

Scansioni laser basate su tecnologia SLAM per documentazione estensiva del convento di San Nicola a Tolentino

SLAM-based mapping technology for extensive documentation of the San Nicola in Tolentino convent

GIULIA SAMMARTANO, NANNINA SPANÒ, ALICE ACCORNERO

ABSTRACT

Come già evidenziato in altri contributi, tra le tecnologie di mapping rapido, i sistemi di scanner portatili terrestri basati sulla tecnologia SLAM (*Simultaneous localization and Mapping*) rivestono un ruolo di particolare rilevanza nello scenario attuale delle tecniche che consentono una documentazione 3D basata su nuvole di punti. Mentre in altre sezioni di questo volume è stata evidenziata la flessibilità del loro uso a integrazione e completamento di altre tecniche di rilievo 3D, in questo contributo viene evidenziata la loro capacità di eseguire rilievi tridimensionali estensivi sull'architettura storica tradizionale, caratterizzata da vani consecutivi e piuttosto ripetitivi quali quelli di un convento, oltretutto del non risentire, in termini di accuratezza globale, di percorsi che si snodano lungo diversi livelli di fabbrica. Tale circostanza conduce le autrici a ritenere che nel prossimo futuro, una volta abbattuti i costi della strumentazione, a oggi non considerabile pienamente *low cost*, essi potranno forse essere impiegati abitualmente nel rilievo edilizio.

As already underlined in other contributions, among the rapid mapping technologies, terrestrial portable scanner systems based on SLAM (Simultaneous localization and Mapping) technology play a particularly important role in the current scenario of techniques that allow 3D documentation based on point clouds. While in other sections of this volume the flexibility of their use to integrate and complement other 3D survey techniques has been pointed out, this contribution draw attention to their ability to perform three-dimensional, extensive surveys on traditional historical architecture, characterized by consecutive spaces and rather repetitive, such as those of a convent. This is valid as well as the SLAM-based mobile scanning technology is not influenced in terms of overall accuracy, by paths that wind along different factory levels. This circumstance leads the authors to believe that in the near future, once the costs of the instrumentation, which cannot be considered fully low cost up to now, they can perhaps be used habitually in the building survey.

1. Il sistema dello scanner portatile nel panorama delle tecnologie rapide

L'efficienza e la rapidità dei metodi di rilievo del costruito, particolarmente in condizioni di rischio e di ridotta accessibilità, sono talvolta aspetti decisivi per l'impiego e diffusione delle nuove tecnologie a partire dai settori della ricerca e sviluppo verso il loro utilizzo nelle reali circostanze della pratica architettonica ed edilizia, nel pronto intervento e rilievo del danno oltre che negli altri molteplici campi applicativi cui attualmente gli approcci della Geomatica sono votati. In particolare, l'urgenza di ridurre i tempi di acquisizione dati (che sia per un'economia di risorse, o per limitare l'esposizione ai rischi dei luoghi che si

Giulia Sammartano, dottore di ricerca in Beni architettonici e paesaggistici, assegnista in Geomatica presso il Politecnico di Torino, DAD
giulia.sammartano@polito.it

Nannina Spanò, professore associato di Geomatica, Politecnico di Torino, DAD
antonia.spano@polito.it

Alice Accornero, laureata magistrale in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino
aliceaccornero@yahoo.it

