

La fotogrammetria sferica in ambienti complessi: il caso del Rio veneziano de le Toresele

Enrico Breggion¹[0000-0001-8512-0463], Beatrice Tanduo¹[0000-0003-2254-0318], Andrea Martino¹[0000-0003-4247-7918], Paolo Vernier¹[0000-0003-0951-4342], Francesco Guerra¹[0000-0002-4614-3846]

¹Laboratorio di Fotogrammetria, Università Iuav di Venezia, Santa Croce 191, 30135, Venezia, Italia - (ebreggion, btanduo, amartino, vernier, guerra2)@iuav.it

Abstract. La ricerca presentata vuole definire una procedura operativa mirata all'acquisizione di ambienti difficilmente accessibili attraverso l'utilizzo di camere omnidirezionali, ponendo particolare attenzione allo schema di presa in fase di campagna e alla degradazione del GSD sulla superficie dell'immagine rispetto al tipo di proiezione applicata.

Come campo sperimentale è stato utilizzato il Rio veneziano de le Toresele il quale a causa della difficile accessibilità non permetterebbe un approccio di tipo classico all'acquisizione.

Parole chiave: fotocamere omnidirezionali, fisheye, fotogrammetria sferica, nuvola di punti, Ground Sample Distance (GSD).

1 Introduzione

Il rilievo di manufatti architettonici attraverso sistemi di acquisizione già consolidati presenta delle sostanziali limitazioni soprattutto nel caso di ambienti con difficile accessibilità. Allo stesso tempo la strumentazione necessaria risulta essere nella maggior parte dei casi onerosa. Per questo motivo, l'utilizzo di dispositivi di acquisizione più economici e di rapido utilizzo è sempre più oggetto di interesse e di ricerca in ambito professionale e accademico [1].

Nel caso in cui l'oggetto del rilievo sia rappresentato da un ambiente complesso e difficilmente accessibile diventa essenziale disporre di un sistema in grado di acquisire con sufficiente velocità e facilità. Questo articolo si focalizza sulla documentazione delle facciate degli edifici presenti nel Rio veneziano de le Toresele, dove verranno testati diversi approcci all'acquisizione, ponendo particolare attenzione alle difficoltà di stazionamento dovute alla presenza dell'acqua. Laser scanning terrestre (TLS) e fotogrammetria tradizionale, nello specifico caso dell'oggetto analizzato, non risultano essere di agevole utilizzo: nel caso del laser scanning la messa in stazione dello strumento risulta essere impossibile nella maggior parte delle aree accessibili; nel caso della fotogrammetria classica, nonostante l'utilizzo di ottiche a focale corta, a causa della ridotta distanza dalle facciate, risulta necessario definire uno schema di presa che pre-

veda un numero elevato di scatti per poter avere un sufficiente ricoprimento delle superfici dal quale ne consegue un ingente aumento sia dei tempi di acquisizione che di elaborazione.

La recente implementazione di algoritmi di Structure from Motion (SfM) per la calibrazione e l'orientamento di immagini ottenute attraverso camere sferiche e fisheye nei più comuni software di fotogrammetria (come: Agisoft Metashape, Bentley ContextCapture e Pix4D) [2] è un segnale della sempre più crescente diffusione di questi dispositivi sia in campo professionale che amatoriale. Allo stesso tempo, il rischio di ottenere modelli di scarsa qualità è più elevato in quanto, nel caso delle lenti fisheye, la lunghezza focale corta e l'estrema distorsione dell'immagine rendono il processo di ricostruzione del modello più complicato [3]. Bisogna dunque porre particolare attenzione alla fase di progettazione del rilievo, dovendo considerare elementi come la degradazione del pixel dovuta alla distorsione conseguente al tipo di proiezione applicata [4], lo schema di presa e l'orientamento del dispositivo. Questi elementi, ancora di più rispetto alla fotogrammetria classica, risultano essere di cruciale importanza per ottenere dei risultati ottimali e per garantire l'integrità metrica dell'oggetto acquisito. [5]

Attraverso l'utilizzo di camere sferiche è possibile ridurre notevolmente i tempi di acquisizione e di elaborazione dei dati [6], allo stesso tempo queste ultime risultano essere uno strumento low-cost se rapportate ai classici sistemi di acquisizione. Questo articolo vuole definire un metodo efficace per il rilievo di ambienti complessi definendo il workflow per ottenere il risultato migliore sia in termini di precisione che di qualità del dato. Il processo prevede la determinazione dello schema ottimale di acquisizione ponendo particolare attenzione alla degradazione del Ground Sample Distance (GSD). Come campo sperimentale è stato utilizzato il Rio de le Toresele a Venezia il quale, essendo accessibile solo via acqua, non permetterebbe un approccio di tipo "classico" al rilievo.

