

Sensori a basso costo per una rapida ed accurata documentazione del patrimonio costruito

Alessio Martino¹, Andrea Maria Lingua¹, Paolo Maschio¹

¹ DIATI, Politecnico di Torino – alessio.martino@polito.it, andrea.lingua@polito.it,
paolo.maschio@polito.it

Abstract. Quando ci si trova di fronte a guerre e cambiamenti climatici, la documentazione degli elementi custodi del nostro patrimonio è un passo essenziale per le azioni di preservazione e di restauro. L'uso di sensori a basso costo offre un modo rapido ed economico per ottenere modelli 3D dettagliati del patrimonio costruito, democratizzando il processo di documentazione. I sensori a basso costo facilitano la documentazione e migliorano l'efficienza degli sforzi di conservazione, identificando vulnerabilità strutturali, monitorando cambiamenti nel tempo e fungendo da sistemi di allerta precoce contro potenziali minacce. Come ulteriore aiuto, l'utilizzo di un Rover RTK consente un'accuratezza centimetrica nel posizionamento mantenendo un design compatto, e la misurazione diretta dei Punti di Controllo a Terra (GCP) semplifica significativamente il processo di rilevamento e riduce l'ingombro dell'attrezzatura.

Parole Chiave: Patrimonio Costruito, Documentazione dei Beni Culturali, Sensori a basso costo, Fotogrammetria, LiDAR, Valutazione di Accuratezza

1. Documentazione dei Beni Culturali a Basso Costo

Quei beni che compongono la ricchezza di un territorio e dei suoi abitanti sono noti come Patrimonio Culturale. Il riconoscimento del valore insito in specifiche risorse implica la necessità di proteggerle e preservarle. Proprio per questo motivo, dal 1978, l'UNESCO protegge i Siti Patrimonio dell'Umanità, luoghi o aree designate per la loro importanza culturale o storica e considerate di eccezionale valore per l'umanità. Allo stato attuale di fine 2024 sono stati identificati 1223 siti provenienti da 168 paesi, di cui 60 in Italia. L'obiettivo comune di tutta l'umanità dovrebbe essere la protezione del Patrimonio Culturale, che deve essere preservato per le future generazioni. La documentazione è uno dei processi fondamentali dell'azione di protezione, specialmente quando si tratta di Patrimonio a rischio e, almeno per il patrimonio tangibile, si basa su diverse tecniche riguardanti il campo della Geomatica. L'uso di strumentazioni impegnative come laser scanner terrestri (TLS), ricevitori GNSS statici o stazioni totali può avere un impatto significativo sul tempo e sul costo di una campagna di acquisizione.

I Mobile Mapping Systems (MMS) sono tecnologie ampiamente utilizzate per la raccolta di dati spaziali in progetti su larga scala e funzionano dotando dispositivi mobili di sensori scanner laser o di imaging, che possono essere utilizzati per la documentazione del patrimonio costruito [1,2], anche in scenari sotterranei dove i TLS sono raramente utilizzati a causa di limitate possibilità di accesso e condizioni di illuminazione non uniformi [3]. Oltre ai MMS, altre tecnologie sono state utilizzate per documentare il Patrimonio Culturale a rischio, anche utilizzando sensori a basso costo, come fotocamere digitali [4] e sistemi LiDAR multi-camera,

per la conservazione del patrimonio culturale e per la preservazione spaziale e temporale del patrimonio tangibile e intangibile [5].

Dalla sua introduzione nel 2020, anche il sensore LiDAR sui dispositivi Apple è stato studiato per diverse applicazioni, come la scansione 3D industriale di piccoli oggetti [6], l'inventario forestale [7], il monitoraggio delle variazioni di profondità della neve in piccole aree nel tempo [8], il rilievo 3D di rocce e scogliere per scopi geologici [9] o le misurazioni del corpo umano [10]. Infine, sono stati effettuati anche alcuni test per scopi di documentazione del patrimonio in diversi scenari: oggetti di piccole e medie dimensioni, monumenti, facciate esterne e mappatura interna [11, 12], e per la modellazione 3D in ambienti interni ed esterni [13]. Apple ha introdotto per la prima volta il sensore LiDAR sui suoi dispositivi nel 2020, con l'intento principale di portare la Realtà Aumentata (AR) a un nuovo livello. Catturare un'enorme quantità di dati ad alta risoluzione in un istante permette di mappare costantemente un ambiente.