devono documentare) insieme alla necessità di massimizzare la ricchezza e la continuità di dati metrici e radiometrici in fase di misura, ha fatto sì che negli ultimi decenni l'impiego di sistemi a scansione LiDAR si sia evoluto e adattato dalle soluzioni di tipo statico verso la fusione con sensori di posizionamento, affiancandosi sempre più a sistemi di mappatura mobile, detti Mobile Mapping Systems (MMS) che equipaggiano corpi in movimento (automobili, droni, carrelli, operatori)¹. Ciò è utile in un'ottica di migliorare continuamente la sostenibilità del rilievo metrico, per poter dedicare maggiore tempo e coinvolgimento all'elaborazione e ottimizzazione dei dati nei modelli 3D successivi alla fase di acquisizione, avvantaggiando in tal modo il tempo impiegato in campagna per lo svolgimento del rilievo e a scapito ovviamente di vagliare la quantità e la selezione dei dati 3D in fase di lavoro sul campo. Perciò, il grande proposito della ricerca applicata alle nuove tecnologie della Geomatica, anche *low-cost*, è quello di testarne le potenzialità e definirne i limiti e condizioni di applicabilità, diffondendone il loro utilizzo nei diversi campi applicativi, e proponendo metodi avanzati e alternativi che trovino spazio e diffusione anche nelle condizioni operative effettive, nel caso per esempio delle emergenze, e soprattutto per un settore così spesso carente di risorse quale è quello del patrimonio architettonico. Tale studio sull'adozione di strumenti basati su MMS portatili per il rilievo speditivo e la documentazione 3D di complessi architettonici in evidente stato di danno, si inserisce all'interno dell'esperienza del team DIRECT per la task force condotta nella basilica e convento di San Nicola a Tolentino (Figura 1) e si sviluppa a partire dalla sua attuale condizione di vulnerabilità e dalle tracce indelebili della sequenza sismica di Amatrice-Norcia-Visso dell'autunno 2016, in particolare sono evidenti i segni dell'evento del 30 ottobre.

2. Il complesso architettonico basilica e convento di San Nicola

Come spesso emerge, anche a Tolentino la condizione di vulnerabilità delle strutture – che si è chiaramente manifestata in seguito alle scosse del 30 ottobre 2016 – è ascrivibile alla

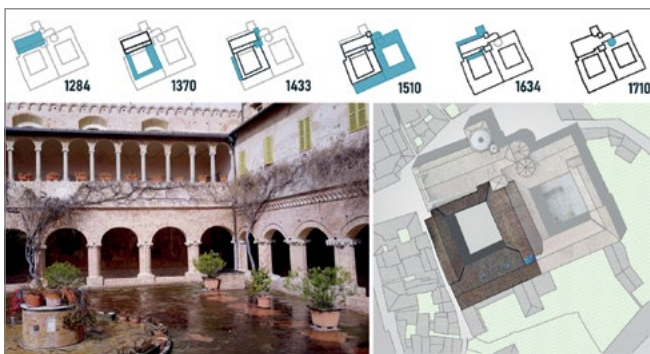


Figura 1. La cronologia della stratificazione storica degli interventi di edificazione del complesso basilicale. Una immagine del chiostro e la sua individuazione nella planimetria integrata con l'ortofoto da fotogrammetria UAV.

eterogenea e progressiva serie storica di rimaneggiamenti, sopraelevazioni e ampliamenti del complesso conventuale. In particolare la struttura del chiostro trecentesco e il convento in muratura laterizia sono determinati da interventi di ampliamento e frazionamento degli spazi attuati a partire dalla metà del XV secolo con il cambio di congregazione religiosa: dagli Agostiniani, insediatisi dal 1250, ai religiosi lombardi arrivati intorno alla fine del XV secolo². Infatti, a partire dal 1490 viene avviato un ampliamento del convento con un nuovo refettorio a sud e intorno al 1502 la congregazione vuole ristrutturare l'ala ovest con un corridoio distributivo aggiuntivo al primo piano, sopra il vecchio refettorio, per organizzare quante più celle possibile negli spazi del lato occidentale che già verso la metà del XV secolo avevano subito un ampliamento. L'episodio decisivo è da individuarsi con l'avanzare del XVII secolo, quando, con le attuazioni incisive delle operazioni di allargamento della basilica e l'aggiunta delle cappelle laterali alla navata verso sud, adiacente il chiostro, è subentrata la necessità di spostare l'ala settentrionale del portico addossata alla basilica, restringendo di una campata le due ali est e ovest del portico che si innestavano sull'asse della basilica. Hanno contribuito a gravare sulla solidità strutturale anche i tamponamenti della fine del XVII secolo delle facciate sud, est e ovest del chiostro prospicienti il portico impostato su tardogotici o precedenti pilastri mistilinei a sezione rilevante e tipici archi ribassati ancora oggi conservati³.