Nella fase di acquisizione, eseguita ponendo il dispositivo al di sopra di un'asta telescopica, sono stati acquisiti differenti set di immagini percorrendo l'intera lunghezza del rio attraverso l'uso di una barca a motore. Sono stati definiti differenti schemi di presa ponendo particolare attenzione all'orientamento e all'inclinazione dello strumento. Nello specifico sono stati acquisiti tre set: il primo e il secondo mantenendo la camera in posizione verticale e orientando gli assi ottici parallelamente e ortogonalmente all'andamento delle facciate degli edifici; il terzo mantenendo l'asse ottico perpendicolare al suolo. Nella fase di elaborazione i set acquisiti sono stati elaborati singolarmente e combinati tra di loro utilizzando sia immagini equirettangolari che immagini fisheye [7].

Per valutare la precisione e la completezza dei dati di ogni set elaborato è stato determinato un dataset di riferimento acquisito attraverso alcune scansioni TLS georeferenziate in un sistema di riferimento topografico precedentemente determinato.

Le nuvole di punti ottenute attraverso la camera omnidirezionale sono state orientate nello stesso sistema di riferimento delle nuvole di punti laser scanning e successivamente confrontate. Per ottenere un indicatore della precisione del sistema è stata calcolata la distanza media dei punti dalla nuvola di riferimento. I dataset sono stati valutati anche dal punto di vista qualitativo considerando elementi come densità, rumorosità e riconoscibilità di elementi geometrici.

1.1 Lenti fisheye e metodi di proiezione

Il problema principale che si presenta usando lenti fisheye riguarda l'alta possibilità di ottenere risultati inconsistenti e incompleti a causa della distorsione radiale [8-9-10]. L'inconveniente principale è dato dalla difficoltà di controllare tutte le variabili che rischiano di invalidare il processo fotogrammetrico: prima di tutto l'approssimazione della distorsione radiale attraverso i coefficienti K_1, K_2, K_3, \dots [11] e in secondo luogo la difficoltà nella definizione dello schema di presa. Questi problemi si manifestano quando viene utilizzato lo stesso processo che verrebbe applicato alla fotogrammetria classica che non considera la grande distorsione presente in alcune zone dell'immagine [12-13].

Per comprendere il problema dato dalla distorsione radiale è necessario quindi definire le sostanziali differenze tra i vari tipi di proiezioni applicate ai fotogrammi. Prima di tutto deve essere considerata la correlazione tra campo visivo (FoV) e lunghezza focale. La funzione che lega questi due parametri definisce le caratteristiche della lente. A parità di lunghezza focale, a ciascuna proiezione ottica disponibile può corrispondere un FoV diverso. I principali tipi di proiezioni ottiche utilizzati sono i seguenti [14]:

$$\text{rettilinea:} \quad r = f \tan(\theta) \quad (1)$$

$$\text{equidistante:} \quad r = f\theta \quad (2)$$

$$\text{equisolida:} \quad r = 2f \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$

$$\text{stereografica:} \quad r = 2f \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

$$\text{ortografica:} \quad r = f \sin(\theta) \quad (5)$$

dove:

r = distanza dal centro del sensore

f = lunghezza focale

θ = angolo di incidenza del fascio luminoso

1.2 La degradazione del GSD

Per una corretta progettazione dello schema di acquisizione deve essere sempre considerato il GSD. Nella proiezione rettilinea (1), utilizzata nella maggior parte delle fotocamere attualmente in commercio, i fasci proiettivi seguono un andamento rettilineo. Di conseguenza la grandezza del pixel può essere determinata con la seguente formula:

$$f : D (\text{distanza di presa}) = \text{dimensione del pixel} : \text{GSD} \quad (6)$$

dove la dimensione di ogni pixel è considerata per approssimazione la medesima per tutta la superficie dell'immagine. Nello specifico caso degli altri tipi di proiezione, data la grande distorsione dovuta al maggiore FoV, deve essere considerata la dimensione variabile del GSD sul piano dell'immagine. La sua dimensione è minima in coincidenza del centro di presa e massima in corrispondenza dei bordi dell'immagine. Il GSD può

raggiungere dimensioni infinite quando il campo visivo raggiunge i 180° [5]. Per questo motivo in fase di progettazione dello schema di presa è essenziale tenere in considerazione la degradazione della qualità, dovuta alle maggiori dimensioni del GSD, in determinate aree dell'immagine.

2 Materiali e metodi

2.1 Ricoh Theta Z1

Per generare un'immagine sferica che ricopra per entrambi gli assi 360° , risulta necessario utilizzare diverse fotocamere dotate di lenti fisheye che, sincronizzate e accuratamente calibrate, permettono di generare un'unica immagine omnidirezionale attraverso l'unione di più fotografie. La Ricoh Theta Z1 permette di generare un'unica immagine omnidirezionale utilizzando due sensori fisheye opposti e sincronizzati, con una risoluzione di 3648×3648 pixel e un campo visivo di circa 196° ciascuna (stimato per via sperimentale [15]). Il fascio luminoso è direzionato attraverso un prisma verso i due sensori CMOS che sono posti ortogonalmente rispetto alle lenti. Le due immagini sono assemblate automaticamente in un'immagine equirettangolare. La fusione delle due foto viene eseguita mantenendo l'orientamento dell'immagine risultante parallelo alla verticale, ottenuta grazie alla presenza di un sistema inerziale all'interno del dispositivo. Allo stesso tempo è possibile ottenere le singole immagini fisheye in formato RAW generate dai due sensori.

