

PROBLEMATICHE E SOLUZIONI NEL RILIEVO RAPIDO E NELLA RESTITUZIONE FOTOGRAMMETRICA SPEDITIVA DI BENI CULTURALI IN CONTESTI AMBIENTALI COMPLESSI. L'ESEMPIO DEL CASTELLO MANFREDONICO DI MUSSOMELI

ISSUES AND SOLUTIONS ON QUICK SURVEY AND FAST PHOTOGRAMMETRIC RESTITUTION OF CH IN COMPLEX NATURAL ENVIRONMENTS. THE EXAMPLE OF THE MANFREDONIC CASTLE OF MUSSOMELI

A. Scianna ^a, M. La Guardia ^b

a ICAR-CNR (Istituto di Calcolo e Reti ad Alte prestazioni – Consiglio Nazionale delle Ricerche) GISLab c/o DICAM, Università di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo, Italy
andrea.scianna@cnr.it;

b DIID, at GISLab c/o D'Arch, Scuola Politecnica dell'Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Edificio 8, 90128 Palermo, Italy
marcellolaguardia87@libero.it

PAROLE CHIAVE: Rilievo, restituzione fotogrammetrica, tecnologie UAV, Beni Culturali 3D

KEY WORDS: Survey, photogrammetric restitution, UAV technologies, 3D CH models

Questo articolo è la traduzione e il sunto della versione sottomessa per uno SPECIAL ISSUE di APPLIED GEOMATICS collegata al convegno SIFET 2017.

RIASSUNTO

La più recente innovazione nel campo della fotogrammetria digitale ha portato a cambiamenti sostanziali rispetto alle metodologie di rilievo tradizionali. Queste tecnologie, affiancate allo sviluppo di sistemi di posizionamento satellitare GNSS sempre più accurati, hanno permesso di ottenere livelli di precisione sempre più elevati, soprattutto quando si opera in condizioni ottimali. Molto spesso, le condizioni operative reali durante l'esecuzione di un rilievo presentano delle complicazioni, in relazione alle condizioni atmosferiche, alla morfologia del terreno, al tempo ed alle risorse disponibili ed alla complessità dell'oggetto da rilevare, fattori tutti che contribuiscono a ridurre la qualità dei risultati attesi. Si ritiene di interesse, pertanto, illustrare il rilievo di un complesso monumentale molto esteso e la successiva restituzione tridimensionale realizzati per finalità di valorizzazione del bene, attività condotte in un tempo molto limitato, con esigue risorse umane e in condizioni di complessità operativa. Oggetto di indagine è stato il Castello Manfredonico di Mussomeli, un'imponente struttura medievale posizionata su un masso roccioso che si erge a strapiombo sulle colline circostanti. Il rilievo del castello, inespugnato nel corso dei secoli grazie alla sua posizione, ha comportato difficoltà esecutive dovute alla irraggiungibilità di alcune molte parti e più in generale alla complessità morfologica dell'area circostante, all'elevato dislivello tra le parti, alle condizioni atmosferiche generali e microclimatiche nell'intorno ristretto – come la presenza di forti correnti d'aria e vortici in prossimità delle pareti del masso di roccia – tutti aspetti che hanno condizionato il risultato finale. Il livello di precisione ottenuto è stato comunque sufficiente per garantire la ricostruzione geometrica di un modello 3D, ed ha permesso di migliorare la conoscenza del bene sotto l'aspetto geometrico permettendo l'ulteriore sviluppo di attività per valorizzazione in modalità virtuale. Il lavoro è stato sviluppato all'interno del Progetto Europeo PON NEPTIS, finalizzato alla valorizzazione del patrimonio culturale attraverso l'utilizzo e la sperimentazione di nuove tecnologie informatiche.