3. Il sistema MMS Zeb Revo e valutazione delle nuvole presso il convento di Tolentino

Se da un lato il complesso della basilica, gli ambienti monumentali e il chiostro porticato con i loro ricchi apparati decorativi hanno visto il dispiegamento di tecnologie integrate ad alta risoluzione finalizzate alla documentazione del degrado e alla modellazione 3D per l'analisi e il monitoraggio strutturale⁴, in questo report si è tracciata una via alternativa per quanto riguarda l'impatto delle tecnologie *low-cost*. La natura di queste ricerche è stata condotta sia sugli approcci *image-based* con l'uso di steady-camera compatta⁵ per un approccio di tipo fotogrammetrico che sugli approcci *range-based*, sperimentando un sistema portatile manuale di scansione LiDAR continua basato sulla tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*)⁶.

Questa modalità è stata orientata a consentire la mappatura estensiva di tutte le volumetrie fuori terra e interrate e, in particolare gli ambienti porticati del chiostro e in particolare, i vani compatti e ripetitivi dei dormitori e degli ambienti comuni del convento al primo piano delle maniche sud e ovest che sono stati abbandonati dopo il sisma (Figura 2).

Le scansioni da MMS hanno riguardato l'intero complesso conventuale, la Basilica, la cripta e il chiostro (Figura 3).

Ciò che contraddistingue tipicamente i sistemi di mappatura mobile LiDAR è, molto sinteticamente, una coppia di requisiti caratterizzanti⁷:

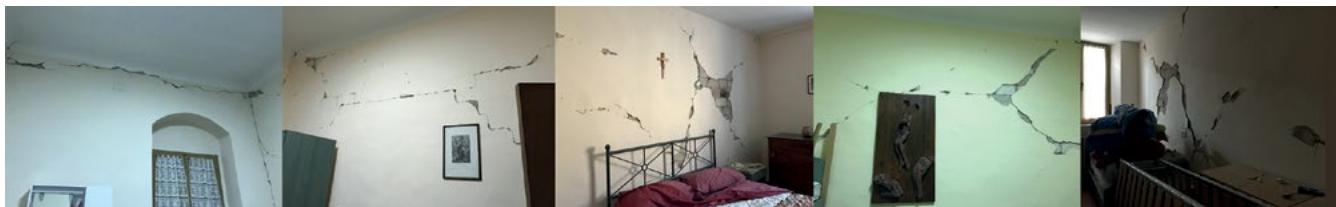


Figura 2. Alcuni scatti dei danni e fessurazioni dell'interno dei dormitori al primo piano.

- l'essere adatti a mappature di interni ed esterni perché dotati di un sistema di posizionamento multiplo basato su una fusione di sensori di misura (profilometri laser), di posizionamento satellitare in esterno (GNSS), e sensori inerziali e di orientamento in interno ed esterno (magnetometri, giroscopi, accelerometri) di aiuto alla stima del posizionamento della traiettoria. Gli algoritmi implementati, tra i quali lo SLAM, che regolano la corrispondenza tra i dati multi-sensore andranno poi a definire, della traiettoria da cui viene misurato il dato 3D, la velocità, la distanza, la posizione;
- il funzionamento tramite un'acquisizione di tipo continuo in movimento, detta *seamless*, cioè la capacità, durante il moto ininterrotto della piattaforma, di acquisire in tempo reale il dato metrico e quelli di posizionamento e orientamento in maniera continua e simultanea, andando progressivamente a costruire il dato 3D sotto forma di nuvola di punti.

In particolare l'algoritmo SLAM implementato nella tecnologia Zeb Revo utilizzata, è basato sulla capacità di stimare la posizione progressiva della traiettoria dello strumento $[T(\tau)]$ funzione del tempo, grazie a una sequenza di traslazioni $t(\tau)$ e rotazioni (τ) registrate e assistite dal sensore inerziale IMU durante l'avanzare dell'operatore, grazie soprattutto all'identificazione di caratteristiche geometriche dell'ambiente. Infatti l'algoritmo è in grado di avanzare nella misura dei profili successivi in base alla somiglianza e relativo allineamento dei nuovi profili su quelli precedenti che sono andati a creare progressivamente un modello 3D, il quale alla fine verrà ottimizzato in chiusura del percorso. È evidente come le potenzialità di questi sistemi di MMS si possono rintracciare soprattutto nella mappatura degli ambienti interni dove la capacità di posizionamento comunemente svolta dai ricevitori GNSS è assente. Significativa è soprattutto la capacità di questi sistemi (es: Hokuyo per Zeb di GeoSLAM, Velodyne per Stencil Kaarta, Viametris i-MMS, Leica Pegasus) di offrire una competitività eccellente in termini di tempo a fronte di una risposta metrica adeguata generalmente alla scala 1:100. Questo riguarda sia l'accuratezza dei modelli che, da studi condotti in proposito negli ultimi anni, si attesta ormai intorno ai 2-3 centimetri⁸ nelle condizioni interne, ma anche la digitalizzazione con un discreto grado di dettaglio dei particolari a grande scala⁹. Piuttosto avanzata è anche la ricerca che vede nell'impiego di questi sistemi di mappatura un utile strumento per derivare

