

RILIEVO DI GIARDINI STORICI: FOTOGRAMMETRIA MULTI-CAMERA E LASER SCANNER PORTATILE A CONFRONTO

L. Perfetti ^a, F. Fassi ^b, G. P. M. Vassena ^a

^a DICATAM, Dip. di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e Matematica, Università degli Studi di Brescia, (luca.perfetti, giorgio.vassena)@unibs.it

^b ABC, Dip. Di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, francesco.fassi@polimi.it

Parole chiave: Fotogrammetria, Multi-camera, Laser scanner portatile, Nuvola di punti, Giardini storici

Keywords: Photogrammetry, Multi-camera, Handheld Laser Scanner, Point Cloud, Historical Gardens

Abstract

Il presente lavoro presenta un'indagine sulla caratterizzazione dei giardini storici confrontando due metodologie di rilievo 3D. In questo contesto, gli approcci che impiegano laser scanner statici sono considerati i più accurati, mentre i laser scanner portatili sono considerati promettenti grazie alla loro estrema produttività. Meno comune è l'uso della fotogrammetria. Questo articolo confronta due approcci basati sull'uso di un Mobile Mapping System (MMS) indossabile e sull'uso di uno strumento fotogrammetrico multi-camera. Il confronto mira a valutare l'applicabilità delle due tecniche in questo campo, valutandone vantaggi e svantaggi nel rilievo di un giardino storico e nell'estrazione di informazioni riguardo le alberature, come il DBH (Diameter at Breast Height) e l'impronta della chioma. Abbiamo confrontato la praticità delle operazioni di rilievo e di elaborazione, nonché la qualità e le caratteristiche delle nuvole di punti ottenute. Entrambi i sistemi hanno prodotto una rappresentazione densa del terreno. Il rilievo multi-camera è risultato più definito grazie al minor rumore della nuvola di punti, ma incompleto nella definizione delle chiome degli alberi. Il DBH dei tronchi degli alberi può essere estratto con entrambi i sistemi, ad eccezione dei tronchi più sottili e di diametro più fine rilevati dall'approccio MMS, ma non sempre dalla multi-camera. L'approccio MMS si è rivelato più efficace grazie al minor tempo di rilievo necessario per coprire un'area uguale e al fatto che il solo rilievo MMS è sufficiente per la descrizione geometrica degli alberi. Al contrario, l'approccio multi-camera non può evitare l'integrazione con un rilievo aereo per la ricostruzione della chioma.

This paper presents an investigation into the characterization of historic gardens by comparing two 3D survey methodologies. In this context, approaches employing static laser scanners are considered the most accurate, while portable laser scanners are considered promising due to their extreme productivity. Less common is the use of photogrammetry. This paper compares two approaches based on the use of a wearable Mobile Mapping System (MMS) and the use of a multi-camera photogrammetric prototype. The comparison aims to assess the applicability of the two techniques in this field, evaluating their advantages and disadvantages in surveying a historic garden and extracting information regarding trees, such as DBH (Diameter at Breast Height) and canopy footprint. We compared the practicality of surveying and processing operations and the quality and characteristics of the point clouds obtained. Both systems produced a dense representation of the terrain. The multi-camera survey was more defined due to less point cloud noise, but incomplete in the definition of tree crowns. DBH of tree trunks could be extracted with both systems, except for thinner and finer diameter trunks detected by the MMS approach, but not always by the multi-camera. The MMS approach proved to be more effective due to the shorter survey time required to cover an equal area and the fact that the MMS survey alone is sufficient for the geometric description of trees. In contrast, the multi-camera approach cannot avoid integration with an aerial survey for canopy reconstruction.

1. Introduzione

I giardini storici fanno parte del patrimonio culturale e sono presenti nel centro storico di molte città. Oggi, dopo essere stati chiusi al pubblico come proprietà privata per gran parte della loro storia, svolgono anche una funzione sociale come parchi pubblici e spazi di aggregazione nei centri storici. I giardini storici richiedono una manutenzione continua, spesso interventi urgenti di conservazione e valorizzazione. Tutti questi interventi necessitano prima di un processo conoscitivo preliminare a cui contribuisce il rilievo geometrico, ovvero la descrizione geometrica e la successiva restituzione grafica del sito in questione. Da questo processo deriva la definizione dei dislivelli, dei percorsi pedonali, degli arredi del parco, delle piante, della vegetazione e delle loro relazioni. Questo processo confluisce tipicamente nella redazione di disegni tecnici come la restituzione 2D: piante, sezioni, prospetti, ortofoto, o anche in

database informativi GIS (Geographic Information System) e prodotti 3D (Cazzani et al., 2019; Malinverni et al., 2019) che possono essere utilizzati per la manutenzione periodica a lungo termine del giardino. A tal fine, assumono un ruolo centrale la raccolta di misure, il rilievo strumentale e le indagini finalizzate alla corretta annotazione degli elementi di interesse, come le essenze presenti nel giardino. La stazione totale è lo strumento tipicamente utilizzato in questa applicazione per redigere la planimetria e creare il modello digitale del terreno. Più recentemente, viene impiegata anche strumentazione in grado di acquisire nuvole di punti 3D. Trovano quindi grande impiego i laser scanner terrestri (TLS), la fotogrammetria e i Mobile Mapping System (MMS). Questi metodi consentono di descrivere in modo completo anche le geometrie più complesse del terreno e di estrarre specifiche metriche per descrivere le alberature, quali: il DBH (Diameter at Breast Height), l'altezza del tronco e l'ampiezza della chioma, necessarie per catalogare

