

La fotogrammetria sferica per il rilievo del patrimonio storico-culturale: la necropoli di Anghelu Ruju

G. Furfaro¹, B. Tanduo²[0000-0003-2254-0318], G. Fiorini²[0000-0002-1475-1556],
F. Guerra²[0000-0002-4614-3846]

¹STF Survey, Società di Topografia s.r.l., Via Carmine 93, 72100, Brindisi, Italia, g.furfaro@stf-survey.com; ²Laboratorio di Fotogrammetria, Università IUAV di Venezia, Santa Croce 191, 30135, Venezia, Italia, btanduo@iuav.it, giuliafiorini96@gmail.com, guerra2@iuav.it

Abstract. La generazione di modelli tridimensionali ad alta risoluzione a partire da immagine sferiche è, ad oggi, pratica consolidata e largamente utilizzata. Le applicazioni in ambito geomatico basate sull'acquisizione di fotogrammi sferici sono sempre più frequentemente tema di ricerca e di interesse professionale.

È nell'ambito di tale filone di ricerca che si pone questo contributo, proponendo l'analisi delle potenzialità della fotogrammetria sferica come tecnica di rilievo speditivo di beni culturali architettonici e paesaggistici, per la costruzione di modelli 3D attraverso algoritmi di Structure from Motion (SfM), andando a valutare le precisioni ottenibili e la completezza e l'accuratezza del dato metrico.

Parole chiave: Fotogrammetria sferica, camere 360°, SfM, Patrimonio storico-culturale

1 Introduzione

La documentazione e il rilievo del patrimonio storico-culturale rappresentano le prime due fondamentali operazioni nel processo di conoscenza, gestione e conservazione del patrimonio stesso. Nell'ottica di un approccio multi- ed inter-disciplinare, ogni step del processo di conoscenza dovrebbe essere definito a priori, con l'obiettivo di ottenere la massima partecipazione e la massima cooperazione delle figure di esperti coinvolti [1].

Nel definire il progetto di rilievo è fondamentale prendere in considerazione i differenti aspetti che possono influenzare il processo di documentazione: lo stato di conservazione dei beni oggetto di analisi, l'accessibilità dei luoghi, l'accuratezza e il livello di dettaglio richiesto per gli elaborati finali, il tempo a disposizione per la fase di acquisizione dei dati e i costi relativi all'intero processo [2-3].

Valutare la possibilità di utilizzo di camere 360° nel campo del rilievo di beni architettonici e del patrimonio paesaggistico è quindi di reale importanza: la velocità di acquisizione, il basso costo della strumentazione e la semplicità di utilizzo della stessa

mirano a rendere questo metodo di rilievo competitivo rispetto alle tecniche tradizionali.

La fotogrammetria sferica multi-immagine per il rilievo di beni architettonici è stata ampiamente descritta ed utilizzata in passato come metodo di approccio analitico all'elaborazione di panorami sferici [4-6]: da un unico punto di vista vengono acquisiti fotogrammi parzialmente ricoprentisi, che vengono poi proiettati su una sfera virtuale a sua volta mappata su un piano, secondo la cosiddetta proiezione azimut-zenit o equirettangolare. [7-8]

La possibilità di gestire ed elaborare immagini sferiche all'interno di software basati su algoritmi di Structure from Motion (SfM) [9] e l'introduzione sul mercato di sensori low-cost per l'acquisizione di fotogrammi sferici hanno portato negli ultimi anni ad un crescente interesse per il tema proposto, ponendo le basi per nuovi tipi di analisi comparative rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo [10].

Lo scopo di questo contributo è quello di testare un approccio multi-sensore applicato al rilievo di un bene storico-culturale, la necropoli di Anghelu Ruju, che presenta una conformazione e una geometria complesse, comprendendo sia spazi esterni indagabili, nel loro complesso, ad ampia scala sia ambienti interni da documentare ad un livello di dettaglio maggiore [11].

L'integrazione di metodi di rilievo sperimentali con quelli già largamente consolidati della aerofotogrammetria con drone e del rilievo con laser scanner terrestre (TLS) (che rappresentano il termine di confronto per la valutazione della precisione ottenibile e dell'affidabilità e completezza dei dati ottenuti dalla fotogrammetria sferica) [12] è quindi volta all'individuazione di una metodologia operativa che consenta di esaltare le caratteristiche di spedività, velocità ed economicità della fotogrammetria eseguita con camere sferiche, coniugando le esigenze di precisione e accuratezza del dato metrico con quelle di qualità e completezza del contenuto grafico.