ABSTRACT

The most recent innovation on digital photogrammetry has led to substantial changes compared to traditional survey methodologies. These technologies, alongside the development of increasingly accurate GNSS satellite positioning systems, have been able to achieve higher levels of precision, at a reduced cost, specially working in perfect conditions. Indeed, real working conditions during survey operations led often troubles, due to weather, morphology of the terrain, time, resources available and the complexity of the object to survey; all these factors contributed to the reduction of the quality of expected results. Therefore, it's considered object of interest to illustrate the survey of a very large monumental complex and the next 3D restitution, developed for the valorization of the good, timeless activities carried out with few human resources and complex working conditions. The object of the survey has been the Manfredonico Castle of Mussomeli, a large medieval structure built on a massive large rock that rises overhanging the surrounding hills. The survey of the castle, unconquered over the centuries thanks to the position, has been characterized by executive difficulties caused by the presence of inaccessible environments and, generally, the morphological complexity of the surrounding area, high difference in elevation between the parts, general atmospheric and microclimatic conditions in the restricted area - as the presence of strong currents of air and vortices near the walls of the rock - , all aspects that have affected the final result. The level of precision obtained was sufficient to guarantee the geometric reconstruction of a 3D model, allowing to improve the knowledge of the good under the geometric aspect for the further development of activities for the virtual valorization. The work has been developed within the PON NEPTIS European Project, aimed at enhancing the CH (Cultural Heritage) through the use and experimentation of new information technologies.

1. INTRODUZIONE

Le tecniche e tecnologie della topografia e della fotogrammetria sono state da sempre utilizzate per il rilievo dei siti archeologici e degli edifici storici. Infatti, la restituzione di siti e manufatti, a partire da un rilievo topografico, è sempre stato un elemento fondamentale per la conoscenza, la protezione, la tutela, e la loro conservazione. I contesti naturali in cui si trovano i beni archeologici sono, spesso, luoghi di difficile accessibilità, dove la natura ha preso il sopravvento, o la particolare posizione del manufatto non permette un accesso diretto. Per questo motivo l'utilizzo dei tradizionali strumenti topografici - come tacheometri e teodoliti dapprima, distanziometri e stazioni totali successivamente - in questi ambienti, ha sempre messo a dura prova i topografi richiedendo loro l'adozione di particolari accorgimenti e il possesso di una notevole esperienza operativa. Alle finalità di conservazione e tutela dei beni, più di recente, si è aggiunta l'importante finalità della valorizzazione, ritenendo che ogni bene culturale possa essere volano di sviluppo turistico e quindi economico del territorio.

La valorizzazione dei Beni Culturali (BB.CC.) può essere posta in essere in modi diversi, non ultimo tramite la messa in rete di modelli tridimensionali navigabili, esplorabili ed interrogabili. In tal senso grande valore aggiunto è stato dato dalle nuove tecnologie di rilievo e restituzione, dapprima tramite l'utilizzo di laser scanner, quindi tramite la restituzione fotogrammetrica digitale basata su algoritmi di computer vision; quest'ultima permette la ricostruzione tridimensionalmente di ambienti interni o esterni utilizzando immagini multiple scattate da varie angolazioni.

Le tecnologie a servizio della restituzione fotogrammetrica digitale, infatti, risultano essere molto più economiche di quelle topografiche tradizionali che si avvalgono dell'utilizzo di laser-scanner o stazione totale (McCarthy 2014). Inoltre, ormai, i livelli di accuratezza in fase di restituzione sono molto elevati. Tutte queste caratteristiche hanno reso le nuove tecniche fotogrammetriche molto utili anche nel campo dei Beni Culturali (Salonia et al. 2009).

Negli ultimi anni, inoltre, lo sviluppo di strumentazione low cost per il rilievo aereo - UAV (Unmanned Aerial Vehicle) - ha contribuito a dare un fondamentale valore aggiunto alla fotogrammetria. Inizialmente utilizzate per scopi militari, queste tecnologie hanno permesso di ottenere, con l'ausilio di ricevitori GNSS incorporati e camere digitali, strumentazioni low-cost con un alto livello di precisione raggiungibile (Remondino et al. 2011). La diffusione di strumentazione UAV per il rilievo a corta distanza (close-range) (Barazzetti et al. 2011, Fraser 2015, Heno et al. 2012) ha dato la possibilità di ottenere con relativa facilità riprese aeree di siti archeologici, aprendo le porte a nuove applicazioni nel campo dell'archeologia (Siebert and Teizer 2014) e, più in generale, nel campo dei beni culturali (Murtiyoso and Grussenmeyer 2017, Murtiyoso et al. 2016, Murtiyoso et al. 2017). Ad esempio, durante gli scavi archeologici l'utilizzo di strumentazione UAV è diventata una valida alternativa al rilievo laser-scanner ai fini di monitorare giorno per giorno le nuove aree archeologiche venute alla luce (Rinaudo et al. 2012). Inoltre, l'utilizzo di riprese aeree ha permesso di raggiungere e rilevare luoghi altrimenti irraggiungibili, e non rilevabili utilizzando gli strumenti topografici terrestri (Smith et al. 2014) più tradizionali. Le riprese tramite UAV devono essere integrate da una campagna di rilievo GNSS di punti di controllo (GCPs), in maniera da georiferire correttamente il modello in fase di restituzione. Tuttavia, l'utilizzo di una rete di punti GNSS non è sempre realizzabile a causa della scarsa qualità del segnale (Masiero et al. 2015).