ed analizzare gli alberi anche nel contesto forestale. Gli approcci che impiegano i TLS sono considerati i più accurati dalla letteratura per la stima di tali metriche e sono, quindi, i più utilizzati per acquisire dati di riferimento affidabili con cui confrontare altri approcci. D'altra parte, gli MMS sono oggi gli strumenti più promettenti per questa applicazione, grazie alla loro estrema produttività e alla completezza della nuvola di punti 3D che sono in grado di produrre. Inoltre, l'accuratezza richiesta per questa applicazione può essere soddisfatta anche da MMS specificatamente progettati per l'utilizzo in ambienti interni, i quali hanno il pregio di essere più maneggevoli ma il difetto di impiegare sensori LiDAR (Light Detection And Ranging) caratterizzati da alti livelli di rumore (2-3 cm). In effetti, la letteratura recente è ricca di analisi sull'uso degli MMS per il rilievo 3D di giardini e parchi storici e per applicazioni di inventario forestale. In ambito forestale, Hyypä et al. (2020) hanno presentato un confronto tra MMS multipiattaforma: uno zaino auto progettato, ZEB Horizon prodotto da Geoslam e due piattaforme UAV (Unmanned Aerial Vehicle); mentre Gollob et al. (2020) hanno testato l'estrazione di DBH di diversi diametri dai dati di ZEB Horizon. Nel contesto dei giardini storici, Pérez-Martín et al. (2021) hanno testato l'MMS portatile ZEB Revo per l'estrazione di DBH; Hess & Ferreyra (2021) hanno presentato un'applicazione di caratterizzazione dei giardini utilizzando lo ZEB Horizon; Del Duca & Machado (2023) hanno confrontato le prestazioni del Leica BLK2GO rispetto a un TLS. Altri autori hanno studiato l'uso di un approccio fotogrammetrico basato su immagini terrestri per l'estrazione di modelli del fusto e DBH: Liang et al. (2014) hanno testato la fotogrammetria per il rilievo di parcelle forestali, riportando una capacità limitata nella mappatura di alberi di piccole dimensioni; Forsman et al. (2016) hanno proposto l'uso di un sistema multi-camera riportando tempi di acquisizione più rapidi ma risultati inferiori rispetto al TLS; Mokros et al. (2021), in un test di confronto tra strumenti a basso costo per l'inventario forestale, hanno testato un approccio multi-camera riportando tempi di acquisizione più brevi ma non la migliore accuratezza; infine, Murtiyoso et al. (2022) hanno testato la fotogrammetria sferica per la ricostruzione dei fusti. Tutti i rilievi basati su immagini terrestri mostrano una ricostruzione densa dei fusti degli alberi vicino al suolo. Al contrario, la parte superiore degli alberi, le foglie e i rami non vengono ricostruiti.

1.1 Obiettivo dell'articolo

In questo contesto, il presente lavoro presenta un'indagine sulla caratterizzazione dei giardini storici confrontando due metodologie di rilievo tridimensionale: l'uso di un sistema MMS indoor indossabile e di uno strumento fotogrammetrico multi-camera. Il confronto mira a valutare l'applicabilità delle due tecniche in questo campo, valutandone vantaggi e svantaggi. Si concentra su due diversi aspetti: (i) l'ottenimento dei dati, ossia le caratteristiche della fase di rilievo geometrico in situ e della fase di elaborazione dei dati; e (ii) la qualità dei dati, ossia le caratteristiche delle nuvole di punti e delle informazioni estratte. Per quanto riguarda il primo aspetto, vengono evidenziate la praticità e la velocità delle operazioni e i problemi incontrati. In relazione al secondo aspetto, invece, viene approfondito il confronto qualitativo delle nuvole di punti ottenute, indagando sulla completezza delle diverse geometrie acquisite, siano esse strutture architettoniche o alberi. L'indagine qualitativa è stata condotta attraverso il confronto visivo di porzioni estratte delle nuvole di punti e di sezioni orizzontali e trasversali degli alberi e del terreno.

2. Caso studio e strumentazione utilizzata

Il caso studio in cui è stato condotto il test è il giardino storico di Villa Burba, una villa nobiliare situata nel comune di Rho (provincia di Milano). Il giardino ha una pianta rettangolare e misura circa 160 m per 100 m; al suo interno sono presenti arbusti e alberi di varie dimensioni, tra cui pregevoli alberi secolari, un piccolo bacino d'acqua e alcune strutture architettoniche sia storiche sia moderne (Figura 1). L'ambiente del giardino risponde alle esigenze del test consentendo di confrontare le metodologie di rilievo fotogrammetrico MMS e multi-camera in termini di tempo necessario per ottenere il rilievo geometrico dell'intero parco e in termini di descrizione tridimensionale delle strutture architettoniche e degli alberi. Gli strumenti utilizzati sono: il laser scanner portatile Heron MS Twin Color (di seguito chiamato Heron Backpack - Figura 2), prodotto da Gexcel srl, e un prototipo del sistema multi-camera fotogrammetrico portatile Ant3D (Figura 3), sviluppato nell'ambito di un'attività di ricerca di dottorato da 3DSurveyGroup (Perfetti, 2022; Perfetti et al. 2022a; Perfetti et al. 2022b). Entrambi gli strumenti consentono di effettuare rilievi in movimento e vengono qui utilizzati al di fuori del loro campo di applicazione principale. Heron Backpack è uno strumento sviluppato per l'uso in interni o in ambienti caratterizzati da una forte geometria, mentre Ant3D è uno strumento progettato per il rilievo di spazi stretti simili a tunnel. Al termine delle fasi di acquisizione ed elaborazione, entrambi gli strumenti producono nuvole di punti colorate. Un precedente test tra questi due strumenti è stato eseguito da Marotta et al. (2022b), dove gli oggetti di confronto erano la deriva strumentale in lunghe acquisizioni non vincolate e la qualità dei dati acquisiti in termini di completezza, intervallo di misura e rumore della nuvola di punti. La presente indagine mira ad ampliare il confronto qualitativo.



Figura 1. Fotografie del giardino storico di Villa Burba.