in maniera quanto più possibile automatica le ricostruzioni 3D continue degli ambienti percorsi tramite approcci parametrici e anche contenuti semantici negli oggetti riconosciuti¹⁰. Recenti indagini applicate a complessi del patrimonio costruito stanno dimostrando che questi sistemi sono promettenti anche in ambienti complessi come gli interrati¹¹ e le strutture verticali, oltreché spazi angusti e articolati, o conservati in stato di rovine¹².

Per le strutture del chiostro e convento del complesso di San Nicola il sistema Zeb Revo è stato accompagnato da un modello a scansione laser di tipo statico come verifica metrica di accuratezza e un modello fotogrammetrico da UAV per il completamento delle porzioni verticali delle coperture (Figura 4).

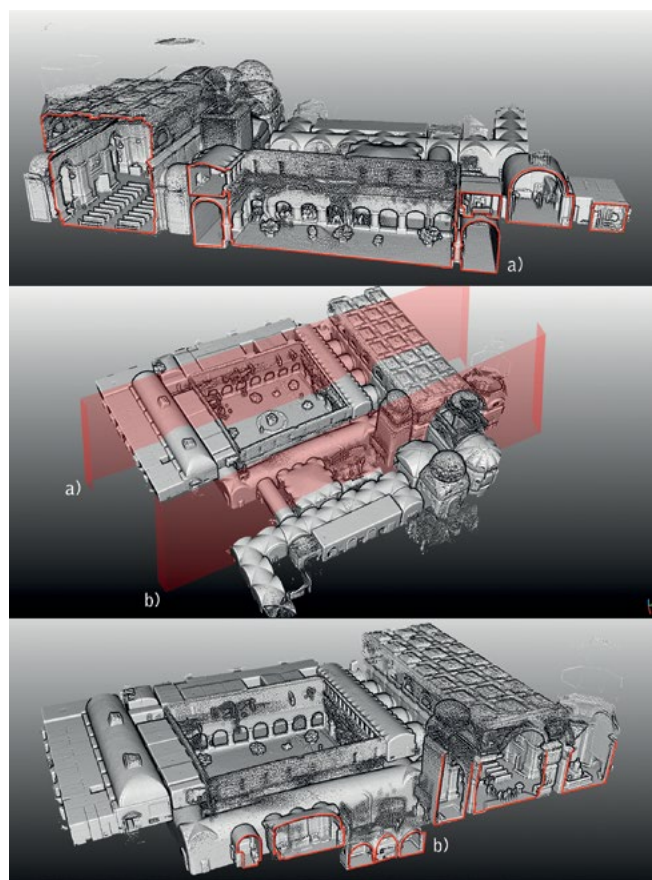


Figura 3. L'integrazione complessiva delle nuvole 3D derivate dal MMS Zeb REVO di GeoSLAM per la volumetria completa dell'area del complesso. Due sezioni che attraversano (a) chiostro, convento e basilica, (b) sacrestia e cripta.



Figura 4. I tre sistemi testati: laser scanner Faro Focus 3D, Zeb Revo di GeoSLAM e fotogrammetria UAV con il Phantom 4 DJI.

