

Digitalizzazione di Precisione del Patrimonio Culturale: il caso studio di Porta Pia, Ancona.

Lucrezia Gorgoglione¹[0000-0003-2491-9380], Francesco Di Stefano¹[0000-0002-0604-7163], Roberto Pierdicca¹ [0000-0002-9160-834X] e Sergio Di Tondo²

¹ DICEA, Università Politecnica delle Marche, Ancona (Italia),

l.gorgoglione@pm.univpm.it, f.distefano@staff.univpm.it, r.pierdicca@staff.univpm.it

² MicroGeo srl, Falconara Marittima (AN) (Italia), s.ditondo@microgeo.it

Abstract. Questo studio si concentra sulle più recenti innovazioni per l'acquisizione e la digitalizzazione del patrimonio culturale (DCH) tangibile, con l'obiettivo di contribuire alla definizione di procedure standard, definiti da protocolli internazionali, per l'acquisizione e la valutazione dei dati, sostenendo la conservazione, il restauro e la valorizzazione dei beni culturali. Il contributo si basa sul confronto di diverse tecnologie LiDAR per la rappresentazione 3D di un bene culturale, con particolare attenzione al livello di accuratezza e dettaglio ottenuti. È stato individuato come caso studio Porta Pia, un esempio di architettura barocca della città di Ancona. A tale scopo, sono stati impiegati tre diversi sensori di acquisizione dati: il MMS FARO Orbis e i TLS FARO FOCUS Premium e REALSEE Galois M2. Questi strumenti sono stati valutati per la loro versatilità e le modalità operative, evidenziando vantaggi e svantaggi in termini qualitativi e quantitativi, inclusi l'accuratezza metrica, la densità della nuvola di punti, i costi e i tempi di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Parole chiave: LiDAR, Patrimonio Culturale, digitalizzazione, Mobile Mapping System, Terrestrial Laser scanning.

1. Introduzione

L'importanza di preservare e promuovere il patrimonio culturale è un tema di attualità globale, poiché questi beni rappresentano una risorsa multidimensionale che arricchisce e protegge le società in cui si trovano. Questi patrimoni, simboli di regioni, città e paesi, sono legati al sentimento sociale e all'identità culturale delle comunità e costituiscono spesso la base per lo sviluppo di attività economiche come il turismo. Tuttavia, la loro conservazione non è sempre agevole a causa della fragilità intrinseca di questi elementi, che hanno subito gli effetti degli eventi storici e naturali. Oltre al deterioramento legato al tempo e agli agenti atmosferici, questi beni sono esposti a minacce costanti come l'abbandono, atti di vandalismo, conflitti armati e disastri naturali, che ne rendono complessa la tutela e la gestione [1-3].

Di fronte a queste sfide, diverse organizzazioni internazionali come UNESCO [4] e ICOMOS [5], nonché enti nazionali e regionali, hanno promosso protocolli, standard e linee guida che sottolineano l'importanza della ricerca e del trasferimento delle conoscenze da altre discipline per migliorare i metodi di intervento, conservazione e gestione del patrimonio culturale tangibile. Tra le tecniche e metodologie che migliorano gli studi e le attività di ricerca sul patrimonio culturale, la geomatica gioca un ruolo chiave nell'acquisizione, elaborazione, analisi, interpretazione, modellazione e diffusione delle informazioni geospaziali digitali. Tali tecnologie applicate al

