

Rilievi e Modellazione 3D

Fabio Remondino, Alessandro Rizzi, Giorgio Agugiaro, Belen Jimenez,
Fabio Menna, Francesco Nex, Giorgio Baratti

3D Optical Metrology, Fondazione Bruno Kessler, Trento
<remondino><rizziale><agugiaro><bjfernandez><fmenna><franex><baratti>@fbk.eu
<http://3dom.fbk.eu>

Riassunto

La generazione di modelli 3D di siti e oggetti del nostro territorio e patrimonio culturale richiede una metodologia affidabile e precisa in grado di catturare digitalmente tutti i dettagli geometrici della scena analizzata. Tecniche moderne di rilievo si basano su sensori attivi o passivi, impiegati da soli o integrandoli, al fine di sfruttarne al meglio i singoli vantaggi. Modelli digitali 3D sono alla base di innumerevoli applicazioni quali la cartografia, il monitoraggio, la pianificazione territoriale, la documentazione, il restauro digitale, il calcolo delle dispersioni termiche o del potenziale fotovoltaico dei tetti, l'animazione e visualizzazione, etc. L'articolo rivede le principali tecniche di rilievo e modellazione 3D riportando le metodologie sviluppate con diversi esempi a scala territoriale e locale.

Abstract

The generation of 3D models of sites and objects requires a methodology able to deliver reliable and precise results with all the geometric and radiometric details of the surveyed scene. Nowadays the surveying techniques employ passive or active sensors, alone or in an integrated mode in order to exploit all the advantages of each technique. Reality-based 3D models are used in many applications like mapping, monitoring, documentation, conservation, animation, planning, heat dispersion estimation, etc. The article reviews the most common surveying techniques and 3D modeling issues before presenting different examples of projects running in FBK.

Introduzione

Il rilievo digitale e la creazione di modelli tridimensionali (3D) di oggetti e scene complesse ha ricevuto negli ultimi anni molto interesse da parte della comunità scientifica e del settore commerciale. Grazie agli sviluppi nel campo della sensoristica è infatti possibile acquisire grandi quantità di dati, geo-referenziarli e derivarne informazioni 3D in maniera abbastanza semplice. Si sta assistendo sempre più a restituzioni virtuali dell'ambiente che ci circonda, con ambientazioni e visualizzazioni 3D prodotte per varie applicazioni quali la documentazione, conservazione, restauro virtuale, simulazione, didattica, animazione, cartografia, gestione territoriale (GIS), monitoraggio, ecc. Uno degli esempi più appropriati è Google Earth, che associa mappe e immagini satellitari a modelli tridimensionali di terreni, città o singoli edifici e dimostra a utenti anche non esperti le potenzialità delle geo-tecnologie e degli strumenti digitali di rilievo 3D oggi disponibili.

L'utilizzo di metodologie digitali nel settore cartografico è ormai diventato da diversi anni uno standard anche a livello produttivo. Nel campo architettonico e archeologico il rilievo digitale ha subito nell'ultimo decennio un sensibile cambiamento, dovuto principalmente alla capacità di restituire senza contatto e con grande accuratezza modelli digitali tridimensionali. Esiste una linea metodologica chiaramente definita lungo la quale negli ultimi anni l'implementazione di tecniche di fotogrammetria e laser scanner ha raggiunto i caratteri di un sistema maturo e stabile. Ciò ha determinato l'aumento di tecniche di modellazione 3D come pratiche di lavoro su edifici storici e

artefatti archeologici e la consolidazione di una metodologia del processo di creazione di modelli 3D a partire da scene reali che presenta ormai passaggi ben definiti e chiari.

L'uso di GIS per la gestione dei dati geo-spaziali è infine diventato una pratica comune anche se i nuovi sviluppi tendono ad andare nella direzione del BIM (*Building Information Modeling*).

Nei paragrafi successivi, viene riportata una breve presentazione delle tecniche di rilievo e modellazione 3D e della modalità di gestione e visualizzazione di dati geo-spaziali.

Viene poi data particolare attenzione a diversi casi di studio e progetti dell'unità di ricerca 3DOM (3D Optical Metrology) della Fondazione Bruno Kessler (FBK) di Trento.