2.2 Modello di calcolo del GSD per lenti fisheye

Con l'utilizzo di foto acquisite con lenti fisheye da applicare al processo fotogrammetrico, il problema principale è rappresentato dalla dimensione variabile del GSD sul piano dell'immagine. Quest'ultimo è strettamente correlato alla scala di rappresentazione, per questo motivo deve essere considerato in fase di progettazione della campagna di rilievo. Di seguito viene presentato un modello matematico generale per la determinazione del GSD per differenti tipi di proiezione ottica derivati a partire dalle formule generali, presentate nel capitolo 1.1. Questo approccio teorico permette di valutare le caratteristiche e potenzialità dei vari tipi di proiezione applicati alla medesima lente.

A differenza del modello rettilineo, in tutti gli altri casi il GSD deve essere espresso anche in funzione del parametro r , cioè la distanza del pixel dal punto principale, ponendo quindi considerare la deformazione e di conseguenza la dimensione variabile del pixel attraverso l'immagine.

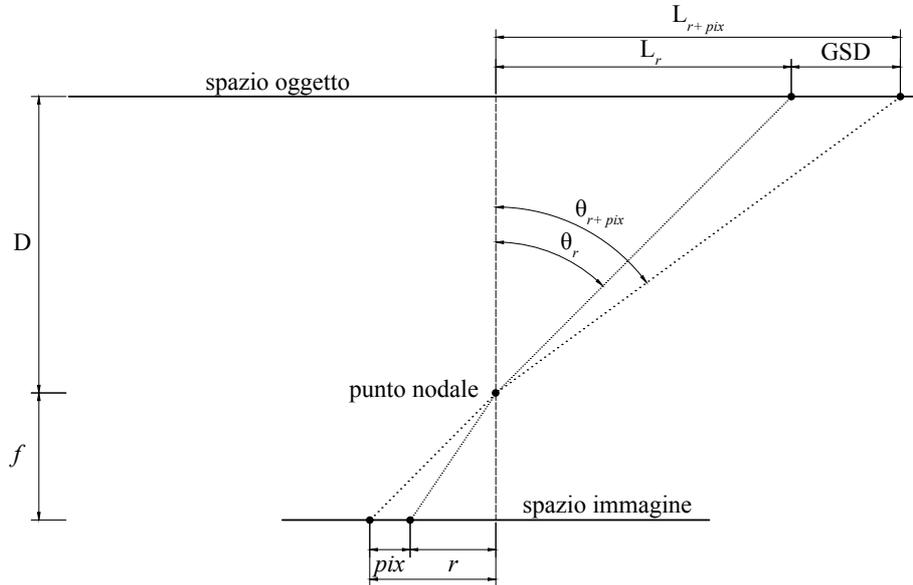


Fig. 1. Relazione tra grandezza del pixel sullo spazio immagine e GSD

Nella Fig. 1 θ_r e θ_{r+pix} sono dipendenti dal tipo di proiezione ottica, dove θ è sempre correlato a r . A partire dalla funzione di ciascuna proiezione è quindi possibile ricavare la formula per determinare il GSD [16]. Di seguito le formule per la proiezione equidistante (7), equisolida (8), stereografica (9) e ortografica (10).

$$GSD = D \cdot \left[\tan\left(\frac{r+pix}{f}\right) - \tan\left(\frac{r}{f}\right) \right] \quad (7)$$

$$GSD = D \cdot \left\{ \tan\left[2 \arcsen\left(\frac{r+pix}{2f}\right)\right] - \tan\left[2 \arcsen\left(\frac{r}{2f}\right)\right] \right\} \quad (8)$$

$$GSD = D \cdot \left\{ \tan\left[2 \arctan\left(\frac{r+pix}{2f}\right)\right] - \tan\left[2 \arctan\left(\frac{r}{2f}\right)\right] \right\} \quad (9)$$

$$GSD = D \cdot \left\{ \tan\left[\arcsen\left(\frac{r+pix}{f}\right)\right] - \tan\left[\arcsen\left(\frac{r}{f}\right)\right] \right\} \quad (10)$$

Il metodo presentato permette di calcolare la distribuzione della risoluzione attraverso l'immagine in modo da poter verificare il minimo valore del GSD per le varie proiezioni ottiche. Considerando che una risoluzione bassa porta a scarsi risultati durante il processo fotogrammetrico, risulta importante capire quali parti dell'immagine potranno essere utilizzate in relazione alla scala di rappresentazione scelta. Attraverso questa metodologia è quindi possibile calcolare il raggio r della massima circonferenza all'interno della quale la risoluzione è compatibile con la scala desiderata, la parte in eccesso sarà di conseguenza scartata [17].