patrimonio culturale tangibile devono tenere conto di due aspetti fondamentali per la digitalizzazione dello stesso: il grado di complessità delle caratteristiche dell'oggetto e il livello di qualità dei dati ottenuti e processati [6-7]. La complessità di un oggetto, intesa come insieme di proprietà geometriche, materiali e ambientali, richiede che gli strumenti di rilievo siano capaci di riprodurlo fedelmente senza perdita di informazione o riduzione del suo valore culturale e scientifico. Questo dipende da fattori come la tecnologia adottata, l'ambiente di rilievo e i materiali presenti. La qualità dei dati acquisiti, misurata in termini di accuratezza e risoluzione, determina il livello di dettaglio raggiungibile nel modello finale, e varia in funzione degli scopi del progetto e degli standard adottati. Tuttavia, sebbene esistano standard internazionali sulla digitalizzazione del patrimonio culturale da parte di enti internazionali come ICOMOS e UNESCO in materia di qualità dei dati 3D, mancano tuttora linee guida che determinano sulla base di quali strumenti, quali metodi, quali sensori, quali dati sono necessari per raggiungere gli obiettivi stabiliti per diversi progetti dedicati al patrimonio architettonico tangibile (Carta di Londra, 2009; Carta di Siviglia, 2011). Questa lacuna complica la selezione delle tecnologie della geomatica che si differenziano per tipologia di sensore, livello di precisione, grado di risoluzione, tempi e costo, quelle più appropriate da usare nel rispetto degli standard [8-9]. Ad esempio, i progetti di restauro richiedono dati estremamente accurati per garantire interventi precisi, mentre per applicazioni di realtà virtuale può essere sufficiente un livello di dettaglio inferiore [10 - 11]. Partendo da questi presupposti, l'obiettivo di questa ricerca è la definizione di una procedura standard per l'acquisizione dei dati e la relativa valutazione degli stessi al fine di operare un'efficiente digitalizzazione del patrimonio culturale, ampliare la conoscenza delle caratteristiche geometriche, superficiali e strutturali, supportare l'analisi dello stato di conservazione, disporre di strumenti per la manutenzione di interventi programmati a breve e lungo termine da condividere con esperti del settore e professionisti [12].

Tale contributo si basa su un'attività di benchmarking di diverse tecnologie LiDAR per la rappresentazione 3D di un monumento storico architettonico. Viene illustrato una metodologia di lavoro che si basa sull'impiego di diversi sensori di acquisizione in modalità dinamica e statica. Questi strumenti vengono valutati per la loro versatilità e le modalità operative, evidenziando vantaggi e svantaggi in termini qualitativi e quantitativi, inclusi l'accuratezza metrica, la densità della nuvola di punti, i costi e i tempi di acquisizione ed elaborazione dei dati.

2. Caso Studio

Per il nostro contributo di ricerca, Porta Pia, un'antica porta monumentale di accesso alla città di Ancona, è stata scelta come caso studio per la sua importanza storica e architettonica, nonché esempio significativo di architettura barocca. Costruita tra il 1787 e il 1789 su progetto dell'architetto Filippo Marchionni e per volere di Papa Pio VI, Porta Pia è non solo un simbolo della città, ma anche una testimonianza della sua evoluzione urbanistica (Fig. 1.). La struttura è caratterizzata da un arco di trionfo a un solo fornice e una singolare doppia facciata. La facciata sud, ovvero quella rivolta verso la Mole Vanvitelliana ed esterna alla città, è in pietra d'Istria con fregi di epoca barocca

e fiancheggiata da due lesene che sorreggono l'attico che recava una lapide dedicatoria e lo stemma papale che è poi stato rimosso durante l'occupazione francese. La facciata nord, ovvero quella rivolta in direzione della città e del Porto Storico, non presenta particolari ornamenti, è costituita da blocchi di arenaria e si conclude con un semplice timpano a triangolo. Il suo stato di conservazione e la complessità architettonica, con una doppia facciata e dettagli barocchi, l'hanno resa il sito ideale per sperimentare tecniche avanzate di digitalizzazione 3D, necessarie per la conservazione e il restauro del patrimonio culturale.



Fig. 1 Inquadramento: Porta Pia, Ancona.

3. Materiali e Metodi

La selezione degli strumenti è stata guidata da criteri di versatilità, modalità operative, accuratezza metrica, densità della nuvola di punti, costi e tempi di acquisizione e processamento, ma principalmente per testare le strumentazioni presenti nel mercato attuale. Il rilievo di Porta Pia è stato condotto utilizzando tre diversi strumenti di acquisizione con sensore LiDAR: il Mobile Mapping System (MMS) FARO Orbis e i Laser Scanner Terrestri (TLS) FARO Focus Premium e REALSEE Galois M2 (Fig. 2). Per vincoli di tempo e logistici, non è stato possibile allestire una rete topografica, ma l'operazione è prevista per il futuro per validare al meglio i dati acquisiti e poter integrare il rilievo da drone con sensore LiDAR per i dettagli della copertura.

