INTEGRAZIONE DI FOTOGRAMMETRIA E LASER SCANNER PER LA DOCUMENTAZIONE DI BENI CULTURALI

Francesca VOLTOLINI(*), Fabio REMONDINO(**), Marco PONTIN(***),
Stefano GIRARDI(*), Alessandro RIZZI(*), Lorenzo GONZO(*)

(*) ITC-IRST – Centro per la Ricerca Scientifica e Tecnologica, Via Sommarie 18, 38050, Povo – Trento;
e-mail: (fvoltolini, girardi, rizziale, lgonzo)@itc.it
(**) Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland; *e-mail: fabio@geod.baug.ethz.ch*
(***) CIRGEO – Università di Padova, Viale dell'Università 16, 35020, Legnaro (PD); *e-mail: cirgeo@unipd.it*

Riassunto

L'integrazione di dati derivanti da metodi di rilievo differenti è uno dei problemi aperti nel campo della modellazione tridimensionale rivolta alla conservazione e alla documentazione di beni culturali. Se da una parte la digitalizzazione di opere d'arte ad alta risoluzione è necessaria per la visualizzazione dettagliata dei modelli, dall'altra, porre l'opera in un contesto geometrico e geografico più ampio risulta necessario ai fini della comprensione della stessa. Nel caso di edifici storici o siti culturali è quindi fondamentale localizzare la struttura nell'ambito territoriale di competenza. A tale scopo si rende necessaria l'integrazione di modelli 3D realizzati con sensori attivi (laser scanner) o fotogrammetria terrestre e modelli digitali della superficie (DSM) per la ricostruzione della morfologia del territorio. Mentre molte ricerche sono in atto per l'integrazione della fotogrammetria digitale e delle tecnologie laser, meno attenzione è rivolta all'integrazione di modelli digitali del suolo con modelli ottenuti attraverso la fotogrammetria a corto raggio. Nonostante le due tecniche siano entrambe basate sull'utilizzo di immagini digitali, il procedimento per ottenere il modello finale è spesso differente, così come sono differenti, soprattutto da un punto di vista delle dimensioni finali, la risoluzione e la tipologia dei modelli ottenuti.
In questo articolo viene descritto il procedimento da noi utilizzato per la generazione automatica e l'integrazione di modelli ottenuti da foto aeree, terrestri e laser scanner, prendendo come esempio un castello medievale situato in Trentino. I modelli sono stati eseguiti in diverse fasi e con strumenti differenti; solo alla fine sono stati georeferenziati ed uniti in unico modello tridimensionale utilizzando punti rilevati con una Stazione Totale e con il sistema GPS.

Abstract

In this article we report about the integration of 3D models at different geometric resolution for the documentation and visualization of cultural heritage sites. Active sensors and images are the most widely used techniques for the modeling of complex sites and objects. The two methods complete each other as, so far, a single modeling technique able to satisfy all requirements of high geometric accuracy, portability, full automation, photo-realism and low costs as well as flexibility and efficiency is not available.
In our case study, we modeled a medieval castle near Trento, Italy. We reconstructed the main geometric features of the architectural building using terrestrial and helicopter images, the interior of a painted chapel using a triangulation-based laser scanner while the terrain model of the area around the castle was recovered from aerial images. All the recovered digital models are then combined together using common points surveyed with a total station and GPS. Problems

encountered in the integration of the different geometric resolutions models as well as in the visualization of the final product will be addressed.