Nel caso del Castello Manfredonico di Mussomeli, per limitazioni temporali imposte dai gestori, è stato necessario rilevare il manufatto in tempi molto brevi e restituire un modello tridimensionale del bene e del suo contesto naturale in tempi limitati, connessi con lo sviluppo del più ampio progetto di valorizzazione.



Figura 1. Il castello Manfredonico di Mussomeli.

Il modello è stato ottenuto da una ricostruzione tridimensionale fotogrammetrica degli ambienti esterni ed interni, basata su immagini multiple. Tale ricostruzione, pur non potendo garantire precisioni centimetriche, a causa dei tempi ristretti a disposizione e due sole unità di personale e del contesto ambientale, rappresenta comunque un ottimo modello utilizzabile per una fruizione virtuale turistica del bene (Snaveley et al. 2006).

2. LE ANALISI PRELIMINARI NEL SITO DEL CASTELLO

Per qualsiasi rilievo da affrontare, la scelta della strumentazione topografica adeguata è strettamente rapportata alle caratteristiche del sito archeologico da rilevare.



Figura 2. Il versante nord del castello.

Il Castello Manfredonico di Mussomeli, eretto nel 1374 su commissione di Manfredi Chiamonte, è un classico esempio di complesso monumentale fortemente relazionato con l'ambiente circostante. Infatti, il manufatto è stato costruito su

una grande massa rocciosa che si staglia sulle colline circostanti.

La struttura edilizia è incastrata nel masso roccioso di natura calcarea a diversi livelli e sulla sommità sono insediati gli edifici principali e di rappresentanza del castello. L'intero complesso è stato progettato in funzione delle inclinazioni della roccia e del suo andamento.

La parete rocciosa, infatti, in più punti sporge all'interno degli ambienti, diventando parte integrante della struttura del castello. Il masso di roccia si estende su una superficie di 250x150 metri e la sommità del castello si eleva di circa 72 metri sul piazzale di accesso.



Figura 3. La salita lungo il versante nord.

I lati ovest, sud e sud-est del masso roccioso sono inaccessibili, poiché le relative pareti si presentano a strapiombo sul terreno circostante. L'unica salita, percorribile solo a piedi, per giungere in cima si trova in corrispondenza del lato nord, dove il pendio meno inclinato ha permesso la costruzione delle mura difensive e del percorso in salita, intagliato nella roccia, che porta agli ambienti principali.

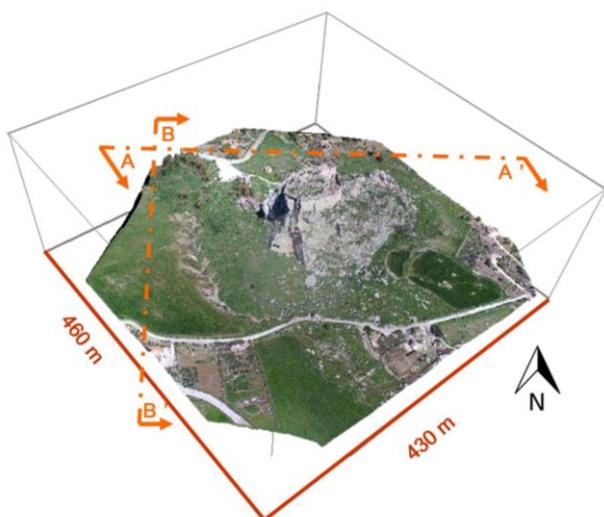


Figura 4. L'area di rilievo con le misure relative alla sua estensione e i piani di sezione delle viste nord (A-A') e ovest (B-B').

