

SCANSIONI DINAMICHE IN ARCHEOLOGIA DELL'ARCHITETTURA: TEST E VALUTAZIONI METRICHE DEL SENSORE LIDAR DI APPLE

1. INTRODUZIONE

Gli strumenti e i metodi per il rilievo archeologico rientrano da sempre nei temi di ricerca di chi scrive (CATTANI, FIORINI, RONDELLI 2004; FIORINI 2004, 2008, 2009, 2010, 2012, 2013, 2018; BOGDANI *et al.* 2007; FIORINI, ARCHETTI 2011; FIORINI, URCIA, ARCHETTI 2011). Di recente, al centro del nostro interesse ci sono gli scanner portatili per il rilevamento dinamico terrestre, da ora in poi indicati nel testo con l'acronimo MLS (Mobile Laser Scanner), ma recentemente definiti anche HMLS (Hand-held Mobile Laser Scanner). Diversamente da quanto succede con i laser scanner statici, il rilievo degli oggetti presenti nello spazio avviene attraverso una ripresa dinamica, dunque, il termine "mobile" nel nome MLS allude alla modalità di utilizzo del dispositivo (JAMES, QUINTON 2014).

Gli MLS stanno cambiando il modo in cui vengono condotti i rilevamenti in molti domini applicativi: ambiente costruito e urbano, beni culturali e archeologia, ambiente sotterraneo, monitoraggio ambientale e altro ancora. L'interesse è dovuto alle loro caratteristiche principali: facilità d'uso, affidabilità, efficienza, costi relativamente contenuti e ridotto sforzo umano. Per acquisire i dati, gli MLS usano un sensore professionale di tipo LiDAR (Light Detection And Ranging, ossia rilevamento e valutazione della distanza tramite la luce: GOMARASCA 2004, 287, 593; YOUNG 2011, 3; DI STEFANO *et al.* 2021, 2389)¹.

2. IL SENSORE LIDAR DI APPLE

L'evoluzione tecnologica ha consentito l'immissione sul mercato di sensori economici e miniaturizzati (fino a dimensioni sub-centimetriche), come quello che Apple ha installato nei suoi tablet e smartphone a partire dal 2020². Questo sensore è stato introdotto sul mercato principalmente per applicazioni di realtà aumentata: una tecnica che impiega i dati sulla profondità della scena

¹ Il sensore trasmette impulsi di onde elettromagnetiche alla velocità costante di 299.792.458 m/s (velocità della luce) e li riceve una volta che sono riflessi da un ostacolo. Il tempo che trascorre tra l'emissione e la registrazione dell'impulso di ritorno (tempo di volo) viene "cronometrato" e si ricava da questo valore la distanza del punto riflettente (GOMARASCA 2004, 287, 593; YOUNG 2011, 3; AMALDI 2014, 1429-1434).

² <https://www.apple.com/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>.

per inserire nell'inquadratura testi e oggetti tridimensionali (BARCELÓ 2001, 233-242). Tuttavia, numerose utility (app) lo usano per rilevare distanze e generare planimetrie in modalità semi-automatica. Si tratta, pertanto, di un sensore che può essere impiegato come strumento di misura pur non essendo stato concepito a tale scopo (MURTIYOSO *et al.* 2021, 600; SPREAFICO *et al.* 2021b, 63). Questo sensore, del quale Apple non ha fornito le specifiche tecniche, dovrebbe usare onde elettromagnetiche di lunghezza pari a $0,8 \mu\text{m}^3$, dunque onde non visibili dall'uomo (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021, 2; SPREAFICO *et al.* 2021a, 421). Funziona in ambienti chiusi come all'aperto e riesce a effettuare la misura fino a 4,9 m di distanza (SPREAFICO *et al.* 2021b, 65). La fotocamera svolge un ruolo fondamentale: fornisce i dati per la colorazione dei punti e contribuisce alla formazione della nuvola stessa (MURTIYOSO *et al.* 2021, 602-603; SPREAFICO *et al.* 2021a, 422). Infatti, se si oscura l'obiettivo mentre si esegue una scansione, si ottiene una nuvola completamente nera e piuttosto lacunosa.

La possibilità di eseguire un rilievo 3D con uno strumento leggero e portatile, in grado di fornire risultati in tempo reale e dal costo relativamente basso (rispetto agli scanner professionali), ha suscitato non poca curiosità tra gli addetti ai lavori. Lo si deduce dalle diverse pubblicazioni scientifiche che valutano le prestazioni del sensore e le modalità d'uso in differenti ambiti applicativi (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021; MURTIYOSO *et al.* 2021; SPREAFICO *et al.* 2021a, 2021b). I test pubblicati fino ad ora hanno evidenziato errori centimetrici nella posizione dei punti della nuvola rispetto ai punti di riferimento misurati con strumenti topografici di precisione elevata. Ad esempio, scansionando a una distanza variabile tra 1 e 3 m un fronte architettonico caratterizzato da una geometria diversificata (dunque non assimilabile a un piano), la posizione di alcuni punti della nuvola (12%) si discosta dal dataset di riferimento fino a 5-10 cm, ma in buona parte (60%) l'errore non supera i 2 cm (SPREAFICO *et al.* 2021b, 68-69). Nel complesso, le conclusioni a cui giungono gli autori (ingegneri, architetti e geologi) sono sostanzialmente positive anche se esistono alcune perplessità:

1) il sensore ha una precisione accettabile per l'elaborazione di rilievi architettonici in scala 1:200 (o con denominatore più grande); dunque, se l'obiettivo è quello di ricavare dalle nuvole un "disegno CAD" da stampare con questo "rapporto di riduzione", allora il sensore di Apple sembra essere uno strumento molto interessante, considerando anche il basso costo rispetto ad altri sistemi di scansione, la portabilità, la velocità e la facilità d'uso (SPREAFICO *et al.* 2021b, 69);

³ <https://www.forbes.com/sites/sabbirrangwala/2020/11/12/the-iphone-12lidar-at-your-fingertips/>.

2) è uno strumento utile anche per la ricerca geo-scientifica, ma la sua “portata” (non superiore a 4,9 m) ne riduce il campo delle applicazioni (LUETZENBURG, KROON, BJØRK 2021, 6);

3) oltre a questo limite, un'altra criticità del sensore è la risoluzione non sufficiente alla restituzione dei dettagli formali più minuti di una superficie (il problema è stato riscontrato in seguito al rilievo di una statua e di alcuni graffiti presenti nelle pareti di un edificio storico).

Nonostante questi limiti, e sebbene la qualità metrica abbia ancora molto margine di miglioramento, la presenza di questo sensore in uno smartphone (o tablet) viene considerata un altro passo importante verso la “democratizzazione” dei dati 3D: un processo iniziato con l'immissione sul mercato di scanner molto più economici e di software per la fotogrammetria digitale “user-friendly” (MURTIYOSO *et al.* 2021, 602-603).

3. CASI DI STUDIO E METODO DELLA RICERCA

La domanda a questo punto è obbligata: per quali attività di documentazione archeologica è adatto questo sensore? Ovviamente la scelta dello strumento dipende dallo scopo della misurazione. Non sempre le misure richiedono una precisione elevata: a seconda dei casi ci si può accontentare di misure approssimative, ma sufficienti allo scopo. In archeologia esistono indagini che richiedono una precisione al millimetro (la mensiocronologia dei laterizi, solo per fare un esempio), ma in genere una precisione centimetrica è compatibile con il livello di qualità richiesto per la maggior parte delle attività di documentazione.