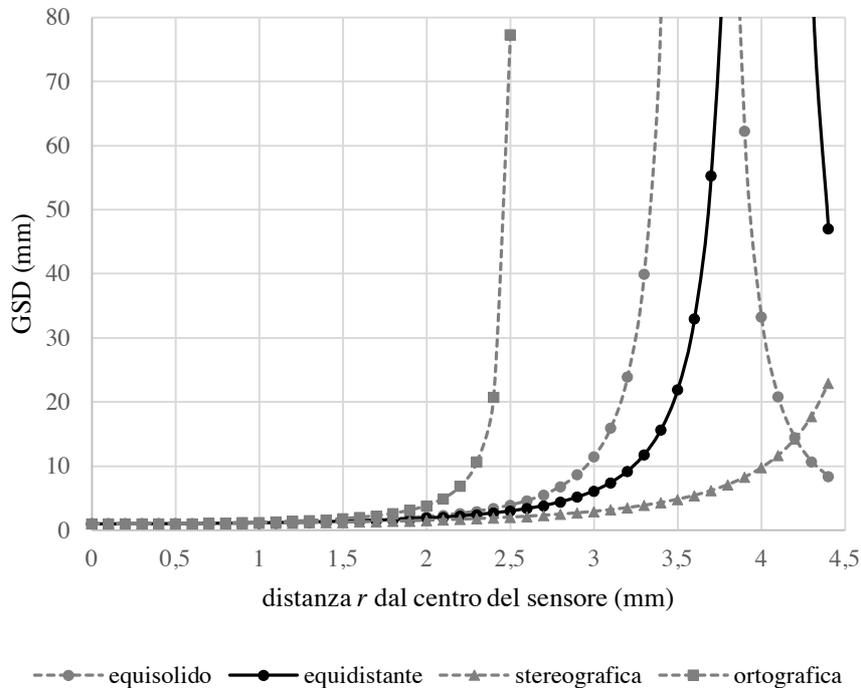


Fig. 2. Variazione del GSD per i diversi tipi di proiezione. La simulazione è stata eseguita sulle specifiche della Ricoh Theta Z1 (lunghezza focale 2.57 mm, dimensione pixel 24 μ , distanza di presa 1 m)

Test sperimentale per la determinazione del GSD e del tipo di proiezione. Prima di procedere con la determinazione dello schema di presa ottimale, è indispensabile comprendere il tipo di proiezione utilizzata dal dispositivo, che nel caso della Ricoh Theta Z1 non viene dichiarato dal produttore. Per verificare quale modello matematico si abbinerà meglio al caso reale risulta necessario definire una procedura sperimentale per determinarlo. È essenziale comprendere anche che l'effettiva distorsione di ogni singola lente è caratterizzata da piccole differenze quando comparata al modello matematico, causate da difetti di produzione e assemblaggio.

Il test è stato condotto utilizzando un pannello di calibrazione a scacchiera dove le dimensioni di ogni singolo riquadro sono note e costanti per tutta la dimensione del pannello. Di conseguenza, ponendo una delle due lenti della Ricoh Theta Z1 parallela alla superficie, sono state scattate delle foto a differenti distanze (10 cm e 1m) successivamente è stata determinata la dimensione di alcuni riquadri sul piano dell'immagine e calcolato di conseguenza il GSD medio in funzione del raggio r dal centro di presa attraverso la seguente formula:

$$GSD = \frac{pix_Q}{L_Q} \tag{7}$$

Dove:

pix_Q = numero di pixel compresi in un singolo riquadro

L_Q = dimensione reale del riquadro

Nonostante i dati ricavati differiscano leggermente dal modello matematico si può affermare con sufficiente approssimazione che il tipo di proiezione applicato dal dispositivo è una proiezione equidistante. In corrispondenza del punto in cui il GSD è massimo, che coincide con i 180°, diventa impossibile stimare per via sperimentale la dimensione del GSD.

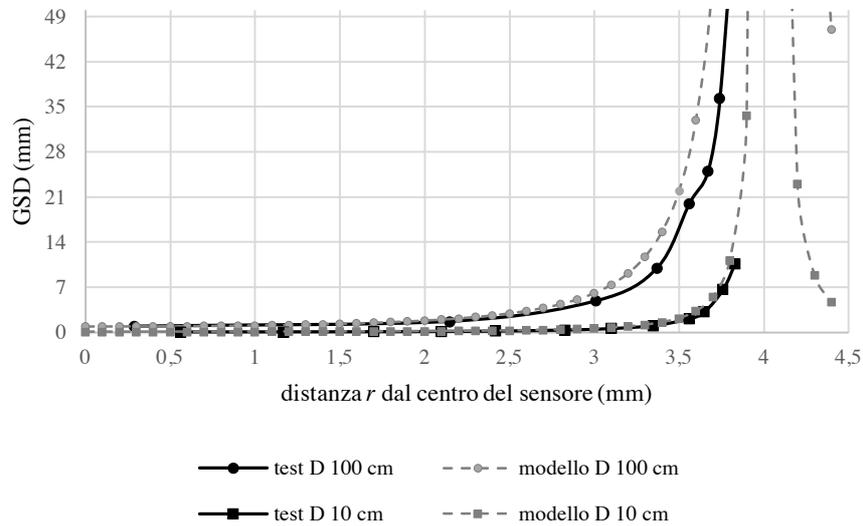


Fig. 3. Variazione del GSD stimato per via sperimentale per la Ricoh Theta Z1 (lunghezza focale 2.57 mm, dimensione pixel 24 μ)

