B., Seitz, S. M., Szeliski, R., 2010. Towards internet-scale multi-view stereo. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 1434-1441.

Altri riferimenti stampati

Barazzetti, L., Fangi, G., Remondino, F., & Scaioni, M., 2010. Automation in multi-image spherical photogrammetry for 3D architectural reconstructions.

Cannella, M., 2013. Valutazioni sull'impiego della fotogrammetria sferica nella costruzione di modelli digitali 3D: l'oratorio della chiesa di Santa Caterina a Zejtun (Malta). *Disegnarecon*, 6(12), 1-8.