2 Materiali e metodi

2.1 Il caso studio: la necropoli di Anghelu Ruju

L'area oggetto di studio è la necropoli di Anghelu Ruju, un sito archeologico prenuragico situato nelle vicinanze del comune di Alghero, in provincia di Sassari: il sito, scoperto nel 1903 ed oggetto di successive campagne di scavo fino al 1967, ospita uno dei più grandi e antichi complessi cimiteriali preistorici della Sardegna, composto da una serie di grotte artificiali scavate nella roccia e utilizzato da differenti culture a partire dal Neolitico Recente fino alla prima età del Bronzo (4200-1800 a. C.) [13].

Il rilievo è stato eseguito a febbraio 2022 da STF Survey [14] nell'ambito del progetto "Riorganizzazione di percorsi di visita ai fini dell'accessibilità a diverse categorie di diversamente abili" su commissione di Soprintendenza e Segretariato Regionale MiC Sardegna.

Nello specifico, è stato effettuato un rilievo aerofotogrammetrico mediante un drone DJI Mavic 2 Pro per l'inquadramento generale del complesso e sono stati quindi

rilevati, con laser scanner terrestre FARO Focus^{3D} X330 e camera 360° Ricoh Theta Z1, gli interni di due (Tomba D e Tomba XXbis) delle trentotto tombe ipogee pluricellulari denominate *domus de janas*, composte da ingresso (*dromos*) e sottoambienti scavati nel bancone roccioso di arenaria calcarea.

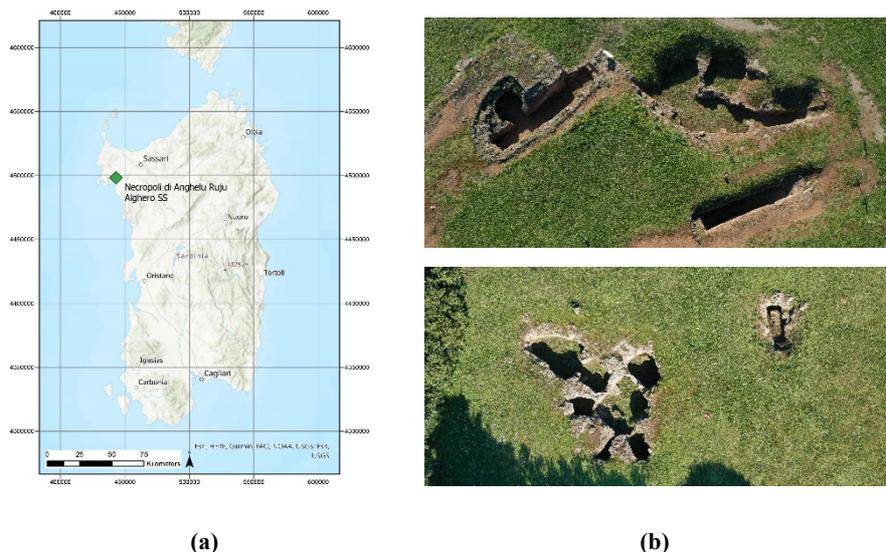


Fig. 1. Collocazione del sito archeologico (ESRI ArcGis World Topographic Map) **(a)**, viste aeree della necropoli **(b)**.

2.2 Acquisizione dei dati

Rilievo GNSS. La determinazione delle coordinate dei punti di rete necessari al controllo metrico ed alla georeferenziazione dei prodotti finali è avvenuta per mezzo di un ricevitore GNSS Leica Viva GS10 equipaggiato con antenna Leica AS10.

Inizialmente lo strumento è stato impiegato in modalità statica, registrando dati ogni 15 secondi in maniera continua per 6 ore; successivamente, al fine di ottimizzare i tempi di lavoro, si è adoperato il posizionamento differenziale NRTK per determinare le coordinate di 88 punti di controllo all'interno del sistema di riferimento RDN2008 / UTM zone 32N. Sia per la determinazione delle baseline in *postprocessing*, sia per la ricezione delle correzioni in *real-time*, ci si è avvalsi della rete di stazioni permanenti SmartNet Italpos.