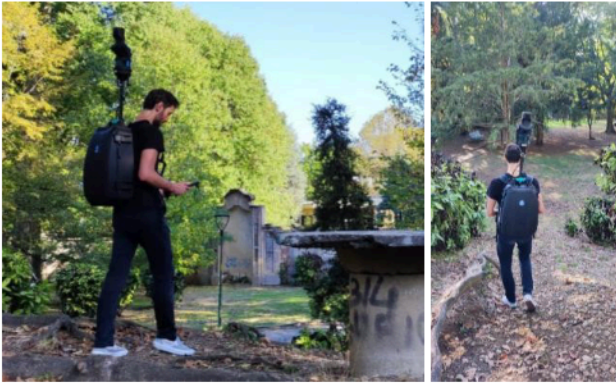


Figura 2. Immagini delle attività di rilievo svolte con Heron Backpack nel Giardino di Villa Burba.



Figura 3. Attività di rilievo con il sistema multi-camera Ant3D e un'immagine di dettaglio dello strumento.

2.1 Heron MS Twin – Mobile Mapping System

Heron Backpack consiste in uno zaino che ospita i sensori dello strumento e un dispositivo di interfaccia utente: tablet o PDA (Personal Digital Assistant). Lo zaino ospita il dispositivo di misura, l'unità di controllo, l'unità inerziale e una telecamera panoramica per la colorazione delle nuvole di punti. Il dispositivo di misura è costituito da due sensori Velodyne Puck LITE da 16 linee ciascuno, il primo posizionato orizzontalmente e il secondo con un angolo di 45° (Figura 2). L'acquisizione avviene mentre si cammina nell'ambiente da rilevare. Durante l'elaborazione dei dati, la traiettoria dello strumento viene ricostruita in base alle informazioni acquisite dal sensore inerziale e in base all'elaborazione SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) svolta nel software proprietario Heron Desktop. La precisione locale nominale è di 3 cm a causa del rumore dei sensori Velodyne. L'accuratezza globale, invece, è funzione della presenza o meno di vincoli come i punti di controllo a terra (GCP – Ground Control Point), della lunghezza dell'acquisizione e della geometria dell'ambiente circostante (Marotta et al. 2022a).

2.2 Ant3D – Sistema multi-camera

Ant3D (Figura 3) è un prototipo funzionante di uno strumento di misura sviluppato per il rilievo efficace e robusto di spazi stretti e tortuosi. Lo strumento è composto da un dispositivo portatile e da uno zaino. Il dispositivo portatile ospita cinque telecamere Flir BFS 50S5 con un sensore a colori da 5 megapixel da 2/3 pollici (2448 x 2048 pixel, passo tra pixel di 3,45 μm). Ogni telecamera monta un'ottica fisheye di tipo equidistante con un campo visivo di 190°. Le telecamere sono disposte lungo i lati di un rettangolo rivolte verso l'esterno e

distanziate da una base di presa che varia da 10 cm a circa 30 cm. Il sistema offre una visione emisferica completa, ad esclusione del lato occupato dall'operatore. Sul dispositivo portatile sono alloggiati tre illuminatori a LED e un monitor. Lo zaino ospita la batteria e l'unità di controllo del dispositivo. Il rilievo avviene tramite l'acquisizione sincronizzata e temporizzata delle immagini; l'operatore imposta la frequenza dei fotogrammi prima di avviare l'acquisizione. Il sistema è privo di sensori inerziali e di posizionamento. Pertanto, la ricostruzione tridimensionale si basa sull'elaborazione delle immagini acquisite mediante pipeline Structure from Motion (SfM) e multi-view stereo. In questo modo si ottiene una nuvola di punti dell'ambiente attraversato durante il rilievo. In Perfetti et al. (2022a, 2022b), vengono illustrati due test di accuratezza del sistema multi-camera nel rilievo di spazi angusti senza vincoli GCP, mentre Marotta et al. (2022b) confrontano il sistema multi-camera e Heron Backpack lungo un sentiero di montagna.

3. Acquisizione ed elaborazione dei dati

I due strumenti a confronto sono stati utilizzati insieme ad altra strumentazione per implementare una procedura di rilievo completa e realmente utilizzabile, che include un appoggio topografico per l'acquisizione dei GCP. In questo modo sono stati confrontati due approcci al rilievo completo e non solo le capacità dei singoli sensori. Ciò ha permesso anche di mitigare gli svantaggi principali già noti dei due strumenti: ad esempio, l'elevato errore di deriva delle acquisizioni non vincolate di Heron Backpack e lo scarso campo di misura della multi-camera Ant3D (Marotta et al. 2022b). In particolare, sono stati condotti un appoggio topografico, un rilievo fotogrammetrico UAV e un rilievo fotogrammetrico terrestre con fotocamera DSLR (Digital Single Lens Reflex). L'appoggio topografico integra entrambi gli approcci, mentre i rilievi UAV e DSLR compensano per il ridotto raggio di acquisizione della multi-camera. Pertanto, i due approcci qui confrontati per la caratterizzazione del giardino storico prevedono l'uso dei seguenti strumenti:

- Heron Backpack, Stazione totale
- Multicamera Ant3D, Stazione totale, UAV, DSLR

3.1 Appoggio topografico

È stata materializzata una rete topografica provvisoria composta da 5 vertici, che si estendeva per tutto il giardino della villa. Da questa rete sono state misurate le coordinate di 53 GCP materializzati sul terreno. I GCP sono stati misurati con un'accuratezza di circa 1-2 cm. La misurazione dei GCP ha permesso di vincolare la verticalità delle ricostruzioni e di contenere le derive strumentali.

3.2 Rilievo fotogrammetrico UAV

Il sistema multi-camera Ant3D è caratterizzata da un raggio di acquisizione ridotto, pari a 4-5 m, a causa del GSD (Ground Sampling Distance) risultante dalla configurazione multi-camera utilizzata. Ciò ha portato a una scarsa ricostruzione della parte superiore degli alberi. Un comportamento simile è stato mostrato da Mokros et al. (2021). Ne consegue che è necessario integrare i dati mancanti con ulteriori rilievi per completare il rilievo degli alberi e, quindi, la caratterizzazione del giardino. Pertanto, è stato eseguito un rilievo UAV dell'intera area del giardino della villa e dei suoi dintorni. Utilizzando l'UAV DJI Phantom 4 Pro v2, sono state acquisite 606 fotografie seguendo un piano di volo automatico a griglia eseguito a 50 m dal suolo.

