UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELLE COSTRUZIONI EDILI E DEL RECUPERO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Tecnologie geomatiche integrate per l'acquisizione e modellazione di monasteri post-bizantini in Albania meridionale

Integrated geomatic technologies for the acquisition and modeling of post-Byzantine monasteries in southern Albania

RELATRICE:

Prof. Malinverni Eva Savina

Tesi di:

Sartini Matteo

Anno accademico 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE 4

STATO DELL'ARTE 6

STRUMENTAZIONE 7

GNSS 7

STRUMENTAZIONE GNSS 9

FOTOGRAMMETRIA 11

SVILUPPO STORICO DELLA FOTOGRAMMETRIA 11

PRINCIPI BASE DELLA FOTOGRAMMETRIA 13

FOTOGRAMMETRIA UAV 16

STRUMENTAZIONE CLOSE RANGE 19

STRUMENTAZIONE UAV 21

LASER SCANNING 23

STRUMENTAZIONE 25

CASO STUDIO 27

METODOLOGIA E RILIEVI 31

RAPPRESENTAZIONI 36

RISULTATI 53

CONCLUSIONI 58

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA 61

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi anni le tecniche di laser scanning e quelle di elaborazione fotogrammetrica hanno fornito ottimi risultati nel campo della produzione di nuvole di punti grazie alla loro semplicità di impiego e velocità di restituzione. Tuttavia, tali tecniche hanno a tutt'oggi limiti non trascurabili; Le sole tecniche di laser scanning ad esempio non consentono di ottenere informazioni radiometriche dell'oggetto in analisi e risulta complicato oltre che impreciso estrarre le linee di discontinuità dal rilievo. Ad esempio gli spigoli degli edifici non vengono rilevati con precisione proprio per la modalità di acquisizione su cui si basa la tecnica del laser scanning. Mentre invece le tecniche di elaborazione fotogrammetrica non consentono di estrarre punti in mancanza di una texture dell'oggetto rilevato, come ad esempio su una parete liscia monocromatica.

L'obiettivo principale di questa tesi è quello di dimostrare la possibilità di generare un accurato modello digitale tramite l'integrazione di moderne tecniche che permettono la realizzazione di una nuvola di punti. Nello specifico si è voluto dimostrare come fosse possibile ottenere un modello computerizzato realistico tridimensionale ricorrendo all'uso integrato di tecniche di rilievo fotogrammetriche, aerofotogrammetriche, GNSS e laser scanner mobile con tecnologia SLAM. La motivazione che mi ha spinto ad affrontare questo tema è la necessità di contribuire, tramite l'uso di applicazioni tecnologiche innovative che rendono possibile analizzare senza rischiare di intaccare la natura spesso già precaria dei manufatti, alla salvaguardia di un patrimonio culturale e architettonico di straordinario valore, che a causa dell'incuria umana e di eventi naturali è a rischio di perdita.

Al fine di raggiungere il nostro obiettivo abbiamo partecipato ad una collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) ad un progetto di ricerca che si prefissa lo scopo di analizzare e valorizzare alcuni complessi architettonici ecclesiastici di rilevante importanza situati nella parte meridionale dell'Albania, più precisamente nella provincia di Argirocastro. Lo scopo di questo progetto di ricerca è quello di costruire un piano pilota per il recupero e la messa in valore di alcuni luoghi di culto che testimoniano le vicende dei Cristiani d'Oriente. Questa missione indaga i monasteri post-bizantini dell'Albania meridionale e si prefissa lo scopo di contribuire alla salvaguardia in particolare di tre complessi religiosi:

- Il Monastero del profeta Ilia a Stegopull
- Il Monastero dei Santi Ciriaco e Giuditta a Dhuvjan

- Il Monastero di Santa Maria a Goranxi.

Il nostro caso oggetto di studio è il monastero di Santa Maria (Shën Mërisë), situato 300 metri sopra il villaggio di Goranxi nella provincia di Argirocastro. Si tratta di una struttura in muratura di medie dimensioni risalente al XVII secolo, composta di una parte perimetrale ormai quasi completamente crollata che aveva la funzione di dormitorio, refettorio e magazzini e di una chiesa ancora tenuta in discrete condizioni composta di un esonartece, un nartece e e una navata principale con transetto.

Il seguente elaborato si compone di una parte descrittiva delle tecniche di rilievo utilizzate, per poi passare alla presentazione del nostro caso studio seguito dalla metodologia utilizzata per effettuare i rilievi sul campo. Segue poi un'analisi dei risultati ottenuti e l'integrazione con le elaborazioni effettuate dal CNR, per poi concludersi con un'analisi delle potenzialità e dei limiti delle tecniche utilizzate nella creazione del modello 3D.

STATO DELL'ARTE

Gli ultimi anni hanno visto progredire significativamente i campi della fotogrammetria e della geomatica grazie alle sperimentazioni e messa a punto di nuove tecnologie range-based, image-based e allo sviluppo di software che permettono la processazione ed elaborazione semi-automatica dei dati raccolti sul campo. Purtroppo, però non esiste ancora uno strumento topografico in grado di rilevare coordinate assolute, generare nuvole di punti estremamente dense e colorate, collimare punti a distanze elevatissime, scattare foto per poter generare un'ortofoto o texturizzare una mesh 3D, che sia di facile gestione, abbia costi contenuti e che non necessiti di un ingente post processing. Infatti se prese singolarmente sia il rilievo fotogrammetrico che quello tramite laser scanner rischiano di avere dei deficit di informazione e delle imprecisioni , ad esempio il laser scanner si presta con facilità all'acquisizione veloce di un'enorme quantità di dati ma necessita di un importante lavoro di elaborazione successiva da parte di un operatore specializzato nell'uso di software in grado di elaborare superfici irregolari proprio a causa della complessità della geometria del soggetto rilevato e alla difficoltà dello strumento nel rilevare gli spigoli, mentre le fotocamere utilizzate per il rilievo fotogrammetrico rischiano di avere al loro interno errori sistematici dovuti spesso a delle imperfezioni della stessa macchina tra le quali distorsioni dell'obiettivo e distanza principale approssimata che anche se riducibili tramite calibrazione rimangono presenti.

Per ora solo tramite l'integrazione dei rilievi fotogrammetrici con quelli effettuati per mezzo del laser scanner possiamo arrivare a generare dei modelli tridimensionali digitali che siano il giusto compromesso tra livello di dettaglio e dimensione del modello (Heok T., 2004), e che abbiano un'accuratezza tale da poter interrogare il modello restituito per ricavarne informazioni dettagliate sullo stato di fatto dell'oggetto rilevato oltre che delle accurate informazioni metriche.

STRUMENTAZIONE

GNSS

Il sistema GPS (Global Positioning System) è un sistema globale di posizionamento satellitare americano formato da una costellazione di satelliti artificiali NAVSTAR (NAVigation Satellite with Timing And Ranging), ideata con lo scopo di permettere il rilevamento della posizione in tempo reale di un qualsiasi punto del nostro pianeta. Il sistema NAVSTAR-GPS si basa sull'emissione di onde elettromagnetiche complesse da parte di una rete di satelliti artificiali che vengono captate dalla strumentazione ricevente la quale elabora la lunghezza dell'onda elettromagnetica trasmessa e il preciso momento in cui è stata trasmessa estrapolandone la distanza tra il satellite e il ricevitore fornendo così delle coordinate basate sulle quote ellissoidiche, che sono quelle del sistema di riferimento WGS84. Il GPS non è però l'unico sistema di posizionamento satellitare esistente, tra i più conosciuti troviamo infatti il GLONASS (Russia) , l' IRNSS (India) , il COMPASS (Cina) , il QZSS (Giappone) e il GALILEO (Europa). Risulta quindi più opportuno parlare di GNSS (Global Navigation Satellite System) quando lavoriamo con ricevitori in grado di comunicare non solo con la rete formata dai 24 satelliti americani.

Il sistema GNSS è costituito da tre segmenti:

- *Il segmento spaziale* ; composto dalla costellazione di satelliti posti a circa 20. 000 km di distanza dalla superficie terrestre che hanno il compito di ricevere e memorizzare le informazioni dal segmento di controllo , trasmettere informazioni agli utilizzatori tramite segnali radio e mantenere un riferimento di tempo accurato.
- *Il segmento utente* ; composto dallo strumento posizionato a terra , ha lo scopo di ricevere il segnale tramite l'antenna posta al sui interno , analizzarlo ed elaborarlo per poi memorizzarlo.
- *Il segmento di controllo* ;composto da stazioni a terra che controllano e trasmettono dati ai satelliti i cui principali scopi sono di controllare gli orologi interni dei satelliti , calcolare le orbite seguite dai satelliti e se necessario effettuare manovre di correzioni delle orbite.

Il principio di funzionamento del sistema GNSS si basa sui principi della trilaterazione ovvero sulla possibilità di determinare la distanza del segmento utente da almeno 3 satelliti di posizione noti contemporaneamente. Il ricevitore è in grado di calcolare per ognuno dei satelliti con cui sta comunicando il tempo di volo del segnale emesso, essendo la velocità di

propagazione del segnale pari alla velocità della luce , e di conseguenza riesce a calcolare la sua distanza dai satelliti con cui si interfaccia. Risulta quindi necessario per il segmento utente sapere il preciso istante in cui il segnale viene emesso dai satelliti e quello in cui viene ricevuto , questo è possibile sfruttando degli orologi estremamente precisi e sincronizzati.
Il posizionamento tridimensionale di un punto nello spazio e nel tempo è quindi possibile grazie alla misura di un minimo di 4 pseudo-distanze e all'ipotesi di conoscere in ogni istante la posizione dei satelliti in orbita (effemeridi). Quindi per identificare un solo punto abbiamo bisogno di 4 satelliti che identifichino i 4 valori corrispondenti alle 3 coordinate cartesiane (latitudine, longitudine e quota) e al tempo. La determinazione delle pseudo-distanze avviene misurando lo sfasamento tra il segnale emesso da ciascun satellite e ricevuto dall'utente , e un segnale identico e sincronizzato generato dal ricevitore.
La tecnologia GNSS viene usata per determinare la posizione di un'insieme di punti necessari per la referenziazione di un rilievo eseguito con tecniche fotogrammetriche, laser o topografiche tradizionali che prende il nome di rete di inquadramento.
La rete di inquadramento ha l'obiettivo di fissare le coordinate di punti su cui appoggiarsi per georeferenziare i rilievi che verranno effettuati , ogni rilievo deve infatti essere basato su un sistema di riferimento composto da punti con coordinate note. La costruzione di questa rete avviene materializzando a terra dei punti strategici di riferimento chiamati Ground Control Point (GCP) e mettendoli in evidenza tramite l'uso di appositi Marker che permettono di identificare nelle foto del rilievo dei punti ben precisi. Una volta materializzata la rete di inquadramento dovremo rilevare le coordinate dei GCP per mezzo di un ricevitore GNSS in modo da avere un sistema di coordinate di riferimento che utilizzeremo per orientare e dimensionare correttamente il nostro rilievo.

Il metodo di rilievo utilizzato sul campo per raccogliere le informazioni di posizionamento dei GCP è il sistema RTK (Real Time Kinematic) Base-Rover. Questo sistema prevede l'utilizzo di 2 ricevitori, il primo, chiamato Base o Master, viene posizionato in un punto fisso per tutta la durata del rilievo presentando quindi molteplici correzioni che ci restituiscono un'elevata accuratezza nel posizionamento. Queste informazioni vengono poi trasmesse tramite un collegamento GSM o radio al secondo ricevitore, chiamato Rover, che viene utilizzato dall'operatore per battere i punti necessari al rilievo soffermandosi sui GCP per un lasso di tempo limitato e permettendo così una rapida acquisizione delle informazioni necessarie con un'accuratezza elevata.

STRUMENTAZIONE GNSS

Nello specifico per il nostro rilievo abbiamo utilizzato il modello Topcon Hiper HR, uno dei ricevitori più piccoli e leggeri della sua categoria ma costruito con la tecnologia GNSS più avanzata. Questo modello, composto da un alloggiamento in lega di magnesio , oltre ad essere progettato per resistere alle condizioni ambientali più avverse, utilizza un chipset GNSS avanzato che grazie alla tecnologia Universal Tracking Channel permette di lavorare con 452 canali e di tracciare automaticamente ogni segnale satellitare disponibile, ma oltre a questo la Fence AntennaTM "full-wave" di Topcon di cui è dotato il dispositivo oltre ad essere in grado di rilevare tutti i segnali GNSS disponibili è progettata per tracciare le costellazioni e i segnali che verranno inseriti in futuro.

.