Le condizioni climatiche sono caratterizzate, in condizioni normali, da un vento variabile dai 6 ai 15 m/s, dovuto probabilmente alla mancanza di rilievi montuosi nell'area circostante. In prossimità delle pareti sono presenti correnti molto più forti e vortici con velocità doppie o triple di quelle

normali che non permettono un volo ravvicinato con gli UAV. Tutte queste caratteristiche rendono il rilievo del Castello di Mussomeli un'ottima occasione per la sperimentazione delle nuove tecnologie per l'acquisizione e l'elaborazione fotogrammetrica in un ambiente che può essere considerato impervio e difficile.

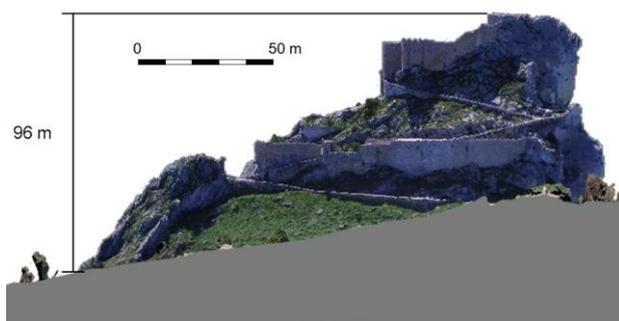


Figure 5. Vista nord (A-A') del castello, con profili del terreno e dislivelli relativi alla sommità della roccia.

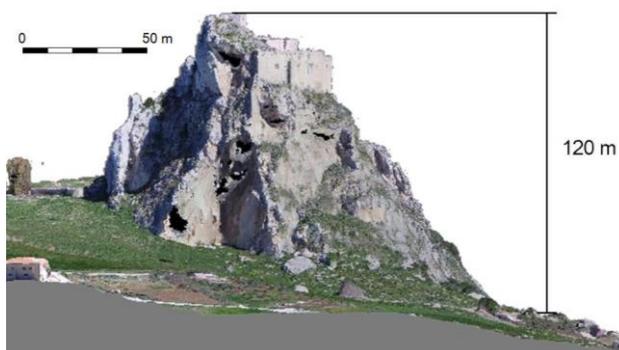


Figure 6. Vista ovest (B-B') del castello, con profili del terreno e dislivelli relativi alla sommità della roccia.

3. IL RILIEVO

L'obiettivo principale del lavoro di rilievo e restituzione fotogrammetrica era quella di ottenere un modello 3D del castello e del suo intorno, utile per la documentazione e la valorizzazione turistica del manufatto.

A seguito delle prime indagini conoscitive, la possibilità di eseguire un rilievo da terra con metodologie tradizionali (laser scanner e stazione totale) è stata esclusa, poiché la maggior parte delle aree esterne risultava totalmente inaccessibile con la conseguente impossibilità di ottenere una restituzione completa del castello e del suo intorno. Inoltre il tempo concesso per l'esecuzione del rilievo era molto ridotto per le condizioni imposte dal gestore del castello, solo 8 ore in unica giornata. La limitazione temporale è stata un fattore determinante per la programmazione e la scelta della strumentazione. Infatti, per eseguire un rilievo topografico di precisione dell'intera area, considerando le caratteristiche del bene oggetto di studio, sarebbe servita una campagna di rilevamento di circa un mese con un numero maggiore di unità di personale. Tale limitazione è stata, tuttavia, proficua ai fini della sperimentazione, poiché che è realmente rappresentativa di una procedura di rilievo e restituzione rapida di un bene culturale complesso.

Scelta obbligata è stata, quindi, l'esecuzione di un rilievo aereo tramite UAV, integrato dal rilievo di punti di controllo a terra (GCPs) ottenuti con l'ausilio di un ricevitore satellitare GNSS nelle sole zone accessibili del castello.

La presenza di un vento costante e correnti aeree molto sostenute lungo le pareti rocciose ha obbligato a progettare un piano di volo caratterizzato da traiettorie incrociate solo al di sopra della sommità della rocca, per evitare possibili collisioni dell'Aeromobile a Pilotaggio Remoto (APR) con le pareti rocciose. La scelta del luogo adatto per il decollo e l'atterraggio dell'APR non è stata immediata, poiché serviva una superficie ampia ed allo stesso tempo vicina alla sommità della rocca, in maniera da evitare possibili inconvenienti dovuti ad errori di multipath del ricevitore GNSS dell'APR durante le operazioni di decollo e atterraggio.