Ad ogni modo, per evitare generalizzazioni, si è deciso di restringere il campo applicativo a un settore specifico dell'archeologia, cioè l'archeologia dell'architettura (PARENTI 2000; BOATO 2008; BROGIOLO, CAGNANA 2012), e di rimandare a lavori futuri una sperimentazione più allargata che comprenda in particolare lo scavo archeologico. Come noto, la documentazione archeologica degli elevati richiede le ortofoto dei prospetti da cui ricavare il disegno degli elementi costruttivi (laterizi e litici) e delle unità stratigrafiche. Altrettanto necessari sono i tradizionali elaborati grafici: piante, prospetti e sezioni. Questi disegni, oltre a fornire dati utili per un'analisi formale e dimensionale del costruito (studio delle tipologie di impianto, dei criteri compositivi e delle unità di misure antiche), vengono utilizzati per costruire tavole fondamentali per la comunicazione dei risultati: l'individuazione grafica delle diverse fasi edilizie e le ricostruzioni dei passati assetti architettonici (MEDRI 2003).

Il dispositivo utilizzato è un iPhone 13 Pro Max: un modello immesso sul mercato nel settembre del 2021 (Fig. 1). I dati sono stati acquisiti tramite l'applicazione gratuita Scaniverse (versione 1.6.1) che trasforma i punti della

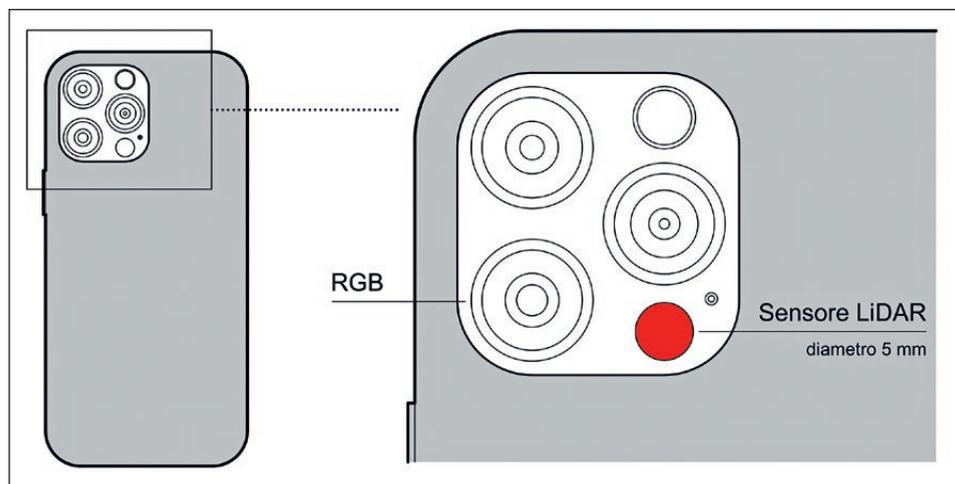


Fig. 1 – Un dettaglio dello strumento impiegato in questo studio (iPhone 13 Pro Max).

nuvola in una superficie mesh a rete di poligoni (triangolari). La fotocamera dello smartphone viene utilizzata dall'app per generare la texture e conferire al modello un aspetto fotorealistico. La mesh può essere misurata, tagliata (generando all'istante una pianta) e salvata su cloud (OneDrive, Sketchfab, etc.) in formato 3D (come OBJ e FBX) garantendo piena compatibilità con la maggior parte dei software di modellazione⁴. Il modello è un prodotto metrico, ovvero misurabile in ogni direzione, pertanto già utilizzabile in ambito tecnico per ricavare piante e sezioni. Non solo: la vista ortografica della mesh texturizzata può essere salvata in formato raster e usata per il disegno CAD di unità stratigrafiche e materiali costruttivi.

Per valutare le proprietà metrologiche del sensore (portata, risoluzione e precisione) si sono svolti 6 diversi test di misurazione: cambiano le condizioni operative durante l'uso dello strumento, la morfologia dell'oggetto e lo scopo della misurazione.

Il primo caso di studio è stato affrontato al fine di valutare la precisione dello strumento. Come termine di confronto si sono usate misure topografiche di alta precisione (ottenute tramite laser scanner a luce strutturata). Oggetto del test è un capitello alto circa 33 cm, con un diametro alla base di circa 23 cm. In meno di 15 secondi è stata eseguita la scansione LiDAR di una parte della sua superficie. L'acquisizione dei dati è avvenuta a una distanza

⁴ In costante crescita è il numero delle applicazioni dedicate al rilievo tramite sensore LiDAR. Tra le più note, oltre a Scaniverse, si ricordano Polycam, 3d Scanner AppTM e Sitiescape.

di circa 40 cm, cercando di muovere lo strumento lentamente e a velocità costante. La stessa porzione è stata poi rilevata con uno scanner manuale ad alta precisione: lo Spider a luce strutturata, prodotto da Artec 3D⁵. Tramite algoritmo ICP (Interactive Closest Point), si sono sovrapposti i due modelli e confrontati mediante analisi Cloud-to-Mesh (una funzionalità del software CloudCompare). Questo strumento (da ora in poi indicato nel testo con l'acronimo C2M) misura il grado di somiglianza formale dei modelli e genera una mappa a falsi colori che evidenzia le zone meno corrispondenti.

Il secondo caso di studio riguarda opere murarie costruttivamente omogenee, selezionate in alcuni edifici storici di Ravenna (le chiese di San Giovanni Evangelista e Santa Giustina). Lo scopo è quello di stabilire se la vista ortografica del modello LiDAR è adatta, in termini di risoluzione della texture, al disegno archeologico dei materiali costruttivi⁶. Inoltre, si vuole quantificare lo scostamento delle dimensioni fornite dal modello rispetto ai valori di riferimento. Per questo motivo all'interno del campione di muratura (2x2 m) si sono applicati alcuni target (sfere di diametro pari a 3 mm) e la loro reciproca distanza è stata misurata con una riga millimetrata di metallo e assunta come dataset di riferimento rispetto al quale valutare la precisione del modello. La parete è stata scansionata "a mano libera", dall'alto verso il basso, mantenendo la stessa distanza (poco meno di 1 m) e soprattutto cercando di non passare più volte sulla stessa porzione. Evitando ridondanze si minimizza la formazione di un doppio strato della nuvola (MURTIYOSO *et al.* 2021, 603). Ulteriori test sono stati condotti a 2,5 e 4 m di distanza dalla parete. Il software CloudCompare è stato usato per misurare sul modello le distanze tra i target e generare la vista ortografica del campione murario.

Il terzo caso di studio è una parete pluristratificata. A Urbino, in via Raffaello, si trova Casa Santi, detta anche Casa natale di Raffaello: un complesso architettonico in laterizi d'uso primario, composto da corpi di fabbrica contigui, che dal XV secolo fu abitato dalla famiglia Santi e dove nacque il celebre pittore (MAZZINI 1982, 431-435). Nel fronte stradale, al civico 57, si apre l'ingresso principale: un portale in pietra ad architrave, sormontato da un fregio e una cornice aggettante. A sinistra dell'ingresso, al numero civico 55, è presente una grande apertura ad arco ribassato, oggi tamponata da un muro in laterizi. Per la natura pluristratificata del paramento e la perfetta leggibilità dei suoi caratteri costruttivi, Casa Santi può essere considerata

⁵ La lunghezza più piccola che lo scanner può apprezzare è 0,1 mm (risoluzione), mentre la differenza tra il valore della lunghezza misurata dallo strumento e quello della lunghezza reale può essere veramente minima: fino a 0,05 mm (precisione).

⁶ La risoluzione di una immagine metrica, come quella che si ottiene da una scansione LiDAR o un rilievo fotogrammetrico, è la frazione di lunghezza che può essere misurata dal singolo pixel. Per questo motivo il valore di risoluzione è detto "pixel size" oppure GSD acronimo di Ground Sampling Distance (GOMARASCA 2004, 218).