Rilievo aerofotogrammetrico. Le prese fotogrammetriche aeree sono state effettuate per mezzo di un drone DJI Mavic 2 PRO, equipaggiato con fotocamera Hasselblad L1D-20c con sensore 1" CMOS da 20 MP.

Sono state acquisite 468 immagini, sia nadirali che inclinate (con asse ottico della camera a 45° rispetto al piano orizzontale) ad una quota di volo costante di circa 26 metri, ottenendo una risoluzione del pixel al suolo (GSD) di 6 mm.

La configurazione geometrica dello schema di presa viene riportata in Fig. 2.

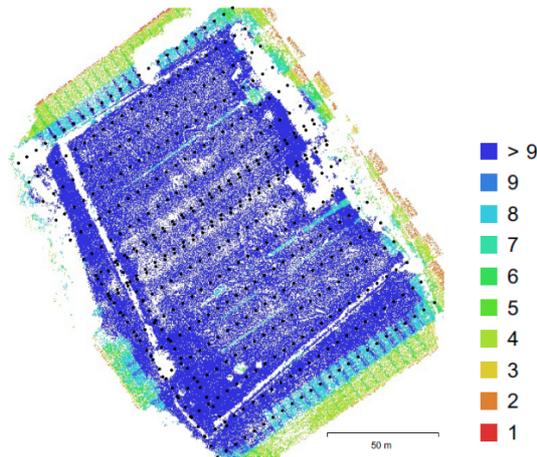


Fig. 2. Posizione delle camere e sovrapposizione dei fotogrammi.

Rilievo TLS. Le acquisizioni con laser scanner terrestre, utilizzate come termine di confronto (*ground truth*) per validare i dati provenienti dalla fotogrammetria sferica, sono state effettuate mediante un laser scanner FARO Focus^{3D} X330 (Tab. 1).

Table 1. Principali specifiche tecniche Faro Focus^{3D} X330

	Range	Velocità di acquisizione	Errore sulla distanza	FoV (orizz. / vert.)
Faro Focus^{3D} X330	0.6 – 330 m	max 976,000 punti/secondo	± 2 mm	360° / 300°

Sono stati acquisiti due differenti set di scansioni, uno per ognuna delle due tombe analizzate, contenenti dati relativi sia agli ambienti interni ipogei sia alla conformazione esterna del terreno nelle immediate vicinanze delle due grotte pluricellulari (Tab. 2).

Table 2. Numero di scansioni e parametri impostati in fase di acquisizione

	N° scansioni		Risoluzione	Qualità
Tomba D	11	spazi esterni	1 pt/6 mm a 10 m	4x
		spazi interni	1 pt/7.5 mm a 10 m	
Tomba XXbis	11	spazi esterni	1 pt/6 mm a 10 m	4x
		spazi interni	1 pt/7.5 mm a 10 m	

Rilievo con camera 360°. La camera utilizzata è la Ricoh Theta Z1 (Tab. 3.), provvista di due lenti fisheye che consentono l’acquisizione dell’ambiente a 360°: il dato di output fornito dalla camera è un’immagine panoramica in proiezione equirettangolare (Fig. 3) ottenuta dallo *stitching* unione delle immagini acquisite dalle due lenti.

Lo *stitching* di immagini è una tecnica che permette di combinare molteplici fotografie per ottenere un’unica immagine panoramica [15-16]: differenti software supportano questo tipo di elaborazione e alcune fotocamere, come ad esempio quella utilizzata per questa analisi, compiono processi di *stitching* in automatico già in fase di acquisizione dell’immagine.

Table 3. Principali specifiche tecniche Ricoh Theta Z1

	Sensore	Dimensioni	Risoluzione immagine	Risoluzione video
Ricoh Theta Z1	CMOS 1” (13.2x8.8mm)	48x133x30 mm	23 MP (6720x3360 px)	4K (30fps)



Fig. 3. Immagine panoramica dell’ingresso della Tomba XXbis.

Sono stati effettuati due set di prese composti rispettivamente da 46 immagini per la Tomba D e 76 immagini per la Tomba XXbis: lo schema di presa (Fig. 4), analogo per le due tombe, prevede l’acquisizione di fotogrammi sia all’esterno che all’interno degli ambienti ipogei, in modo da poter ottenere un modello fotogrammetrico il più completo possibile; per ogni “stanza” delle due grotte sono state effettuate almeno tre prese, andando a densificare il numero di immagini laddove ce ne fosse più bisogno (passaggi tra una stanza e l’altra, spazi scarsamente illuminati).