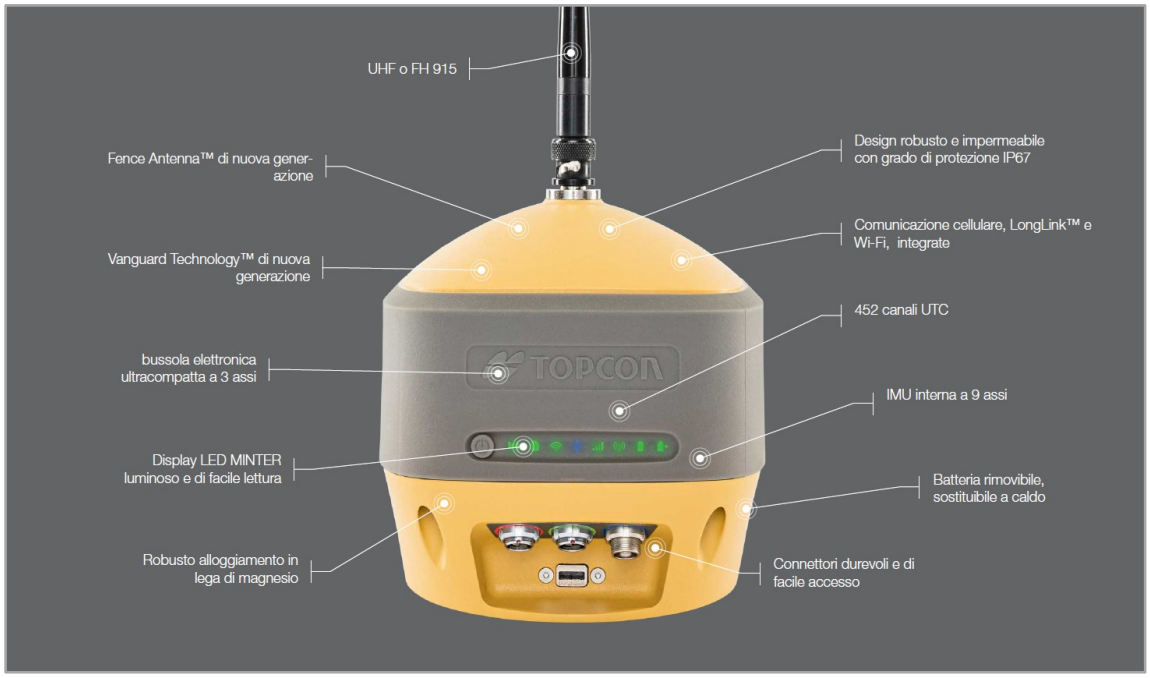

Fig. 1 Ricevitore GNSS Topcon Hiper HR (Topcon)

Il ricevitore Topcon Hiper HR è inoltre dotato del sistema TILT^{TM} (Topcon Integrated Leveling Technology) che include una piattaforma inerziale (IMU) rivoluzionaria a 9 assi e una bussola elettronica ultracompatta (eCompass) a 3 assi. Questo sistema consente di compensare le misurazioni fuori piombo fino a 15 gradi, concedendo quindi la possibilità di effettuare facilmente misurazioni su punti difficili da raggiungere (Topcon).

Fig. 2 Sistema TILT Topcon (Topcon)

Tracciamento GNSS	
Numero di canali	452 con la tecnologia brevettata Universal Tracking Channel
GPS GLONASS Galileo BeiDou IRNSS SBAS QZSS Banda L	L1 C/A, L1C, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5 L1 C/A, L1P, L2 C/A, L2P, L3C E1, E5a, E5b, E5AltBOC, E6 B1, B2, B3 con disponibilità ICD SPS-L5 WAAS/EGNOS/MSAS L1 C/A, L1C, L2C, L5, LEX 1525-1560 MHz
Satelliti tracciati	All in view
Prestazioni	
Statico/Statico-rapido	H: 3,0 mm + 0,3 ppm V: 5,0 mm + 0,5 ppm
Precisione Statico*	H: 3,0 mm + 0,1 ppm V: 3,5 mm + 0,4 ppm
RTK	H: 5,0 mm + 0,5 ppm V: 10,0 mm + 0,8 ppm
RTK, Compensazione TILT**	H: 1,3 mm/°Tilt; Tilt ≤ 10° V: 1,8 mm/°Tilt; Tilt > 10° L'angolo massimo consigliato per la compensazione TILT è di 15°
Data Update / Output Rate	Standard 1 Hz Opzionale 10, 20 Hz

Comunicazione	
Tipo radio opzionale	UHF (410-470 MHz) SS (915 MHz)
Portata radio UHF	5-7 km tipica; 15 km in condizioni ottimali***
Cellulare	Integrato HSPA+/CDMA
Comunicazioni supplementari	Modem cellulare interno, Wi-Fi, Bluetooth®, LongLink™
Dati e memoria	
Output dati in tempo reale	TPS, RTCM SC104 v2.x, 3.x, CMR/CMR+
Output NMEA 0183	Versione 2.x, 3.x e 4.x
Memoria interna	8 GB
Alimentazione	
Fonte di alimentazione	Alimentazione esterna da 6 a 28 VCC 1 batteria interna (3,7 V, 5200 mAh) 1 batteria rimovibile (7,2 V, 2900 mAh)
Autonomia	Fino a 9 ore con batterie incluse
Ambientali e fisiche	
Dimensioni (l x h)	115 x 132 mm
Temp. di esercizio	Da -40 °C a 65 °C
Protezione Polvere/Acqua	IP67
Caduta e ribaltamento	Caduta dall'asta da 2 metri
Peso	1.172 g (incluse batteria interna e batteria esterna sostituibile a caldo)

Fig. 3 Specifiche tecniche Hiper HR (Topcon)

FOTOGRAMMETRIA

SVILUPPO STORICO DELLA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che ci consente di ottenere le informazioni metriche (forma e posizione) dell'oggetto da rilevare sfruttando le proprietà prospettiche della fotografia e basandosi sull'acquisizione e osservazione di immagini dell'oggetto. I primi approcci a questa tecnica di rilievo li ritroviamo nei primi anni del 1700, quando Moriz Anton Kappeler, ingegnere e medico svizzero, ideò un sistema che consisteva nel disegnare i contorni dell'oggetto in esame su due lastre di vetro poste a distanza nota dopo aver dotato le lastre di un sistema di riferimento cartesiano ortogonale. A questo punto le due lastre, collocate in modo appropriato su di un piano, permettevano di restituire una proiezione dell'oggetto. Nonostante le basi per lo studio della materia fossero state già gettate in precedenza con lo studio della geometria proiettiva e dell'ottica le vere origini della fotogrammetria possono ritenersi contemporanee all'invenzione della fotografia. Uno dei primi passi in questa direzione venne fatto nel 1839 quando Louis Daguerre realizzò la prima immagine fotografica con quello che può essere considerato il progenitore della fotografia: il dagherrotipo. Solo nel 1849 avremo però il primo vero esempio di fotogrammetria, quando Aimé Laussedat utilizzò un processo chiamato "iconometria" per realizzare mappe topografiche analizzando immagini fotografiche. Dopo qualche anno arrivò un contributo italiano allo sviluppo della tecnica fotogrammetrica grazie agli italiani Porro e Paganini che utilizzarono apposite camere fotografiche ed effettuarono la restituzione grafica del terreno per punti, calcolando le misure con regoli e settori graduati e risolvendo i problemi di livellazione trigonometrica. Un'ulteriore svolta fondamentale nel progresso dello sviluppo fotogrammetrico avvenne agli inizi del '900 con l'invenzione da parte di C. Pulfrich della stereofotogrammetria, che portò E. Von Orel a costruire il primo stereoautografo nel 1909, strumento fondamentale nel riconoscimento continuo e autonomo di punti omologhi, che rese possibile per la prima volta estrarre curve di livello e linee planimetriche, in maniera continua (Gomarasca M., 2004). Durante la prima guerra mondiale crebbe la necessità di ottenere dati e informazioni dall'alto, fu così che W. Bauersfeld, sfruttando i principi dello stereoautografo, inventò lo stereoplanigrafo, strumento in grado di sfruttare le immagini aeree che introdusse per la prima volta il concetto di aerofotogrammetria. Da qui in avanti la fotogrammetria si affermò come strumento utile e accurato per il rilievo e di conseguenza vennero apportate continue migliorie e innovazioni sia a livello concettuale che alle stesse strumentazioni. Alla

fine del secondo conflitto mondiale, sfruttando l'arrivo dei primi calcolatori, venne sviluppata la tecnica della triangolazione aerea che permetteva di ottenere risultati in tempi ridotti grazie alla produzione di strisciate aeree in cui la collinearità veniva raggiunta in maniera analitica su blocchi di immagini con punti di controllo a terra (Kraus K., 1994). Attorno al 1980 arrivarono finalmente le immagini digitali, anche dette raster, dove l'immagine viene vista come una scacchiera composta da varie celle chiamate pixel che contengono informazioni radiometriche sotto forma di numeri, hanno una posizione fissa che resta immutata nel tempo e a differenza dei fotogrammi su pellicola non risentono delle deformazioni ambientali (Spanò A., 2016). Grazie a queste ultime scoperte la fase di processing delle immagini inizia a divenire un procedimento automatizzato grazie all'ausilio di specifici strumenti per l'elaborazione di immagini computer vision e computer graphics (Kraus K., 1994). Al giorno d'oggi lo studio della materia fotogrammetrica si è evoluta ad un punto tale da consentirci di ricreare dei modelli digitalizzati tridimensionali grazie alle nuove tecniche di range imaging della computer vision chiamate *Structure from motion* da cui è possibile estrapolare informazioni spaziali e grafiche come ad esempio le componenti cromatiche e morfologiche dell'oggetto rilevato.

PRINCIPI BASE DELLA FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è per definizione "quella tecnica che consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi" (Cannarozzo R., 2012). I principi geometrici di base su cui si fonda la fotogrammetria sono quelli della prospettiva centrale, secondo la quale ogni punto dell'oggetto fotografato viene proiettato su un piano di proiezione da un punto detto centro di presa *O*, non appartenente all'oggetto, attraverso una corrispondenza biunivoca. Il centro di presa *O* è un punto dell'obiettivo della camera, mentre la distanza di *O* dal piano della lastra è detta distanza principale *p,* questa è una distanza che si mantiene fissa ed è corrispondente alla distanza focale *f* dell'obiettivo della camera, mentre il punto di proiezione di *O* sul piano della lastra è chiamato punto principale *P*.

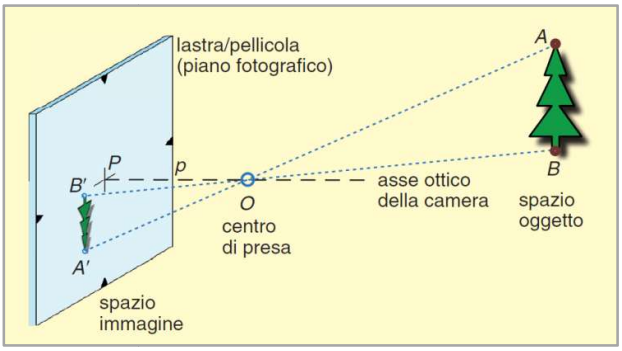

Fig. 4 Schema della geometria della presa fotografica nella configurazione terrestre (Cannarozzo R., 2012)

Ogni punto è quindi proiettato tramite raggi proiettivi, i quali definiscono una stella proiettiva di raggi, che costruisce un modello ottico preciso della geometria dell'oggetto (Bertocci S., 2012). Ad ogni punto tridimensionale dello spazio oggetto corrisponde un solo punto bidimensionale dello spazio immagine determinato dalla retta proiettiva passante per il centro di presa *O*, perciò la determinazione del punto oggetto partendo dal punto immagine non è possibile in quanto risulterebbe impossibile determinare la corretta posizione del punto sulla retta. Di conseguenza è necessario avere almeno una seconda immagine che includa il punto oggetto da determinare al fine di calcolare le rette passanti per il punto oggetto e i centri di presa *O* ed effettuare un'intersezione delle due rette che si incontreranno in un solo punto. La possibilità di conoscere le coordinate tridimensionali dei punti di un oggetto permette di trasformare la rappresentazione prospettica dell'immagine fotografica in una proiezione ortogonale.

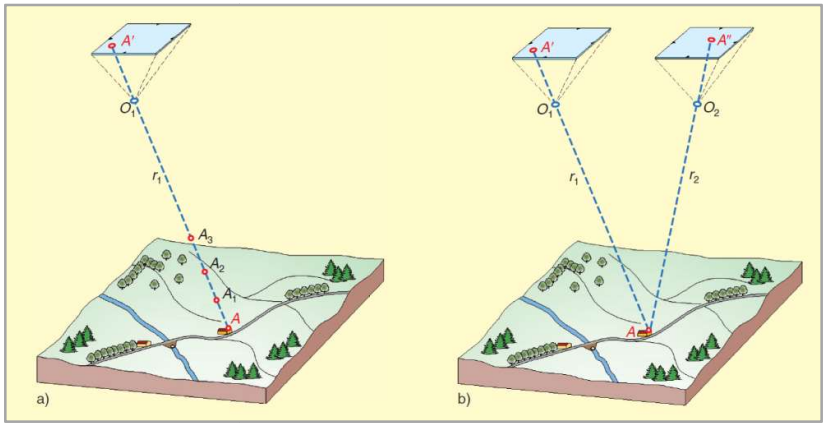

Fig. 5 Un solo centro di presa definisce infiniti punti A, due centri di presa definiscono un solo punto A (Cannarozzo R., 2012)

L'uso della fotogrammetria comporta quindi la risoluzione di un problema di fondo, ovvero quello di determinare una relazione tra le coordinate oggetto tridimensionali (X, Y, Z) dei punti dello spazio oggetto con le coordinate immagini bidimensionali (x, y) appartenenti al piano fotografico.

Questo problema può essere suddiviso in tre fasi:

- Presa; noti i parametri di orientamento interno della camera, dalle coordinate oggetto vengono definite le coordinate immagine
- Orientamento; note le coordinate oggetto e le coordinate immagine si determinano i parametri di orientamento esterno della camera
- Restituzione; noti i parametri di orientamento, dalle coordinate immagine vengono determinate le coordinate spaziali dell'oggetto.

La relazione tra coordinate immagine e coordinate oggetto è definita dalle *equazioni di collinearità*:

$$X = X_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}f}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}f}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0)\frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}f}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) - r_{33}f}$$

dove (X_0, Y_0, Z_0) rappresentano le coordinate oggetto del centro di presa del sensore,

(x, y) sono le coordinate immagine del centro di presa, *f* è la lunghezza focale della camera e le componenti r_{ij} sono gli elementi della matrice di rotazione che descrive le rotazioni (φ, ω,

κ) del sensore rispetto ai 3 assi principali (rollio, beccheggio e deriva). I parametri utilizzati nelle equazioni di collinearità vengono comunemente suddivisi in parametri di orientamento interno (P. O. I.) *f, x,* e *y*, e parametri di orientamento esterno (P. O. E.) X_0, Y_0, Z_0, φ, ω, e κ.
Per avere quindi la ricostruzione metrica dell'oggetto rappresentato nei fotogrammi è necessario conoscere i 9 parametri di orientamento che definiscono le equazioni di collinearità.