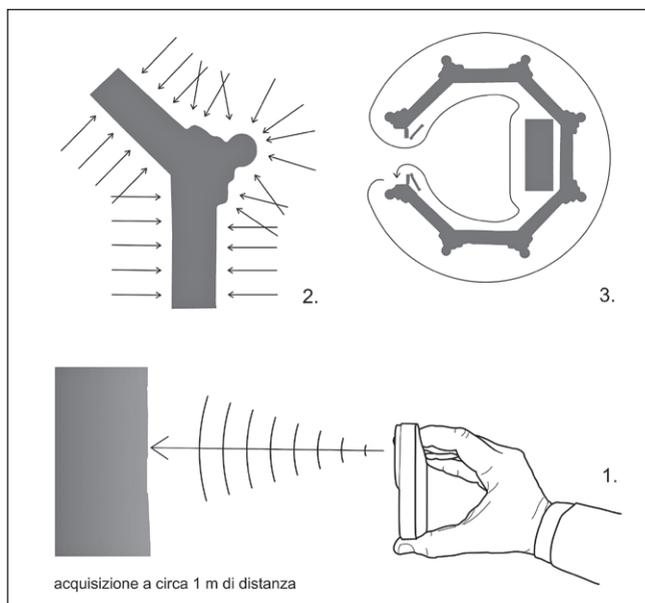


Fig. 2 – Schema che illustra alcuni aspetti del rilievo planimetrico tramite sensore LiDAR: 1) la distanza dall'oggetto; 2) l'orientamento dell'asse ottico rispetto alla superficie; 3) il percorso scelto per scansionare la struttura.

un manufatto ad alto potenziale archeologico. Il rilievo è stato condotto da terra, senza strumenti ausiliari, sollevando il dispositivo a un'altezza di circa 2 m. La distanza di presa è stata scelta considerando due fattori: la distanza massima di acquisizione (4,9 m) e la necessità di leggere chiaramente sul modello i perimetri di USM. Pertanto la scansione è avvenuta senza inclinare eccessivamente l'asse ottico, a una distanza dalla parete di 4 m, rilevandola fino a un'altezza di circa 5 m. In meno di un minuto è stata acquisita la nuvola e calcolato il modello texturizzato. La vista ortografica della parete è stata elaborata con il software CloudCompare e il disegno delle unità stratigrafiche realizzato con AutoCAD.

Il quarto test di misurazione ha prodotto la planimetria di un edificio. A Rimini, in piazza Tre Martiri, si trova il Tempietto di Sant'Antonio: un edificio a pianta ottagonale, costruito nella prima metà del XVI secolo e ristrutturato dopo il terremoto del 1672 (GUERRA 2010, 34-35). L'assenza di ostacoli e la possibilità di entrare all'interno della chiesa hanno permesso di eseguire una sola scansione dinamica per documentare l'intera pianta. Durante il percorso, il sensore è stato tenuto a un'altezza di circa 1 m da terra e a una distanza analoga dalla parete, cercando di orientare il suo asse ottico

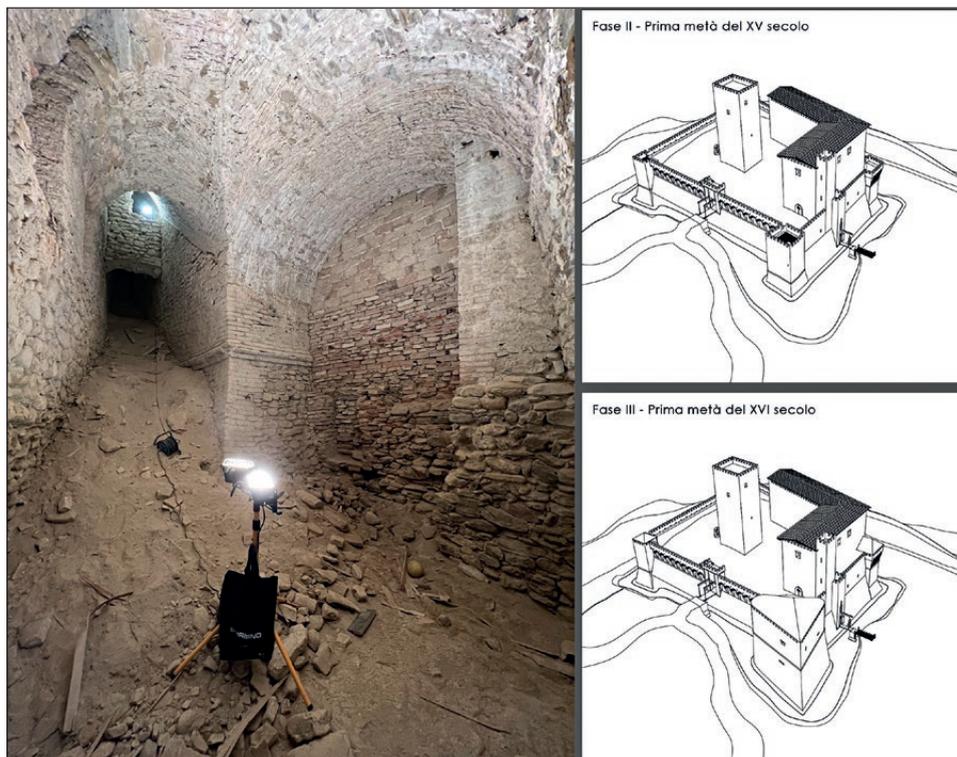


Fig. 3 – Castello di Sorrivoli, provincia di Forlì-Cesena. Al centro della foto si può notare lo spigolo della torre quattrocentesca. Nella prima metà del XVI secolo, quando viene addossato alla torre un bastione, si forma tra i due edifici un vano stretto e allungato. Questo ambiente è stato rilevato tramite sensore LiDAR.

in modo da formare sempre un angolo di 90° con la superficie architettonica (Fig. 2). Per l'acquisizione dei dati si sono impiegati meno di 2 minuti, mentre l'elaborazione del modello 3D ha richiesto all'app circa 10 secondi. Una scansione supplementare ha permesso di rilevare la pavimentazione e alcune parti delle finestre che erano state trascurate durante il primo rilievo. Il modello è stato sezionato con CloudCompare e il disegno della pianta completato in AutoCAD.

Con il quinto caso di studio si è rilevato l'ambiente interno di un edificio storico. A Urbania, in via Roma, si trova l'Oratorio della Madonna del Carmine: un edificio a pianta rettangolare, costruito nel XV secolo (LEONARDI 2005, 133-137). I muri perimetrali delimitano un'aula di modeste dimensioni: lunghezza 5,4 m, larghezza 3,5 m, altezza 4,8 m. Attraverso più scansioni dinamiche eseguite a una distanza variabile tra 1-3 m, si sono rilevate le pareti,

il pavimento, il soffitto e l'altare. Al termine di ogni sessione è stata elaborata la mesh per verificare la completezza del dato e stabilire l'area di ripresa successiva. Per quanto riguarda le condizioni ambientali, la scarsa illuminazione non ha impedito al sensore una corretta registrazione dei dati, anche nelle zone più buie. Le diverse mesh sono state registrate in CloudCompare sfruttando una serie di punti omologhi (macchie, dettagli pittorici, venature naturali dei materiali edilizi, etc.).