2.3 Il rilievo del rio de le Toresele

Attraverso questo test si vuole determinare il processo più agevole per il rilievo di un ambiente difficilmente accessibile come un rio veneziano che risulta essere raggiungibile solo via acqua. Per poter procedere con un confronto è stato prima di tutto determinato un dataset di riferimento da utilizzare per tutti i successivi test. Attraverso l’acquisizione di 12 scansioni TLS, successivamente georeferenziate attraverso un sistema topografico, è stato possibile ottenere una nuvola di punti da porre come riferimento che non eccedesse ±1 cm di errore. Successivamente, per determinare effettivamente quale tecnologia possa essere la più adatta, è stato acquisito anche un set di 670 imma-

gini con la fotocamera Nikon D610 con focale fissa di 20mm. Lo schema di acquisizione prevede sia foto parallele alle superfici degli edifici che ortogonali. Le immagini sono state successivamente elaborate attraverso il software Agisoft Metashape ed è di conseguenza stata esportata la nuvola di punti risultante.

Riguardo i test relativi alla camera sferica Ricoh Theta Z1 risulta necessario fare un'analisi più accurata sullo schema di acquisizione. Considerando che, come visto dai test precedentemente eseguiti, la dimensione del GSD è più bassa in corrispondenza del centro dell'immagine e più alta in corrispondenza delle estremità, risulta necessario fare una considerazione sull'orientamento della fotocamera al momento della presa. Sono stati acquisiti tre differenti set di foto: il primo ponendo gli obiettivi parallelamente all'andamento medio delle facciate (fig. 4a); il secondo ortogonalmente (fig. 4b) e il terzo orientando gli assi ottici verso cielo e terra (fig. 4c). Le immagini sono state acquisite con un passo di circa 3 metri l'una dall'altra. Sono state esportate sia le immagini equirettangolari (Fig. 4d) che la versione RAW delle stesse (Fig. 4 a-b-c) dove è possibile ottenere una singola immagine per ciascuno dei sensori.

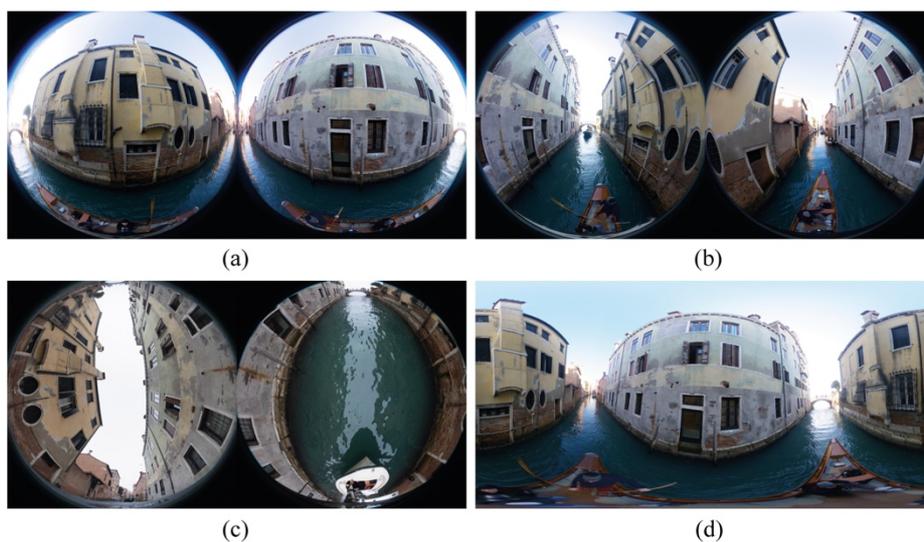


Fig. 4. Acquisizione con Ricoh Theta Z1 nel Rio de le Toresele. (a-b-c) immagini in proiezione equidistante; (d) immagine in proiezione equirettangolare.

I set di immagini sono stati elaborati attraverso il software di fotogrammetria Agisoft Metashape. Per ogni set sono state applicate tre diverse metodologie di elaborazione: nel primo caso sono state elaborate le immagini equirettangolari; nel secondo e terzo caso sono state elaborate le immagini fisheye, processando in uno l'intera superficie dell'immagine e nell'altro utilizzando solo la porzione che presenta minore distorsione [17], che è compresa all'incirca entro 3,5 mm di raggio a partire dal centro del sensore, di dimensione 8,8 x 13,2mm. Allo stesso tempo i diversi set di immagini fisheye sono stati elaborati congiuntamente applicando anche in questo caso i tre differenti approcci

all'elaborazione. Successivamente le nuvole di punti ottenute sono state orientate nello stesso sistema di riferimento della nuvola di punti laser scanner.