Il rilievo UAV è stato vincolato agli stessi GCP materializzati per il rilievo terrestre.

3.3 Rilievo fotogrammetrico terrestre – DSLR

Un rilievo fotogrammetrico terrestre dei muri perimetrali in mattoni del giardino storico, che ha alcuni portali d'ingresso che superano i 4 m di altezza e presenta numerose opere scultoree, è stato condotto per ovviare al limitato campo di misura della tecnica multi-camera. L'indagine è stata condotta con una reflex Nikon D750 dotata di un obiettivo da 16 mm, con cui sono state acquisite 1960 immagini. Queste sono state elaborate secondo la pipeline SfM insieme alle immagini multi-camera.

3.4 Heron MS Twin – rilievo ed elaborazione dei dati

Per il rilievo con Heron Backpack sono state effettuate 3 acquisizioni. Ognuna di esse aveva un punto di partenza baricentrico rispetto all'intero parco e un punto di arrivo prossimo a quello di partenza, garantendo la chiusura di un

anello di acquisizione. Le acquisizioni MMS sono state effettuate principalmente lungo i sentieri esistenti nel parco e solo eccezionalmente percorrendo alcuni tratti di prato per raggiungere aree altrimenti troppo lontane dai sentieri. La Figura 4 (a) mostra i percorsi calcolati delle 3 traiettorie acquisite con Heron Backpack, mentre la Tabella 1 riassume i dettagli del rilievo Heron Backpack, che ha richiesto circa 30 minuti per essere completato.

I dati acquisiti sono stati elaborati con il software proprietario Heron Desktop commercializzato da Gexcel srl.

	Durata	Lunghezza	N° di punti
Acquisizione 1	00:10:03	590 m	262 Mln
Acquisizione 2	00:10:28	596 m	261 Mln
Acquisizione 3	00:07:14	444 m	193 Mln

Tabella 1. Riassunto dei dati delle 3 acquisizioni effettuate con Heron Backpack.

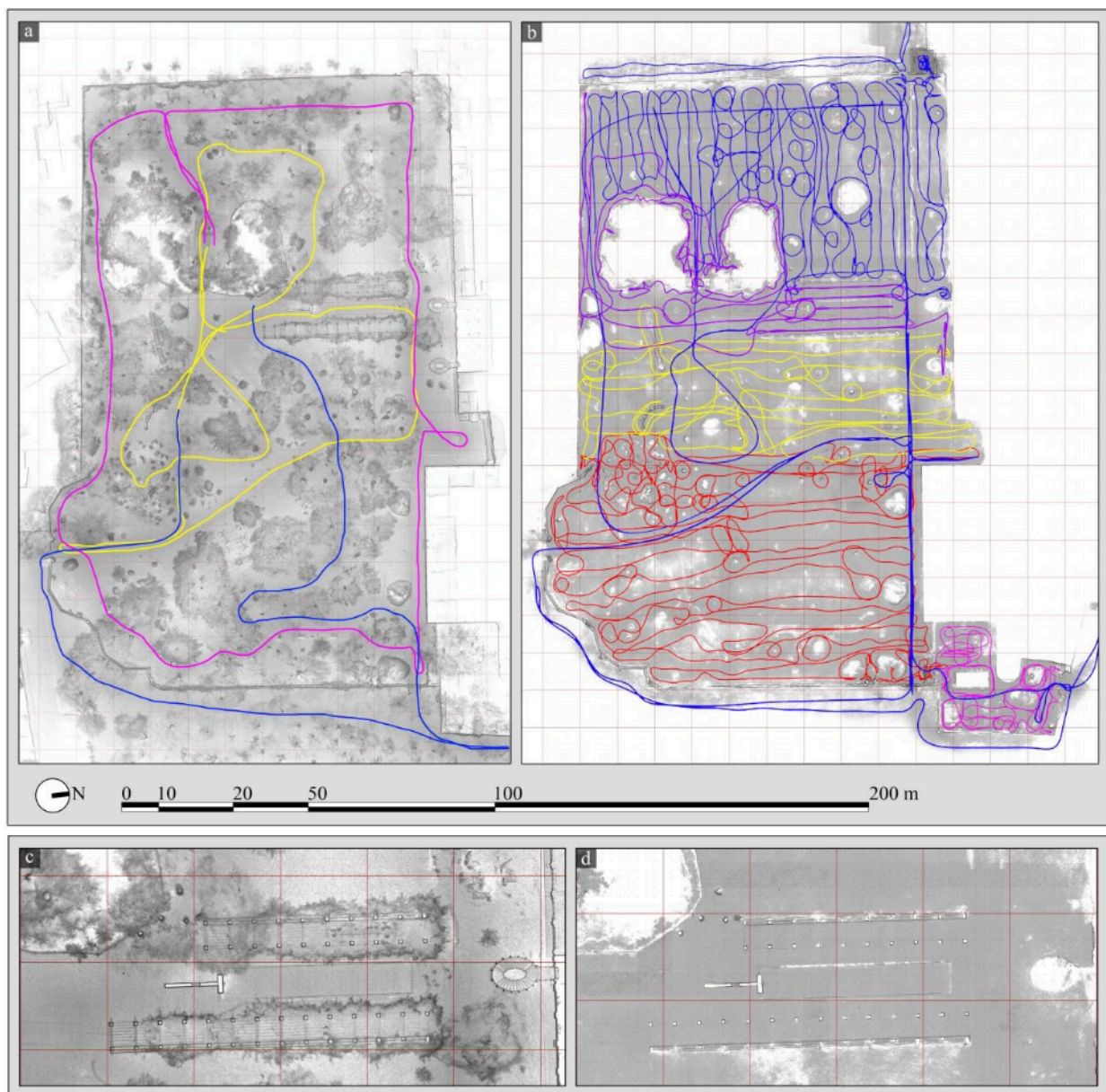


Figura 4. Vista in pianta delle due nuvole di punti ottenute. Sono evidenziate le rispettive traiettorie seguite durante l'acquisizione. Rilievo Heron Backpack (a), rilievo Ant3D (b) e rispettivi zoom delle nuvole di punti: Heron Backpack (c), Ant3D (d).