FOTOGRAMMETRIA UAV

Prima dell'era digitale la cartografia veniva prodotta tramite fotogrammetria aerea sfruttando complesse camere fotogrammetriche montate su carlinghe di aerei che sorvolavano il territorio effettuando rilievi con un basso livello di dettaglio a causa delle quote di volo che non potevano essere inferiori all'ordine di svariate centinaia di metri. Negli ultimi decenni infatti la fotogrammetria aerea è stata integrata con il telerilevamento da satellite per l'aggiornamento delle cartografie, aumentando il range di quota di acquisizione delle immagini. Oltre al problema del dettaglio del rilievo, i voli aerofotogrammetrici sono sempre risultati parecchio costosi, per questo motivo sono stati testati e introdotti nuovi sistemi in grado di acquisire immagini ad alta risoluzione con riprese da basse quote. Fino a non molto tempo fa per questo scopo vennero utilizzati mezzi come palloni aerostatici, mongolfiere, velivoli ultraleggeri o addirittura aquiloni mentre oggi grazie agli enormi passi avanti della tecnologia questo tipo di rilievo è affidato principalmente ai dispositivi aerei UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Questi dispositivi, più comunemente conosciuti come droni, sono mezzi aerei non convenzionali dotati di camere digitali ad alta risoluzione, possono essere pilotati manualmente o programmati per volare autonomamente, e si sono rivelati essere un valido supporto per la fotogrammetria aerea sia per la qualità di restituzione delle immagini che per il loro costo contenuto. L'obiettivo dei sistemi UAV è quello di ottenere immagini aeree a bassa quota utili sia per la documentazione pura, sia per ottenere i dati primari che, grazie all'utilizzo di tecniche tipiche della Geomatica come la fotogrammetria digitale, possono essere trasformati in prodotti metricamente attendibili, quali modelli del terreno e ortofoto, utili ed efficaci per una corretta rappresentazione e conoscenza dell'area investigata (Chiabrando F., 2017). Ad oggi i sistemi UAV possono essere classificati in base al tipo di volo, all'equipaggiamento, alla durata, alla distanza o alla quota del volo , ma una distinzione che risulta utile fare è quella delle categorie di droni ad ala fissa e i multi-rotori, in quanto queste categorie offrono diverse prestazioni. Un drone ad ala fissa può raggiungere una quota di volo elevata e ha un'autonomia di circa un'ora ma il suo volo deve essere sempre gestito manualmente, mentre un drone multi-rotore anche se privo di un'elevata autonomia temporale di volo e vola a quote più basse, ha la possibilità di effettuare voli programmati e offre una maggiore stabilità. Perciò gli UAV maggiormente utilizzati sono quelli multi-rotore, poiché sono in grado di coniugare una maggiore maneggevolezza e stabilità con costi inferiori e una facilitazione nela fase di controllo da parte dell'operatore addetto al pilotaggio.

Gli UAV sono formati da tre componenti:

- Il velivolo: costituito dal corpo del velivolo completo del suo sistema di propulsione, e del sistema di controllo e navigazione;
- Il payload:costituito dai sistemi accessori indispensabili per lo scopo del volo che il velivolo deve trasportare, tra cui ad esempio la fotocamera, il sistema di posizionamento, e il radar;
- La Ground Control Station(GCS): il pannello di controllo in mano all'utilizzatore, dove vengono visualizzate le informazioni del volo.

Anche nella fotogrammetria aerea per poter risolvere le equazioni di collinearità è necessario conoscere i parametri di orientamento interno ed esterno della camera fotografica, che sono equivalenti a quelli della fotogrammetria terrestre. Come nella fotogrammetria terrestre per permettere un giusto allineamento delle immagini e avere una buona restituzione grafica la fase di presa deve essere effettuata con un buon overlapping, ovvero con una buona sovrapposizione dei fotogrammi consecutivi. La sovrapposizione raccomandata per la maggior parte dei casi è di almeno il 70-75% di sovrapposizione longitudinale - overlap (rispetto alla direzione di volo) e almeno il 50-60% di sovrapposizione laterale - overside (tra le strisciate). E' fortemente raccomandato lo scatto delle immagini con una griglia regolare. La fotocamera deve essere mantenuta il più possibile a un'altezza costante sull'oggetto per garantire la risoluzione delle foto a terra (GSD Ground Sampling Distance) desiderata. Per rendere la fase di presa ottimale si effettuano voli con traiettorie a serpentina con strisciate parallele l'una all'altra. Generalmente si effettuano strisciate perpendicolari l'un l'altra solo nel caso di rilievo di aree urbane in modo che tutte le facciate degli edifici siano visibili sulle immagini raccolte. In questo caso affinché le facciate siano visibili in modo ottimale, il drone deve volare con un angolo obliquo compreso tra 10º e 35º. Per lo stesso motivo, nel caso di rilievo di un singolo edificio, occorre effettuare un volo intorno all'edificio con la fotocamera inclinata di un angolo di 45° e procedere successivamente una seconda e terza volta, aumentando l'altezza di volo e diminuendo l'angolo della telecamera ad ogni turno. E' raccomandabile prendere una serie di immagini ogni 5-10 gradi per garantire sufficiente sovrapposizione, a seconda delle dimensioni dell'oggetto e la distanza rispetto ad esso. L'altezza di volo non deve essere aumentata più di due volte tra i voli.

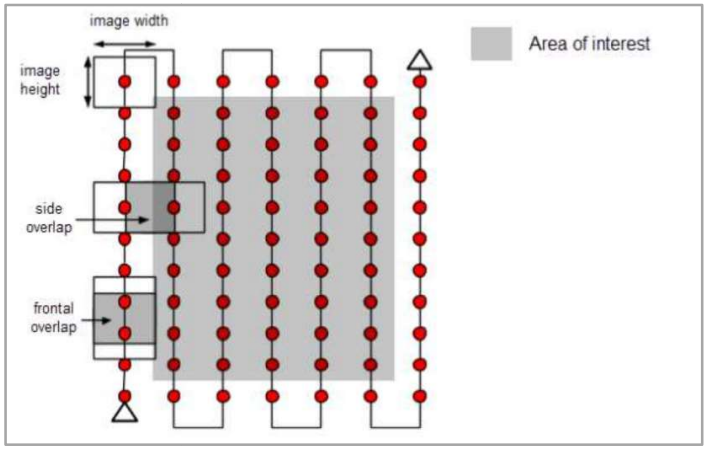

Fig. 6 Schema di presa corretto per rilievi aerofotogrammetrici con andamento a serpentina per rilievi semplici (Guerra F.)

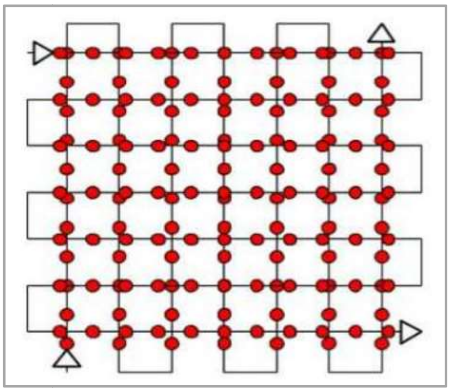

Fig. 7 Schema di presa con andamento reticolare per aree urbane (Guerra F.)

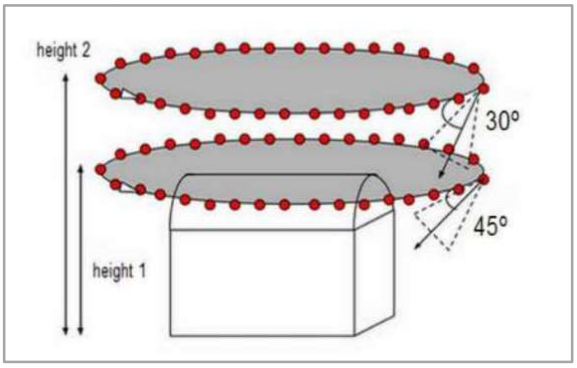

Fig. 8 Schema di presa circolare per singoli edifici (Guerra F.)

Per le elaborazioni dei modelli fotogrammetrici risulta fondamentale la definizione di vincoli a terra in un sistema di coordinate assolute in quanto successivamente saranno necessarie per permetterci di scalare e orientare correttamente il modello ottenuto. Per eseguire queste operazioni ci si avvale della triangolazione aerea, tecnica fotogrammetrica che ha lo scopo di

fornire le coordinate dei punti di appoggio per i modelli stereoscopici di un rilievo fotogrammetrico (Galetto R., 1998).

STRUMENTAZIONE CLOSE RANGE

Per il nostro rilievo fotogrammetrico terrestre abbiamo utilizzato una Canon EOS 750D, una reflex con sensore APS-C (1, 6x) da 24, 2 Megapixel di medie dimensioni con corpo esterno in policarbonato resistente molto ben costruito e scheletro in alluminio. Lo schermo articolato orientabile da 3 pollici ha una risoluzione di 1. 040. 000 punti, un rapporto di aspetto 3:2 ed è sensibile al tocco, il che permette di selezionare manualmente il punto focale.

Fig. 9 Canon EOS 750D vista frontale (Canon)

I comandi sono completi e ben posizionati, anche se c'è una sola ghiera di regolazione. Con l'occhio al mirino o col menu di controllo rapido, attivabile premendo il comando Q, tutte le impostazioni sono facilmente raggiungibili e regolabili. L'obiettivo zoom in dotazione, 18-135 IS STM mm equivalente ad un 29-216 mm in formato fullframe, stabilizzato e dotato di motore STM passo-passo silenzioso è ben proporzionato in rapporto alle dimensioni del corpo.

Fig. 10 Comandi Canon EOS 750D (Canon)

Il processore DIGIC 6 di cui è equipaggiata questa Reflex permette di scattare a 5fps, che è diventata la velocità standard per ogni DSLR (Digital Single-Lens Reflex) che si rispetti. La Canon EOS 750D ha un sensore a 19 punti a croce, i quali vengono usati anche in modalità Live View. L'Autofocus usando il mirino è veloce e copre la porzione centrale dell'inquadratura, con sette colonne di punti focali che diventano più piccoli man mano che ci si sposta dal centro dell'inquadratura. La velocità dell'otturatore va da 30s a 1/4000 di secondo, mentre la gamma ISO nativa è di 100-12800, estendibile fino a di 25600. È presente tuttavia una modalità Auto Lighting Optimizer che si può utilizzare per migliorare la gamma dinamica negli scatti JPEG, e una modalità a multi esposizione HDR (Canon).

Fig. 11 Display Canon EOS 750D (Canon)

STRUMENTAZIONE UAV

Per quanto riguarda il rilievo fotogrammetrico aereo è stato utilizzato il drone DJI Mavic Mini. I punti di forza di questo drone sono le dimensioni e il peso estremamente contenuti, questo infatti pesa solo 249 grammi comprensivi della batteria installata e ha, una volta piegato, dimensioni talmente ridotte da consentire all'utilizzatore di tenerlo sul palmo di una mano.

Fig. 12 DJI Mavic Mini chiuso (DJI)

Questo mini UAV rientra nella categoria dei droni multi-rotore con quattro eliche ed è dotato nonostante il peso esiguo di una buona qualità costruttiva, infatti il corpo centrale risulta essere ben costruito e le cerniere dei quattro bracci con motore ripiegabili sono robuste e solide. Le dimensioni effettive da chiuso sono di 140x82x57 mm mentre una volta aperto le dimensioni comprensive di eliche arrivano a 245x290x55 mm.

Fig. 13 DJI Mavic Mini con ali aperte (DJI)

È inoltre dotato di una fotocamera da 12 megapixel con apertura f/2. 8 completamente stabilizzata meccanicamente, che può girare video con una risoluzione fino a 2, 7K. La fotocamera, montata nella parte anteriore e sospesa su supporti in gomma che le permettano di assorbire ogni tipo di vibrazione, ha tre assi di stabilizzazione motorizzati ed è affiancata da due sensori sonar e un ricevitore GNSS (GPS + Glonass) che garantiscono la possibilità di librarsi in un punto stabilmente senza muoversi.

Fig. 14 DJI Mavic Mini in fase di volo (DJI)

Il DJI Mavic Mini viene fornito con un radiocomando compatto privo di display ma con un indicatore led per lo stato della batteria, con una portata di trasmissione massima di 2 km. La mancanza di display però non risulta essere un problema in quanto è possibile collegarlo tramite app ad un qualsiasi smartphone per avere accesso alle funzionalità avanzate di drone e fotocamera.

Fig. 15 Radiocomando DJI Mavic Mini (DJI)

Infine, grazie alla batteria con una capacità di 2400 mAh questo drone ha un'autonomia di volo che si aggira intorno ai 30 minuti, alla pari con droni molto più grandi e costosi (DJI).

LASER SCANNING

Per il rilevamento di nuvole di punti e la ricostruzione di modelli 3D i sistemi di mappamento mobile, più comunemente chiamati MMS (Mobile Mapping System) rivestono un ruolo di particolare importanza. Tra questi MMS spiccano quelli dotati della tecnologia SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) che negli ultimi anni ha progredito a tal punto da essere riconosciuta come una delle tecniche più efficaci per raccogliere informazioni di siti di qualsiasi genere in modo accurato e veloce. La tecnologia SLAM originariamente è stata sviluppata in relazione alla robotica, si pensi ad esempio che viene utilizzata anche dai robot aspirapolvere, ma ha trovato largo impiego sia nelle tecnologie di rilevamento ma anche, ad esempio, nella risoluzione dei problemi legati alla guida autonoma. Il funzionamento di questa tecnologia sta nella capacità di consentire al dispositivo che ne è dotato di determinare la propria posizione e contemporaneamente di rilevare l'ambiente che lo circonda. Questa tecnologia si basa principalmente su 2 componenti tecnologiche, una che elabora i segnali raccolti dai sensori permettendo allo strumento di localizzare la propria posizione, stimando il movimento e analizzando gli ostacoli che incontra, e un'altra che registra e ottimizza i grafici raccolti dalla prima componente. La tecnologia SLAM da noi sfruttata allo scopo di raccogliere le informazioni metriche dell'oggetto del rilievo viene chiamata più precisamente SLAM LIDAR. LIDAR è l'acronimo di Light Detection and Ranging ed è un metodo che utilizza principalmente un sensore laser. Rispetto alle fotocamere, sensori ToF o altri sensori, i laser sono estremamente più precisi e vengono utilizzati per applicazioni con veicoli in movimento ad alta velocità o voli tramite droni o semplicemente trasportando a mano il rilevatore. L' output generato dai sensori laser sono generalmente nuvole di punti che possono essere 2D o 3D a seconda delle necessità e del ricevitore. La nuvola di punti del sensore laser fornisce misure di distanza ad alta precisione ed è molto efficace per la costruzione di mappe grazie al contributo della tecnologia SLAM. Generalmente il movimento viene stimato in modo sequenziale abbinando le nuvole di punti, mentre la distanza percorsa viene utilizzata per localizzare il rilevatore. Ciò che contraddistingue quindi i MMS LIDAR dotati di tecnologia SLAM è 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) che danno sostegno alla stima del posizionamento della traiettoria. La tecnologia SLAM si occupa in particolare di andare a

definire la velocità, la distanza e la posizione della traiettoria percorsa dallo strumento. Altra caratteristica fondamentale per i laser mobili LIDAR è la capacità durante il movimento ininterrotto dello strumento di acquisire contemporaneamente in tempo reale le informazioni metriche e quelle di posizionamento e orientamento in modo continuo, provvedendo allo stesso tempo alla generazione del modello sotto forma di nuvola di punti in maniera progressiva.