Criteri quantitativi di valutazione. Per ottenere un dato indicatore di precisione, attraverso l'algoritmo *cloud to cloud* (C2C) presente nel software CloudCompare [18-19], sono stati confrontati i diversi dataset con la nuvola di punti laser scanner. È stato di conseguenza possibile calcolare lo scostamento dal "dato reale" di questi ultimi. Per non incorrere in errori grossolani di confronto è stato fissato un valore soglia di 1 m oltre il quale non è stato eseguito il confronto tra le nuvole. I dati confrontati sono stati presentati sotto forma di campo scalare.

Criteri qualitativi di valutazione. In aggiunta all'analisi quantitativa descritta in precedenza, alcune valutazioni di tipo qualitativo possono risultare utili per dare una più esaustiva valutazione dei dati, in modo da determinare la loro fruibilità in funzione di un rilievo architettonico.

Se per le analisi di tipo quantitativo la valutazione della densità delle nuvole di punti non è un parametro che incide sul risultato, un'analisi quantitativa della densità può risultare utile per determinare l'effettiva qualità e sfruttabilità dei dati. Al fine di ottenere una valutazione più accurata, la capacità di identificare dettagli di piccole dimensioni deve essere considerata soprattutto nel caso di rilievi dove piccole variazioni delle superfici sono essenziali. L'analisi è stata eseguita attraverso il filtro *Roughness*, presente nel software CloudCompare, che assegna un valore di "rumorosità" derivato dalla differenza di distanza tra la nuvola di punti e l'intersezione di un piano basato sui punti più prossimi [20]. L'analisi è stata eseguita in una porzione di facciata determinando quindi l'affidabilità geometrica di quest'ultima. I dati ottenuti vengono rappresentati attraverso un campo scalare colorato e di conseguenza confrontati visivamente con la nuvola di riferimento. Per rendere comparabili i risultati ottenuti è stato assegnato un valore da 1 a 5 rispetto alla maggiore o minore rumorosità evidenziata dal test.

3 Risultati

3.1 Elaborazione dei dati

La calibrazione delle immagini è una fase cruciale per quanto riguarda il processo fotogrammetrico. Nello specifico caso delle immagini omnidirezionali i software di fotogrammetria attualmente disponibili non prevedono una calibrazione o una rimozione delle distorsioni causate dalle piccole imperfezioni di costruzione e progettazione degli obiettivi [21-22-23]. Allo stesso tempo per le immagini omnidirezionali generate dalla Ricoh Theta Z1, che prevede un approccio alla fusione dei fotogrammi variabile in base all'orientamento del dispositivo rendendo ogni immagine unica, una eventuale calibrazione non sarebbe possibile in quanto ne conseguirebbe la necessità di differenti parametri di calibrazione per ogni scatto. Nel caso delle immagini fisheye si presenta una maggiore flessibilità in fase di elaborazione. Attraverso il processo di auto calibrazione [24] sono stati determinati i parametri necessari per la rimozione della distorsione e per

l'orientamento delle immagini per ognuno degli obiettivi. In generale, grazie alla maggiore flessibilità sono stati ottenuti dei risultati migliori attraverso le foto fisheye.

Tabella 1. Tabella riassuntiva delle analisi e risultati ottenuti dopo i confronti.

Elaborazione	Precisione (cm)	Densità (punti/m ²)	Rumore	Foto utilizzate
<u>SCHEMA A verticale parallelo (fig. 4a)</u>				
equirettangolare	±27,53	3754	1	52
equidistante	±3,65	8965	2	104
equidistante crop 3,5 mm	±3,21	9273	2	104
<u>SCHEMA B verticale ortogonale (fig. 4b)</u>				
equirettangolare	±24,95	1.527	1	47
equidistante	±2,89	1840	2	94
equidistante crop 3,5 mm	N/D	N/D	N/D	94
<u>SCHEMA C orizzontale ortogonale (fig. 4c)</u>				
equirettangolare	±27,61	3247	2	51
equidistante	±4,39	2096	1	102
equidistante crop 3,5 mm	N/D	N/D	N/D	102
<u>A + B + C</u>				
equirettangolare	±58,60	6383	3	150
equidistante	±4,68	8167	4	300
equidistante crop 3,5 mm	±4,65	7944	4	300
<u>NIKON D610 F 20 mm</u>	±2,60	18658	5	796

3.2 Valutazione quantitativa

Questo test vuole definire quale procedura permetta di ottenere dei risultati ottimali in termini di precisione del dato metrico. Come si può vedere dalla Tabella 1 nel caso delle elaborazioni a partire dalle immagini fisheye sono stati ottenuti dei risultati migliori. Nello specifico con le foto fisheye mascherate è stato ottenuto un SQM più basso solo nel caso dello schema di presa con gli obiettivi paralleli alle facciate, con gli altri schemi di presa non è stato possibile orientare le immagini a causa del ridotto campo visivo risultante. Per questo motivo lo schema di acquisizione con gli obiettivi paralleli all'andamento dei prospetti, come nella fotogrammetria classica, risulta essere il migliore per la fotogrammetria sferica.