Il sesto e ultimo caso di studio si inserisce in un progetto di archeologia dell'architettura che ha come obiettivo la determinazione della storia costruttiva del castello di Sorrivoli (FIORINI 2011, 2019). Nelle precedenti campagne di documentazione non fu possibile produrre – con gli strumenti a disposizione (fotogrammetria e stazione totale) – la consueta documentazione grafica (piante, sezioni e prospetti) di alcuni ambienti del complesso architettonico, a causa delle loro piccole dimensioni: in particolare un lungo vano, largo appena 60 cm, posto tra un bastione moderno e una torre tardomedievale (Fig. 3). Al termine di questo corridoio si trova un ambiente a pianta semicircolare (1,8×1,07 m), alto appena 1,4 m e coperto da una semicupola.

Oltre al limitato spazio di operatività, questo contesto porta una seconda criticità: la scarsa illuminazione. Pertanto, si sono impiegati tre faretto da cantiere e una piccola lampada, fissata direttamente allo smartphone grazie a una staffa di metallo (Neewer Rig Video). Le comode impugnature di questo supporto hanno permesso una movimentazione più fluida del sensore: un aspetto su cui si ritornerà. L'ambiente è stato rilevato in meno di 2 minuti, eseguendo una scansione dinamica generale e alcune riprese supplementari per colmare le lacune individuate all'istante nel modello.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 *Caso di studio n. 1 (capitello)*

Il primo test ha riguardato il rilievo di un capitello, ovvero di un oggetto caratterizzato da una geometria diversificata, non assimilabile a un piano e il cui andamento nello spazio è fortemente tridimensionale. Lo scanner a luce strutturata ha generato una “replica” digitale, priva di difetti autoptici e ricca di dettagli. Gli elementi decorativi della superficie, le parti incavate e quelle sporgenti (a volte di pochi millimetri) sono fedelmente riprodotte (Fig. 4). Nel modello LiDAR questi dettagli si perdono totalmente e appare ben restituito solo l'andamento curvilineo generale del fusto. Ciò significa che la distanza tra i punti della nuvola è troppo ampia per riuscire a catturare i dettagli più minuti (secondo alcuni test di misurazione effettuati a 1 m di distanza dall'oggetto, la distanza osservata tra due punti della nuvola è di circa 1 cm: SPREAFICO *et al.* 2021b, 65). L'analisi comparativa (C2M) ha poi evidenziato che alcuni punti della superficie del modello LiDAR si



Fig. 4 – Comparazione dei modelli ottenuti con i diversi sistemi di scansione: 1) a luce strutturata; 2) LiDAR (di Apple).

discostano dal modello di riferimento fino a 1,3 cm⁷. Queste deformazioni e semplificazioni lo rendono sicuramente inadatto per impieghi nel settore museale e del restauro. Si pensi, ad esempio, al monitoraggio del degrado o alla produzione di repliche fisiche (stampa 3D) da esporre temporaneamente al posto dell'originale. Per lo stesso motivo (il basso grado di aderenza alla realtà della mesh), il suo impiego anche solo per una schedatura dei caratteri (formali e dimensionali) del manufatto deve avvenire con grande cautela.

4.2 Caso di studio n. 2 (campione di muratura omogenea)

Il rilievo, eseguito a poco meno di 1 m di distanza dalla superficie, ha fornito un modello texturizzato. La sua vista ortografica è un'immagine (in formato .jpg) nitida e metricamente idonea a una documentazione archeologica degli elementi costruttivi (osservazione, schedatura e disegno al CAD). La risoluzione è pari a 0,6 mm e fornisce misure con uno errore fino a 6 mm rispetto ai valori di riferimento (errore medio 2 mm) (Fig. 5)⁸.

Riguardo alla fase di acquisizione dei dati è importante sottolineare alcuni aspetti. Diversamente da quanto accade per la fotogrammetria, non

⁷ Sono 8 le osservazioni che rientrano nella classe di valore 0,012-0,013 m, mentre la classe più popolata (122 osservazioni) comprende errori più contenuti, intorno ai 2 mm (da 0,0015 a 0,0021 m).

⁸ Ripetendo il test a 2,5 m la texture è meno dettagliata: i bordi degli elementi costruttivi appaiono poco nitidi e i target applicati sulla parete (sfere di diametro pari a 3 mm) non sono facilmente identificabili. In questo caso le misure eseguite sul modello LiDAR si discostano dai valori di riferimento fino a 1,5 cm (media 8 mm).

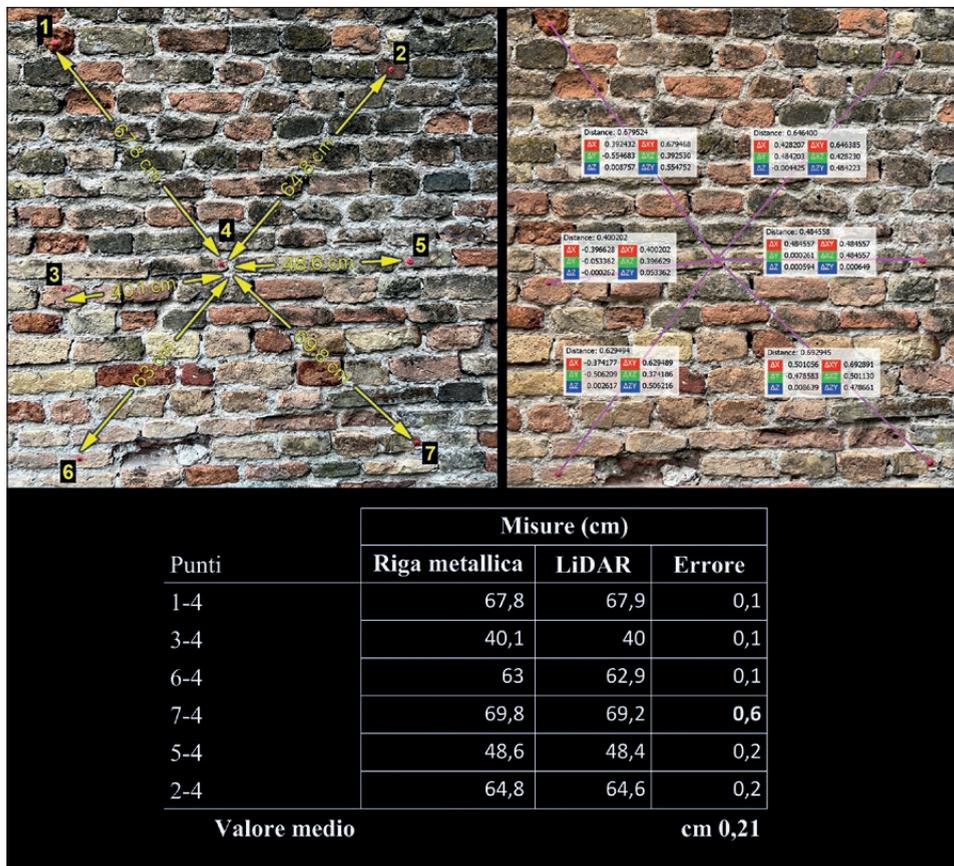


Fig. 5 – Comparazione dei dati metrici acquisiti con strumenti differenti: a sinistra, le distanze misurate con una riga millimetrata di metallo; a destra, le distanze estratte dal modello 3D prodotto dal sensore LiDAR (chiesa di San Giovanni Evangelista, Ravenna).

occorre appoggiare sulla superficie riferimenti metrici o rilevare punti di appoggio: i dati acquisti sono già in scala 1:1. Grazie a questa caratteristica è possibile ridurre il numero di strumenti ausiliari da portare sul campo (righe, stazioni totali, etc.). Ma non è tutto. La scansione dinamica è una tecnica di immediata applicabilità: ben più complesso è il settaggio di una fotocamera digitale o uno scanner 3D.