STRUMENTAZIONE

Per effettuare il rilievo abbiamo utilizzato il laser scanner mobile Kaarta Stencil 2, una piattaforma personalizzabile per la mappatura mobile rapida e a lungo raggio, dotata un computer abbastanza piccolo ma sufficientemente potente da riuscire ad elaborare e visualizzare tutti i dati che acquisisce. La mappatura 3D integrata del Kaarta Stencil 2 e la stima della posizione in tempo reale consentono funzionalità non possibili con altri sistemi di scansione laser terrestre a base fissa, questo grazie agli algoritmi di locazione e mappatura 3D avanzati brevettati da Kaarta di cui è dotato il computer integrato dello stencil 2.

Fig. 16 Kaarta Stencil 2-16 (Kaarta)

Questa piattaforma permette di rilevare accuratamente gli spazi esterni e interni di grandi dimensioni in modo rapido e semplice con una portata fino a 100 metri, un campo visivo di 30° e con una precisione lidar di ±30 mm. Il sistema ha una velocità di trasmissione dati che raggiunge i 300. 000 punti al secondo fino a 10 Hz e ha la possibilità di essere trasportato a mano, montato su un veicolo o montato su un drone per l'uso in un'ampia varietà di applicazioni. Stencil 2non nasce con un sistema GNSS integrato ma, essendo dotato di IMU (Inertial Measurement Unit) con sistema microelettromeccanico, la scansione viene geolocalizzata in tempo reale in un sistema di riferimento locale, così come avviene similmente nella tecnologia SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) grazie alla tecnica del loop-closure. Il dispositivo mobile è inoltre incorporato con un features tracker che registra il percorso effettuato e permette l'acquisizione di immagini a risoluzione molto bassa per tutte le varie tipologie di ambienti in cui si opera. (Malinverni E. S., 2021)

Fig. 17 Kaarta Stencil 2-16 con Tablet incluso (Kaarta)

L'interfaccia utente di Stencil 2 e la tastiera su schermo, a cui si accede dal tablet venduto insieme al laser scanner, rendono il funzionamento in tempo reale facile e intuitivo, offrendo agli utenti un controllo migliore sulle operazioni di scansione, sull'immissione dei parametri e sulla gestione dei file (Kaarta).

CASO STUDIO

Il monastero di Santa Maria di Ravenja (Shën Mërisë Ravenjës) si trova nel comune di Dropull, a circa 4 km dal villaggio di Goranxi, nella provincia di Argirocastro ad un'altitudine di circa 650 m sul livello del mare. Il monastero è meglio conosciuto come il "Monastero di Ravenja" e la sua chiesa, situata al centro del cortile del monastero, è dedicata al "sonno di Tutti i Santi". Del monastero sono rimasti solo la chiesa e alcuni edifici circostanti in condizioni danneggiate.

Fig. 18 Vista aerea del monastero Shën Mërisë

L'ingresso al monastero avviene da Nord, attraverso un portale ad arco, protetto da un portico a due colonne. All'interno delle mura perimetrali che racchiudono un cortile quasi quadrato, sono state realizzate celle, depositi e altre strutture di servizio.

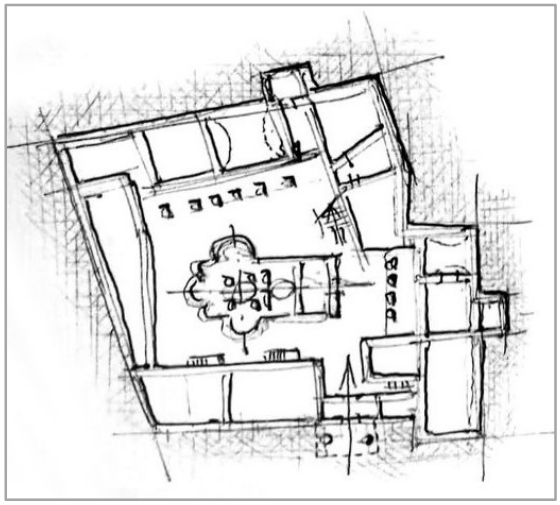

Fig. 19 Planimetria del monastero Shën Mërisë

Secondo un’iscrizione incisa su una lastra di pietra sopra la porta all’interno del nartece, che recita:"Regina di tutti i profeti, chiamata la progenie di Gioacchino e la sterile Anna, che divenne degna di ascoltare la voce dell'angelo che disse: Rallegrati, tu che gioisci nell'Onnipotente, figlia, vergine e madre, accetta la preghiera del tuo servo Christofor, che volontariamente ha costruito il tuo tempio, nell’anno 1600 dalla nascita di Cristo”, la costruzione della chiesa fu attribuita allo Ieromonaco Cristoforo nel 1600. La chiesa si compone di una navata a croce con cupola triabsidata e ha dimensioni interne di 6, 80 × 5, 60 metri, un nartece e un’esonartece, entrambi ricoperti da un sistema di volte a botte e cupole. L'interno della chiesa è caratterizzato dalla notevole proporzione delle parti costitutive, dalla predominanza dell'asse verticale e dall'elaborazione decorativa degli elementi architettonico-costruttivi, quali capitelli, portoni con i loro rivestimenti e spalle. L'intera superficie interna della chiesa è ricoperta da pitture murali di alta qualità artistica, che si conservano in condizioni relativamente buone (Fig. 20).

Fig. 20 Pitture interne alla chiesa

Al di sopra del volume della chiesa, si eleva l'alto tamburo che sorregge la cupola, nella parte centrale, nonché il volume del campanile sopra il frontone del nartece, come due necessari accenti verticali. La chiesa è costruita con pietre stratificate, regolarmente inserite in muratura. Le superfici murarie sono movimentate dalla lavorazione decorativa, che si concentra principalmente sulle absidi e sul tamburo. La sua particolarità, che la distingue da altre chiese della stessa provincia e periodo, ma che al tempo stesso costituisce un caso unico nell'architettura post-bizantina, è la sua decorazione esterna. Le absidi, il tamburo della cupola e le finestre absidali contengono colonne in pietra collegate da archi che, intersecando tra loro, creano archi acuti. Sopra l'intersezione di questi archi sono collocati rilievi con motivi zoomorfi e antropomorfi.

Fig. 21 Decorazioni esterne alla chiesa

Questo tipo di decorazioni ha spinto gli studiosi ad attribuire delle influenze occidentali alla chiesa.

METODOLOGIA E RILIEVI

La finalità dei nostri rilievi è quella di generare un modello 3D virtuale identico all'originale, metricamente corretto e fotorealistico del monastero in questione che possa essere utile per vari scopi, tra cui:

- Creazione di un archivio digitale al fine di catalogare e classificare i beni culturali offrendo la possibilità di consultare e studiare le opere da remoto;
- Simulazione con finalità preventive di fenomeni fisici o sismici con conseguente studio degli effetti che potrebbero generarsi ;
- Interrogazioni metriche al fine di conoscere le dimensioni, proporzioni e forme del monumento rilevato, utile per l'analisi di opere che abbiano subito variazioni o danneggiamenti nel tempo;
- Progettazione della manutenzione o del restauro per mezzo di ipotesi integrative o ricostruttive;
- Indagini sui materiali costruttivi e sulle tecniche di esecuzione, al fine di programmare un intervento di restauro o solo per motivi di studio dell'opera;
- Valutazione e monitoraggio dello stato di degrado, che sia questo dovuto ad eventi accidentali, naturali, fisici, climatici o di altra natura.

Per raggiungere il nostro obbiettivo abbiamo deciso di integrare i dati di più metodologie di rilievo, fotogrammetrico, aerofotogrammetrico e da laser scanner, in modo da poter avere un modello più preciso di quello che avremmo avuto effettuando solo un rilievo fotogrammetrico e più dettagliato di quello che avremmo generato solo con un rilievo da laser scanner. Questo è stato possibile grazie all'ausilio di appositi software, tra cui:

- *Metashape* di Agisoft, un programma che sfrutta il sistema *Structure from Motion (SfM)* per derivare automaticamente la posizione tridimensionale di un oggetto, raffigurato nelle immagini, calcolando i parametri della macchina fotografica (Hartley R., 2004);
- *CloudCompare*, un software di elaborazione di nuvole di punti che fornisce una serie di strumenti di base per la modifica e il rendering manuale delle nuvole 3D e di mesh triangolari.

Il Monastero di Santa Maria è raggiungibile percorrendo una strada non asfaltata e poco praticabile, solo con l'aiuto di una guida locale esperta infatti siamo riusciti a raggiungere il nostro caso di studio. Appena giunti sul posto, come prima ed essenziale fase del nostro rilievo, abbiamo provveduto alla disposizione a terra i target, i quali risulteranno essenziali per la successiva georeferenziazione dei rilievi del nostro modello. A questo scopo abbiamo utilizzato 6 Target con dimensioni di30x40cmcon sfondo a rettangoli bianchi e neri, successivamente integrati con dei target circolari riflettenti al loro centro per essere rilevati più agevolmente dal laser scanner. La principale caratteristica dei target è la loro visibilità, in quanto devono essere facilmente individuabili dalle foto aeree.

Fig. 22 Fase di rilievo dei Target a terra

I 6 target sono stati disposti nel cortile interno del monastero in punti che non risultassero nascosti da alberi o altri elementi per facilitarne la localizzazione in fase di georeferenziazione. Successivamente abbiamo provveduto a rilevare le coordinate geodetiche dei target tramite i nostri rilevatori GNSS Topcon Hiper HR. Per avere un rilievo preciso delle coordinate dei target abbiamo utilizzato il metodo Base-Rover, il quale sfrutta la misura statica eseguita con il ricevitore denominato Base, che abbiamo posizionato fisso in un punto favorevole per la ricezione dei segnali satellitari. Così facendo abbiamo permesso a quest'antenna di effettuare molteplici correzioni che ci ha portato ad avere un'elevata precisione sul posizionamento. Nel frattempo, dopo un'inizializzazione statica in cui i 2 ricevitori GNSS si sono abbinati, abbiamo provveduto con il secondo ricevitore, il Rover, ad acquisire le posizioni dei nostri target andandolo a posizionare al centro di questi e attendendo per un minuto (tempo a favore della precisione) su ogni target. In questo modo, attraverso il collegamento radio UHF di cui sono dotati i nostri ricevitori, le due antenne sono state in grado di comunicare tra di loro e rilevare le posizioni del Rover rispetto a quella della Base, per poi riposizionarla con precisione in riferimento alla posizione geodetica della Base.

Dopo aver battuto i target a terra abbiamo iniziato il rilievo aerofotogrammetrico con il nostro drone DJI Mavic Mini. Per prima cosa abbiamo deciso di effettuare gli scatti in direzione nadirale, quindi abbiamo programmato una traiettoria a serpentina per il nostro drone con un'elevazione di 30 metri da terra e abbiamo impostato il tempo di scatto tale da avere una sovrapposizione almeno 70% tra un'immagine e la successiva.

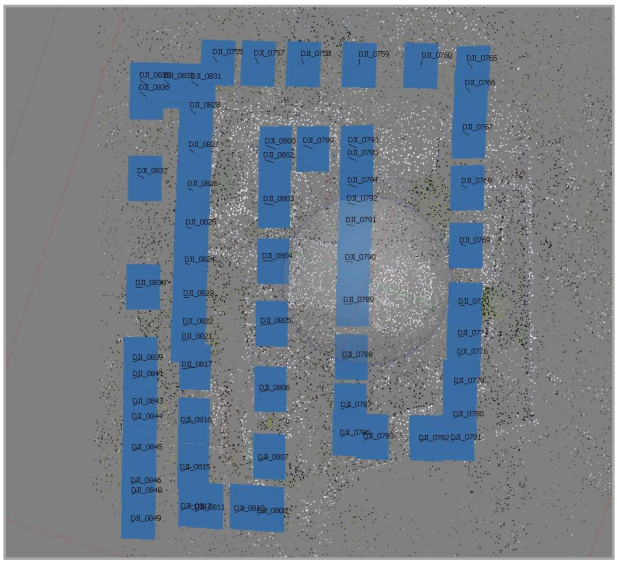

Fig. 23 Schema di presa a serpentina applicato al nostro caso studio

Una volta concluso il rilievo aerofotogrammetrico nadirale siamo passati a quello obliquo con la fotocamera del drone inclinata a 45°, fase essenziale per rilevare con cura lo sviluppo in altezza della nostra chiesa e del monastero. In questo caso l'elevazione del drone è stata impostata a 10 metri da terra per un primo volo intorno alle mura del monastero per poi salire a 15 metri di elevazione in un secondo volo riducendo l'inclinazione della fotocamera a 40°.