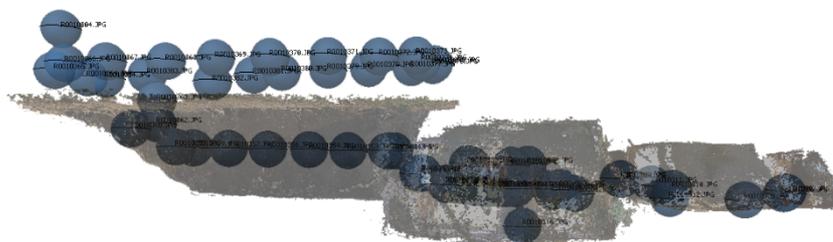


Fig. 4. Schema di acquisizione dei fotogrammi sferici.

2.3 Elaborazione dei dati

Rilievo aerofotogrammetrico. Le prese fotogrammetriche sono state elaborate seguendo il consueto workflow previsto dall'approccio Structure from Motion (SfM), per mezzo del software Agisoft Metashape. I risultati dell'orientamento assoluto del modello fotogrammetrico sui GCPs e CPs sono riportati in Tab. 4.

Table 4. Principali risultati ottenuti dall'elaborazione dei fotogrammi aerei.

N° immagini	N° GCPs	RMSe (GCPs)	N° CPs	RMSe (CPs)
468	8	0.047 m	4	0.056 m

Il principale elaborato grafico derivato dal rilievo aerofotogrammetrico consiste in un'ortofoto ad alta risoluzione (Fig. 5) georeferenziata nel sistema cartografico RDN2008 / UTM zone 32N (EPSG:7791) appartenente alla realizzazione ETRF2000 epoca 2008 del Sistema di Riferimento Geodetico ETRS89 [17]. La realizzazione di un elaborato raster georeferenziato permette il suo immediato utilizzo (sia in termini di visualizzazione che di successive indagini ed elaborazioni) all'interno delle consolidate piattaforme GIS (Geographic Information System).

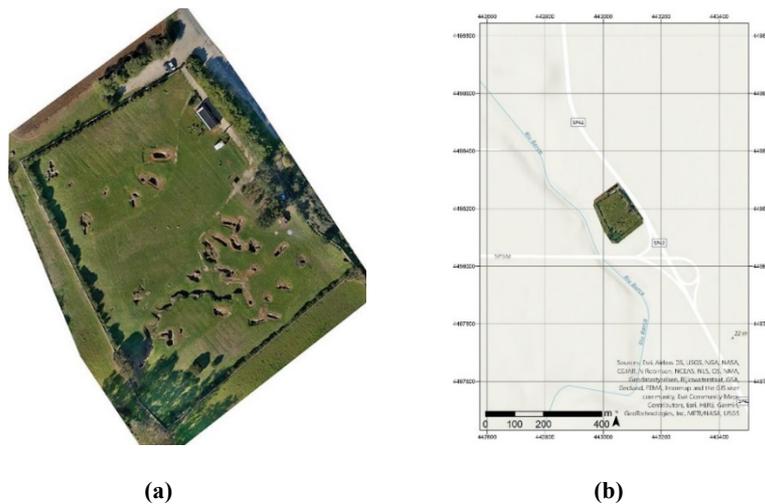


Fig. 5. Ortofoto relativa all'intera area di pertinenza della necropoli (a) e visualizzazione dell'ortofoto all'interno del software ESRI ArcGis (b).

Rilievo TLS. Per l'orientamento delle scansioni eseguite con laser scanner terrestre è stato utilizzato il software Faro SCENE. È stato adottato un approccio che prevede una georeferenziazione in due fasi successive: un primo orientamento nuvola su nuvola, ottimizzato con algoritmo ICP (Iterative Closest Point), ha permesso la registrazione di tutte le scansioni in un unico sistema di riferimento; successivamente, l'intero

set di dati è stato georeferenziato sulla base dei *control points* (CPs) rilevati con la strumentazione GNSS.

I risultati ottenuti in fase di orientamento delle nuvole laser sono riportati in Tab. 5.