L'elaborazione dei dati prevede, in una prima fase, la stima del percorso delle singole traiettorie sulla base dei dati acquisiti dall'unità inerziale e dai sensori LiDAR e, in una seconda fase, la realizzazione della cosiddetta "chiusura del loop", ovvero un'ottimizzazione congiunta delle traiettorie delle diverse acquisizioni in cui vengono creati automaticamente o manualmente dei vincoli tra dati acquisiti in tempi diversi ma relativi alla stessa posizione. In questa seconda fase, è anche possibile realizzare vincoli tra punti identificati manualmente sulla nuvola di punti e le coordinate dei GCP. I punti sono stati identificati con un'accuratezza stimata di circa 2 cm. L'errore medio sui GCP alla fine dell'ottimizzazione era di circa 5 cm. Marotta et al. (2022a) descrivono più dettagliatamente la fase di elaborazione dei dati di Heron Backpack. La Figura 4(a, c) mostra i dati ottenuti al termine dell'elaborazione.

3.5 Ant3D – rilievo ed elaborazione dei dati

Per il rilievo eseguito con Ant3D, sono state effettuate in totale 5 acquisizioni. A differenza del rilievo di Heron Backpack, a causa del ridotto campo di misura della multi-camera, non è stato possibile percorrere solo i sentieri del parco. Piuttosto, si è cercato di mantenere uno schema di camminata di fitte passate parallele con cui è stata coperta l'intera area del giardino. In corrispondenza di alberi o cespugli più grandi, è stata eseguita un'acquisizione circolare camminando intorno all'ostacolo e fotografandolo così da tutti i lati. Al termine dell'ultima acquisizione, sono stati infine percorsi i sentieri principali del parco con lo scopo di collegare tra loro le diverse acquisizioni. La Figura 4(b) mostra il percorso delle 5 diverse acquisizioni, dove è evidente la differenza di densità rispetto al rilievo Heron Backpack.

	Durata	N° di img.	N° di punti
Acquisizione 1	00:18:00	5400	90 Mln nuvola di punti filtrata
Acquisizione 2	01:05:00	19570	
Acquisizione 3	00:26:00	7860	
Acquisizione 4	00:37:00	11240	
Acquisizione 5	01:32:00	27730	

Tabella 1. Sintesi dei dati delle 5 acquisizioni effettuate con il sistema multi-camera Ant3D.

Durante le acquisizioni, le immagini sono state scattate a 1 fps per un totale di 71800 immagini. Tuttavia, solo una immagine su quattro è stata successivamente elaborata, per un totale di 17950. Il tempo richiesto per il rilievo multi-camera è stato di circa 4 ore. Tuttavia, considerando le operazioni di rilievo con UAV e DSLR che si sono rese necessarie, il tempo totale di rilievo è stato di circa 6 ore, un tempo molto superiore a quello richiesto per il rilievo con lo zaino Heron. Le immagini acquisite sono state elaborate con Agisoft Metashape fino a ottenere nuvole di punti dense dell'intero parco. È stato eseguito un unico allineamento SfM complessivo di tutte le immagini Ant3D e DSLR e sono state vincolate le distanze tra le fotocamere in tutte le pose multi-camera. L'imposizione dei vincoli sulle basi di presa è stata eseguita come descritto in Perfetti & Fassi (2022a). Sulle fotografie sono stati imposti anche vincoli GCP identificati manualmente; l'errore medio su questi punti è stato di circa 5 cm. La nuvola di punti finale è stata realizzata dividendo la porzione di parco in 10 blocchi che sono stati elaborati separatamente e poi uniti.

Il rilievo UAV, invece, è stato elaborato separatamente e registrato nello stesso sistema di coordinate locali basato sui GCP. Le Figure 4(b,d) mostrano una vista in pianta della nuvola di punti Ant3D; si può notare che rispetto ai dati ottenuti con

Heron Backpack, le chiome degli alberi non sono state rilevate. La Figura 5 (al centro) mostra la nuvola di punti Ant3D in vista 3D.



Figura 5. Nuvole di punti ottenute per i vari rilievi effettuati: Heron Backpack (in alto), Ant3D (al centro), UAV (in basso).

4. Risultati e confronti

Al termine dell'elaborazione, sono state ottenute 3 nuvole di punti colorate (Figura 5): (i) il rilievo Heron Backpack, (ii) il rilievo Ant3D e (iii) il rilievo UAV. I dati acquisiti con entrambi gli approcci consentono di estrarre il DBH e l'impronta planimetrica delle chiome, caratterizzando così gli alberi rilevati. Tuttavia, le nuvole ottenute presentano differenze essenziali nella descrizione delle geometrie naturali e artificiali a causa dei diversi campi di acquisizione e della precisione dei due strumenti. Di seguito vengono presentati i confronti visivi tra i dati.

4.1 Dettagli e rumore della nuvola di punti

Il confronto è stato eseguito su porzioni delle nuvole di punti Heron Backpack e Ant3D, concentrandosi sulle geometrie architettoniche presenti nel parco. La Figura 6 riporta il confronto in queste aree: 1a e 1b mostrano uno dei portali in muratura presenti nel parco. La nuvola di punti Heron Backpack (1a) presenta un livello di rumore molto più elevato rispetto alla nuvola fotogrammetrica (1b - in quest'area è stata realizzata anche l'acquisizione DSLR); 2a e 2b mostrano la struttura di un gazebo coperto da vegetazione rampicante. In questo caso la nuvola fotogrammetrica (2b, ottenuta solo dal rilievo multi-

camera) mostra la completa assenza della vegetazione mentre tutte le strutture architettoniche sono ricostruite correttamente; 3a e 3b mostrano uno zoom della stessa area. La nuvola di punti del rilievo multi-camera presenta maggiori dettagli rispetto a quella del MMS.