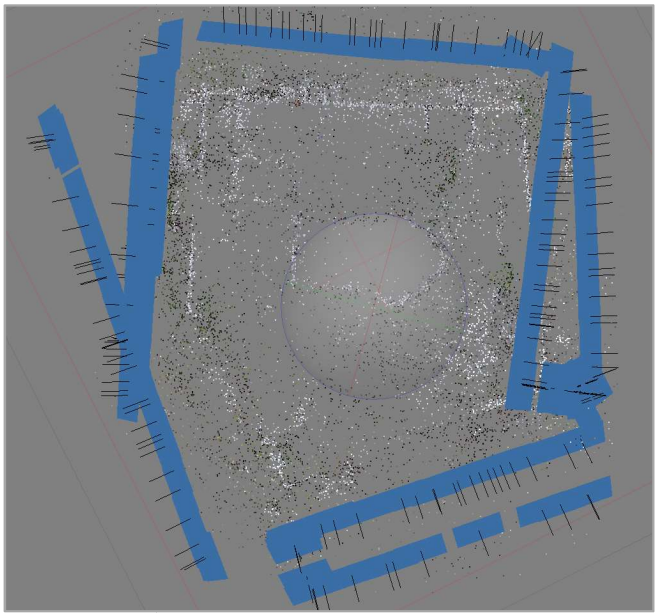

Fig. 24 Schema di presa circolare applicato al nostro caso studio

Successivamente al rilievo aerofotogrammetrico tramite UAV siamo passati al rilievo fotogrammetrico terrestre, per mezzo della Canon 750D, necessario per l'osservazione dei dettagli all'esterno del nostro caso di studio e soprattutto per il rilievo minuzioso degli interni della chiesa. Anche in questo caso siamo stati attenti nel cercare di mantenere una sovrapposizione delle immagini che fosse intorno al 70% per cercare di collegarle in modo ottimale durante la fase di restituzione. Abbiamo quindi fotografato prima tutte le facciate esterne della chiesa, il tamburo e il campanile, per cercare di cogliere con maggiore dettaglio ciò che poteva risultare complicato da catturare per mezzo del drone, per poi spostarci all'interno dove abbiamo rilevato in modo scrupoloso le pavimentazioni, le pareti e il soffitto di nartece, esonartece e navata per poterne restituire successivamente una nuvola di punti estremamente precisa e dettagliata. L'ultima fase del nostro rilievo è stata poi quella effettuata tramite il Mobile Kaarta Stencil 2, un laser scanner mobile terrestre dotato di tecnologia

SLAM. Per assicurarci una restituzione accurata durante questa fase abbiamo proceduto con l'acquisizione di più rilievi per poi integrare i risultati creando un modello unico.

Fig. 25 Fase di rilievo tramite tecnologia SLAM

Abbiamo iniziato con il rilievo esterno alle mura del monastero in modo da acquisire tutti i punti del perimetro per poter analizzare lo stato effettivo delle mura perimetrali del nostro caso di studio. Successivamente siamo passati ad effettuare una seconda scansione all'interno del cortile in modo da raccogliere informazioni riguardanti il perimetro esterno della chiesa e le mura del monastero interne. Infine abbiamo proceduto con l'acquisizione dei punti interni alla chiesa. Quest'ultimo passaggio ci ha richiesto più di una acquisizione in quanto il nostro strumento a causa dei passaggi stretti, come corridoi e porte, in molte acquisizioni ha avuto una perdita dell'orientamento . Inoltre, inclinando lo strumento di 30 gradi per effettuare il rilievo delle parti più alte come previsto dal manuale d'uso, il Kaarta Stencil 2 non è stato in grado di garantire sempre una corretta registrazione della nuvola di punti.

RAPPRESENTAZIONI

Una volta rientrati dal sito dei nostri rilievi è iniziato il lavoro di elaborazione dei dati raccolti attraverso il programma Metashape. Questo software, prodotto dalla compagnia russa Agisoft LCC, è uno strumento avanzato che permette di elaborare, partendo da fotogrammi, nuvole dense di punti, mesh e texture. Infatti il software consente l'individuazione automatica di punti omologhi all'interno delle immagini e li correla tra loro, ricavando i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa nello spazio tridimensionale per ciascun fotogramma. Grazie a questo procedimento il software elabora e restituisce una prima nuvola di punti, attraverso la quale è possibile verificare che l'allineamento sia stato eseguito correttamente e se necessario correggere le eventuali incongruenze. È possibile inoltre georeferenziare le nuvole ricavate facendo riferimento ai marker assegnati manualmente in corrispondenza delle immagini che individuano i target da noi disposti sul campo in fase di rilievo, di cui abbiamo rilevato le coordinate. Il programma è inoltre in grado di processare elevati numeri di fotogrammi, mantenendo tempistiche di elaborazione proporzionali al carico di lavoro assegnatogli. Per utilizzare correttamente Metashape è però necessario attenersi ad alcune regole utili per avere un risultato più veritiero possibile. La raccolta delle foto deve essere effettuata per mezzo di una camera ad alta risoluzione, impostandola alla massima risoluzione possibile. Per le elaborazioni devono essere utilizzate solo foto nitide scartando quindi quelle non a fuoco, le immagini devono avere una buona sovrapposizione (*overlap*), bisogna evitare di tagliare o modificare le fotografie, l'oggetto fotografato deve occupare il massimo spazio possibile nella foto ed è fondamentale avere una buona e corretta luce in quanto è preferibile non utilizzare il flash. Ultimo punto, decisamente importante, riguarda la modalità di acquisizione delle foto, l'oggetto deve essere ripreso da più angolazioni possibile in modo da avere il minor numero di zone d'ombra, ovvero spazi senza informazioni.

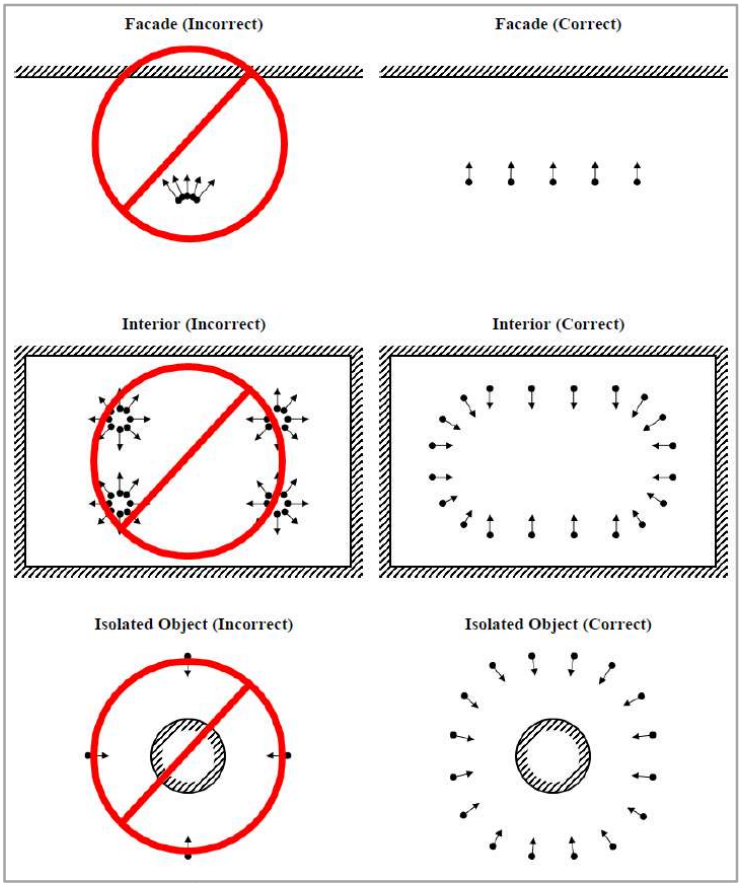

Fig. 26 Corrette modalità di scatto per una elaborazione ottimale di Metashape (Agisoft)

Come prima fase della nostra elaborazione dei dati raccolti abbiamo quindi provveduto ad un lavoro di selezione delle immagini acquisite, in primis suddividendole a seconda dell'area fotografata e in seguito effettuando una selezione delle immagini, eliminando quelle con una messa a fuoco non ottimale e quelle doppie in modo da non andare ad appesantire inutilmente il modello che avremmo poi dovuto generare. Abbiamo iniziato la nostra prima elaborazione di immagini utilizzando le foto ottenute per mezzo del rilievo aerofotogrammetrico tramite drone, inserendo insieme le immagini dei voli nadirali e quelle dei voli con camera inclinata a 45° per un totale di 442 immagini. Abbiamo quindi avviato l'allineamento su Metashape. Con questo comando il software, sfruttando la tecnica *Structure from Motion*, calcola le posizioni delle camere al momento dello scatto analizzando i parametri di orientamento della fotocamera, e restituisce una prima nuvola di punti generata dai punti omologhi delle immagini allineate. Una volta concluso l'allineamento delle immagini abbiamo generato una nuvola densa di punti ma una volta finita l'elaborazione ci siamo subito resi conto che il risultato restituito risultava essere incompleto. Infatti il tamburo della cupola della chiesa e il

campanile presentavano una carenza di informazioni e di conseguenza sembravano generare dei vuoti in prossimità delle informazioni mancanti.

Fig. 27 Nuvola densa da volo aerofotogrammetrico con informazioni mancanti

Abbiamo allora deciso di integrare questo modello con quello generato delle immagini scattate tramite la Canon 750D selezionando solo le foto che inquadrassero il tamburo e il campanile. Quindi abbiamo allineato le 74 immagini selezionate e abbiamo creato una nuvola densa del campanile e del tamburo.

Fig. 28 Nuvola densa raffigurante il tamburo completo e il campanile

Abbiamo successivamente importato questa nuvola nel primo modello e provveduto a scalarla e sovrapporla alla nuvola generata dal rilievo aereo tramite il comando di allineamento di due nuvole di punti del programma CloudCompare per poi unire il tutto in una sola nuvola. Abbiamo preferito utilizzare CloudCompare piuttosto che Metashape nella gestione delle nuvole di punti per praticità di utilizzo e per il fatto che CloudCompare una volta allineate le nuvole ci restituisce un report di registrazione dove viene indicato l'RMS (valore quadratico medio) che definisce il valore medio delle distanze tra i punti delle nuvole allineate e la matrice di trasformazione della nuvola allineata.

Fig. 29 Nuvola densa completa generata dai rilievi fotogrammetrici

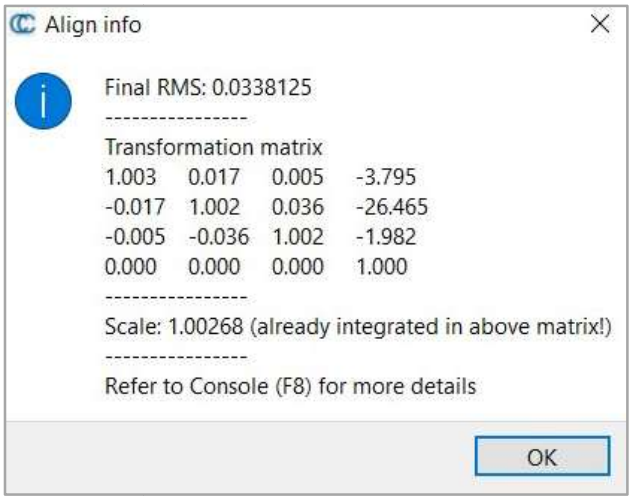

Fig. 30 Report finale di allineamento nuvola UAV con campanile e tamburo

Il report ci indica che il valore quadratico medio risulta leggermente superiore ai 3 cm, che nel nostro caso è un valore buono in quanto come anticipato precedentemente questo valore indica la distanza media tra i punti delle 2 nuvole allineate. Abbiamo deciso di accettare solo risultati di allineamento inferiori ai 5cm, valore più che accettabile per le finalità del nostro studio.

Prima di allineare le due nuvole abbiamo però provveduto a georeferenziare il nostro modello aerofotogrammetrico con Metashape sfruttando i target posizionati durante la fase di rilievo. Per georeferenziare la nostra nuvola abbiamo dovuto individuare, per ogni immagine che li contenevano, i target posizionati da noi a terra per il rilievo e attribuire a questi un diverso marker per ogni target. Dopo questo passaggio abbiamo provveduto ad inserire le coordinate, precedentemente estrapolate in un file di testo, dei target battuti per mezzo del rilevatore GNSS nei rispettivi markers. A questo punto abbiamo fatto ricalcolare l'allineamento delle immagini con delle coordinate di riferimento reali, in modo da avere come prodotto una nuvola densa di punti georeferenziata, correttamente allineata e metricamente corretta.

Fig. 31 Nuvola densa georeferenziata tramite l'applicazione di markers in corrispondenza dei targets

Una volta completata la nuvola densa fotogrammetrica dell'esterno del nostro caso studio siamo passati alla generazione delle nuvole degli ambienti interni della chiesa. Come primo ambiente abbiamo deciso di ricostruire il Nartece che avevamo in precedenza diviso in 3 cartelle di immagini in quanto scattate con fotocamere diverse. Infatti per acquisire le 295 foto delle pareti abbiamo sfruttato il drone, mentre per le 46 immagini della cupola e le 56 del pavimento del nartece abbiamo utilizzato la Canon. Per questa molteplicità di fonti di presa ci aspettavamo di non riuscire ad elaborare contemporaneamente tutte le immagini, infatti inizialmente abbiamo avuto dei problemi con l'allineamento. Dopo aver selezionato più accuratamente le immagini però il programma è riuscito senza problemi ad allineare tutte le immagini, calcolando l'orientamento delle diverse fotocamere e generando una nuvola sparsa di punti corrispondente ad una corretta restituzione. Questo ci ha permesso di generare una sola nuvola con le 3 diverse prospettive di presa già allineate tra loro, evitandoci di dover generare 3 nuvole da allineare manualmente l'una all'altra e quindi restituendoci un risultato più preciso e già allineato. Abbiamo quindi provveduto a raffittire la nuvola ottenuta generando dalla nuvola sparsa una nuvola densa di punti.