Esistono però due criticità: 1) il mancato rilevamento delle zone in ombra o di colore molto scuro (con la conseguente formazione di lacune nella nuvola di punti), problema riscontrato sul paramento adiacente a quello rilevato. Qui i mattoni presentano una colorazione omogenea e scura (Munsell 2.5Y 4/1 dark

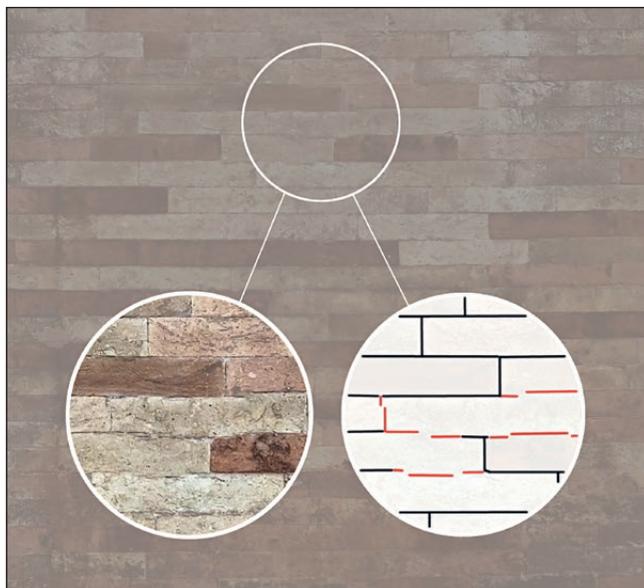


Fig. 6 – Rilievo LiDAR di una muratura in laterizi d'uso primario (chiesa di Santa Giustina, Ravenna). Nel cerchio: i problemi riscontrati in alcune zone della texture del modello 3D.

gray); 2) il disallineamento millimetrico (per la verità non frequente) di alcuni bordi dei mattoni (Fig. 6). Il primo problema è facilmente risolvibile dell'utente illuminando adeguatamente la superficie. Alla risoluzione del secondo problema stanno invece lavorando gli stessi ingegneri informatici che producono l'app testata. Secondo Keith Ito (fondatrice di Scaniverse), il disallineamento sarebbe legato a una imprecisa valutazione dell'orientamento spaziale del sensore durante la ripresa da viste differenti della stessa area (K. ITO 2021, lettera personale dell'autore). A causa di questo problema il LiDAR di Apple non è adatto ad una indagine mensiocronologica dei laterizi, in quanto gli artefatti presenti qua e là nell'immagine non consentono di identificare con sufficiente precisione l'inizio e la fine del fianco o della testa di un mattone e pertanto non permettono la misura al millimetro della sua dimensione⁹.

⁹ Misurando al millimetro le dimensioni di un certo numero di mattoni di un'opera muraria costruttivamente omogenea (USM) è possibile identificare la misura cui la fabbrica tendeva (valore medio) ed escludere le misure casuali, non volute, dovute a vari fattori (naturali e antropici): piccole differenze nelle dimensioni delle cassette causate da errori nel corso della loro preparazione o di consumazione da lavoro; diminuzioni di volume durante l'essiccamento e poi in cottura (MANNONI 2000, 216-217). Per una introduzione alla tecnica di analisi mensiocronologica dei laterizi cfr. MANNONI, MILANESE 1988; BOATO 2008, 139-146.

4.3 Caso di studio n. 3 (parete pluristratificata)

Come noto, alla base di un intervento di archeologia dell'architettura vi è un rilievo delle superfici che consenta di documentare le unità stratigrafiche murarie. Il test condotto a Urbino dimostra che il sensore può essere adatto a tale scopo. In effetti, la vista ortografica della parete ha una risoluzione

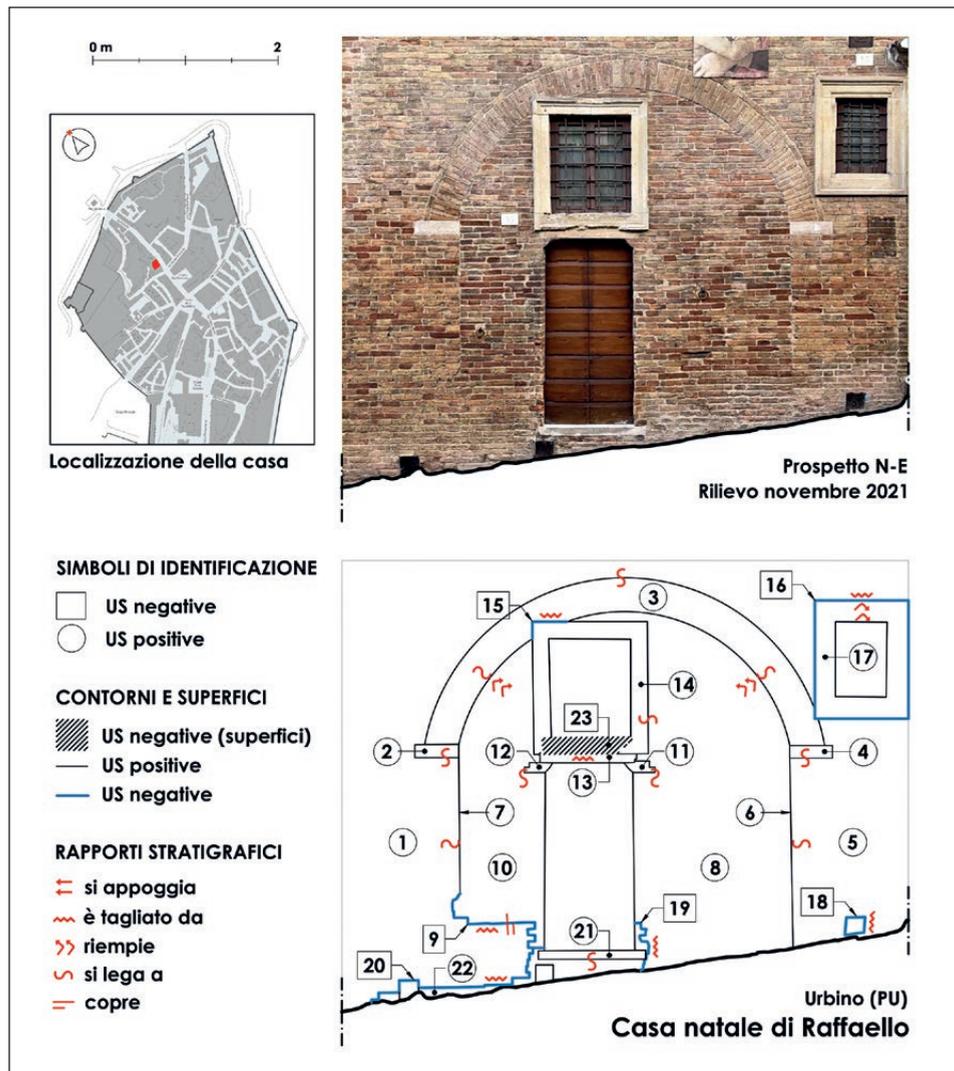


Fig. 7 – Casa natale di Raffaello, Urbino. Analisi stratigrafica di una porzione del fronte stradale. L'immagine è ottenuta tramite scansione dinamica LiDAR.

sufficiente per il disegno al CAD delle USM (grandezza del pixel pari a 3 mm ca.) (Fig. 7).