Table 5. Risultati ottenuti dalla georeferenziazione delle scansioni TLS

	N° scansioni	Residui orientamento nuvola su nuvola	Residui georeferenziazione su CPs
Tomba D	11	0.006 m	0.022 m
Tomba XXbis	11	0.005 m	0.025 m

Rilievo con camera 360°. Anche per quanto riguarda i set di dati derivanti dalla Ricoh Theta Z1, l'elaborazione è stata effettuata all'interno del software Agisoft Metashape, che ha implementato negli ultimi anni la possibilità di utilizzo di immagini sferiche per la generazione di modelli fotogrammetrici.

La camera utilizzata permette di salvare i file di immagine in due differenti formati: un primo formato non compresso (.dng) che prevede come dato di output due differenti immagini per ogni acquisizione, una relativa alla prima lente fisheye e una alla seconda lente; i files del secondo formato (.jpg) derivano dalla generazione di un'unica immagine panoramica, la cui fase di *stitching* avviene direttamente all'interno del dispositivo. In questo caso si è deciso di utilizzare le immagini già elaborate dalla camera, testando così oltre all'affidabilità metrica e geometrica del prodotto fotogrammetrico finale, anche la precisione sullo *stitching* della camera stessa; tale scelta di utilizzo è stata dettata anche dalle caratteristiche di speditività dichiarate nell'esecuzione del rilievo del bene culturale in esame.

Un approccio di *self-calibration* è stato adottato per la stima dei parametri di orientamento interno (I.O.) della camera testata ed è stato quindi seguito l'abituale schema operativo di elaborazione per l'ottenimento dei modelli 3D (nuvole di punti e relativi modelli poligonali) (Fig. 6).



Fig. 6. Modelli poligonali texturizzati ottenuti dall'elaborazione dei panorami sferici, vista dell'ingresso e dell'esterno della Tomba XXbis (a) e del complesso delle stanze della Tomba D (b).

L'orientamento assoluto dei modelli fotogrammetrici è avvenuto sulla base di *control points* (CPs) individuati sulle nuvole TLS: il sistema di riferimento adottato è quindi univoco per ognuno degli elaborati prodotti dalle diverse tecniche di rilievo utilizzate. I risultati ottenuti dalle elaborazioni sono riportati in Tab. 6.

Table 6. Risultati ottenuti dall'orientamento dei modelli fotogrammetrici delle due tombe.

	N° immagini	N° immagini correttamente orientate	N° CPs	RMSe (CPs)
Tomba D	46	46	8	0.021 m
Tomba XXbis	76	74	10	0.019 m

3 Analisi e confronto dei dati

Le successive analisi presentate fanno riferimento al confronto quantitativo e qualitativo tra i modelli fotogrammetrici ottenuti dall'elaborazione delle immagini sferiche e le nuvole di punti derivanti dal rilievo laser scanning (*ground truth*): verranno quindi presi in considerazione solo i dati che riguardano in modo specifico le Tombe D e XXbis, e non l'intera area interessata dal sito archeologico.

L'obiettivo è quello di validare la qualità e la fruibilità dei modelli 3D fotogrammetrici andando ad indagare la precisione ottenibile dalla ricostruzione geometrica, l'affidabilità e l'accuratezza metrica, la qualità e la completezza del dato.

3.1 Confronto quantitativo

Per la gestione e l'analisi delle diverse nuvole di punti è stato utilizzato il software open source CloudCompare. Le analisi sono state effettuate sulle nuvole di punti derivanti dalle due alternative metodologiche menzionate già georeferenziate nel medesimo sistema di riferimento (RDN2008 / UTM zone 32N).

L'allineamento tra le nuvole di punti è stato ottimizzato mediante algoritmo ICP (Iterative Closest Point) che, prendendo in esame un sottocampione casuale delle nuvole di punti, ad ogni iterazione, migliora la precisione dell'allineamento tra le stesse: il metodo ICP utilizza una funzione di errore per ridurre al minimo la somma delle distanze al quadrato tra le due rappresentazioni tridimensionali dello stesso oggetto (i.e. le due nuvole di punti) [18-19].

Il confronto prevede l'analisi della distanza *cloud to cloud* (C2C), basata sull'algoritmo di Hausdorff, che va a calcolare la distanza media che intercorre tra i punti appartenenti alle due differenti rappresentazioni 3D (Fig. 7) [20].