Fig. 32 Nuvola densa raffigurante il Nartece

Successivamente abbiamo applicato la stessa metodologia per generare una nuvola densa dell'Esonartece processando le 451 immagini catturate per mezzo del drone e della Canon.

Fig. 33 Nuvola densa raffigurante l'esonartece

Purtroppo non siamo stati in grado di effettuare lo stesso lavoro per la navata della chiesa in quanto il rilievo fotogrammetrico effettuato all'interno di questa è risultato incompleto a causa di un guasto al drone utilizzato per la fase di presa delle pareti interne della chiesa e di conseguenza non è stato possibile generare una nuvola di punti senza sufficienti informazioni.

Una volta create le nuvole dense di punti di tutti gli ambienti interni ed esterni ripresi tramite fotocamera e drone, ad esclusione della navata, dove purtroppo le immagini raccolte tramite rilievo fotogrammetrico sono risultate incomplete, siamo passati ad analizzare le nuvole rilevate per mezzo del laser scanner terrestre Kaarta stencil 2. Come prima cosa abbiamo analizzato tutte le nostre 23 scansioni registrate e ci siamo accorti che molte di queste risultavano inutilizzabili in quanto la perdita dell'orientamento da parte del Kaarta Stencil 2 ha fatto si che venisse registrata una nuvola completamente o quasi distorta.

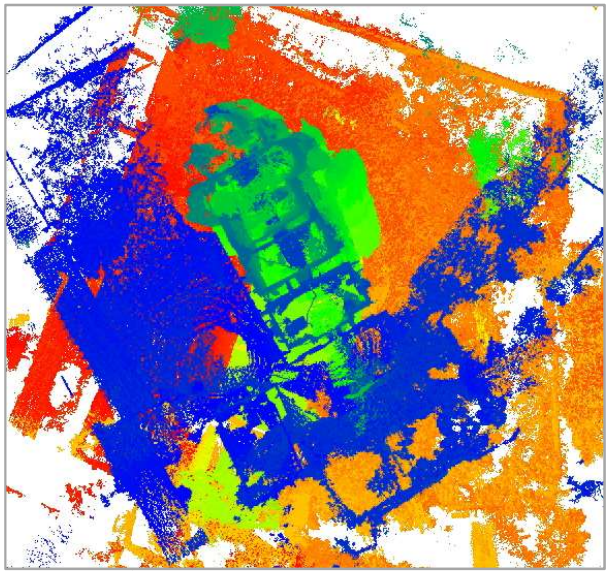

Fig. 34 Nuvola SLAM distorta del rilievo interno al cortile

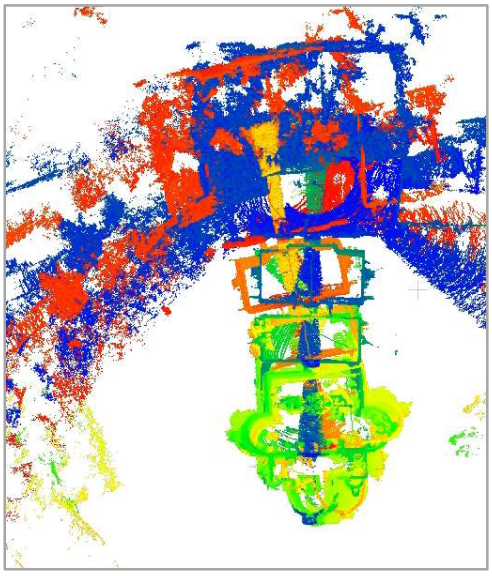

Fig. 35 Nuvola SLAM distorta del rilievo interno alla chiesa

Non in tutte le scansioni però si sono verificate distorsioni tali da rendere inutilizzabili le nuvole, per quanto anche le nuvole migliori presentavano delle leggere deviazioni delle traiettorie con conseguente non riuscita della chiusura ad anello ed effetti di rumore nella registrazione che non ci saremmo aspettati. Per rimediare a queste imprecisioni di registrazione delle nuvole abbiamo sfruttato un programma installato all'interno del nostro Stencil 2, il *Loop Closure.* Kaarta infatti mette a disposizione dei propri utenti questo software installato all'interno del dispositivo Stencil 2 in grado di modificare le nuvole di punti

raccolte rielaborandone la traiettoria, in modo da creare una chiusura ad anello, e orientando di conseguenza correttamente la nuvola di punti registrati durante la scansione. Abbiamo quindi inserito nel programma le nostre nuvole migliori dei 3 percorsi utili effettuati e abbiamo minimizzato le distorsioni della nuvola facendo imporre dal programma la chiusura della traiettoria ad anello, come è stata percorsa nella fase di presa. A questo punto , una volta corrette le nuvole di punti abbiamo proceduto con una successiva elaborazione CloudCompare poiché la rielaborazione restituita dal *Loop Closure* non risultava essere sufficientemente precisa. Abbiamo quindi provveduto a rimuovere i punti superflui e modificato il campo scalare temporale per mettere in luce solo la porzione di nuvola non distorta prima della nuvola di punti acquisita percorrendo esternamente il perimetro delle mura del convento, poi della nuvola registrata percorrendo il cortile interno della chiesa e infine della nuvola generata percorrendo internamente gli ambienti della chiesa.

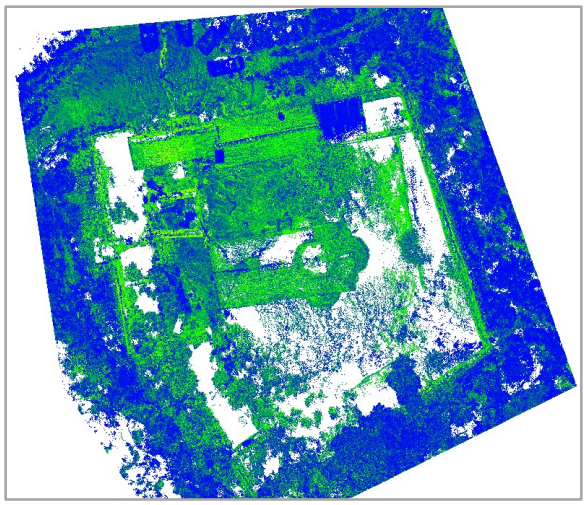

Fig. 36 Nuvola di punti raccolta tramite Stencil 2 nel percorso esterno alle mura

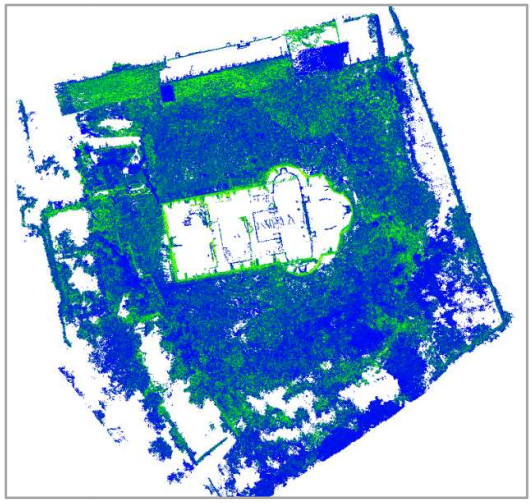

Fig. 37 Nuvola di punti del rilievo interno al cortile

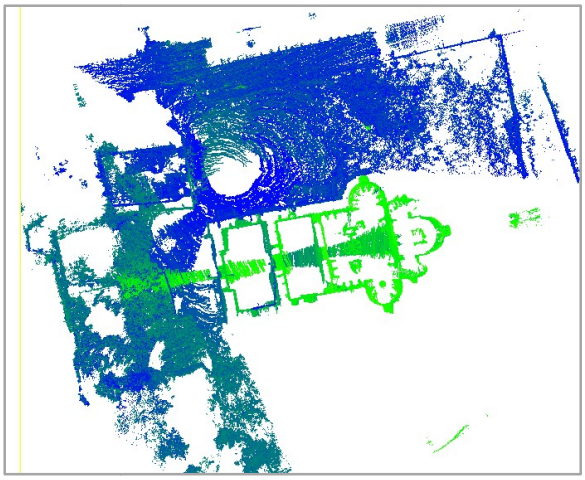

Fig. 38 Nuvola di punti del rilievo interno alla chiesa

A questo punto abbiamo inserito le 3 nuvole nello stesso file e le abbiamo allineate tra di loro prendendo come riferimento dei punti omologhi in comune tra le nuvole. Una volta allineate le nuvole SLAM abbiamo deciso di salvare il nostro file con le 3 nuvole ancora divise piuttosto che in un'unica nuvola, in modo da rendere possibile l'esclusione di una qualsiasi di queste per necessità di visualizzazione.

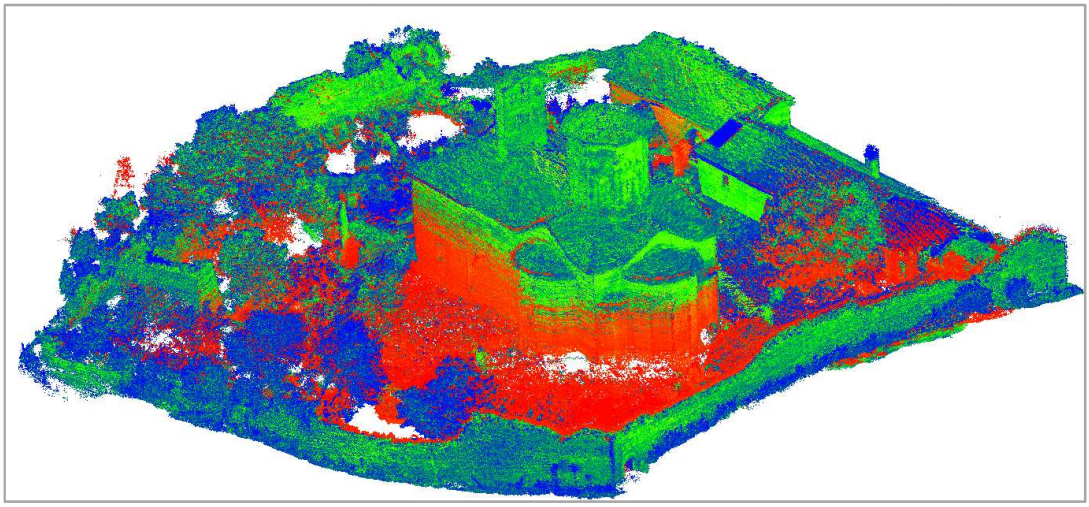

Fig. 39 Nuvole SLAM allineate con vista inclinata

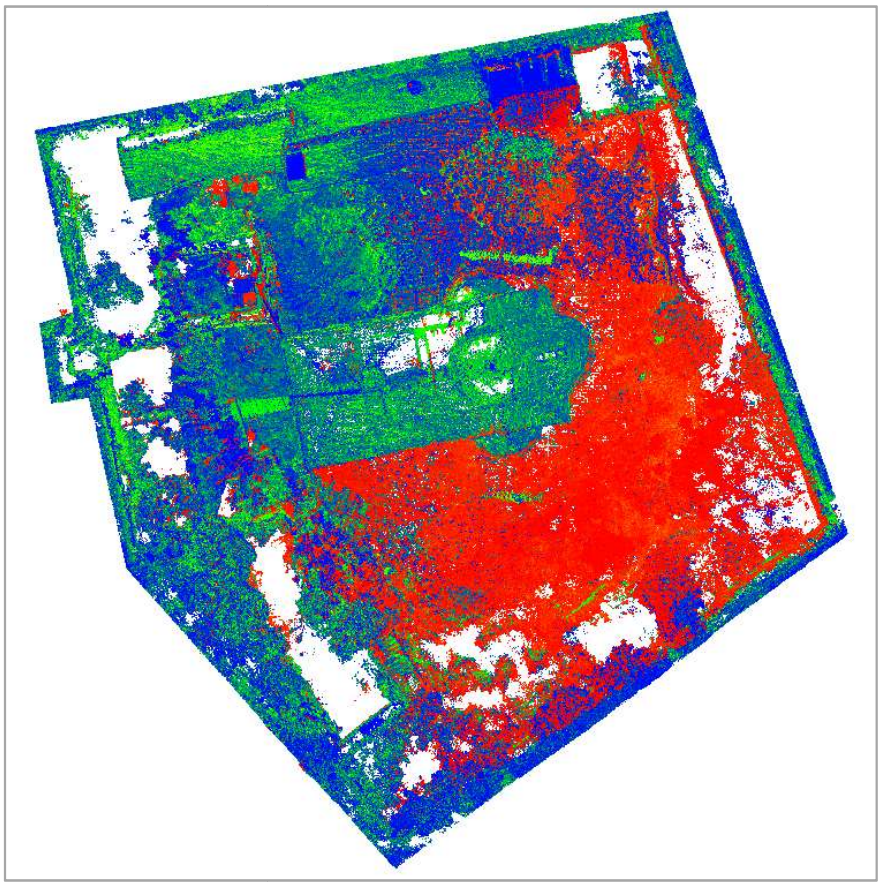

Fig. 40 Nuvole SLAM allineate con vista dall'alto

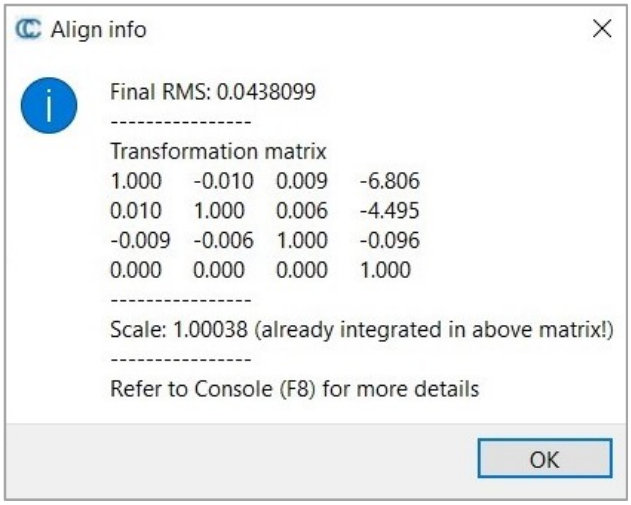

Fig. 41 Report di allineamento della nuvola esterna alle mura con quella interna al cortile

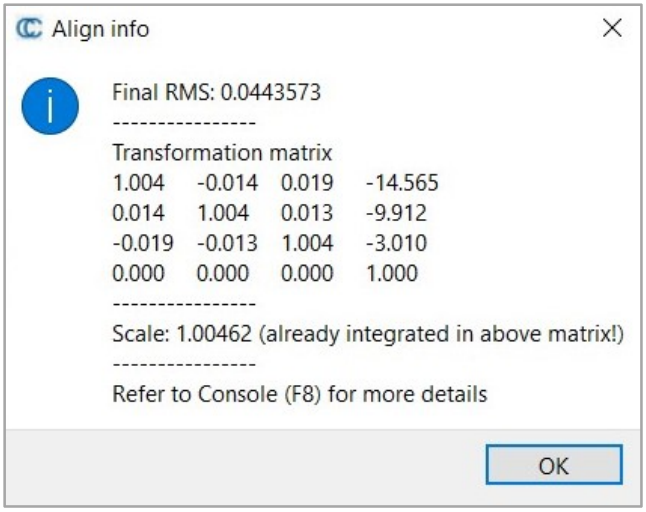

Fig. 42 Report di allineamento nuvola interna alla chiesa con le altre 2 precedentemente allineate

La fase successiva del nostro lavoro è stata quella di allineare la nuvola di punti fotogrammetrica con quella derivata dal Laser scanner. Abbiamo quindi creato un nuovo file dove abbiamo importato sia la nuvola fotogrammetrica georeferenziata sia le nuvole della scansione tramite lo Stencil 2 e abbiamo provveduto ad allinearle tenendo come riferimento quella già georeferenziata, in quanto già collocata nello spazio con le giuste coordinate spaziali raccolte con il nostro rilievo GNSS, mantenendo un valore RMS leggermente inferiore ai 3,5 cm.