L'indagine è iniziata con il TLS FARO FOCUS Premium, i cui dati sono stati utilizzati come *ground truth*. Lo strumento in questione utilizza la tecnica della differenza di fase per misurare distanze fino a 200 metri con una precisione di ± 2 mm, risultando ideale per documentazioni dettagliate di oggetti con geometrie complesse. Sono state acquisite 23 scansioni statiche progressive, senza utilizzo di riferimenti o target, con un tempo di acquisizione pari a 1 ora e 38 minuti. Le scansioni sono state poi elaborate utilizzando il software proprietario Faro Scene (versione 2023.1.0) e allineate attraverso la

costruzione della matrice di roto-traslazione delle singole scansioni, effettuata individuando tre punti comuni con l'inclinometro tra scansioni adiacenti, con un errore massimo di 5 mm.

Il secondo strumento utilizzato è il MMS FARO Orbis, con sensore LiDAR e tecnologia SLAM che consente di acquisire dati in movimento e in tempo reale ottenendo modelli 3D accurati e una densità di punti adeguata senza la necessità di posizionare punti di riferimento esterni. Il rilievo è stato eseguito effettuando un solo loop per l'acquisizione degli esterni di Porta Pia, per un tempo pari a 11 minuti e 40 secondi. Le operazioni di pulizia e ottimizzazione della nuvola di punti sono state effettuate con il software di elaborazione Faro Scene.

Infine, è stato testato un secondo TLS, REALSEE Galois M2, con tecnologia LiDAR, sensore IMU e una camera 3D integrata ad alta risoluzione, che garantisce misurazioni accurate e precise indipendentemente dalle condizioni di illuminazione o dall'ambiente. Offre tre modalità di acquisizione e per il caso in esame si è scelto di impostare lo strumento per l'alta risoluzione. Sono state eseguite 55 scansioni progressive con un tempo di acquisizione di 38 minuti. Dopo l'acquisizione dei dati, lo strumento genera automaticamente vari documenti disponibili per il download, come modelli 3D, nuvole di punti, planimetrie, immagini panoramiche, attraverso Realsee Console, una piattaforma proprietaria di editing e visualizzazione, adatta anche alla realizzazione di tour virtuali.



Fig. 2. Caratteristiche tecniche delle strumentazioni impiegate per il rilievo.

4. Risultati e Discussione

I dati acquisiti sono stati processati ed elaborati per garantire la massima accuratezza e qualità della documentazione, permettendo di ottenere una visione completa e dettagliata del sito. Dall'analisi dei risultati ottenuti dai tre strumenti sono emerse differenze significative in termini di tempi di acquisizione, accuratezza metrica e densità delle nuvole di punti e costi, schematizzati in Figura 3. In termini di costo-efficienza, FARO Orbis e REALSEE Galois M2 si sono dimostrati più vantaggiosi per la loro capacità di acquisire dati rapidamente e con un processamento relativamente veloce. FARO Orbis, in particolare ha offerto un buon compromesso tra accuratezza e velocità, con un tempo di processamento di 30 minuti. Il REALSEE Galois M2, ha mostrato un'accuratezza inferiore con un RMSE medio di 3,9 mm, ma ha compensato

con tempi di acquisizione e processamento molto rapidi, per un totale di 90 minuti circa. FARO FOCUS Premium ha confermato la sua precisione nelle misurazioni in modalità statica con un RMSE medio di 2,3 mm. Tuttavia, il tempo di acquisizione e il tempo di processamento lo rendono la soluzione più lenta rispetto agli altri metodi e più dispendiosa dal punto di vista economico.

Tabella 1. Risultati principali riguardo alle fasi di acquisizione e post-processing.

Strumento	N° punti Nuvola densa	RMS (m) - ICP
FARO Focus Premium	17.184.958	-
FARO Orbis SLAM	15.452.256	0,175
REALSEE Galois M ²	346.755	0,145

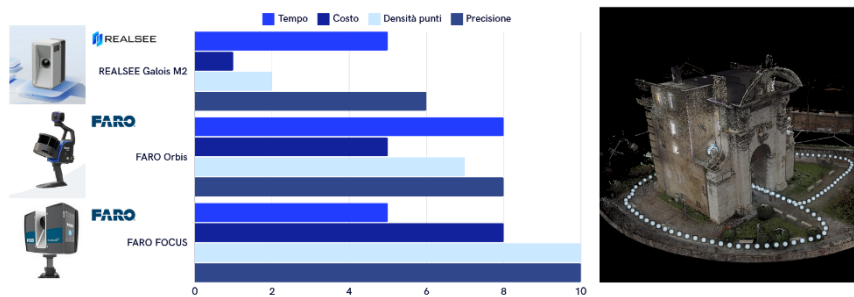


Fig. 3. Sensori a confronto. Schema del percorso di acquisizione del caso studio: Porta Pia, Ancona.