1. Introduzione

L'utilizzo della modellazione tridimensionale rivolta alla conservazione dei beni culturali sta ricoprendo un ruolo sempre più importante in questi ultimi anni. Nella ricostruzione tridimensionale di oggetti complessi quali castelli medievali o siti culturali, nasce l'esigenza da un lato di avere un elevato grado di dettaglio, dall'altro di avere un modello abbastanza "leggero" che possa consentirne la visualizzazione interattiva. Questo motivo, unito alla complessità delle strutture da modellare, richiede l'utilizzo di diverse tecniche che vanno dalla fotogrammetria (aerea o terrestre) a sistemi di rilevamento a scansione basati sul principio della triangolazione o del tempo di volo. Al giorno d'oggi non esiste una tecnica di modellazione 3D in grado di soddisfare, allo stesso istante, requisiti come portabilità, flessibilità, alto dettaglio geometrico, foto-realismo e bassi costi. Quindi, per ottenere un buon modello 3D, è spesso necessaria la fusione di tecniche di modellazione differenti, in grado di generare prodotti con una differente densità di punti e una differente precisione nella misura.
La necessità di integrare dati ottenuti attraverso l'utilizzo di diverse tecniche è nata all'interno di un progetto in corso all'ITC-IRST di Trento per la documentazione e la modellazione di strutture complesse. Gli obiettivi finali di questo progetto sono, oltre alla ricostruzione tridimensionale di edifici di interesse storico-culturale, anche la visualizzazione interattiva e la creazione di filmati fotorealistici. Attraverso i modelli tridimensionali è possibile avere una documentazione dell'oggetto nel caso in cui questo venga danneggiato o perso, la visualizzazione da differenti punti di vista e l'interazione con l'opera d'arte senza rischio di danneggiamento oltre, ovviamente, al turismo virtuale. A questi scopi è necessario creare modelli virtuali con un elevato grado di dettaglio, che siano fotorealistici ed abbiano un'elevata accuratezza geometrica.
Il caso di studio trattato in questo articolo riguarda la modellazione di un castello medievale e la sua integrazione con un modello digitale del territorio circostante (DSM). Il castello in analisi è Castel Valer (Figura 1), edificio medievale situato nella zona limitrofa l'abitato di Tassullo (Trento). Questo castello è un tipico esempio di architettura complessa, contenente strade e cortili molto angusti ed abbastanza problematico per una buona e corretta ricostruzione 3D. La struttura architettonica è stata modellata esternamente utilizzando immagini acquisite da un elicottero mentre l'interno è stato ricostruito utilizzando sia foto terrestri che laser scanner; infine il modello digitale del terreno circostante è stato realizzato servendosi di immagini aeree.

Figura 1. Viste aeree di Castel Valer

L'obiettivo è quello di combinare *image-based* e *range-based modeling* in modo tale da avere il giusto *trade-off* tra livello di dettaglio e dimensione del modello (Heok, Damen, 2004).

La presenza nelle vicinanze di altri castelli medievali ha indirizzato il lavoro verso la realizzazione di un DSM per poter collocare i castelli nel loro ambiente e realizzare un GIS contenente i diversi monumenti documentati.
Nei paragrafi seguenti verranno illustrate le tecniche utilizzate per la ricostruzione tridimensionale dei modelli e le procedure utilizzate per la loro integrazione.

2. Ricostruzione tridimensionale dei modelli

2.1. Il complesso architettonico del castello con metodi fotogrammetrici

Nonostante negli ultimi anni ci siano stati miglioramenti significativi nei metodi basati su immagini (*Image-based modeling*) (Remondino, El-Hakim, 2006), la complessità e la varietà delle architetture rendono difficile l'acquisizione di tutti i dettagli senza un'intensa interazione manuale.
L'esterno del castello, una loggia interna, i cortili e il ponte d'ingresso sono stati ricostruiti tramite metodi fotogrammetrici in quanto architetture formate da superfici approssimabili a primitive elementari, quali piani, cilindri, archi, etc. In particolare, per la modellazione dei muri esterni e del tetto sono state usate immagini acquisite da un elicottero. Fotografie terrestri sono state invece utilizzate per la modellazione delle parti interne (come vicoli e cortili) e di alcune aree non visibili dalle fotografie aeree o che richiedono un più alto livello di dettaglio.
A causa della complessità interna del castello è stato difficile trovare un adeguato numero di postazioni dalle quali acquisire le immagini. In merito, diversi lavori di ricerca sono stati effettuati (El-Hakim et al., 2003a; Voltolini et al., 2006).
Le immagini sono state acquisite con una macchina digitale Kodak DCS Pro SLR/n (pre-calibrata in laboratorio) il cui sensore, costruito in tecnologia CMOS, ha dimensione 36 x 24 mm ed è costituito da 13,5 Mega Pixel; la dimensione di ogni pixel è 8 µm. La lunghezza focale utilizzata è 66 mm per le fotografie aeree e 18 mm per le fotografie terrestri.
L'ipotesi di ricostruire la loggia (Figura 2.a) con tecniche laser è stata scartata a causa delle occlusioni dovute ai molti archi e alle numerose colonne. L'utilizzo del laser scanner avrebbe richiesto un elevato numero di acquisizioni e l'altezza della loggia avrebbe reso molto difficoltosa l'acquisizione di dati per la parte più alta. La loggia è infatti stretta ed alta (circa 12 m di altezza con una base di 6 x 7 m), ma ci sono molti balconi dai quali è possibile scattare fotografie su più livelli.
La stessa scelta è stata fatta per la modellazione del cortile aperto mostrato in Figura 2.b e del vicolo con balcone sovrastante mostrato in Figura 2.c.

a) *b)* *c)*

Figura 2. Fotografie della loggia, di un cortile interno e di un vicolo.

Per la restituzione delle architetture, misure manuali sono state effettuate. L'automazione per questo tipo di strutture è ancora lontana e l'interazione dell'utente è ancora richiesta per modellare correttamente e in modo preciso.