Considerate, quindi, le problematiche relative al decollo e all'atterraggio del APR, con un test sulla qualità del segnale GNSS, è stata scelta come campo base la corte principale del castello.

I voli sono stati eseguiti con un APR DJI Matrice 100, e le immagini sono state scattate con una camera Zenmuse X3 da 12 MP, con una distanza focale equivalente di 20 mm.

Il piano di volo è stato programmato ad un'altezza di 70 metri sopra la quota del campo base, in maniera da rimanere l'APR in sorvolo sempre al di sopra del complesso monumentale.



Figura 7. L'APR DJI Matrice 100 utilizzato per il rilievo aereo.

Relativamente al rilievo, occorre fare una precisazione in merito alla risoluzione del terreno ottenuta dalle immagini scattate dalla camera, ovvero al GSD (Ground Sample Distance). Considerando un rilievo su una superficie quasi pianeggiante tale fattore risulterebbe praticamente costante per tutte le aree rilevate, poiché la distanza fra la camera ed il terreno non varierebbe molto. Considerando il nostro caso, invece, ovvero il rilievo di un castello situato sulla sommità di una rocca che giace su un terreno fortemente inclinato, anch'esso oggetto di rilievo, la situazione è stata di gran lunga più complessa. Infatti, vi sono 77 metri di dislivello tra la quota della sommità del castello e la quota del piazzale d'ingresso.



Figura 8. La fase di take off dell'APR nella corte principale del castello.

Nel nostro caso, quindi, volando ad una quota costante, è stato ottenuto un GSD variabile in funzione della quota altimetrica delle varie parti del complesso, raggiungendo una precisione maggiore sulla sommità della rocca che ovviamente diminuisce man mano si scende verso la base. In particolare, il GSD corrispondente al piano della corte principale, con una quota di volo di 70 m, è stato di 2,9 cm/px, mentre sul piano del piazzale d'ingresso, con una quota di volo di 120 m, è stato ottenuto un GSD di 5 cm/px. Allo stesso tempo è stato effettuato un rilievo utilizzando un ricevitore satellitare GNSS, in maniera da collimare 24 target naturali che fossero ben visibili.

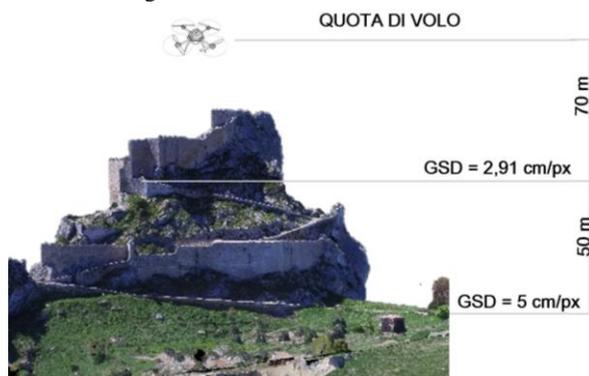


Figura 9. La variazione del GSD in funzione dell'andamento altimetrico del castello mantenendo una quota di volo costante.

Tabella 1. Dati riassuntivi dell'elaborazione delle immagini ricavate da strumentazione UAV.

Dati elaborazione camera Zenmuse X3	
Dimensioni sensore	6.17x4.55 mm
Risoluzione	4000x3000
Distanza focale	3,6 mm
Distanza focale eq.	20 mm
GSD piazzale di ingresso (a 120 m)	5 cm/px
GSD corte principale (a 70 m)	2,91 cm/px
Errore medio	0,214 m
Numero di target	24



Figura 10. Il rilievo dei target con il ricevitore GNSS.

Anche in questa fase, rispetto ad un rilievo eseguito relativo su una superficie piana ed aperta, si sono presentate delle difficoltà dovute alla particolare conformazione del sito. I punti naturali di controllo (GCPs) sono stati scelti lungo la rampa di accesso in corrispondenza del versante nord, non essendo possibile attuare una disposizione omogenea e regolare dei target.