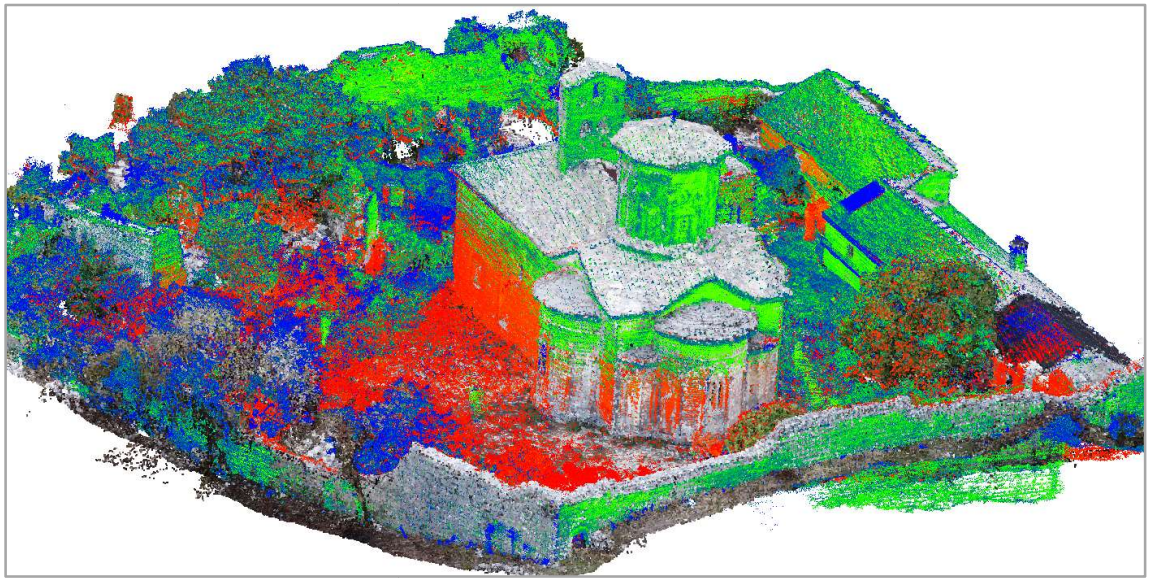

Fig. 43 Modello completo georeferenziato generato dall'allineamento delle nuvole fotogrammetriche insieme a quelle SLAM

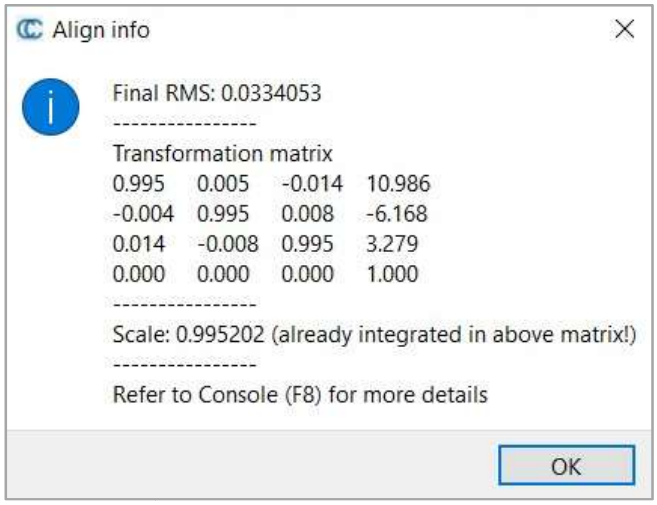

Fig. 44 Report di allineamento della nuvola fotogrammetrica con le nuvole Lidar

Da quest'ultimo modello abbiamo poi provveduto ad estrapolarne una pianta composta dai soli punti rilevati dal laser scanner ripuliti di tutto ciò che non fosse considerabile parte della struttura.

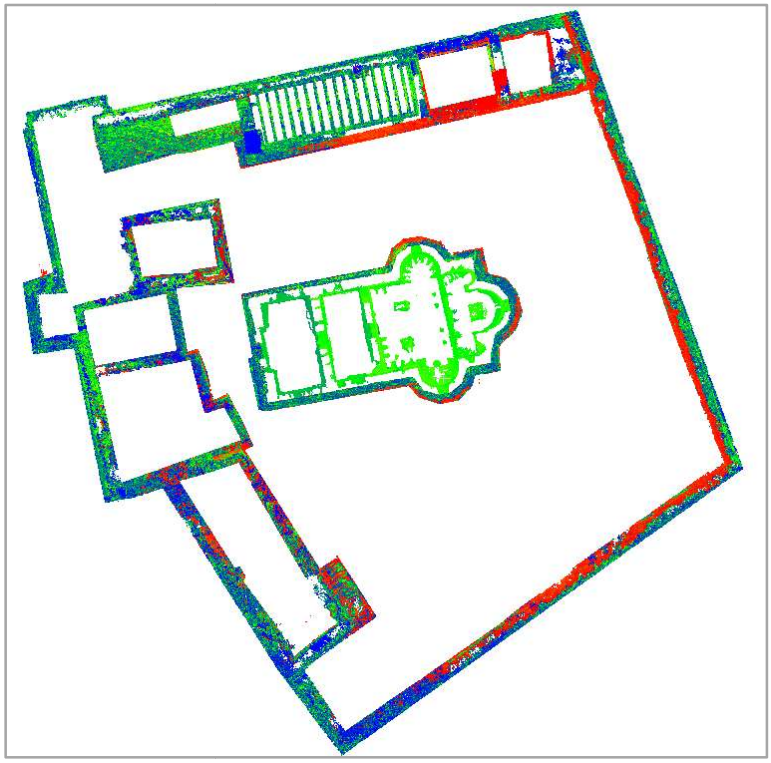

Fig. 45 Sezione orizzontale delle nuvole al fine di ricavare una pianta del caso studio

Infine abbiamo provveduto ad inserire anche le nuvole fotogrammetriche generate in precedenza del Nartece e dell'Esonartece, in modo da avere un file completo di tutte le elaborazioni effettuate dove poter ritrovare tutte le informazioni raccolte dai rilievi.

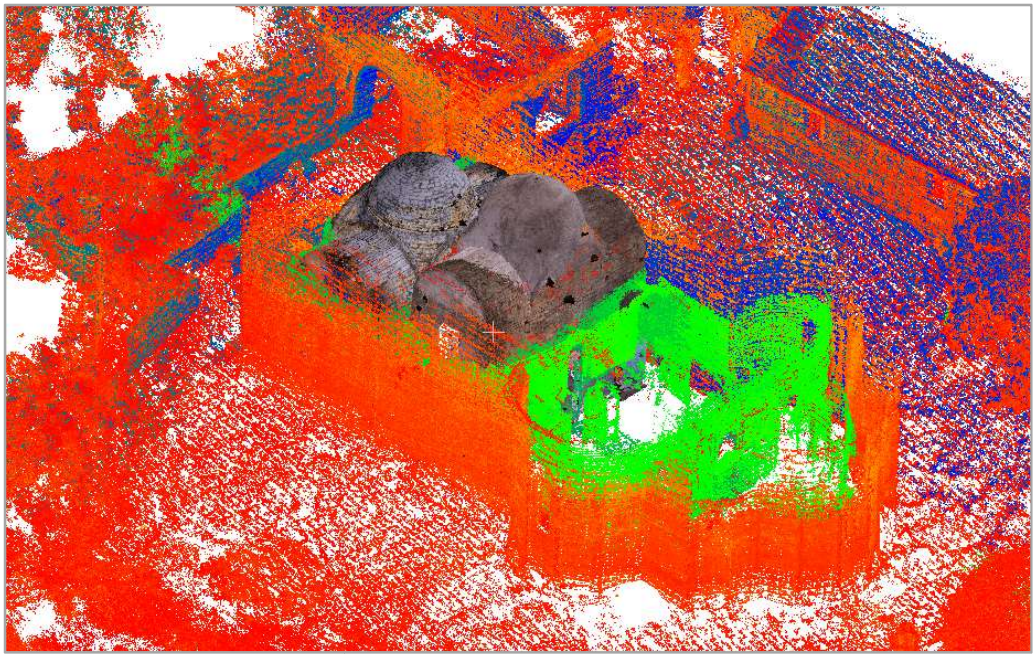

Fig. 46 Modello completo con nuvola aerofotogrammetria spenta e inserimento di Nartece ed Esonartece

RISULTATI

A questo punto del lavoro le nostre elaborazioni sono state integrate con quelle del CNR con cui abbiamo collaborato per tutto il progetto, sia nella fase di raccolta dei dati che in quella di restituzione grafica. Il nostro modello aerofotogrammetrico da drone è stato utilizzato come base per collocare con precisione i rilievi fotogrammetrici delle facciate effettuati tramite fotocamera in modo da avere una maggiore risoluzione del manufatto esaminato.

Fig. 47 Modello aerofotogrammetrico da drone con applicate le facciate generate dal rilievo fotogrammetrico con fotocamera, vista Sud-Ovest

Il grado di dettaglio che siamo riusciti ad ottenere dall'integrazione delle informazioni derivanti dalla fotogrammetria terrestre è più che soddisfacente, e ci permette di indagare ogni minimo dettaglio della struttura in esame.

Fig. 48 Modello aerofotogrammetrico da drone con applicate le facciate generate dal rilievo fotogrammetrico con fotocamera, vista Nord-Est

Oltre a questo hanno provveduto ad aggiungere anche la parte della cupola interna della chiesa che non avevamo avuto la possibilità di inserire per mancanza di immagini da poter utilizzare per crearne un modello.

Fig. 49 Soffitto della chiesa di Shën Mërisë (CNR)

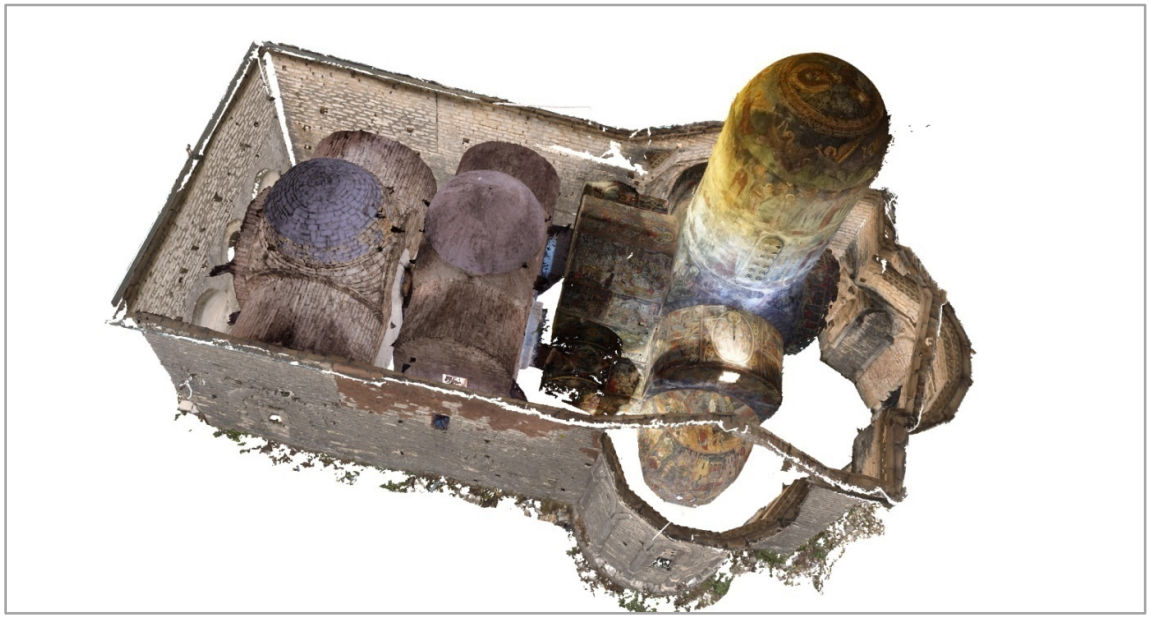

Fig. 50 Modello generato dall'integrazione degli interni e dal rilievo fotogrammetrico terrestre (CNR)

Queste integrazioni hanno portato ad avere un modello estremamente definito che ci da la possibilità di esaminare nel dettaglio il nostro caso studio, arrivando addirittura a poter esaminare lo stato fessurativo del monastero, e quindi poter decifrare le evoluzioni subite nel tempo dal nostro oggetto di studio senza aver bisogno di analizzarlo sul luogo.