Nel caso dell'utilizzo delle immagini equirettangolari sono stati ottenuti dei risultati peggiori in tutti i test eseguiti, probabilmente a causa della difficoltà di orientamento dei fotogrammi. Le nuvole di punti ottenute in questo caso risultano essere deformate e la stima della posizione nel momento dell'orientamento relativo spesso non corrisponde alla reale posizione al momento dello scatto.

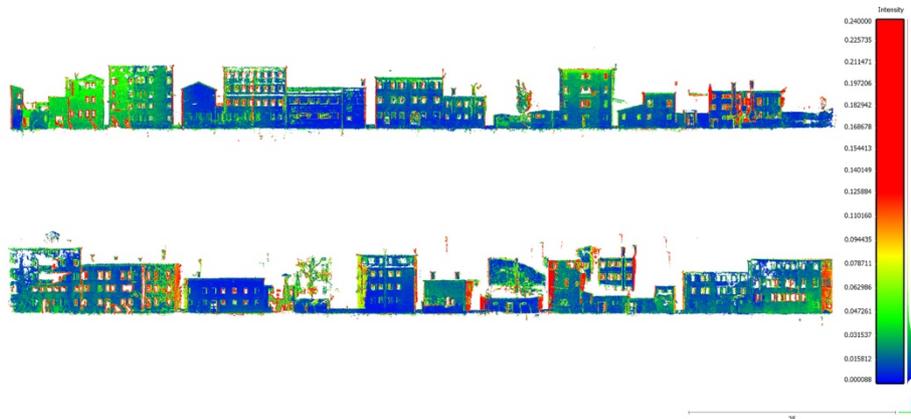


Fig. 4. Prospetti del rio de le Toresale. Confronto C2C rappresentato con campo scalare con distanze compute dalla nuvola TLS di riferimento.

3.3 Valutazione qualitativa

Oltre al dato della precisione, per un'analisi più esaustiva dei risultati ottenuti, risulta essenziale definire dei parametri per valutare la qualità e la fruibilità delle nuvole di punti. Per quanto riguarda la riconoscibilità dei dettagli, i risultati migliori sono stati ottenuti a partire dalle immagini fisheye. Nello specifico, grazie alla maggiore ridondanza, le nuvole ottenute dall'elaborazione congiunta dei tre schemi di acquisizione risultano essere le migliori. Allo stesso tempo in tutti i casi la qualità diminuisce all'aumentare dell'altezza dei fronti, a causa della dimensione del GSD che a distanze maggiori risulta essere più elevata. A riprova della maggiore qualità delle nuvole ottenute attraverso le immagini fisheye, anche la densità risulta essere maggiore rispetto alle medesime ottenute attraverso l'elaborazione delle immagini omnidirezionali.

4 Conclusioni

L'obiettivo del caso studio presentato è di descrivere brevemente le possibilità che la fotogrammetria sferica offre se applicata al rilievo di manufatti architettonici di difficile accessibilità. In primo luogo si vuole risolvere il problema della progettazione dello schema di acquisizione, tenendo in considerazione le limitazioni di questi dispositivi come la degradazione del GSD e il tipo di proiezione applicata. In secondo luogo, si vuole evidenziare la versatilità che questi dispositivi offrono nell'ambito di un rilievo architettonico, infatti attraverso di essi è possibile diminuire notevolmente il tempo di acquisizione e di elaborazione dei dati finali grazie alla notevole riduzione della numerosità di scatti necessari.

Attraverso lo studio del GSD si è voluto evidenziare come la tipologia di proiezione delle immagini incida notevolmente sul risultato finale. L'approccio applicato all'ela-

borazione dei dati vuole tenere in considerazione la distorsione variabile sulla superficie delle immagini, cercando quindi di mantenere solo le porzioni minormente deformate in funzione di una ricostruzione del modello fotogrammetrico migliore. Come dimostrato dai test eseguiti, attraverso coppie di immagini fisheye, a discapito delle immagini 360° equirettangolari, è stato possibile ottenere dei risultati migliori sia in termini di precisione che di qualità. Allo stesso tempo deve essere posta grande attenzione allo schema di presa e all'orientamento del dispositivo soprattutto nel caso dell'utilizzo della porzione minormente distorta dell'immagine. Per quanto riguarda l'elaborazione delle immagini equirettangolari, il maggiore ostacolo è sicuramente posto dalla componente software, che non permette la stessa flessibilità ottenibile con la fotogrammetria classica. In riferimento alla flessibilità in fase di acquisizione, questi dispositivi sicuramente possono rappresentare un valido sostituto alle normali tecniche di acquisizione in ambienti difficilmente accessibili in quanto, se commisurati alla velocità di utilizzo e al limitato prezzo, permettono di ottenere dei buoni risultati anche se ancora non al livello della fotogrammetria classica.