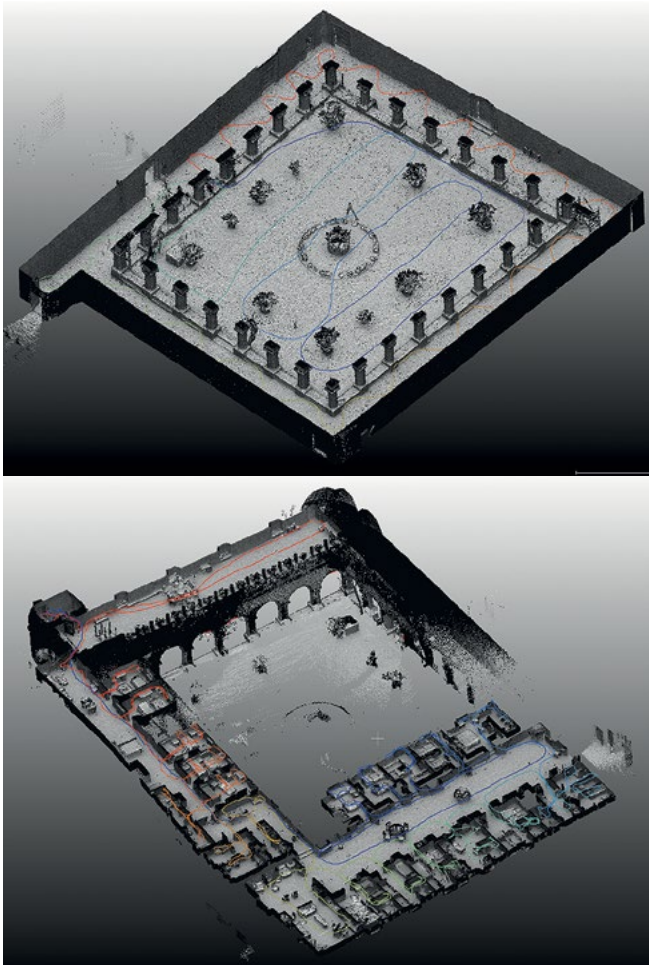


Figura 5. Le due scansioni di mapping mobile che hanno coperto gli spazi del chiostro e del convento al piano superiore.

I percorsi di MMS eseguiti sono stati due (Figura 5) e hanno coperto l'area del chiostro e degli ambienti del primo piano: l'acquisizione è durata circa 20 minuti a scansione, percorrendo la traiettoria a una velocità di circa 1m/sec. Il numero totale di punti acquisiti è stato circa 30 milioni.

Il post-processamento delle nuvole e la loro pulizia e segmentazione hanno permesso di allineare le scansioni nel sistema di riferimento globale del rilievo tramite l'appoggio della nuvola da LiDAR statico e di andare a correggere eventuali errori di deriva verticale e orizzontale degli ambienti più lontani della manica sud, problema di cui il sistema di mapping talvolta soffre a causa della lunghezza del percorso. Dalla densità del dato metrico e dalla sua verificata continuità e accuratezza è stato possibile estrarre dei prodotti multi-scala: un modello 3D e degli elaborati 2D multi-scala di tipo tradizionale, derivati però dagli ortopiani di sezione delle nuvole ZEB integrate con la nuvola UAV. Una prima planimetria generale di ricognizione è stata digitalizzata in vettoriale alla scala 1:200 (Figura 6) mentre gli elaborati architettonici dettagliati sono proposti alla scala 1:100 (Figura 7).

Considerazioni conclusive

L'eccezionale rapidità e portabilità di questo tipo di tecnologie SLAM si preannuncia sicuramente dirompente nell'offrirsi alle attività degli esperti di rilievo 3D e documentazione del patrimonio costruito. I sistemi sono tutt'ora in una fase di ricerca e sviluppo ma i primi prodotti commerciali che si stanno presentando sul mercato sono molto concorrenziali rispetto ai sistemi di scansione statica di tipo più consolidato, benché differenti per natura e per qualità del dato.

Il rilievo di tipo edilizio-speditivo potrà certamente beneficiare di queste soluzioni tecnologiche da sensori integrati, e gli sviluppi stanno andando, tra gli altri, verso l'integrazione del contenuto informativo radiometrico, derivato cioè dalle immagini, molto vantaggioso per la lettura di questi modelli leggeri e maneggevoli¹³. Tale opportunità, si rivela del tutto preminente in casi come quello qui presentato dove la lettura del danno e l'analisi del rischio degli edifici passa attraverso la misura ed il posizionamento nello spazio sia di consistenze murarie, oltre che la documentazione fotografica di fenomeni quali le estese fessurazioni e crolli localizzati.