Tra le tecniche di rilievo disponibili, i sensori dell'iPhone 15 Pro sfruttano la scansione laser e la fotogrammetria, che permettono di recuperare informazioni accurate in un breve periodo. Tra gli scanner laser, alcuni sono noti come "time of flight" (TOF) poiché determinano le distanze misurando il tempo che l'impulso impiega ad andare e tornare dallo scanner all'oggetto. Il dispositivo di Apple utilizza la luce strutturata per il Face ID, emettendo una griglia di 30.000 punti visibili solo a telecamere IR disposti in un pattern regolare per la stima della profondità, e utilizza il time-of-flight diretto (dTOF) per il sensore LiDAR. Insieme al sensore LiDAR, anche le fotocamere vengono sfruttate nel processo di acquisizione, utilizzando i principi della fotogrammetria per ottenere informazioni fisiche come colore, forma o dimensioni di un oggetto o ambiente a partire da immagini fotografiche. Questa tecnologia è particolarmente significativa per beni fuori dalla portata umana o per oggetti fragili, poiché evita il contatto fisico.

La soluzione di Apple è solo l'ultima a fornire sensori time-of-flight su dispositivi mobili prodotti in massa ad un prezzo ridotto. Il principale svantaggio della tecnologia LiDAR è infatti il suo costo elevato, con i prezzi che partono da poco meno di 20.000 € e arrivano a oltre 100.000 € in base al loro raggio di azione, caratteristiche e velocità, riducendo l'appeal e la disponibilità per la vasta maggioranza del pubblico. Negli ultimi vent'anni ci sono però stati timidi approcci alla scansione laser e ai sensori di imaging a basso costo, principalmente focalizzati su applicazioni AR, ma che possono anche essere sfruttati per scopi diversi, come robotica, geomatica e documentazione 3D. Tra quelli degni di nota ci sono i lavori svolti da Nintendo e Microsoft, rispettivamente, con la Wii e Kinect. La prima utilizza una sensor bar con cinque LED infrarossi a ciascun estremo per calcolare distanza e angolo tra il telecomando e la barra tramite triangolazione. La seconda utilizza una fotocamera RGB, un sensore di profondità e un proiettore infrarosso per creare un modello 3D dell'ambiente calcolando il tempo di volo della luce infrarossa trasmessa per misurare le distanze di ciascun punto sul corpo del giocatore. Infine, prima della soluzione di Apple, Google e Samsung avevano tentato di implementare sensori di profondità su dispositivi prodotti in massa rispettivamente con il progetto Tango e con i Galaxy S10, S20+ e S20 Ultra, ma con una scarsa ricezione da parte del pubblico. Entrambi sfruttavano sensori di profondità e movimento e la fotocamera RGB principale per misurare accuratamente oggetti tridimensionali,

offrendo simulazioni virtuali per scenari di Realtà Aumentata o videogiochi. Oltre ai sensori ad alta precisione offerti dall'iPhone 15 Pro, si può utilizzare un componente aggiuntivo, il viDoc RTK rover (Figura 1), prodotto dalla viGram GmbH, azienda tedesca specializzata in costruzioni e rilievi. Il rover funziona tramite tecnologia NTRIP e può essere montato sul retro del dispositivo per essere utilizzato insieme all'applicazione mobile Pix4Dcatch. L'app è gratuita, ma è necessario acquistare alcuni crediti per l'elaborazione dei dati online, che può essere effettuata gratuitamente su PC utilizzando Pix4Dmatic o altri software di ricostruzione fotogrammetrica. Il flusso di lavoro proposto è progettato per dispositivi iOS dotati di sensore LiDAR, ma funziona anche per altri dispositivi Apple e Android selezionati. Il viDoc ha dimensioni simili a quelle del dispositivo mobile, dove solo l'antenna sporge leggermente verso l'alto, rendendo comunque la strumentazione di rilievo leggera e tascabile.



Figura 1. iPhone 15 Pro con il viDoc RTK Rover

2. Casi studio e Metodologia

I dati su cui verrà effettuata questa valutazione sono due esempi notevoli di patrimonio costruito a Torino. Il primo è la statua di un leone sdraiato alla base di un monumento a Giuseppe Garibaldi, mentre il secondo è il porticato esterno del Castello del Valentino, incluso nella lista dei Patrimoni dell'Umanità dell'UNESCO come parte delle ex residenze reali sabaude e che attualmente ospita la Facoltà di Architettura del Politecnico di Torino (Figura 2).



Figura 2. I due casi studio: una statua di leone alla base del monumento di Garibaldi e il porticato del Castello del Valentino a Torino.