In Figura 3 sono mostrati alcuni *screenshots* dei modelli tridimensionali ottenuti, mentre in Figura 4 è mostrato il modello finale del castello.

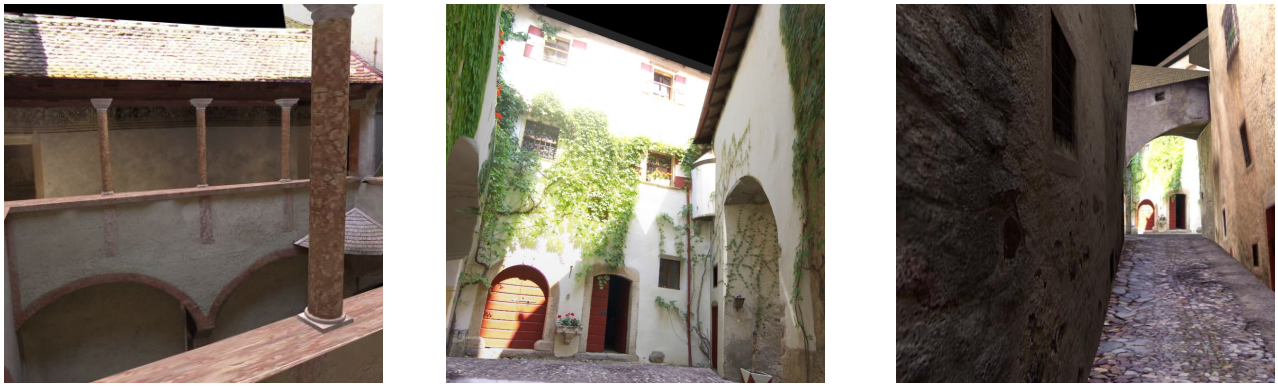

Figura 3. Modelli tridimensionali di parti interne del castello

Figura 4. Modello finale tridimensionale del castello

2.2 Laser scanner

Tra le varie stanze del castello, l'interno della cappella (Figura 5.a), è stato modellato utilizzando un laser scanner. In questo caso risultava difficile acquisire immagini con buoni angoli e con una buona sovrapposizione fra loro per creare un corretto modello tridimensionale. La stanza è stretta ed alta (da 1.5 a 4.5 metri circa) e non è possibile scattare immagini su più livelli come nel caso della loggia interna vista precedentemente. Per questo motivo, e considerando il fatto che ci sono poche occlusioni, è stato deciso di utilizzare il laser scanner per la modellazione e le immagini digitali per applicare la tessitura al modello (El-Hakim et al., 2003b).
Il sistema a scansione utilizzato per la modellazione della cappella è un Leica - HDS 3000. Dopo la registrazione delle varie scansioni, acquisite con una risoluzione media di 1 cm, immagini digitali acquisite con una Kodak DCS Pro SLR/n a una lunghezza focale di 18mm sono state utilizzate per il *texture mapping*. Il modello finale texturizzato è mostrato in Figura 5b, mentre la Figura 5c mostra una vista wireframe interna della cappella.

a) *b)* *c)*

Figura 5. Fotografia e modello tridimensionale della cappella

2.3 Modello digitale del territorio

Il prossimo passo del progetto è quello di proseguire nella modellazione di altri castelli trentini. La modellazione digitale della territorio (DSM) è quindi necessaria per collocare tutti i castelli nella loro corretta posizione geografica. Per creare il DSM sono state utilizzate due immagini aeree acquistate dalla CGR con una scala di 1:40.000, una dimensione del pixel di 21 μm e una risoluzione a terra *(foot-print)* di ca 1 m. Per orientare la coppia stereo sono stati utilizzati alcuni punti di controllo acquisiti con il GPS e inquadrati nel sistema di riferimento UTM-WGS84. Successivamente, un DSM con una risoluzione di 3 m è stato prodotto automaticamente utilizzando un *in-house software*, sviluppato per la generazione automatica di modelli digitali da foto terrestri, aeree o satellitari. Il modello digitale del terreno, texturizzato con una *ortho-foto*, è mostrato in Figura 6.