Successivamente le nuvole di punti, ottenute dai tre strumenti, sono state convertite nel formato di interscambio *.e57*, allineate manualmente e perfezionate con l'algoritmo ICP (Tab.1), esaminate e valutate con analisi quantitative e qualitative condotte attraverso il software opensource *Cloud Compare*. Sono state definite come aree campione le porzioni di ingresso della Porta, lato sud e lato nord (Fig. 4) sulle quali sono state

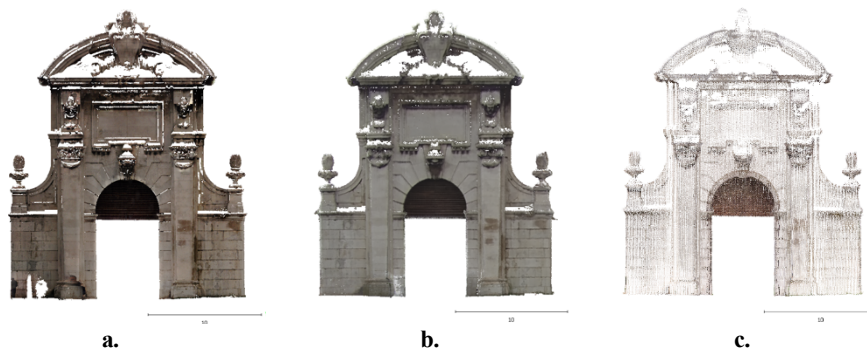


Fig. 4. Nuvola di punti densa. Dettaglio: Porta Pia, lato sud. **a.** Faro Focus Premium; **b.** Faro Orbis; **c.** Realsee Galois M2.

valutate l'accuratezza e la precisione della nuvola di punti con l'analisi della distanza C2C, densità, livello di rumore e caratteristiche geometriche.

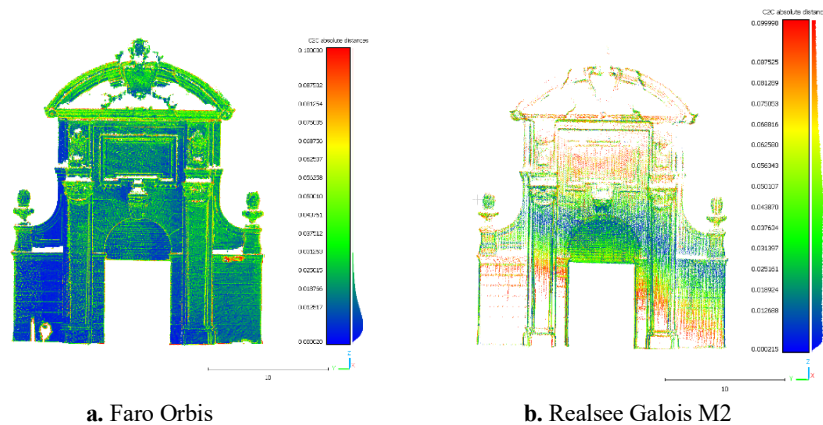


Fig. 5. Analisi di distanza C2C su una delle aree campione: Porta Pia, lato sud.

Per l'analisi C2C, la nuvola di punti Faro Focus Premium è stata utilizzata come riferimento, impostando una distanza assoluta di 0,1 m sulla base dell'accuratezza richiesta dall'indagine (scala 1:100 per patrimonio culturale). Questo primo confronto, come mostrato nella Figura 5, ha risultati soddisfacenti. Come si può leggere nell'istogramma, la distribuzione dei punti analizzati per il Faro Orbis mostra che la maggior parte di essi rientra nell'intervallo di errore tra 0 e 0,02 m (Fig. 5a). Mentre per il Galois M2, si hanno valori di maggiore distanza (Fig. 5b) e parti mancanti, questi valori sono influenzati negativamente dalle aree che il laser non è in grado di acquisire soprattutto in direzione verticale.