I Punti di Controllo a Terra (GCP) vengono posizionati e misurati per ogni dataset per valutare la qualità del posizionamento dei punti del rover RTK viDoc rispetto al ricevitore GNSS Stonex S990a. La ground truth misura le coordinate di ciascun punto posizionando l'estremità del palo telescopico al centro del target e livellandolo con una bolla fisica. La stessa procedura viene effettuata con il sensore mobile, che, una volta livellato con una bolla digitale sullo schermo, misura automaticamente la distanza tra il centro di fase dell'antenna e il centro del target utilizzando il laser posizionato sul fondo. Per quanto riguarda la fase di acquisizione, sono stati utilizzati diversi software e hardware: Pix4Dcatch con il viDoc, la stessa applicazione ma senza sensore aggiuntivo, e un'altra app, Scaniverse, per verificare l'accuratezza dei dati acquisiti da Pix4Dcatch. Ogni acquisizione per gli scenari scelti dura circa un minuto e consiste essenzialmente nel camminare lentamente attorno all'oggetto da rilevare, osservando lo schermo per valutare le aree che devono ancora essere acquisite. Dopo questa fase, la posizione dei punti misurati con il rover RTK viene assegnata manualmente alle immagini acquisite in Pix4Dcatch. Questo passaggio richiede di selezionare un punto e localizzarlo in un minimo di due immagini. Ripetendo questa procedura su almeno tre GCP, l'elaborazione effettuata online su Pix4Dcloud o localmente su Pix4Dmapper terrà conto di questi dati per migliorare l'accuratezza nella georeferenziazione del modello. Per valutare la qualità del rover RTK viDoc, sono state utilizzate due ground truths: la prima riguarda la qualità del posizionamento dei GCP, misurati sia dal rover ViDoc che dal ricevitore GNSS Stonex S990a, mentre la seconda riguarda la differenza in densità e distanza tra le nuvole di punti generate utilizzando la correzione di posizionamento in tempo reale offerta dal viDoc e quella acquisita in modo statico dal Faro Focus X 330 TLS. Le stesse comparazioni vengono effettuate con il dispositivo senza sensore aggiuntivo, utilizzando Pix4Dcatch e Scaniverse.

3. Analisi e Risultati

La prima valutazione riguarda i GCP, le cui coordinate sono misurate dal ricevitore GNSS in modalità RTK e dal rover viDoc. Queste posizioni sono calcolate anche sulle nuvole di punti generate da Pix4Dcatch e Scaniverse utilizzando il GPS interno dell'iPhone. La Tabella 1 riassume per ciascuna direzione le differenze medie ($Av.\Delta$) tra la ground truth e le altre acquisizioni per i due dataset, così come le deviazioni standard (σ), i valori minimi e massimi.

Tabella 1. Confronto dei GCP rispetto alla ground truth

STATUA DEL LEONE			
	viDoc	Pix4dcatch	Scaniverse
Av.Δ_X	0,024	1,490	1,425
Av.Δ_Y	0,028	1,268	0,694
Av.Δ_Z	0,025	5,656	54,964
σ_X	0,012	0,038	0,166
σ_Y	0,026	0,031	0,182
σ_Z	0,021	0,013	0,044
min_x	0,002	1,442	1,263
min_y	0,002	1,208	0,472
min_z	0,001	5,629	54,877
MAX_X	0,040	1,548	1,656
MAX_Y	0,075	1,297	0,997
MAX_Z	0,061	5,671	55,000
PORTICATO DEL CASTELLO DEL VALENTINO			
	viDoc	Pix4dcatch	Scaniverse
Av.Δ_X	0,020	1,850	0,172
Av.Δ_Y	0,021	3,423	2,447
Av.Δ_Z	0,033	2,892	53,132
σ_X	0,019	0,473	0,126
σ_Y	0,015	0,432	0,083
σ_Z	0,038	0,033	0,036
min_x	0,006	1,356	0,059
min_y	0,005	2,767	2,348
min_z	0,002	2,860	53,098
MAX_X	0,042	2,578	0,382
MAX_Y	0,043	3,963	2,566
MAX_Z	0,095	2,945	53,192