Riferimenti bibliografici

1. Calantropio, A., Patrucco, G., Sammartano, G., Losè, L.T.: Sensori low-cost per il mapping speditivo di beni culturali. Primi test su di una steadycam low-cost. Bollettino SIFET n.3: Sezione Scienza (2016)
2. Barazzetti, L., Previtali, M., Roncoroni, F.: Fisheye lenses for 3d modeling: evaluations and considerations. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W3, 79–84 (2017). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-79-2017>
3. Ying, X., Hu, Z., Zha, H.: Fisheye Lenses Calibration Using Straight-Line Spherical Perspective Projection Constraint. In: Narayanan, P.J., Nayar, S.K., e Shum, H.-Y. (a c. di) *Computer Vision – ACCV 2006*. pagg. 61–70. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2006)
4. Perfetti, L., Fassi, F., Rossi, C.: fisheye photogrammetry to generate low-cost DTMs. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W17, 257–263 (2019). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-257-2019>
5. Fassi, F., Troisi, S., Baiocchi, V., Del Pizzo, S., Giannone, F., Barazzetti, L., Previtali, M., Roncoroni, F.: Fisheye Photogrammetry to Survey Narrow Spaces in Architecture and a Hypogea Environment. In: *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*. MDPI (2018)
6. Gottardi, C., Guerra, F.: Spherical images for cultural heritage: survey and documentation with the nikon km360. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2, 385–390 (2018). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-385-2018>
7. Campos, M.B., Tommaselli, A.M.G., Marcato Junior, J., Honkavaara, E.: Geometric model and assessment of a dual-fisheye imaging system. *Photogram Rec.* 33, 243–263 (2018). <https://doi.org/10.1111/phor.12240>
8. Teppati Losè, L., Chiabrandò, F., Giulio Tonolo, F.: Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. *Remote Sensing*. 13, 3633 (2021). <https://doi.org/10.3390/rs13183633>
9. Puig, L., Bermúdez, J., Sturm, P., Guerrero, J.J.: Calibration of omnidirectional cameras in practice: A comparison of methods. *Computer Vision and Image Understanding*. 116, 120–137 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2011.08.003>

10. Hou, W., Ding, M., Qin, N., Lai, X.: Digital deformation model for fisheye image rectification. *Opt. Express*. 20, 22252 (2012). <https://doi.org/10.1364/OE.20.022252>
11. Scaramuzza, D., Martinelli, A., Siegwart, R.: A Flexible Technique for Accurate Omnidirectional Camera Calibration and Structure from Motion. In: Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06). pagg. 45–45. IEEE, New York, NY, USA (2006)
12. Fangi, G.: Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes, *ISPRS Archive*, Vol. XXXVI, Part 5, Dresden, 25–27 September 2006 (2006). ISSN 1682-1750
13. Schwalbe, E.: Geometric Modelling and calibration of fisheye lens camera systems. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 Part 5/W8 (2005)
14. Hughes, C., Denny, P., Jones, E., Glavin, M.: Accuracy of fish-eye lens models. *Appl. Opt.* 49, 3338 (2010). <https://doi.org/10.1364/AO.49.003338>
15. Viula, R., Hordijk, T.: A method for estimating fisheye lens' field-of-view angle and projection for hdr luminance capture. In: PROCEEDINGS OF the 29th Quadrennial Session of the CIE. pagg. 1108–1112. International Commission on Illumination, CIE, Washington DC, USA (2019)
16. Wagdy, A., Garcia-Hansen, V., Isoardi, G., Pham, K.: A Parametric Method for Remapping and Calibrating Fisheye Images for Glare Analysis. *Buildings*. 9, 219 (2019). <https://doi.org/10.3390/buildings9100219>
17. Perfetti, L., Polari, C., Fassi, F.: Fisheye photogrammetry: tests and methodologies for the survey of narrow spaces. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W3, 573–580 (2017). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-573-2017>
18. Cloud-to-Cloud Distance – CloudCompareWiki, https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Cloud_Distance, ultimo accesso 2022/03/15
19. Strecha, C., Zoller, R., Rutishauser, S., Brot, B., Schneider-Zapp, K., Chovancova, V., Krull, M., Glassey, L.: Quality assessment of 3d reconstruction using fisheye and perspective sensors. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* II-3/W4, 215–222 (2015). <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W4-215-2015>
20. Roughness – CloudCompareWiki, <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Roughness>, ultimo accesso 2022/03/20
21. Aghayari, S., Saadatseresht, M., Omidalizarandi, M., Neumann, I.: Geometric calibration of full spherical panoramic Ricoh-Theta camera. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* IV-1/W1, 237–245 (2017). <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-237-2017>
22. Fangi, G.: The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey- XXI International CIPA Symposium, 1-6 October 2007, Atene, *ISPRS International Archive*, Vol. XXXVI-5/C53, ISSN 1682-1750 - CIPA Archives, Vol. XXI-2007 (2017). ISSN 0256-1840
23. Fangi, G.: Multi-scale Multi-resolution Spherical Photogrammetry With Long Focal Lenses For Architectural Surveys *ISPRS mid-term symposium NewCastle* (2010). ISSN: 1682-1777 ISSN 1682-1777
24. Grasso, N.: Indoor spherical images for the survey of indoor environments. *Bollettino SIFET n.2: Sezione Scienza* (2016)