La “storia costruttiva” di questa porzione dell'edificio è chiara: in origine l'apertura era chiusa solo per due terzi o tre quarti della larghezza da un basso muro, rimanendo il resto libero per il passaggio all'interno dell'ambiente. Queste evidenze sono attribuibili al tipo architettonico della bottega medievale, dotata di banco e porticina di accesso: una soluzione che riprende, come noto, tipi edilizi dell'età classica (ADAM 1988, 346-347). In conclusione, il LiDAR, se posto a circa 4 m dalla parete, fornisce immagini nitide e con una risoluzione sufficientemente allo studio della stratificazione edilizia, ma presenta dei limiti non trascurabili in termini di estensione del rilevato (a quella distanza è possibile documentare correttamente una parete non più alta di 5 m). In futuro, si dovranno identificare gli strumenti ausiliari e le procedure necessarie per superare questo limite (ad es. “selfie stick” o aste telescopiche).

4.4 Caso di studio n. 4 (muri perimetrali di una chiesa)

Il risultato di questo test è un modello parziale dei muri perimetrali del Tempietto di Sant'Antonio, rilevati fino a un'altezza di circa 1,2 m (Fig. 8).



Fig. 8 – Tempietto di Sant'Antonio, Rimini. Pianta e modello dell'edificio rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

L'edificio ha una struttura geometrica diversificata, simile per complessità a quella del capitello (caso di studio n. 1). Pertanto, visto che il rilievo è avvenuto a una distanza simile, è ragionevole ipotizzare che la mesh abbia errori non troppo differenti: dunque tra 1 e 2 cm. Questi valori sarebbero inaccettabili se lo scopo del rilievo fosse la replica digitale di un piccolo manufatto, mentre si possono accogliere nel caso di una pianta di un edificio. Il disegno planimetrico (ricavato da una mesh con errori di quell'ordine) è sufficientemente preciso per la maggior parte delle applicazioni in campo archeologico: lo studio tipologico-formale dell'impianto, la restituzione grafica dei perimetri di USM, la mappatura delle tecniche costruttive e delle fasi edilizie.

4.5 Caso di studio n. 5 (aula affrescata di una chiesa)

Il sensore LiDAR ha restituito una copia digitale dell'intero ambiente, compreso il soffitto e le pareti affrescate, da cui è possibile ricavare informazioni metriche e disegni tecnici (piante, sezioni e prospetti) (Fig. 9). Anche il risultato estetico è pienamente soddisfacente, tuttavia occorre rilevare le seguenti criticità. La superficie del modello non è continua, ma è il risultato di numerose mesh giustapposte tramite punti comuni. Nelle zone di sovrapposizione si distinguono errori di allineamento fino a 5-10 cm: un risultato analogo a quello riscontrato da altri ricercatori rilevando oggetti simili a una distanza di 1-3 m (SPREAFICO *et al.* 2021b, 68-69). Inoltre, nelle singole mesh si riscontrano due tipi di problemi: 1) deformazioni geometriche (sporadiche e localizzate) dovute agli sdoppiamenti della nuvola (causati da involontari passaggi multipli del sensore sulla stessa porzione di parete); 2) errori di allineamento della texture (un problema riscontrato anche nel caso di studio n. 2).

Riguardo alla fase di acquisizione dei dati, è importante sottolineare i seguenti aspetti. Rilevare questo ambiente con la fotogrammetria sarebbe stato certamente più complesso perché avrebbe richiesto un operatore con una buona esperienza di acquisizione e processamento dei dati, nonché la disponibilità di molti strumenti: una fotocamera reflex; lampade led a batteria; un treppiede (non potendo scattare "a mano libera" a causa della scarsa illuminazione); uno strumento di misura per raccogliere distanze utili alla messa in scala del modello; un numero elevato di foto (viste le dimensioni dell'ambiente non sarebbe stato possibile allontanarsi dalle pareti per aumentare il campo di ripresa); un computer in grado di processare il set (corposo) di dati. Questa strategia sarebbe giustificata in casi particolari, come ad esempio la progettazione di un intervento di restauro delle pareti affrescate.

4.6 Caso di studio n. 6 (ambiente pluristratificato di un castello)

Gli scanner statici, le stazioni totali o la fotogrammetria necessitano di una certa distanza dall'oggetto per poter eseguire la misura. Pertanto, sono strumenti che possono essere inadeguati quando gli spazi sono molto piccoli

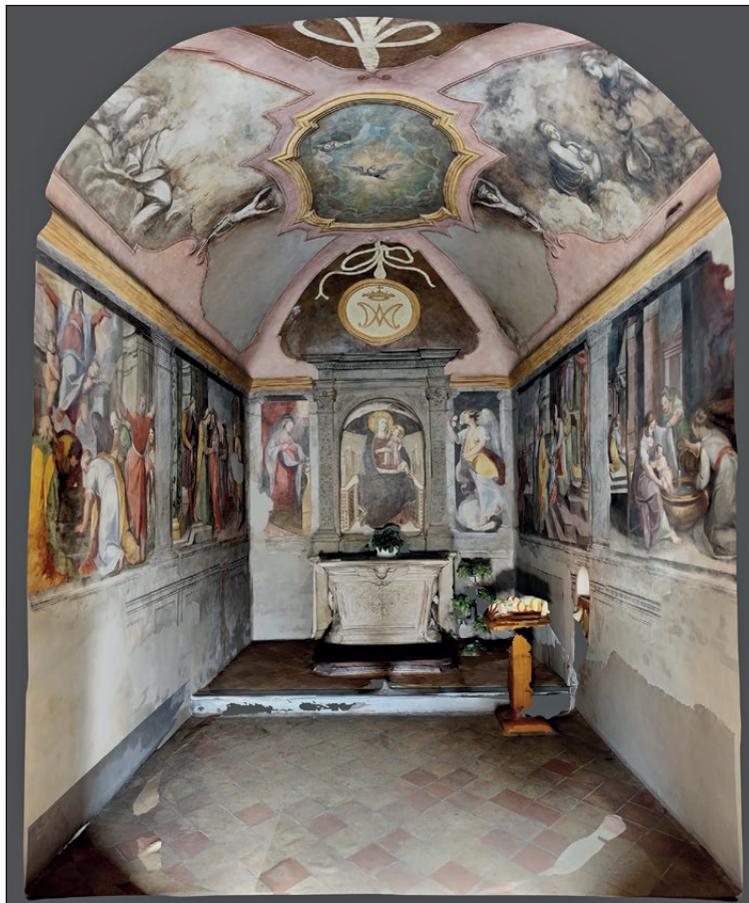


Fig. 9 – Oratorio della Madonna del Carmine, Urbania. Modello dell'edificio rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

e scarsamente illuminati (cunicoli, grotte, intercapedini, etc.). L'ambiente rilevato nel castello di Sorrivoli è largo appena 60 cm. Se si fosse utilizzata la fotogrammetria per ottenere un modello 3D, il numero di scatti necessario per coprire l'intera superficie sarebbe stato elevatissimo, con l'impossibilità di eseguire prese ad asse inclinato (e convergente) necessarie – a integrazione delle prese ad asse ortogonale – per ottenere una modellazione più accurata delle superfici. La scansione dinamica è invece una tecnica adatta al rilevamento di spazi ristretti. Il risultato di questo test è una replica 3D dell'ambiente, con resa fotorealistica delle superfici, composta da circa 130.000 poligoni, che occupa su hard disk un peso di circa 30 MB. Il modello ha permesso di