Figura 6. Modello digitale del terreno

3. Integrazione dei dati acquisiti

L'integrazione dei modelli tridimensionali è un passo fondamentale del nostro lavoro in quanto è necessario inserirli tutti nello stesso sistema di riferimento.
Viste le notevoli dimensioni della struttura, il primo passo è stato quello di determinare, con tecniche topografiche classiche, la posizione di alcuni punti di riferimento sulle pareti esterne della struttura. Tale procedura è risultata infatti essenziale sia per poter disporre di punti di appoggio per la ricostruzione fotogrammetrica, sia per il corretto allineamento dei vari modelli realizzati. Si è materializzata perciò, con una stazione totale, una poligonale chiusa attorno le mura del castello dai cui vertici sono stati rilevati alcuni punti di controllo, individuati dalle caratteristiche morfologiche della struttura e senza l'ausilio di alcun target di riconoscimento. E' stato impossibile infatti poter fissare permanentemente dei riferimenti sulla struttura, sia per un aspetto puramente visivo, sia per l'estrema difficoltà nel loro posizionamento. Da osservare che non ci si è appoggiati a nessun vertice di coordinate note e il sistema di riferimento assunto è locale. Inoltre, poiché era essenziale conoscere anche le coordinate di alcuni punti di controllo sulle pareti interne del castello, non visibili dalle precedenti stazioni, è stato necessario riferirsi alla poligonale prima calcolata per materializzare ulteriori stazioni interne al complesso architettonico e determinare così ulteriori punti di interesse. In questo modo è stato possibile, per esempio, georiferire il modello laser scanner della chiesetta interna con il modello fotogrammetrico dell'esterno del castello.
Per quanto riguarda la precisione ottenuta nella riproduzione virtuale di Castel Valer si sono confrontate le coordinate di circa 30 control points misurati con le corrispondenti derivate dal

modello 3D globale. Lo scostamento massimo è risultato essere inferiore a 15 cm con un errore quadratico medio pari a 8 cm, valore assunto quale stima della precisione del modello.
In una fase successiva, avendo a disposizione il DSM prima citato, la stessa poligonale è stata rilevata con strumentazione GPS mediante un rilievo di tipo statico con sessioni di osservazione della durata media di circa 45 minuti; i dati così acquisiti sono stati elaborati riferendosi alle stazioni permanenti GPS di Rovereto e di Bolzano, che ne hanno permesso la correzione differenziale. Sono quindi state determinate le coordinate di tali vertici nel sistema di riferimento UTM-WGS84, permettendo così la relativa georeferenziazione della fortificazione medioevale e l'inserimento del modello tridimensionale nel DSM a disposizione.

4. Conclusioni

In questo articolo sono state analizzate, attraverso la modellazione di un castello medievale, le problematiche relative alla modellazione di architetture complesse.
La modellazione basata su immagini ci permette di ottenere modelli tridimensionali a basso costo e con un numero di poligoni non eccessivamente elevato, ma richiede un'intensa interazione manuale; uno degli argomenti chiave nel campo della fotogrammetria è infatti l'automazione dell'intero processo che, nonostante negli ultimi anni abbia avuto miglioramenti significativi, è necessario incrementare ulteriormente. L'utilizzo del laser scanner ci permette invece di ottenere modelli tridimensionali dettagliati con tempi di acquisizione ridotti ma con tempi di elaborazione ancora elevati. L'unione di entrambe le tecniche è sicuramente la strada da seguire per avere un giusto compromesso fra grado di dettaglio e pesantezza del modello.
Una volta ottenuto il modello tridimensionale è possibile visualizzarlo da tutti i punti di vista, cosa non sempre fattibile nella realtà, e realizzare voli virtuali che mostrino l'intera struttura.
Il risultato di questo lavoro è determinante per gli sviluppi futuri che prevedono la modellazione di altri castelli circostanti da inserire all'interno dello stesso modello digitale del terreno e la generazione di un sistema informativo territoriale (GIS) atto alla documentazione dell'intera regione e dei suoi castelli.

5. Bibliografia

El-Hakim, S. F., Beraldin, J. A., Blais, F. (2003a), "Critical factors and configurations for practical image-based 3D modeling", Proceedings of 6th Conference Optical 3D Measurements Techniques. Zurich, Switzerland. Vol. II, pp. 159-167.

El-Hakim, S.F., Gonzo, L., Picard, M., Girardi, S., Simoni, A., Paquet, E., Viktor, H., Brenner, C. (2003b), "Visualization of highly textured surfaces", 4th Int. Symp. VAST2003, Brighton, UK, 5-7 November 2003, pp. 231-240.

Heok, T.K. and Damen, D. (2004), "A review of level of detail", IEEE Int. Conf. Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'04).

Remondino, F. and El-Hakim, S.F. (2006), "Image-based 3D modelling: a review", The Photogrammetric Record, Vol. 21(115), September 2006, pp. 269-291.

Voltolini F., Remondino F., Pontin M., Gonzo L. (2006) "Experiences and considerations in image-based modeling of complex architectures", Proc, ISPRS Symp. Com. V, Dresden, Germany. Sept. 25-27 (in press).