I risultati ottenuti vengono riportati in Tab. 7 e discussi nella sezione 4. *Discussione dei risultati e conclusioni.*

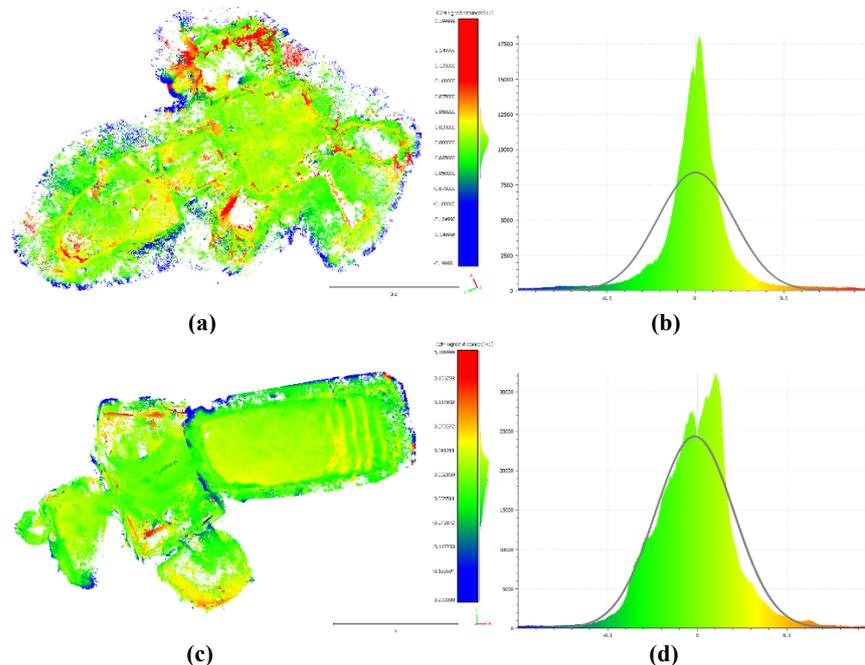


Fig. 7. Rappresentazione in falsi colori delle distanze *cloud to cloud* calcolate rispettivamente per la Tomba D (a) e per la Tomba XXbis (c) e relativi istogrammi di distribuzione dei valori calcolati (b, d).

Table 7. Risultati ottenuti dal confronto *cloud to cloud* (C2C) tra le nuvole fotogrammetriche e le nuvole TLS.

	Range di indagine	Distanza media	SQM
Tomba D	-20 cm/+20 cm	0.0005 m	0.036 m
Tomba XXbis	-20 cm/+20 cm	0.0025 m	0.041 m

3.2 Confronto qualitativo

Le considerazioni a livello qualitativo delle analisi svolte sono strettamente legate al livello di dettaglio (LoD), il quale viene influenzato dal livello di rumore e dalla densità e risoluzione del modello.

Una prima serie di valutazioni qualitative è stata condotta sulla completezza della ricostruzione dei modelli fotogrammetrici. Il livello di completezza dei dati è strettamente collegato alla fase di orientamento esterno relativo (stima della posizione reciproca delle camere ed estrazione dei *tie points*): nel caso della Tomba D la nuvola di punti risulta completa in tutte le sue parti, ad eccezione di piccole zone mancanti di

dato sulla pavimentazione di alcune delle stanze; la nuvola relativa alla Tomba XXbis presenta una mancanza di informazioni in un'area relativa a circa un quarto dell'ultimo ambiente ipogeo, zona in cui non è stato possibile ottenere un corretto orientamento di due dei fotogrammi che la coinvolgono.

La rumorosità di entrambe le nuvole è abbastanza elevata: la presenza di outliers è costante e presente su tutte le superfici rilevate.

Un'ultima analisi è stata infine condotta rispettivamente alla densità dei modelli ottenuti (Tab. 8). Tale parametro di valutazione, che non influenza le indagini quantitative relative alla precisione e all'accuratezza delle nuvole fotogrammetriche, è fondamentale per indagare le caratteristiche di fruibilità del prodotto finale: al livello di densità dei punti appartenenti alla nuvola è correlata la riconoscibilità dei dettagli architettonici appartenenti alle superfici, che definisce quindi il livello di dettaglio (LoD) sia della nuvola stessa che degli elaborati 2D e 3D derivati.