Figura 6. Confronto tra le due nuvole di punti ottenute di alcune strutture artificiali. Una struttura a portale (1a, 1b), una struttura a gazebo (2a, 2b) e lo zoom di una parte della struttura a gazebo (3a, 3b). I dati ricavati dal rilievo Heron Backpack sono bordati in blu, mentre in rosso quelli relativi ad Ant3D.

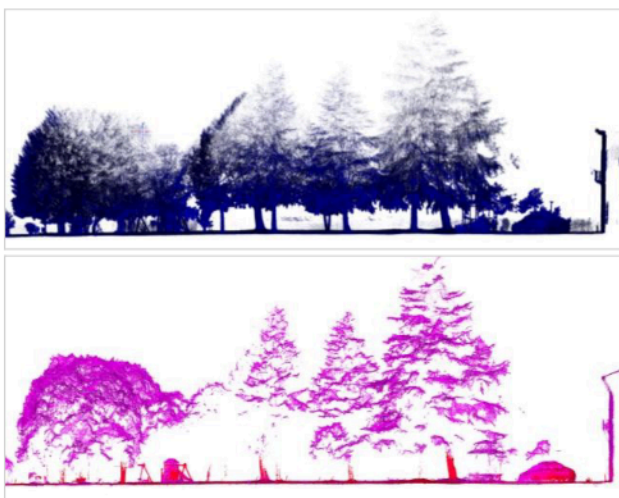


Figura 7. Sezioni trasversali estratte da Heron Backpack (alto) e da Ant3D + UAV (basso). Ant3D in rosso, UAV in rosa.

4.2 Completezza delle sezioni trasversali

È stata estratta una sezione verticale con uno spessore di 6 m delle nuvole di punti acquisite. La Figura 7 mostra la sezione ricavata dal dato Heron Backpack (in alto) completa in tutte le sue parti. Si distinguono chiaramente il profilo del terreno, gli arredi del parco, gli alberi, i rami e il fogliame. Anche la presenza di persone nel giardino al momento dell'acquisizione è particolarmente visibile. Al contrario, la sezione ricavata dai dati Ant3D (in basso, in rosso) è completa solo in prossimità del suolo, fino a pochi metri di altezza. Tuttavia, i dettagli dei rami sotto la superficie superiore del fogliame rimangono non rilevati. Il rilievo UAV, quindi, ci permette di integrare il rilievo terrestre con le chiome degli alberi (in basso, rosa).

4.3 Qualità delle alberature – DBH e chioma

Per questo confronto sono stati isolati alcuni alberi di dimensioni diverse. La Figura 8 mostra la vista planimetrica e altimetrica di questi alberi. I dati acquisiti da Heron Backpack (1a, 2a, 3a) risultano completi in tutte le loro parti, analogamente a quanto mostrato nella Figura 7 (in alto); mentre i dati fotogrammetrici, ottenuti dall'unione del rilievo Ant3D e UAV (1b, 2b, 3b) risultano parzialmente incompleti. Tuttavia, come visibile nelle immagini planimetriche, è ancora possibile stimare l'impronta della chioma per una rappresentazione 2D. La Figura 9, invece, mostra le sezioni orizzontali estratte alla quota di 1,3 m dal suolo utili per la stima del DBH. Si può notare la maggiore presenza di rumore nei dati di Heron Backpack (1a, 2a, 3a, 4a, 5a). Tuttavia, i dati Ant3D non sono esenti da problemi; sebbene mostrino una definizione del tronco più precisa in generale (1b, 2b, 3b, 4b), i tronchi di piccolo diametro non vengono restituiti correttamente se non acquisiti da una breve distanza (5b).

5. Conclusioni e lavori futuri

I risultati ottenuti dai due approcci di rilievo sono paragonabili; entrambi i metodi hanno prodotto nuvole di punti colorate da cui si possono ricavare varie analisi per la caratterizzazione dei giardini. Il rilievo Heron Backpack ha prodotto una nuvola di punti completa in tutte le sue parti, in grado di descrivere gli alberi sia alla base del tronco sia alla chioma senza richiedere l'integrazione di ulteriori rilievi. Tuttavia, la nuvola di punti MMS presenta un rumore maggiore rispetto a quella fotogrammetrica. I tempi di rilievo sono stati significativamente favorevoli all'approccio MMS, con un tempo di acquisizione di circa 30 minuti, che ha richiesto un percorso più breve per coprire l'intero giardino grazie al campo di acquisizione più esteso. Il rilievo multi-camera ha prodotto una nuvola di punti ad alta risoluzione, con un rumore minore e una maggiore definizione dei dettagli. Tuttavia, il rilievo ha richiesto più tempo: infatti, a causa del campo di misura più ristretto, è stato necessario effettuare più passaggi paralleli a una distanza di circa 5 m, richiedendo fino a circa 4 ore per coprire l'intero giardino con il solo rilievo multi-camera. Tuttavia, considerando che solo un quarto delle immagini è stato elaborato, il tempo di indagine avrebbe potuto essere ridotto a circa 1 ora aumentando la velocità di camminata. Entrambi i sistemi hanno prodotto una rappresentazione densa del terreno; le sezioni del terreno che possono essere estratte dal rilievo multi-camera sono più definite grazie al minore rumore della nuvola di punti, ma incomplete nella definizione delle chiome degli alberi. Inoltre, con entrambi i sistemi è possibile estrarre il DBH dei tronchi d'albero, tranne che per i tronchi più sottili e di diametro più fine. In questo caso, il MMS permette di

identificare la presenza dei tronchi. Tuttavia, la stima del DBH potrebbe essere meno accurata, mentre il sistema multi-camera a volte non fornisce dati. Questo è stato anche il caso dei pali della luce (non mostrati qui), che sono risultati scarsamente identificabili o completamente assenti nella nuvola di punti fotogrammetrica. Impiegando i dati fotogrammetrici durante il processo di restituzione 2D, l'identificazione di steli sottili e altre caratteristiche fini non è sempre possibile osservando una fetta della nuvola di punti in tagli orizzontali sottili (circa 5 cm).