Da questo primo test, si può notare come l'uso del rover RTK migliori significativamente l'accuratezza di posizionamento dei GCP e, di conseguenza, la corretta georeferenziazione dell'intera nuvola di punti. Nel primo scenario, utilizzando solo il GPS, l'errore planare medio è di circa 1,4 metri (1,49 m in direzione X e 1,27 m in direzione Y), e l'errore in quota è superiore ai 5 metri. I valori acquisiti dal rover RTK hanno invece errori inferiori a 3 centimetri sia per le misurazioni planari che per quelle di elevazione. Allo stesso modo, nel secondo scenario, l'errore piano medio è di 2,6 metri (1,8 m in direzione X e 3,4 m in

direzione Y), mentre per l'elevazione è di 2,9 metri. Anche in questo caso, utilizzando il rover RTK, gli errori si riducono significativamente a circa 2 e 3 centimetri. Inoltre, questa prima valutazione riconosce nell'app utilizzata dal rover RTK una maggiore accuratezza rispetto a Scaniverse, che per il primo scenario raggiunge una differenza planare leggermente migliore con circa 1,1 metri (1,4 m in direzione X e 0,7 m in direzione Y), ma con un errore medio di elevazione di 54,9 metri. Nel secondo scenario i risultati sono simili, con un errore medio planare di circa 1,3 metri (0,17 m in direzione X e 2,45 m in direzione Y) e un'elevazione media superiore ai 53 metri. Questo è facilmente spiegabile dal fatto che Pix4DCatch misura le quote ellissoidiche, mentre Scaniverse quelle ortometriche. Tutte le nuvole di punti acquisite sono state confrontate con la ground truth acquisita utilizzando il TLS Faro Focus X 330 attraverso i software CloudCompare e Leica Cyclone 3DR. Ogni nuvola è stata segmentata per analizzare solo la parte in comune tra i dataset. Una volta che tutte le nuvole di punti sono state allineate e segmentate rimuovendo tutti gli elementi non necessari, sono state effettuate due analisi. La prima riguarda la densità spaziale dei punti, mentre la seconda si occupa della distanza dalla ground truth dopo l'allineamento. Per quanto riguarda la prima analisi, è stato impostato un raggio di 2 cm, all'interno del quale è stato calcolato il numero di neighboring points (Tabella 2).

Tabella 2. Neighboring Points (raggio 2 cm) per ciascuna nuvola di punti

		N° punti totali	Media Neighboring Points	Standard Deviation
STATUA DEL LEONE	Faro Focus X 330	3,62 M	66,9	38,8
	P4DC RTK	11,1 M	334,9	277,9
	P4DC	9,73 M	288,4	305,8
	SV	515,2 K	15,5	11,5
PORTICATO DEL CASTELLO DEL VALENTINO	Faro Focus X 330	25,52 M	597,7	2715,2
	P4DC RTK	11,4 M	133,3	164,2
	P4DC	9,0 M	88,7	96,55
	SV	289,9 K	2,08	1,07

Le nuvole di punti acquisite da Pix4Dcatch presentano un numero di punti molto maggiore rispetto a quelle generate con Scaniverse. In confronto con la ground truth, la nuvola di punti ottenuta con il ViDoc è molto più sparsa per il Porticato del Castello del Valentino (597,7 contro 133,3 punti medi in un raggio di 2 cm). Tuttavia, è più densa per la Statua del Leone (66,9 contro 334,9 punti medi in un raggio di 2 cm). Questo può essere facilmente spiegato dal fatto che, muovendosi con un dispositivo mobile, è più facile catturare piccoli dettagli da angolazioni che sarebbero inaccessibili con un TLS posizionato relativamente lontano dalla statua, mentre nell'altro scenario era stato posizionato direttamente all'interno del porticato, permettendo una ricostruzione più densa dello scenario.

Per quanto riguarda le distanze rispetto ai dataset del TLS, viene considerato un intervallo massimo di 10 cm per discriminare le distanze effettive delle nuvole di punti da tutti quei punti che rappresentano un cambiamento nell'ambiente tra le epoche di acquisizione (ad es., vasi o sedie nel Castello del Valentino posizionati dopo l'acquisizione TLS). Di solito, quando si scansiona un ambiente con un dispositivo mobile, può verificarsi una deriva nell'acquisizione col passare del tempo o in presenza di una loop closure, specialmente per ambienti interni. Tuttavia, poiché il test sul rover RTK sarebbe stato poco significativo in uno scenario interno, e poiché i dataset sono stati acquisiti in modo rapido e senza loop closure, non è stata notata una deriva significativa (Figura 3).