Inoltre il rilevamento dei GCP è stato difficoltoso, sia per l'oscuramento di buona parte dei satelliti, che si trovavano nella parte di emisfero occluso dalla roccia a sud del castello, sia per l'errore di multipath dovuto all'eccessiva vicinanza della parete rocciosa al ricevitore GNSS.



Figura 11. L'ortofoto del castello, con l'indicazione dei target acquisiti.

Per la ricostruzione degli ambienti interni, invece, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico di ogni singola stanza del castello, in maniera da ottenere per ogni ambiente un numero esaustivo di immagini scattate da diverse angolazioni e con inclinazioni diverse. Durante questa fase è stata utilizzata una camera reflex Canon Eos 550D da 18 MP.

Il rilievo è stato eseguito considerando tutti gli ambienti principali del castello, compresi i sotterranei e le prigioni, in maniera da poter ricostruire esaustivamente la distribuzione del manufatto architettonico. Il rilievo è stato integrato dalla misura diretta di alcune distanze.



Figura 12. Uno degli ambienti interni più rappresentativi del castello: la sala dei baroni.

4. DALL'ACQUISIZIONE DEI DATI ALLA RESTITUZIONE DEL MODELLO

La ricostruzione tridimensionale del manufatto è stata ottenuta mediante il software Agisoft Photoscan, utilizzando la procedura denominata SFM (Structure for Motion). Questa tecnologia permette di ottenere una nuvola di punti dell'ambiente, a partire da un dataset di immagini che catturano l'oggetto da diverse angolazioni (Koutsoudis et al. 2013).

Per ottenere la nuvola di punti correttamente georiferita e scalata, sono stati importati all'interno del software i target naturali rilevati con l'ausilio del ricevitore satellitare GNSS.



Figura 13. La nuvola di punti ricostruita dell'esterno del castello.

È stata, quindi, eseguita un'opera di riconoscimento dei punti corrispondenti ai target per ogni immagine. Alla fine dell'elaborazione considerando i GCPs è stato ottenuto un errore medio pari a 0,214 m. Tale errore, se paragonato ad un rilievo topografico di precisione eseguito in condizioni ottimali, risulterebbe eccessivo; tuttavia, considerati i tempi e le risorse umane a disposizione, e le difficoltà operative dovute alla particolare conformazione del sito, la precisione raggiunta risulta soddisfacente, soprattutto ai fini dell'ottenimento un modello del complesso monumentale e del suo intorno utilizzabili per la valorizzazione e la fruizione virtuale del bene.

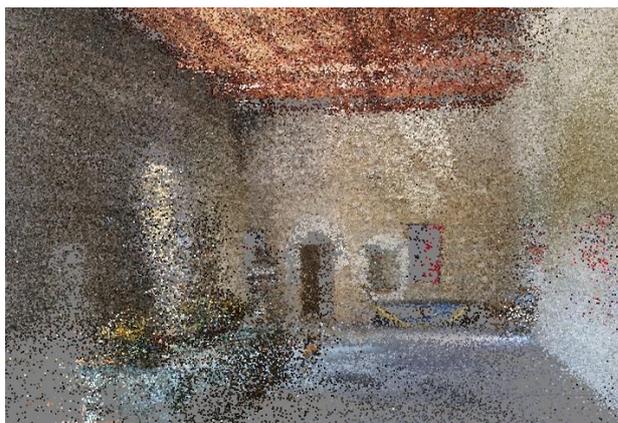


Figura 14. La nuvola di punti ricostruita della sala dei baroni.

Attraverso tale procedura è stato, quindi, generato un modello completo della superficie esterna del complesso monumentale e dell'ambiente circostante.

Per quanto riguarda, invece, gli ambienti interni, anch'essi sono stati ricostruiti attraverso un'operazione di restituzione fotogrammetrica, a partire dalle immagini di ogni ambiente scattate da diversi angoli.

5. LA COSTRUZIONE DELLA MESH E L'UNIONE DEI MODELLI 3D

L'ultima fase del procedimento necessaria per restituire il modello 3D del castello, è stata la generazione delle mesh e la loro combinazione. In particolare è stata inizialmente generata la mesh principale, riguardante la superficie esterna del complesso monumentale. Il modello 3D così ottenuto, essendo georiferito e scalato correttamente grazie all'ausilio dei GCP, ed è stato preso come riferimento per l'inserimento delle altre mesh relative agli ambienti interni.