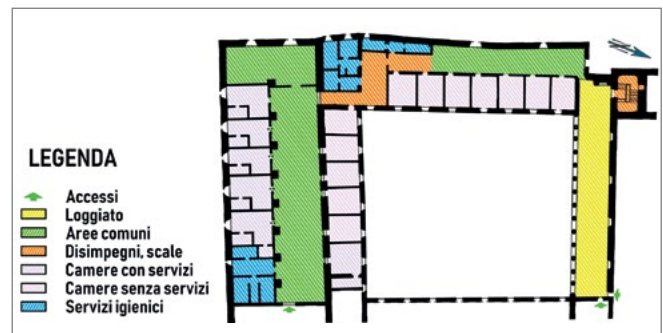


Figura 6. Planimetria generale del piano del dormitorio del convento estratta con dettaglio assimilabile alla scala 1:200.

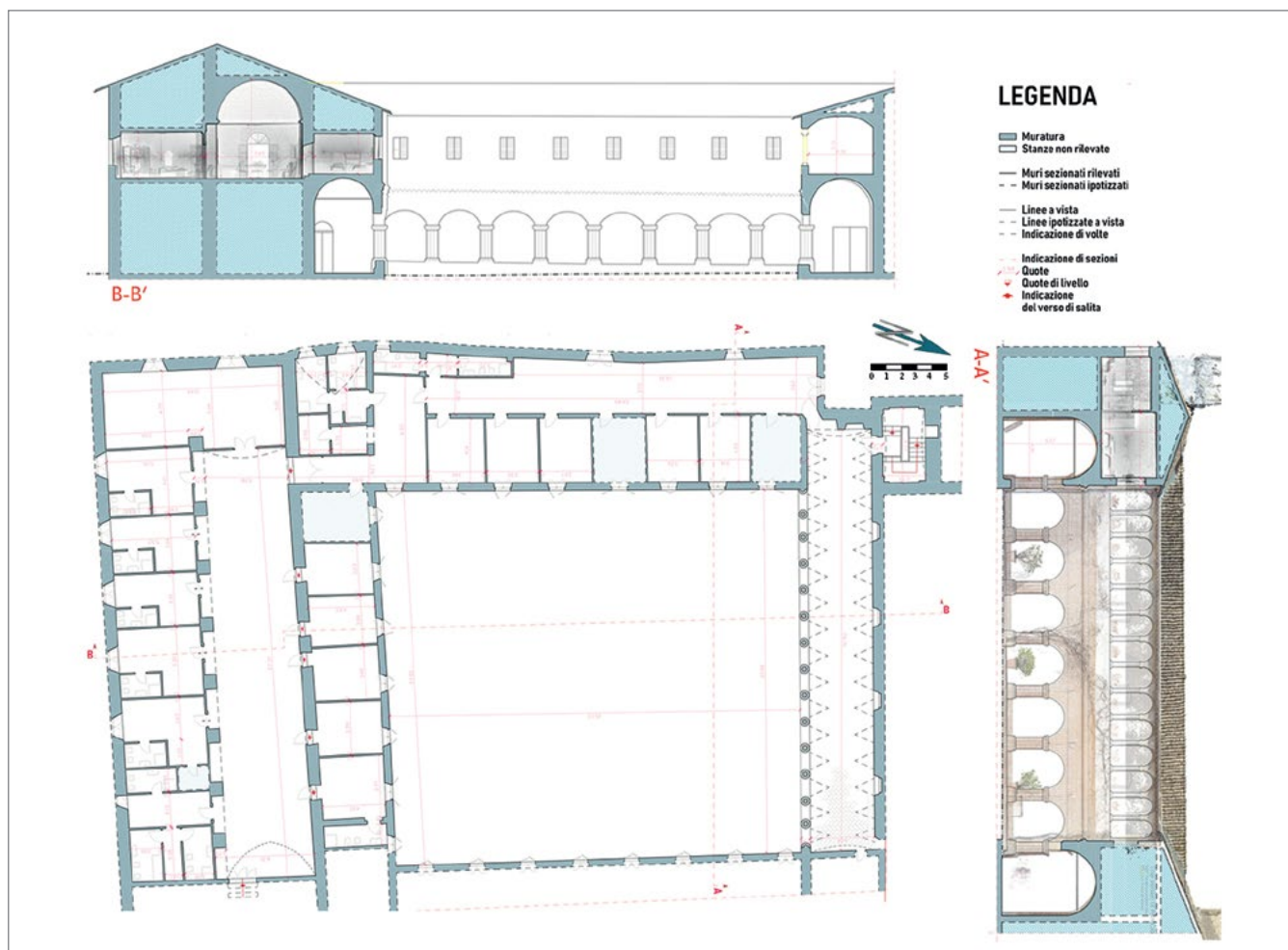


Figura 7. Elaborati architettonici in scala 1:100 derivati dalle sezioni delle nuvole ZEB integrate alle nuvole fotogrammetriche UAV.

Note

¹ Iván Puente, Higinio González-Jorge, Joaquín Martínez-Sánchez, Pedro Arias, *Review of mobile mapping and surveying technologies*, in «Measurement», 46 (7), 2013, pp. 2127-2145.
² Pio Francesco Pistilli, *Architettura medievale del complesso monumentale*, in Centro Studi Agostino Trapè (a cura di), *La Basilica di San Nicola a Tolentino. Guida all'arte e alla storia*, Biblioteca Egidiana, Tolentino 1995.
³ Pio Francesco Pistilli, *Architettura medievale...* cit.
⁴ Cfr. in questo volume il contributo a p. 102 e anche: Daniele Costanzo, Filiberto Chiabrando, Renato Lancellotta, Andrea Maria Lingua, Antonino Quattrone, Donato Sabia, Antonia Spanò, *Rilievo 3D e monitoraggio strutturale per l'analisi post-sisma del complesso di S. Nicola a Tolentino (MC)*, in Atti della XXI Conferenza Nazionale ASITA, 21-23 novembre 2017, Salerno, pp. 315-323.
⁵ Alessio Calantropio, Giacomo Patrucco, Giulia Sammartano, Lorenzo Teppati Losè, *Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadicamera*, in «Applied Geomatics», 1-10, 2017.