In conclusione, l'approccio di rilievo MMS è più efficace dell'approccio multi-camera nella caratterizzazione dei giardini

storici. Il principale vantaggio dell'approccio MMS risiede nella produttività dovuta al minor tempo di rilievo richiesto per coprire un'area uguale e al fatto che il solo rilievo MMS è sufficiente per la descrizione geometrica degli alberi. D'altra parte, l'approccio multi-camera non può evitare l'integrazione con un rilievo aereo per la ricostruzione della chioma, e il maggior dettaglio della nuvola di punti (anche in assenza del rilievo DSLR, Figura 4 - 3b) non è richiesto per le rappresentazioni in scala 1:200 o 1:100. Tuttavia, il principale vantaggio dell'approccio multi-camera risiede nel minor costo della strumentazione utilizzata e può quindi essere preso in considerazione per applicazioni a basso budget.

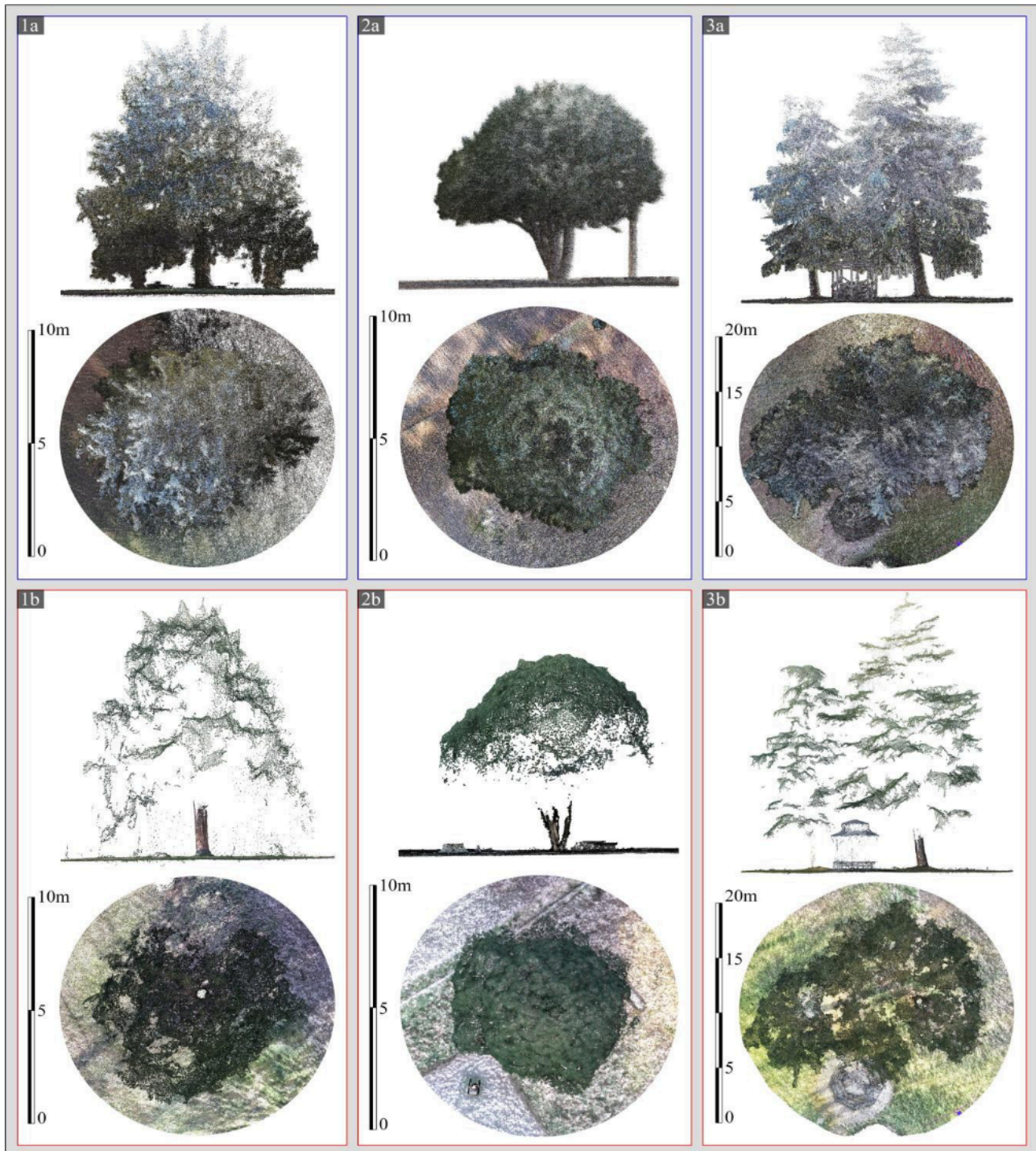


Figura 8. Planimetrie e viste altimetriche degli alberi estratte dalla nuvola di punti Heron Backpack (riga superiore, bordi blu) e dalla nuvola di punti Ant3D + UAV (riga inferiore, bordi rossi).