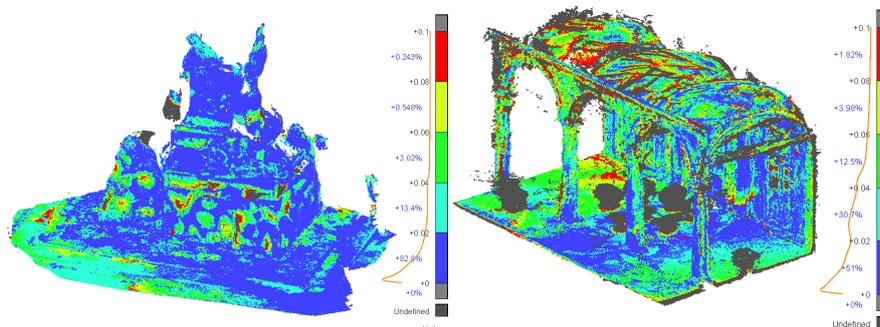


Figura 3. Distanze delle nuvole di punti acquisite con Pix4Dcatch con il rover RTK viDoc rispetto al Faro Focus X 330

Nel primo scenario, dopo l'allineamento rispetto al Faro Focus X 330, oltre l'80% dei punti rientra nell'intervallo di distanza per la nuvola di punti acquisita con Pix4Dcatch RTK. Utilizzando solo il GPS, questa percentuale è leggermente inferiore, al 77,7%; per Scaniverse, questa percentuale scende al 40%. Nel secondo scenario, nello stesso intervallo, troviamo oltre il 50% dei punti acquisiti utilizzando il rover RTK, mentre solo il GPS fornisce poco più del 33% dei punti all'interno di una distanza di 2 cm. A prima vista, il risultato ottenuto con Scaniverse sembra migliore, con il 60% dei punti in questo intervallo. Tuttavia, va considerato che questo valore è una percentuale riferita al numero di punti della nuvola segmentata: il 60% di 289,9 mila punti per Scaniverse contro il 51% di 11,4 milioni di punti per Pix4Dcatch RTK. I risultati di questa valutazione delle distanze suggeriscono la bontà del processo di acquisizione di Pix4Dcatch, sia utilizzando il rover RTK che da solo, così come l'efficacia del processing, che per questo contributo è stato effettuato via cloud, ma che può anche essere realizzato localmente utilizzando Pix4dmatic o altri software per la ricostruzione fotogrammetrica. La soluzione offerta da viGram e Pix4D per un mapping rapido ed accessibile del patrimonio costruito ha fornito risultati promettenti, con il rover RTK che ha mostrato basse discrepanze (< 3 cm di errori planari e di elevazione) rispetto alle misurazioni dei GCP effettuate dal ricevitore GNSS. Allo stesso tempo, il confronto con un'altra app, Scaniverse, ci ha permesso di definire che la migliore qualità dei dati fosse sfruttata. Le nuvole di punti generate dalla seconda app erano infatti significativamente meno dense rispetto a quelle di Pix4Dcatch, in parte perché l'elaborazione dei dati può avvenire solo in tempo reale in pochi secondi, mentre l'elaborazione della nuvola

richiede diversi minuti. Tra le molte app gratuite che sfruttano il sensore LiDAR, altre potrebbero offrire risultati migliori, che gli autori potrebbero non aver considerato.

4. Conclusioni

L'uso di dispositivi mobili distribuiti in massa con sensori ad alta risoluzione per la documentazione del patrimonio costruito pone le basi per la democratizzazione delle tecniche di rilevamento, grazie all'integrazione di un dispositivo mobile con un rover RTK di dimensioni contenute e molto meno costoso rispetto a un TLS abbinato a un ricevitore GNSS. La precisione di un dispositivo così compatto può essere cruciale per identificare rapidamente vulnerabilità strutturali e cambiamenti minimi nel tempo, consentendo azioni tempestive e allocazione di risorse contro potenziali minacce. La differenza di prezzo tra le due strumentazioni giustifica alcune limitazioni, come il raggio massimo acquisibile di 5 metri per il sensore LiDAR di Apple, che potrebbe essere aumentato montando il dispositivo mobile su un palo telescopico per raggiungere aree più lontane da rilevare. Inoltre, si potrebbe ottenere un'integrazione con droni compatti, ad alta risoluzione e relativamente economici, come la serie DJI Mini, utilizzando i GCP misurati dal rover RTK per la ricostruzione fotogrammetrica aerea di oggetti di notevoli dimensioni o aree non accessibili agli operatori umani. L'intera strumentazione sarebbe comunque molto meno costosa e più leggera rispetto a quella di riferimento. Il viDoc, come tutti i ricevitori RTK/GNSS, non è adatto per scenari interni. Tuttavia, i GCP misurati all'aperto con precisione in un'acquisizione ad ambiente misto possono comunque essere presi in considerazione per migliorare il posizionamento della nuvola di punti nella fase di elaborazione. Oltre alla documentazione rapida del patrimonio costruito, questa configurazione compatta e leggera potrebbe essere sfruttata anche per molte altre attività, come la documentazione di trincee e cantieri, o per la ricostruzione di incidenti e perizie forensi. Il rover viDoc RTK testato in questo contributo è stato offerto agli autori nell'ambito del grant Pix4Dcatch RTK per la ricerca universitaria, dove è stato proposto un workflow riguardante l'uso della fotogrammetria da integrare con TLS e UAS per una ricostruzione completa e accurata della nuvola di punti per l'architettura sostenibile. I dataset di riferimento sono stati acquisiti dal Dipartimento di Architettura e Design del Politecnico di Torino (DAD), specificamente dal team di ricerca del Laboratorio di Geomatica per i Beni Culturali (LabG4CH), e sono stati gentilmente messi a disposizione per le analisi e i confronti di questo contributo.