⁶ Questi temi, già affrontati nel Laboratorio di Geomatica per i beni culturali del DAD, sono stati approfonditi, per il complesso di Tolentino in Alice Accornero, *Il rilievo sostenibile per il patrimonio edilizio a rischio: mobile mapping basato su tecnologia SLAM*, tesi di laurea in Architettura per il progetto sostenibile, Politecnico di Torino, relatori Antonia Spanò, Giulia Sammartano, a.a. 2017-2018.

⁷ Ivan Puente *et al.*, *Review...*, cit.
⁸ Charles Thomson, George Apostolopoulos, Damian Backes, Jan Boehm, *Mobile Laser Scanning for Indoor Modelling*, in «ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», II-5/W2, 2013, pp. 289-293.
⁹ Charles Thomson *et al.*, *Mobile Laser Scanning...*, cit., p. 293.
¹⁰ Lucía Díaz-Vilariño, Edward Verbree, Sisi Zlatanova, Abdoulaye Diakitè, *Indoor modelling from SLAM-based laser scanner: door detection to envelope reconstruction*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W7, 2017, pp. 345-352.
¹¹ Andrea di Filippo, Luis Javier Sánchez-Aparicio, Salvatore Barba, José Antonio Martín-Jiménez, Rocío Mora, Diego González Aguilera, *Use of a Wearable Mobile Laser System in Seamless Indoor 3D Mapping of a Complex Historical Site*, in «Remote Sensing», 10(12), 2018, p. 1897.
¹² Giulia Sammartano, Antonia Spanò, *Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition*, in «Applied Geomatics», 10 (4), 2018, pp. 317-339.
¹³ Giulia Sammartano, Antonia Spanò, Lorenzo Teppati Losè, *A fusion-based workflow for turning SLAM point clouds and fisheye data into texture-enhanced 3D models*, in «International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», XLII-2/W17, 2019, pp. 295-302, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-295-2019.