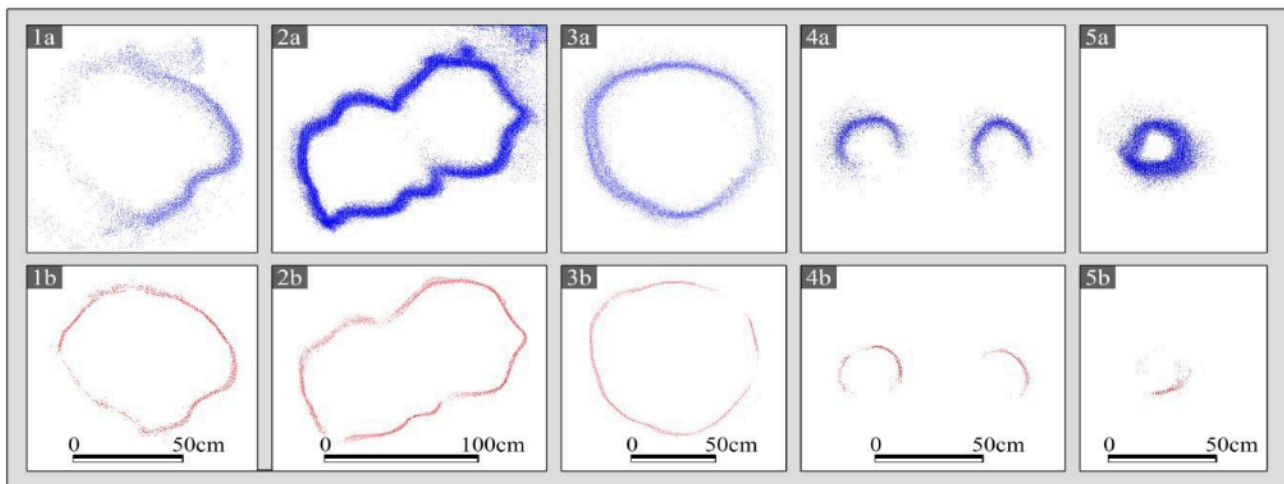


Figura 9. Sezione planimetrica degli alberi ad altezza uomo estratta dalla nuvola di punti Heron Backpack (blu) e dalla nuvola di punti Ant3D (rosso).

Per lavori futuri, si potrebbero tentare due modifiche del dispositivo multi-camera per renderlo più adatto al rilievo di giardini o al contesto forestale: (i) la prima modifica potrebbe essere quella di aumentare la risoluzione delle telecamere equipaggiate sul sistema, con l'obiettivo di ridurre il GSD, aumentare il campo di misura e di conseguenza semplificare e velocizzare la fase di acquisizione; (ii) la seconda modifica potrebbe essere quella di aggiungere una telecamera rivolta verso l'alto per tentare di ricostruire la geometria dei rami e della chioma degli alberi dal basso. Tuttavia, l'opinione degli autori rimane quella che il vantaggio principale dell'approccio multi-camera sia il costo più basso, mentre un laser scanner portatile è da preferire per una descrizione completa degli alberi.

Bibliografia

- Cazzani, A., Zerbi, C. M. & Brumana, R., 2019. Management plans and web-GIS software applications as active and dynamic tools to conserve and valorize historic public gardens, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-2/W15, 291–298.
- Del Duca, G. & Machado, C., 2023. Assessing the quality of the Leica BLK2GO mobile laser scanner versus the Focus 3D S120 static terrestrial laser scanner for a preliminary study of garden digital surveying. *Heritage*, 6(2), 1007–1027.
- Forsman, M., Börlin, N. & Holmgren, J., 2016. Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig. *Forests*, 7(3):61.
- Gollob, C., Ritter, T. & Nothdurft, A., 2020. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing*, 12(9), 1509.
- Hess, M. & Ferreyra, C., 2021. Recording and comparing historic garden architecture. Value of SLAM-based recording for research on cultural landscapes in connection with heritage conservation, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-M-1-2021, 301–308.
- Hyyppä, E., Yu, X., Kaartinen, H., Hakala, T., Kukko, A., Vastaranta, M. & Hyyppä, J., 2020. Comparison of backpack, handheld, under-canopy UAV, and above-canopy UAV laser scanning for field reference data collection in boreal forests. *Remote Sensing*, 12(20), 3327.
- Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyyppä, J., Honkavaara, E., Liu, J. & Kaartinen, H., 2014. The use of a handheld camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots. *Remote Sensing*, 6(7), 6587–6603.
- Malinverni, E. S., Chiappini, S. & Pierdicca, R., 2019. A geodatabase for multisource data management applied to cultural heritage: the case study of Villa Buonaccorsi's historical garden, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W11, 771–776.
- Marotta, F., Achille, C., Vassena, G., & Fassi, F., 2022a. Accuracy improvement of a IMMS in an urban scenario, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, 351–358.
- Marotta, F., Perfetti, L., Fassi, F., Achille, C. & Vassena, G. P. M., 2022. Lidar IMMS vs handheld multi-camera system: a stress-test in a mountain trailpath. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2022, 249-256.
- Mokroš, M., Mikita, T., Singh, A. K., Tomaščík, J., Chudá, J., ... Liang, X., 2021. Novel low-cost mobile mapping systems for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102512.
- Murtiyoso, A., Hristova, H., Rehush, N. & Griess, V. C., 2022. Low-cost mapping of forest under-storey vegetation using spherical photogrammetry, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-2/W1-2022, 185–190.
- Pérez-Martín, E., Medina, S. L., Tejedor, T. R. H., Pérez-Souza, M. A., De Mata, J. A. & Ezquerro-Canalejo, A., 2021. Assessment of tree diameter estimation methods from mobile laser scanning in a historic garden. *Forests*, 12(8), 1013.
- Perfetti, L., 2022. Image-based multi-camera mobile mapping system to survey narrow spaces (*Doctoral dissertation*). Politecnico di Milano, Milan.
- Perfetti, L. & Fassi, F., 2022a. Handheld fisheye multi-camera system: surveying meandering architectonic spaces in open-loop mode - accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, 435-442.
- Perfetti, L., Elalaily, A. & Fassi, F., 2022b. Portable multi-camera system: from fast tunnel mapping to semi-automatic space decomposition and cross-section extraction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2022, 259–266.