Table 8. Valori di densità al m^2 , calcolati mediante il software CloudCompare, per le nuvole relative alle due tombe indagate.

	Tomba D		Tomba XXbis	
	Nuvola TLS	Nuvola camera 360°	Nuvola TLS	Nuvola camera 360°
Densità [pt/m²]	273,313.67	77,662.37	301,468.12	68,135.91

4 Discussione dei risultati e conclusioni

La ricerca descritta in questo contributo mira a valutare la possibilità di utilizzo di camere 360° per il rilievo metrico del patrimonio storico-culturale, prendendo in analisi come caso studio il complesso di grotte artificiali della necropoli di Anghelu Ruju.

Considerando un approccio multi-sensore e multi-scala alla documentazione dei beni architettonici e paesaggistici si è deciso di testare la capacità di integrazione dei prodotti derivanti dalla fotogrammetria sferica con quelli propri della fotogrammetria aerea e del rilievo laser scanning, valutandone precisione, accuratezza e qualità del dato.

Dalla valutazione critica del processo di acquisizione ed elaborazione dei panorami sferici emerge come la metodologia operativa proposta riesca, in modo sempre maggiore nel corso degli ultimi anni, a competere con le tecniche tradizionali di rilievo: la notevole riduzione dei tempi di acquisizione rispetto alla fotogrammetria tradizionale e al rilievo con laser scanner terrestre (TLS), il costo ridotto della strumentazione necessaria alla documentazione, la possibilità di accesso in spazi di dimensioni ridotte e la componente immersiva propria delle immagini a 360° sono punti di forza da tenere in considerazione nel percorso di analisi di questa tecnica di rilievo [21].

Per quanto riguarda i risultati ottenuti dal processo fotogrammetrico adottato, una prima considerazione è da effettuarsi sui valori dello scarto quadratico medio (SQM) ottenuti dall'orientamento della nuvola di punti sui *control points* (CPs) individuati: sono stati riscontrati valori di circa 2 cm per i modelli di entrambe le tombe oggetto di

studio, risultato che rende il prodotto utilizzabile per un rilievo alla scala nominale di rappresentazione 1:100.

Il confronto tridimensionale, condotto adottando come termine di riferimento (*ground truth*) le nuvole di punti ottenute dalle scansioni effettuate con laser scanner terrestre (TLS), ha prodotto risultati finali in linea con quelli attesi: una prima analisi è stata condotta valutando la distanza *cloud to cloud* (C2C) tra le nuvole fotogrammetriche e le nuvole TLS orientate nel medesimo sistema di riferimento solo sulla base dei *control points* (CPs), confronto che ha evidenziato un leggero sbandamento complessivo di entrambi i modelli indagati; successivamente, l'allineamento è stato ottimizzato e reso più robusto mediante algoritmo ICP e il successivo calcolo della distanza *cloud to cloud* (C2C), di cui il workflow è riportato nella sezione *3.1 Confronto quantitativo*, ha restituito valori dello scarto quadratico medio (SQM) pari a 0.036 m per la Tomba D e 0.041m per la Tomba XXbis, che permettono una possibilità di rappresentazione degli elaborati finali 2D e 3D ad una scala nominale che non può scendere sotto a 1:200.

Nell'ambito di un rilievo speditivo e sperimentale volto alla conoscenza, alla gestione e conservazione e alla fruizione del patrimonio costruito si è resa fondamentale una riflessione anche sugli impieghi successivi che i prodotti delle camere sferiche possono avere [22-23]. Una delle potenzialità individuate nel metodo di documentazione proposto è la possibilità di andare oltre alle classiche rappresentazioni bidimensionali dell'architettura e del territorio: le nuvole di punti e i panorami sferici generati dalle camere 360° rappresentano un ottimo supporto di partenza alla creazione di modelli HBIM utilizzabili per la realizzazione di *virtual tour* e per la condivisione e la trasmissione di informazioni sui beni culturali analizzati, sia dal punto di vista metrico che semantico.