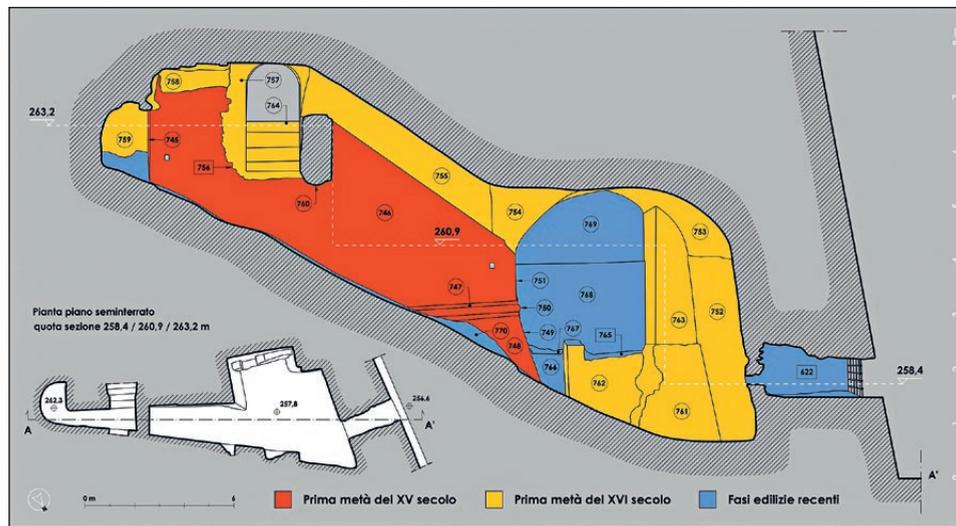


Fig. 10 – Castello di Sorrivoli, provincia di Forlì-Cesena. Analisi stratigrafica del vano rilevato tramite scansioni dinamiche LiDAR.

ricavare, oltre alla planimetria delle strutture, una documentazione accurata della stratificazione muraria (Fig. 10).

5. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Sebbene la qualità geometrica dei tradizionali strumenti di scansione rimanga innegabilmente migliore, il sensore LiDAR di Apple può essere efficace per quelle applicazioni che ammettono una precisione inferiore. Alla luce dei test effettuati, è possibile affermare che il sensore riporta errori centimetrici (e in alcuni casi sub-centimetrici), e pertanto può essere impiegato in campo archeologico, considerando anche il costo inferiore e la facilità d'uso rispetto agli scanner professionali. Se nel futuro si continuerà a investire in questa tecnologia – producendo sensori più performanti (in grado di campionare lo spazio in modo più uniforme, misurare a una distanza maggiore e restituire una texture priva di difetti) – allora potrebbe diventare uno strumento di uso comune. Allo stato attuale del suo sviluppo, il sensore LiDAR di Apple non è adatto per la modellazione di piccoli oggetti, mentre è utile per ottenere all'istante planimetrie funzionali agli scopi più frequenti in archeologia: lo studio tipologico-formale dell'impianto, la restituzione grafica dei perimetri di USM, la mappatura delle tecniche costruttive e delle fasi edilizie. Soprattutto può lavorare in condizioni operative estreme, dove lo spazio è limitato e la luce è scarsa (ipogei, corridoi, etc.). Inoltre, è uno strumento ideale per la documentazione archeologica di

campioni di muratura (2x2 m) ed elementi architettonici (finestre e apparati decorativi). Infine, può fornire viste ortografiche di facciate da utilizzare come base di riferimento per mappare le unità stratigrafiche murarie.

Alcuni consigli per il corretto uso dello strumento:

1 – Pianificazione del percorso. Stabilire come muoversi intorno all'oggetto o dentro l'ambiente da scansionare verificando che il percorso sia libero da ostacoli.

2 – Distanza di presa. Per le superfici planari, come ad esempio i paramenti murari, si raccomanda una distanza di presa non superiore a 1 m (errore previsto: inferiore a 1 cm). In questo modo l'immagine sarà nitida e permetterà il disegno dei materiali costruttivi. Non superare i 4 m di distanza per i rilevamenti stratigrafici di pareti, pena l'impossibilità di distinguere chiaramente i limiti delle USM. Nel caso di superfici complesse, come ad esempio i muri perimetrali di un edificio, se l'obiettivo è ottenere la pianta si consiglia una distanza non superiore a 1 m (errore previsto: inferiore a 2 cm). Il rilievo di un ambiente complesso, compreso il suo soffitto, richiederà necessariamente una distanza maggiore, variabile (1-3 m) e prossima al limite di portata dello strumento (4,9 m). In questo caso l'errore atteso può arrivare fino a 5-10 cm, pertanto, la qualità dell'informazione metrica potrebbe non essere sufficiente per scopi del ricercatore.

3 – Movimentazione del sensore. Non passare più volte sulla stessa porzione dell'oggetto, così da evitare "sdoppiamenti" della nuvola. La fluidità del movimento può minimizzare la formazione di artefatti nella texture, pertanto è consigliabile l'impiego di un "ring" o un gimbal.

Questa ricerca ha messo in luce i limiti e l'utilità del sensore in archeologia dell'architettura. I prossimi passi saranno rivolti, oltre alla ricerca di metodi per superare i problemi riscontrati, alla sperimentazione dello strumento in diversi contesti di scavo e ricognizione territoriale.

ANDREA FIORINI

Dipartimento di Storia Culture Civiltà (DiSCi) - Sezione di Archeologia
Alma Mater Studiorum - Università degli Studi di Bologna
andrea.fiorini6@unibo.it

Ringraziamenti

Questo articolo è il risultato di un proficuo scambio di opinioni con diversi docenti e ricercatori. In particolare, al Prof. Maurizio Cattani (Università di Bologna) si esprime sincera gratitudine per aver incoraggiato e seguito lo sviluppo di questa ricerca. Inoltre, si ringraziano il Prof. Antonio Curci (Università di Bologna) per aver partecipato alla discussione dei risultati, la Dott.ssa Federica Collina (FrameLAB, Università di Bologna) per il corso introduttivo sull'uso dello scanner a luce strutturata (Artec Spider) e il Dott. Stefano Bordoni (training fellow per il Centre for Data, Culture and Society dell'Università di Edimburgo) per la ricerca di informazioni sul funzionamento dell'applicazione Scaniverse.