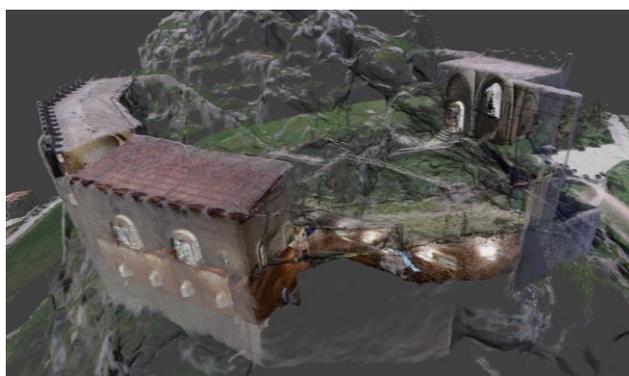


Figura 15. Il modello finale del castello, con l'involucro esterno in trasparenza ed all'interno gli altri ambienti.

Successivamente, sono state generate le mesh degli ambienti interni, opportunamente scalate sulla base delle misurazioni dirette, in modo tale da ottenere la totalità delle mesh da unire per la creazione del modello finale. Utilizzando il software Blender, ogni mesh è stata importata all'interno del modello principale, per poi essere inserita opportunamente. In questo modo, avendo come riferimento gli elementi architettonici, è stato ricostruito un modello completo del castello, comprendente le superfici esterne ed interne.

Una volta ottenuto il modello completo del castello è stato possibile estrapolare elaborati 2D e 3D degli ambienti, in maniera da poter rappresentare il complesso monumentale in maniera esaustiva e con un buon livello di precisione.

6. RISULTATI E POSSIBILITA' DI UTILIZZO

Il procedimento descritto in questo lavoro permette, quindi, di ricostruire tridimensionalmente un imponente manufatto architettonico, completo del contesto circostante, localizzato in un ambiente difficilmente accessibile, sulla base di un rilievo speditivo eseguito in poche ore, con sole 2 unità di personale e una ridotta dotazione di attrezzature. Un rilievo di questo tipo non possiede una precisione paragonabile a quella di un rilievo topografico di alta precisione, tuttavia la precisione ottenuta risulta accettabile per il perseguimento complessivo degli obiettivi del progetto di ricerca al quale l'attività presentata si collegava, ovvero la valorizzazione del bene.

Inoltre, volendo fare un paragone con gli ottimi risultati ottenuti dall'attività del 'Benchmark SIFET 2017', anche in confronto al benchmark il risultato è più che soddisfacente. Infatti,

nell'attività di benchmark utilizzando un'attrezzatura pressoché identica (stessa fotocamera), con un volo a 25 m di quota su una superficie piana estesa circa 4.500 mq, è stato ottenuto dalle immagini un errore medio di 0.062 m (Piras et al. 2017). Nel nostro caso, invece, con un volo da altezza minima di 70 m (e massima 120 m) su una superficie estremamente irregolare estesa circa 37.000 mq, l'ottenimento dall'elaborazione di un errore medio di 0,214 m è da considerare un buon risultato.

La procedura così definita permette di ottenere una ricostruzione tridimensionale di un bene culturale complesso completo del contesto circostante, eseguito in tempi e unità di personale ridottissimi. Il modello così ottenuto risulta di fondamentale importanza per la fruizione e la documentazione del castello. Tale restituzione può essere finalizzata sia alla messa in rete di modelli 3D interattivi di beni culturali, ma anche alla ricostruzione in scala di modelli per l'esplorazione tattile, da parte dei non vedenti, attraverso l'utilizzo delle tecnologie alla base del rapid prototyping.

Inoltre, recenti ricerche in questo campo hanno portato allo sviluppo di modelli interattivi di sistemi informativi 3D, in cui il Bene Culturale è navigabile ed accessibile via web (Scianna et al. 2016, Scianna and La Guardia 2017) inserito nel suo contesto naturale. Lo sviluppo e l'affinamento di queste metodologie di rilievo speditivo risulta quindi, di fondamentale importanza per la documentazione e la fruizione virtuale del patrimonio culturale.