Riferimenti bibliografici

1. Yang, X.; Grussenmeyer, P.; Koehl, M.; Macher, H.; Murtiyoso, A.; Landes, T. Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information techniques. *J. Cult. Herit.* **2020**, *46*, 350–360.
2. Tobiasz, A.; Markiewicz, J.; Lapinski, S.; Nickel, J.; Kot, P.; Muradov, M. Review of Methods for Documentation, Management, and Sustainability of Cultural Heritage. Case Study: Museum of King Jan III's Palace at Wilanów. *Sustainability* **2019**, *11*, 7046.
3. Georgopoulos, A. Data Acquisition for the Geometric Documentation of Cultural Heritage. In *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, **2017**; pp. 29–73.
4. Fangi, G. The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey. In *Cipa Heritage Documentation: Best Practices and Applications*; CIPA: Valencia, Spain, **2007**.
5. Barazzetti, L.; Fangi, G.; Remondino, F.; Scaioni, M. Automation in Multi-Image Spherical Photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions. *Vast* **2010**, 2312.
6. Fangi, G. Towards an easier orientation for spherical photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. ISPRS Arch.* **2015**, *40*, 279–283.
7. Fangi, G. La fotogrammetria sferica, una nuova tecnica per il rilievo dei vicini. In *Archeomatica*, **2012**, vol. 1, n. 2, pp. 6-10.

8. Fangi, G. Further developments of the spherical photogrammetry for cultural heritage. In: XXII International Committee for Cultural Heritage (CIPA), **2009**, Kyoto, Japan.
9. Pagani, A.; Stricker, D. "Structure from Motion using full spherical panoramic cameras," 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), **2011**, pp. 375-382, doi: 10.1109/ICCVW.2011.6130266.
10. Gottardi, C., Guerra, F., «Spherical images for Cultural Heritage: survey and documentation with the Nikon KM360», In: *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2, **2018**.
11. Teppati Losè, L., Chiabrando, F., Giulio Tonolo, F. Documentation of Complex Environments Using 360° Cameras. The Santa Marta Belltower in Montanaro. *Remote Sensing* **13**, **2021**, 3633. <https://doi.org/10.3390/rs13183633>
12. Mandelli, A.; Fassi, F.; Perfetti, L.; Polari, C. Testing different survey techniques to model architectonic narrow spaces. In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—ISPRS Archives, Ottawa, ON, Canada, 28 August–1 September **2017**; Volume 42, pp. 505–511.
13. Necropoli Anghelu Ruju | Alghero, Sito ufficiale dell'area archeologica di Anghelu Ruju, Alghero (Sardegna), <https://necropoliangheluruju.it/>, ultimo accesso 2022/05/10
14. STF land and sea survey Homepage, <http://www.stf-survey.com/wordpress/>, ultimo accesso 2022/05/06
15. Szeliski, R.; Shum, H.-Y. Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques—SIGGRAPH '97; ACM Press: New York, NY, USA, **1997**; pp. 251–258.
16. Fangi, G., Investigation on the suitability of the spherical panoramas by Realviz Stitcher for metric purposes In: *ISPRS Archives of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences Vol. 36(5)*, **2006**
17. IGM Direzione Geodetica, Nota per il corretto utilizzo dei Sistemi Geodetici di riferimento all'interno dei software GIS aggiornata a gennaio 2022, <https://www.igmi.org/>, ultimo accesso 2022/05/12
18. He, Y., Liang, B., Yang, J., Li, S., & He, J. (2017). An iterative closest points algorithm for registration of 3D laser scanner point clouds with geometric features. *Sensors*, *17*(8), 1862.
19. Ahmad Fuad, N., Yusoff, A.R., Ismail, Z., Majid, Z., 2018. Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-4/W9, 11–21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018>
20. A. A. Taha and A. Hanbury, "An Efficient Algorithm for Calculating the Exact Hausdorff Distance," in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 37, no. 11, pp. 2153-2163, 1 Nov. **2015**, doi: 10.1109/TPAMI.2015.2408351.
21. Kwiatek, K., Tokarczyk, R., 2015. Immersive photogrammetry in 3D modelling. *geom* *9*, 51. <https://doi.org/10.7494/geom.2015.9.2.51>
22. Banfi, F., Previtali, M., Stanga, C., Brumana, R., 2019. A layered-web interface based on hbim and 360° panoramas for historical, material and geometric analysis. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W9, 73–80. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-73-2019>
23. Quattrini, R., Malinverni, E.S., Clini, P., Nespeca, R., Orlietti, E., 2015. From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-5/W4, 367–374. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-367-2015>