Successivamente sono state valutate la completezza e la qualità dei dataset. I valori di densità e rumore sono stati calcolati per valutare le caratteristiche geometriche dell'oggetto rilevato utilizzando rispettivamente gli algoritmi matematici *number of neighbours* e *roughness* implementati in CloudCompare, considerando una sfera di raggio 0,02m. I risultati dell'analisi della densità (Fig. 6) è evidente come sia correlata strettamente alla distanza di acquisizione tra il sensore e l'oggetto acquisito e quindi la traiettoria o punti di scansione e il tempo impiegato.

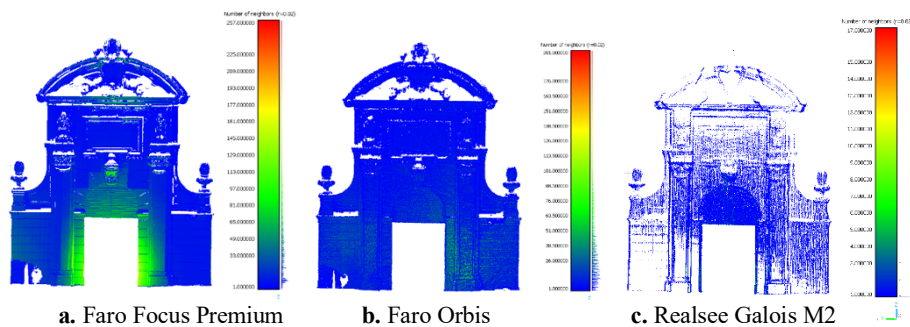


Fig. 6. Confronto della densità (*number of neighbours*); sfera $r = 0,02$ m.

Mentre dai risultati sulla *roughness* (Fig. 7) è emerso che il dataset TLS Faro è caratterizzata da un livello di rumore di 0,002 metri con un'omogeneità dei punti e un maggior livello di accuratezza dei dati; la nuvola di punti MMS presenta valori di rumore leggermente inferiori che si aggirano intorno a 0,01 metri con una distribuzione più rada dei punti ma che in ogni caso non consentono una facile lettura delle informazioni geometriche e di dettaglio. Dai risultati del TLS Realsee non è invece possibile valutare le caratteristiche geometriche della porta.

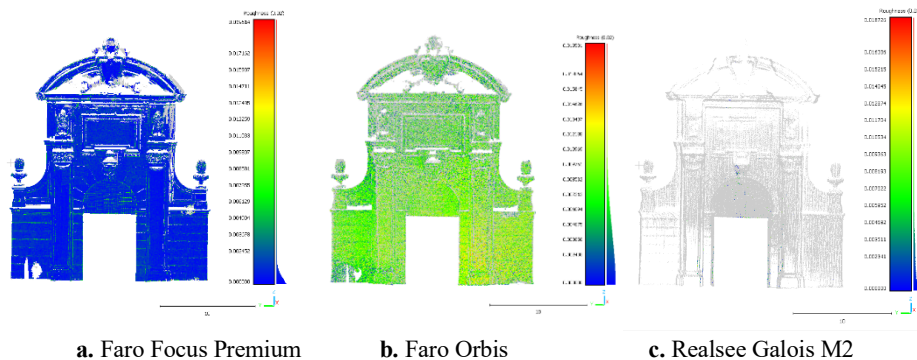


Fig. 7. Confronto del rumore (*roughness*); sfera $r = 0,02$ m.

5. Conclusioni

In conclusione, questo studio ha sottolineato l'importanza di definire procedure standard per l'acquisizione e la valutazione dei dati nella digitalizzazione del patrimonio culturale. Il lavoro qui presentato si propone come un utile caso studio per la definizione di linee guida sulla digitalizzazione del patrimonio culturale, in conformità con gli standard internazionali. L'obiettivo è di mettere a sistema l'utilizzo di diverse tecnologie applicate al patrimonio culturale tangibile, valutando la qualità dei risultati in termini di accuratezza e risoluzione rispetto ai differenti scopi progettuali. Tale lavoro si inserisce tra le attività svolte dagli autori nell'ambito di ICOMOS Italia - CIPA HD (Documentazione del Patrimonio Culturale), che mirano alla definizione di tali linee guida attraverso il confronto e la collaborazione con altre realtà di ricerca scientifica specializzate nella digitalizzazione del patrimonio culturale tangibile.