5. Riferimenti

1. Alsadik, B., Jasim, L.K. (2018). Active use of panoramic mobile mapping systems for as-built surveying and heritage documentation. *International Journal of Architectural Heritage*, Volume 13, Issue 2, 244-256.
<https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1431733>

2. Bonfanti, C., Patrucco, G., Perri, S., Sammartano, G., Spanò, A. (2021). A NEW INDOOR LIDAR-BASED MMS CHALLENGING COMPLEX ARCHITECTURAL ENVIRONMENTS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XLVI-M-1-2021, 79–86.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-79-2021>
3. Di Stefano, F.; Torresani, A.; Farella, E.M.; Pierdicca, R.; Menna, F.; Remondino, F. (2021). 3D Surveying of Underground Built Heritage: Opportunities and Challenges of Mobile Technologies. *Sustainability*, 13, 13289.
<https://doi.org/10.3390/su132313289>
4. Fanar, M.A., Mamoun, U. M. & Saif, J.K. (2017). ARCHITECTURAL AND CULTURAL HERITAGE CONSERVATION USING LOW-COST CAMERAS. *Applied Research Journal*, Volume 3, Issue 12, 376-387.
5. Breggion, E., Balletti, C. & Guerra, F. (2023). MULTI-CAMERA LIDAR SYSTEM FOR SPATIAL AND TEMPORAL PRESERVATION OF THE INTANGIBLE CULTURAL HERITAGE. *ISPRS Archives*, Volume XLVIII-M-2-2023, 297-302.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-297-2023>
6. Gollob, C.; Ritter, T.; Kraßnitzer, R.; Tockner, A.; Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sens.*, 13, 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
7. Vogt, M., Rips, A., Emmelmann, C. (2021). Comparison of iPad Pro®'s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. *Technologies*, 9, 25.
<https://doi.org/10.3390/technologies9020025>
8. F. King, R. Kelly and C. G. Fletcher (2022). Evaluation of LiDAR-Derived Snow Depth Estimates From the iPhone 12 Pro, in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, 1-5 <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3166665>
9. Luetzenburg, G., Kroon, A. & Bjørk, A.A. (2021). Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Sci Rep* 11, 22221.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>
10. Zamotsin, M., Dyagilev, A., Hafez, S.H., Holovenko, T., Shovkomud, O. (2022). Human body measurement with the iPhone 12 Pro LiDAR scanner. *AIP Conference Proceedings*; 2430 (1): 090009. <https://doi.org/10.1063/5.0078310>
11. Murtiyoso, A.; Grussenmeyer, P.; Landes, T.; Macher, H. (2021). First assessments into the use of commercial-grade solid-state lidar for low-cost heritage documentation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B2-2, 599–604.
<https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLIII-B2-2021/599/2021>

12. Teppati Losè, L.; Spreafico, A.; Chiabrando, F.; Giulio Tonolo, F. (2022). Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sensing*, 14, 4157. <https://doi.org/10.3390/rs14174157>
13. Díaz-Vilariño, L., Tran, H., Frías, E., Balado, J., and Khoshelham, K. (2022). 3D MAPPING OF INDOOR AND OUTDOOR ENVIRONMENTS USING APPLE SMART DEVICES, ISPRS Archives, XLIII-B4-2022, 303–308. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-303-2022>