BIBLIOGRAFIA

- ADAM J.P. 1988, *L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche*, Milano, Longanesi.
- AMALDI U. 2014, *Dalla mela di Newton al bosone di Higgs*, 5, *Induzione e onde elettromagnetiche. Relatività e quanti*, Bologna, Zanichelli.
- BARCELÓ J.A. 2001, *Virtual reality for archaeological explanation. Beyond "picturesque" reconstruction*, «Archeologia e Calcolatori», 12, 221-244 (<http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF12/12Barcelo.pdf>).
- BOATO A. 2008, *L'archeologia in architettura. Misurazioni, stratigrafie, datazioni, restauro*, Venezia, Marsilio.
- BOGDANI J., FIORINI A., SILANI M., ZANFINI M. 2007, *Esperienze di stereofotogrammetria archeologica*, «Ocnus», 15, 27-44.
- BROGIOLO G.P., CAGNANA A. 2012, *Archeologia dell'architettura. Metodi e interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- CATTANI M., FIORINI A., RONDELLI B. 2004, *Computer applications for a reconstruction of archaeological stratigraphy as a predictive model in urban and territorial contexts*, in K.F. AUSSERER, W. BÖRNER, M. GORIANY, L. KARLHUBER-VÖCKL (eds.), *Enter the Past: The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage. CAA 03 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 31st Conference (Wien 2003)*, Oxford, BAR International Series 1227, Archaeopress, 299-303 (<http://dx.doi.org/10.15496/publikation-3548>).
- DI STEFANO F., CHIAPPINI S., GORREJA A., BALESTRA M., PIERDICCA R. 2021, *Mobile 3D scan LiDAR: A literature review*, «Geomatics, Natural Hazards and Risk», 12.1, 2387-2429 (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19475705.2021.1964617>).
- FIORINI A. 2004, *Il trattamento informatico del dato tridimensionale in archeologia: dallo scanner 3D alla modellazione vettoriale*, in M. CATTANI, A. FIORINI, N. VIGGIANI (eds.), *Nuove frontiere dell'archeologia: il trattamento del dato tridimensionale. Atti del Seminario (Ravenna 2004)*, Ravenna, Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Archeologia (CD-ROM).
- FIORINI A. 2008, *Esperienze di fotomodellazione e stereofotogrammetria archeologica*, in VOLPE, DE FELICE, SIBILANO 2008, 175-186.
- FIORINI A. 2009, *Rilievo archeologico mediante dispositivo scanner laser 3D. Verso una registrazione tridimensionale delle evidenze stratigrafiche: l'edificio 2 – magazzino – nel sito archeologico di Classe*, in D. BARTOLUCCI, *Principi di laser scanning 3D. Hardware, metodologie applicative, esempi*, Palermo, Flaccovio, 100-105.
- FIORINI A. 2010, *La documentazione tridimensionale dello scavo archeologico nell'abitato dell'Età del Bronzo di Mursia, Pantelleria (TP)*, «IpoTESI di Preistoria», 3,2, 1-14 (<https://doi.org/10.6092/issn.1974-7985/2135>).
- FIORINI A. (ed.) 2011, *Il castello di Sorrivoli (Roncofreddo, Forlì-Cesena). Storia e archeologia dell'architettura*, Bologna, Ante Quem.
- FIORINI A. 2012, *Tablet PC, fotogrammetria e PDF 3D: strumenti per documentare l'archeologia*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'archeologia 2.0. Atti del Workshop (Bologna 2012)*, «Archeologia e Calcolatori», 23, 213-227 (http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF23/13_Fiorini.pdf).
- FIORINI A. 2013, *Nuove possibilità della fotogrammetria. La documentazione archeologica del nuraghe di Tanca Manna (Nuoro)*, in A. CURCI, A. FIORINI (eds.), *Documentare l'Archeologia 3.0. Atti del Workshop (Bologna 2013)*, «Archeologia e Calcolatori», 24, 341-354 (http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF24/18_Fiorini.pdf).
- FIORINI A. 2018, *Il metodo fotografico RTI (Reflectance Transformation Imaging) per la documentazione delle superfici archeologiche. L'applicazione ai materiali di età protostorica*, «Archeologia e Calcolatori», 29, 241-258 (<https://doi.org/10.19282/ac.29.2018.20>).

- FIORINI A. 2019, *I castelli della Romagna. Indagini di Archeologia dell'architettura*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- FIORINI A., ARCHETTI V. 2011, *Fotomodellazione e stereofotogrammetria per la creazione di modelli stratigrafici in archeologia dell'architettura*, «Archeologia e Calcolatori», 22, 199-216 (http://www.archcalc.cnr.it/indice/PDF22/AC_22_Fiorini_Archetti.pdf).
- FIORINI A., URCIA A., ARCHETTI V. 2011, *The digital 3D survey as standard documentation of the archaeological stratigraphy*, in M. DELLEPIANE, F. NICCOLUCCI, S. PENA SERNA, H. RUSHMEIER, L. VAN GOOL (eds.), VAST 2011. *The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (Prato 2011)*, Goslar (Germany), Eurographics Association, 145-152 (<http://dx.doi.org/10.2312/VAST/VAST11/145-152>).
- GOMARASCA M.A. 2004, *Elementi di geomatica*, Firenze, AIT.
- GUERRA L. 2010, *Sant'Antonio a Rimini: le chiese*, in S. DE CAROLIS, L. GUERRA, R. MENGHI, *Sant'Antonio «da Rimini detto». Il Santo di Padova a Rimini: fede, miracoli e devozione*, Rimini, Guaraldi, 33-46.
- JAMES M.R., QUINTON J.N. 2014, *Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: The hand-held mobile laser scanner (HMLS)*, «Earth Surface Processes and Landforms», 39,1, 138-142 (<https://doi.org/10.1002/esp.3489>).
- LEONARDI C. 2005, *Guida per le chiese di Urbania e Museo arcidiocesano*, Urbania, Fondazione Istituito Culturale e Sociale Arcidiocesano.
- LUETZENBURG G., KROON A., BJÖRK A.A. 2021, *Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences*, «Scientific Reports», 11,1, 15.11.2021 (<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>).
- MANNONI T. 2000, *I problemi dei laterizi altomedievali*, in S. GELICHI, P. NOVARA (eds.), *I laterizi nell'Alto Medioevo italiano*, Ravenna, Società di Studi ravennati, 213-221.
- MANNONI T., MILANESE M. 1988, *Mensiocronologia*, in R. FRANCOVICH, R. PARENTI (eds.), *Archeologia e restauro dei monumenti*, Firenze, All'insegna del Giglio, 383-402.
- MARONI E. 2011, *Fasi edilizie*, in FIORINI 2011, 29-37.
- MAZZINI F. 1982, *I mattoni e le pietre di Urbino*, Urbino, Argalia.
- MEDRI M. 2003, *Manuale di rilievo archeologico*, Roma-Bari, Laterza.
- 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*, in N. PAPANODITIS, C. MALLET, F. LAFARGE, M.Y. YANG, A. YILMAZ, J.D. WEGNER, F. REMONDINO, T. FUSE, I. TOSCHI (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B2-2021, 599-604 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-599-2021>).
- PARENTI R. 2000, s.v. *Architettura, archeologia della*, in R. FRANCOVICH, D. MANACORDA (eds.), *Dizionario di archeologia. Temi, concetti e metodi*, Roma-Bari, Laterza, 39-43.
- SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F., TEPPATI LOSÈ L. 2021a, *Apple iPad Pro: test e valutazioni metriche sul sensore LiDAR integrato*, in #AsitaAccademy2021 (evento online, 1-2-9-16-23 luglio 2021), 421-424 (<http://atti.asita.it/ASITA2021/Pdf/067.pdf>).
- SPREAFICO A., CHIABRANDO F., GIULIO TONOLO F., TEPPATI LOSÈ L. 2021b, *The iPad Pro built-in LiDAR sensor: 3D rapid mapping tests and quality assessment*, in N. PAPANODITIS, C. MALLET, F. LAFARGE, M.Y. YANG, S. HINZ, R.Q. FEITOSA, M. WEINMANN, B. JUTZI (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B1-2021, 63-69 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>).
- VOLPE G., DE FELICE G., SIBILANO M.G. (eds.) 2008, *L'informatica e il metodo della stratigrafia. Atti del Workshop (Foggia 2008)*, Bari, Edipuglia.
- YOUNG J. 2011, *LiDAR For Dummies*, Hoboken, Wiley Publishing.

ABSTRACT

Cutting-edge mobile phones and tablets marketed by Apple, equipped with a LiDAR sensor, are able to measure the three-dimensional position of objects and reconstruct their surface. At present, specific publications illustrating the potential of this sensor in the field of archaeology are not known. The first part of the article explains its functioning; the second deals with its limitations; the third describes its use in an architectural survey of two buildings; the fourth proves its usefulness in the architectural field, particularly in the study of archaeological standing buildings (archaeology of architecture). In light of the tests performed, it can be stated that the LiDAR offers centimetre-level accuracy and is therefore of great interest in the field of archaeology, also considering its relatively low cost, its ease of manoeuvring and fast acquisition of data, compared to other scanning systems. The LiDAR may become a common tool in the field of archaeology in the future if investments in this technology continue, producing sensors capable of measuring more accurately (the current maximum coverage is 5 m) and software (apps) that can produce flawless textures and more uniform sampling of space. In its current state of development, the sensor is not suitable for precise modelling of small-size objects, while it is useful for the archaeological documentation of masonry, architectural elements and walls. In addition, it is the ideal tool for obtaining floor maps and three-dimensional models of small-sized environments.