Figura 16. GIS 3D del castello liberamente accessibile online (www.gislab.unipa.it/mussomeli).



Figura 17. Navigazione interattiva 3D negli ambienti del castello.

BIBLIOGRAFIA

Barazzetti L, Forlani G, Remondino F, Roncella R, Scaioni M (2011) Experiences and achievements in automated image sequence orientation for close-range photogrammetric projects. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, Vol. 8085, pp.1-13.

- Fraser C (2015) Advances in Close-Range Photogrammetry. *Photogrammetric week '15*, Wichmann/VDE Verlag, Belin & Offenbach, pp.257-267.
- Heno R, Egels Y, Heipke C, Grussenmeyer P (2012) An overview of close-range photogrammetry in France. *Revue Francaise de Photogrammetrie et de Teledetection*, n 200, pp. 80-87.
- Korumaz AG, Korumaz M, Tucci G, Bonora, V, Niemeier W, Riedel (2014) UAV SYSTEMS FOR DOCUMENTATION OF CULTURAL HERITAGE. *ICONARCH I-International Congress of Architecture-Innovative Approaches in Architecture and Planning*. Konya,Turkey, Volume: ISBN:978-975-448-206-5.Proceedings pp.419-430.
- Koutsoudis A, Vidmar B, Arnaoutoglou F (2013) Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact. *Journal of Archaeological Science* 40, pp.4450-4456.
- Masiero A, Fissone F, Guarneri A, Pirotti F, Vettore A (2015) UAV positioning and collision avoidance based on RSS measurements. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-1/W4, pp.219-225.
- McCarthy J (2014) Multi-image photogrammetry as a practical tool for cultural heritage survey and community engagement. *Journal of Archaeological Science* 43, pp.175-185.
- Murtiyoso A, Grussenmeyer P, (2017) Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies, *The Photogrammetric Record*, Volume 32, Issue 159, pp.206-229.
- Murtiyoso A, Grussenmeyer P, Koehl M, Freville T (2016) Acquisition and Processing Experiences of Close Range UAV Images for the 3D Modeling of Heritage Buildings. *Digital Heritage, Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, 6th International Conference, Euromed 2016, Nicosia, Cyprus, October 31-November 5, 2016, *Proceedings*,Part I, pp 420-431.
- A. Murtiyoso, P. Grussenmeyer, and T. Freville (2017) CLOSE RANGE UAV ACCURATE RECORDING AND MODELING OF ST-PIERRE-LE-JEUNE NEO-ROMANESQUE CHURCH IN STRASBOURG (FRANCE), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W3, 2017, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 1-3 March 2017, Nafplio, Greece, pp.519-526.
- Piras M, Di Pietra V, Visintini D (2017) 3D modeling of industrial heritage building using COTs system: Test, limits and performances. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-2/W6, pp. 281-288.
- Remondino F, Barazzetti L, Nex F, Scaioni M, Sarazzi D (2011) UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling - current status and future perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 38(1/C22), pp. 923-931.
- Rinaudo F, Chiabrando F, Lingua A, Spanò A (2012) Archaeological site monitoring: UAV photogrammetry can be an answer. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B5 pp. 583-588.
- Salonia P, Scolastico S, Pozzi A, Marcolongo A, Leti Messina T (2009) Multi-scale cultural heritage survey: Quick digital photogrammetric systems. *Journal of Cultural Heritage* 10S, pp.e59-e64.
- Scianna A, La Guardia M (2017) Main Features of a 3D GIS for a Monumental Complex with an Historical-Cultural Relevance. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-5/W1, pp.519-526.
- Scianna A, La Guardia M, Scaduto ML (2016) Sharing on web 3D Models of Ancient Theatres. A Methodological Workflow. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B2, pp.483-490.
- Siebert S, Teizer J. (2014) Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Journal of Archaeological Science* 41, pp.1-14.
- Smith NG, Passone L, Al-Said S, Al-Farhan M, Levy TE (2014) Drones in archaeology: Integrated data capture, processing, and dissemination in the al-ula valley, Saudi Arabia. *Near Eastern Archaeology* 77(3), pp.176-181.
- Snavely N, Seitz SM, Szeliski R (2006) Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM transactions on graphics (TOG)*, Volume 25 Issue 3, pp.835-846.