Guardando al futuro, l'intenzione di ampliare il confronto includendo tecniche di intelligenza artificiale come NeRF (Neural Radiance Fields) e 3D Gaussian Splatting promette di rivoluzionare ulteriormente il campo della digitalizzazione del patrimonio culturale. Questi approcci basati sull'AI offrono potenziali vantaggi significativi in termini di accuratezza, automazione e contenimento dei costi.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano il Comune di Ancona, per aver concesso l'opportunità di condurre gli studi su Porta Pia, e il team Microgeo, per aver messo a disposizione la strumentazione utilizzata per il rilievo; in particolare Matteo Lucesoli e Daniele Bartolucci. Questo lavoro è stato finanziato nell'ambito della convenzione tra

Microgeo srl e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) - UNIVPM, "Testing e controllo con metodi di validazione statistici su dati geomatici multisorgente e multisensore per il rilevamento prossimale e remoto".

Riferimenti bibliografici

1. Di Stefano, F., Chiappini, S., Gorreja, A., Balestra, M., & Pierdicca, R.: Mobile 3D scan LiDAR: A literature review. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 2387-2429. (2021).
2. Di Stefano, F., Torresani, A., Farella, E. M., Pierdicca, R., Menna, F., & Remondino, F.: 3D surveying of underground built heritage: Opportunities and challenges of mobile technologies. *Sustainability*, 13(23), 13289. (2021)
3. Maté-González, M. Á., Di Pietra, V., & Piras, M. (2022). Evaluation of Different LiDAR Technologies for the Documentation of Forgotten Cultural Heritage under Forest Environments. *Sensors*, 22(6314). <https://doi.org/10.3390/s22166314>
4. UNESCO. UNESCO Declaration Concerning the Intentional Destruction of Cultural Heritage. Paris, 17 October 2003. https://international-review.icrc.org/sites/default/files/irrc_854_unesco_eng.pdf, ultimo accesso 2024/10/16.
5. ICOMOS. The NARA document on authenticity (1994). <https://www.icomos.org/en/179-articles-en-francais/ressources/charters-and-standards/386-the-nara-document-on-authenticity-1994>, ultimo accesso 2024/10/16.
6. Ioannides, M.: Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage: mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines: final study report. (2022)
7. Campi, M., Falcone, M., & Sabbatini, S.: Towards continuous monitoring of architecture. Terrestrial laser scanning and mobile mapping system for the diagnostic phases of the cultural heritage. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-2/W1-2022, 121–127. (2022)
8. Tando, B., Teppati Losè, L., & Chiabrando, F.: Documentation of complex environments in cultural heritage sites. A SLAM-based survey in the Castello del Valentino basement. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-1/W1-2023, 489–496. (2023)
9. Bonfanti, C., Patrucco, G., Perri, S., Sammartano, G., & Spanò, A.: A new indoor lidar-based MMS challenging complex architectural environments. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1-2021, 79–86. (2021)
10. Dezen-Kempton, E. L. O. I. S. A., Mezencio, D. L., Miranda, E. D. M., De Sã, D. P., & Dias, U. L. I. S. S. E. S.: Towards a digital twin for heritage interpretation. In RE Anthr. Des. Age Humans: Proc. 25th Int. Conf. Comput. Archit. Des. Res. Asia, CAADRIA 2020 (Vol. 2, pp. 183-191). (2020)
11. Capolupo, A. (2021). Accuracy assessment of cultural heritage models extracting 3D point cloud geometric features with RPAS SfM-MVS and TLS techniques. *Drones*, 5(4), 145.
12. Pepe, M., Alfio, V. S., Costantino, D., & Herban, S.: Rapid and accurate production of 3D point cloud via latest-generation sensors in the field of cultural heritage: a comparison between SLAM and spherical videogrammetry. *Heritage*, 5(3), 1910-1928. (2020)