Fig. 51 Analisi fessurativa di una parte della chiesa (CNR)

Tutto il nostro lavoro ci ha portato a conoscere nel dettaglio la struttura nel suo stato di fatto, permettendoci di analizzare le fessurazioni già presenti e le vulnerabilità in atto nel manufatto. Questo ci da la possibilità di progettare interventi di recupero e manutenzione comprensivi di calcoli metrici e quindi di costi al fine di riportare ad uno stato di sicurezza il manufatto senza dover per forza tornare sul luogo di ubicazione del nostro caso studio.

L'ultimo passaggio effettuato per completare il nostro database di informazioni sul monastero Shën Mërisë è stato quello di creare un modello BIM (Building Information Modeling) in grado di fornirci informazioni sul sistema costruttivo della chiesa integrato con informazioni prestazionali e funzionali oltre ai dettagli metrici di ogni sua parte. Questo modello ci da sia la possibilità di avere quindi informazioni sull'intero ciclo di vita del monastero, dal progetto ai tempi nostri, sia quella di progettare le future evoluzioni o programmare un'eventuale demolizione.

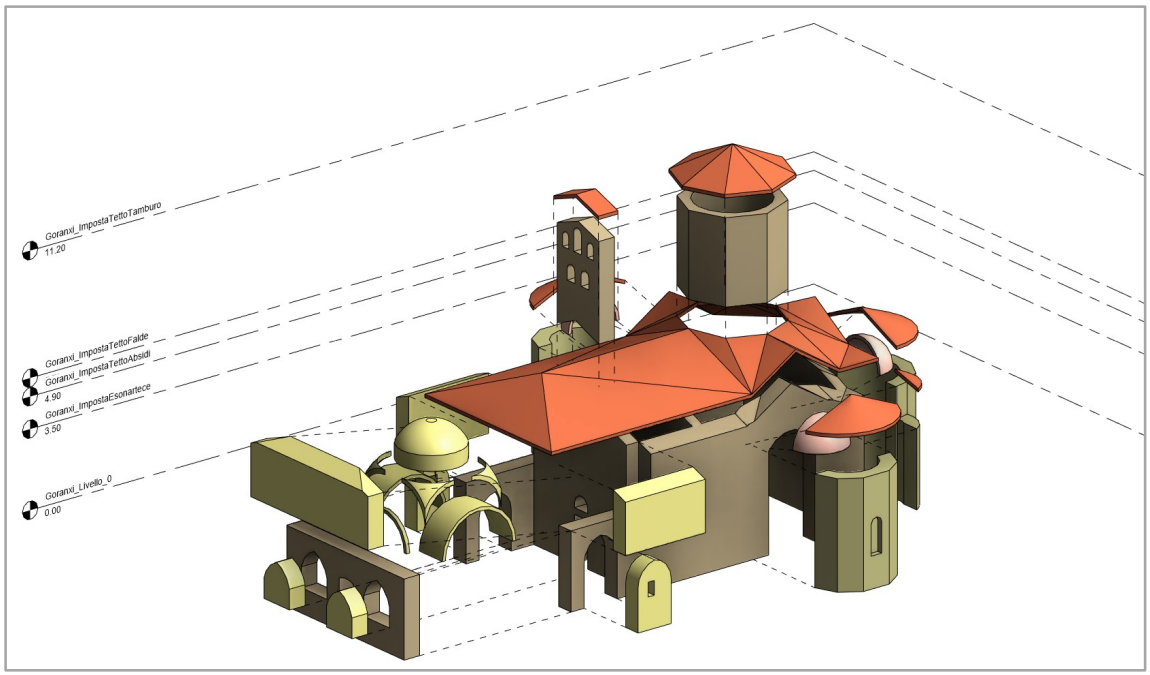

Fig. 52 Modello BIM esploso della chiesa Shën Mërisë con dettagli di quota (CNR)

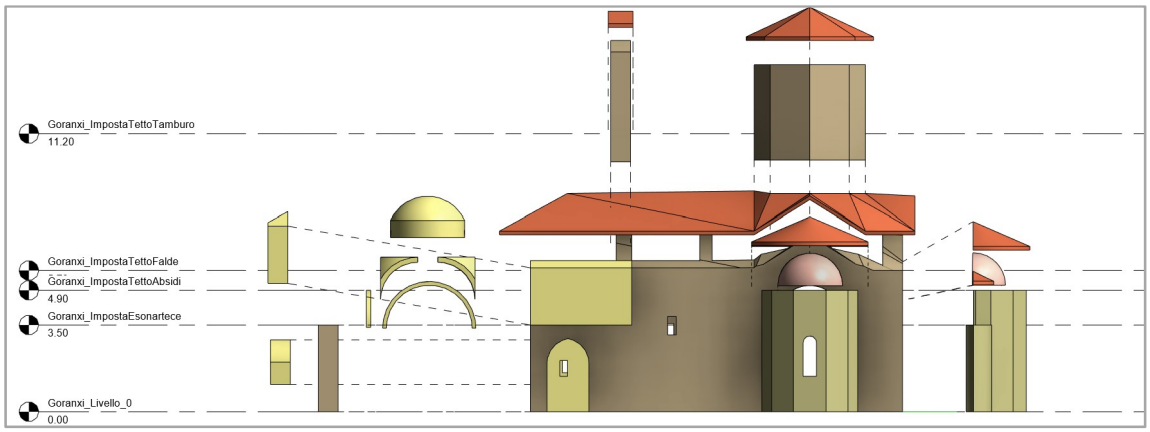

Fig. 53 Modello BIM esploso della chiesa Shën Mërisë vista frontale (CNR)

Dal modello BIM possiamo notare lo studio dell'evoluzione nel tempo del Monastero da noi analizzato. Con un grigio scuro sono infatti indicati i paramenti murari originali della prima costruzione che non hanno subito modifiche nel tempo, mentre sono indicati con una colorazione olivastra gli absidi, a indicare un intervento successivo alla prima costruzione del monastero. In beige sono invece evidenziati i paramenti murari superiori all'esonartece, la sua cupola ed i riempimenti murari applicati a quelle che una volta erano finestre e porte di ingresso alla chiesa. Si ipotizza infatti che una volta non esistesse l'esonartece, ma che sia stato inserito solo successivamente dove una volta si trovava solo un portico d'ingresso al nartece.

CONCLUSIONI

Nel corso della presente tesi sono state utilizzate tecniche di rilievo differenti volte alla generazione di un modello unico, fedele, realistico e metricamente corretto attraverso l'esplorazione di tecniche image-based e frame-based impiegate nel rilievo di un complesso patrimonio religioso e storico come quello del monastero di Santa Maria a Goranxi.

L'integrazione di piu rilievi derivanti da diverse sorgenti ci ha permesso di generare un modello del nostro caso studio estremamente accurato per consentirne un'analisi approfondita sia dello stato di fatto sia delle evoluzioni subite nel tempo sia per pianificare un'eventuale intervento di manutenzione ordinaria o straordinaria. Il modello ottenuto può infatti essere utilizzato per un'analisi strutturale o per una mappatura dei degradi e delle fessurazioni o solo per monitorare il ciclo di vita dell'edificio, permettendo all'utilizzatore di implementarlo con nuovi dati ed elaborati utili al fine di tenere aggiornato lo stato di fatto del caso studio.

Sono apparsi evidenti i limiti e le potenzialità di ognuna delle tecniche di rilievo utilizzate.

La fotogrammetria terrestre ci ha dato la possibilità di creare una nuvola di punti accurata e precisa, con un'altissima definizione e una facilità e velocità di acquisizione che permette a tutti il suo utilizzo. I limiti di questa tecnica sono quelli fisici, che ci impediscono di arrivare a catturare immagini delle coperture e quelli della luminosità, in quanto le immagini utilizzate dai programmi di elaborazione dovrebbero essere scattate senza l'ausilio del flash.

La fotogrammetria UAV invece ha contribuito abbondantemente alla generazione di un modello completo, arrivando a catturare immagini dove altrimenti non saremmo mai riusciti ad arrivare solo con l'ausilio della fotogrammetria terrestre. Rispetto alla fotogrammetria terrestre abbiamo sicuramente, almeno nel nostro caso, una perdita di definizione, ma il suo limite più grande si è mostrato essere la dipendenza dagli agenti atmosferici e la necessità di un operatore formato all'utilizzo del drone. È stato infatti impossibile effettuare il rilievo aerofotogrammetrico in un giorno ventoso e nebbioso a causa della forza esercitata dal vento sul drone e della scarsa visibilità.

La tecnologia SLAM si è dimostrata una validissima alleata nel rilievo del nostro caso studio, permettendoci di raccogliere informazioni dettagliate dell'edificio senza subire l'influenza dei fattori atmosferici ne della carenza in alcuni punti di luminosità. La strumentazione SLAM ha infatti raccolto informazioni molto precise soprattutto durante la fase di rilievo esterno

restituendoci una nuvola completa e fedele all'oggetto del nostro studio. I suoi limiti li abbiamo incontrati invece durante l'acquisizione degli interni dove la perdita dell'orientamento, causata dal passaggio in spazi stretti che impedivano la creazione di una traiettoria ideale per lo strumento, ha fatto si che le nuvole raccolte risultassero in alcuni casi completamente distorte.

L'integrazione delle tre differenti tecniche di rilievo con il rilievo GNSS, che ha fatto in modo di rendere realistico il modello creato, georeferenziandolo nelle sue coordinate reali e quindi attribuendo una corrispondenza univoca tra le dimensioni del nostro oggetto di studio e il modello, ci ha permesso di raggiungere il nostro obiettivo; generare un modello realistico , metricamente corretto e fruibile da chiunque al fine di ispezionare o studiare il monastero in questione. Questo passaggio è stato possibile grazie all'utilizzo di 2 software per la generazione ed elaborazione delle nuvole di punti: Metashape e CloudCompare.

Il software Agisoft Metashape implementa gli algoritmi della *structure from motion*, tecnica di range imaging della computer vision che ci ha permesso di creare una nuvola densa di punti dai rilievi fotogrammetrici. Questo programma si è rivelato molto utile e intuitivo da utilizzare per un'elaborazione di base, ma necessita di una formazione specifica dell'utente utilizzatore al fine di sfruttare a pieno le sue potenzialità oltre a richiedere tempi di elaborazione abbastanza lunghi.

CloudCompare è un software open source utile all'elaborazione delle nuvole di punti che ci ha permesso di ripulire le varie nuvole ottenute dai diversi rilievi e unirle in un unico modello. Questo software, per quanto risulta essere leggermente meno intuitivo del precedente, ci ha permesso di modificare ed elaborare le nostre nuvole di punti sotto ogni aspetto con la conseguenza però di risultare più complicato da utilizzare per un'utente non esperto. Per questo programma infatti l'unico limite sottolineabile è la necessità di un utilizzatore specificatamente formato per riuscire ad avere una restituzione il più fedele e realistica possibile del modello realizzato.

Il contributo di modelli 3D derivanti dall'integrazione delle più nuove tecniche geomatiche ci permette di costruire una banca dati solida e ricca di informazioni metriche e descrittive utili al fine di migliorare e supportare l'analisi dei casi studio analizzati contribuendo ad una corretta valutazione delle vulnerabilità dell' oggetto in esame. Le tecniche di rilievo utilizzate, dalla fotogrammetria terrestre, a quella UAV, al rilievo per mezzo di un Mobile Mapping

System si sono rivelati molto efficaci. L'unione tra facilità di utilizzo, compattezza e manovrabilità di questi sistemi rendono la fase di acquisizione delle informazioni semplice e veloce oltre che restituirci un risultato preciso e completo di tutte le informazioni necessarie per un'accurata analisi delle vulnerabilità e dei possibili meccanismi in atto del caso studio in esame, senza rischiare di compromettere situazioni che potrebbero essere precarie.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Agisoft. (s.d.). Tratto da www.agisoft.com

Bertocci S., B. M. (2012). *Manuale di Rilievo Architettonico e Urbano.* Novara: De Agostini Scuola Spa.

Cannarozzo R., C. L. (2012). *Misure, rilievo, progetto.* Bologna: Zanichelli Spa.

Canon. (s.d.). Tratto da https://www.canon.it/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_750d/specifications.html

Chiabrando F., L. A. (2017). *Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicle): un'opportunità per il rilievo 3D multiscala.* Trieste: EUT Edizioni Università di Trieste.

DJI. (s.d.). Tratto da www. dji. com/it/mavic-mini/specs

Galetto R., S. A. (1998). *Lezioni di Topografia.* Pavia: CUSL.

Gomarasca M., A. (2004). *Elementi di Geomatica.* Milano: Associazione Italiana di Rilevamento.

Guerra F. (s.d.). *Utilizzo del drone per rilievi di piccole e medie dimensioni.* Tratto da www.dronebase.it/wp-content/uploads/2016/04/Guida-rilievo-con-drone.pdf

Hartley R., Z. A. (2004). *Multiple viewgeometry in computer vision.* Cambridge university Press.

Heok T., K. D. (2004). *A review of level of detail.*

Kaarta. (s.d.). Tratto da https://www. kaarta. com/products/stencil-2-for-rapid-long-range-mobile-mapping/#Specs

Kraus K. (1994). *Fotogrammetria, Vol. 1-Teoria e Applicazioni.* Torino: LibreriaUniversitaria Levrotto& Bella Editrice.

Malinverni E. S., D. S. (2021). *Applicazione e validazione nell'uso di un mobile 3D scanLiDAR.*

Spanò A., T. (2016). *Dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D".*

Topcon. (s.d.). Tratto da www.topconpositioning.com/it/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-hr#panel-product-info

Topcon. (s.d.). *topconpositioning*. Tratto da www.topconpositioning.com/it/gnss-and-network-solutions/integrated-gnss-receivers/hiper-hr#panel-product-info