Rilievo e modellazione 3D

Le principali tecniche *reality-based* di rilievo digitale per acquisire dati spaziali e produrre modelli 3D si possono classificare in:

1) tecniche basate su sensori passivi (metodi *image-based*) (Remondino & El-Hakim, 2006): esse sfruttano la luce presente nell'ambiente per acquisire immagini da elaborare successivamente per derivarne informazioni 3D della scena osservata. Tra queste tecniche, la fotogrammetria è quella più conosciuta ed utilizzata per rilievi cartografici, architettonici, industriali e archeologici, con la precisione e affidabilità dei risultati come obiettivo principale. Una tecnica simile è la *computer vision* che però ha come scopo primario l'automazione dell'intero processo di restituzione (2D o 3D) da immagini, riducendo quindi l'accuratezza e dei risultati ottenuti. Al momento il principale vantaggio dei sistemi passivi e delle relative tecniche di elaborazione risiede nel costo e nella trasportabilità dei sensori (soprattutto nel caso terrestre) nonché nel fatto che le immagini sono sempre reperibili in archivi storici o banche dati. L'automazione nel processo fotogrammetrico terrestre ha raggiunto livelli soddisfacenti, sia nella fase di orientamento (Barazzetti et al., 2010; Pierrot-Deseilligny & Clery, 2011) che in quella di correlazione automatica (Remondino et al., 2008; Vu et al., 2009; Furukawa and Ponce, 2010; Pierrot-Deseilligny et al., 2011). Ma sicuramente una forte esperienza è richiesta nell'acquisire e processare le immagini e questo ha portato molti utenti all'uso di strumentazione laser scanner. Le immagini possono essere acquisite da sensori montati su satelliti, aeree, droni (o più genericamente UAV) o camere digitali terrestri. Recentemente i droni hanno avuto un forte successo e sviluppo, sia nel campo archeologico che architettonico, permettendo di acquisire immagini nadirali o oblique con bassi costi e affidabilità di rilievo abbastanza elevate.

2) tecniche basate su sensori attivi (metodi *range-based*) (Vosselman & Maas, 2010): esse impiegano strumenti che emettono un segnale elettromagnetico (nel campo del visibile, infrarosso, raggi X, ecc.) che viene poi registrato dallo strumento al fine di derivarne una misura di distanza (*range*). Strumenti *range-based* sono i laser scanner (terrestri o aerei), le stazioni totali, i GNSS, i radar, ecc. Nel campo architettonico e dei beni culturali, i laser scanner (a triangolazioni o tempo di volo) e i sistemi a luce strutturata hanno riscontrato un grande successo e hanno notevolmente aumentato la facilità con la quale possono essere acquisiti i dati formali relativi a semplici oggetti o ad ampie strutture. A scala territoriale, il LiDAR (o *airborne laser scanning*) viene spesso preferito al tradizionale rilievo fotogrammetrico, in particolare per il fatto di poter penetrare e discriminare la vegetazione. I sensori LiDAR infatti sono in grado di fornire direttamente e in poco tempo grandi moli di dati 3D, restituendoli sotto forma di nuvola di punti non strutturata e densa. L'elevato numero di informazione non strutturata richiede poi lunghi tempi di editing per estrarne gli elementi geometrici più significativi della scena o crearne un modello geometrico poligonale. Inoltre i sensori attivi sono generalmente progettati per uno specifico campo di utilizzo, pertanto per lavorare in un determinato raggio d'impiego. Ma a fronte delle rapide acquisizioni di grandi quantità di dati 3D, costi, problemi di trasportabilità o problemi nel rilievo di spigoli possono spesso limitarne l'impiego in particolari missioni di lavoro.

Una metodologia di rilievo e modellazione 3D viene ideata combinando diverse tecniche, cercando di sfruttare i vantaggi e sopperire agli eventuali limiti di ciascuna singola tecnica. Infatti, al momento, non esiste una singola tecnica di rilievo portatile e flessibile, in grado di fornire, allo

stesso tempo, risultati accurati con costi contenuti e in tempi rapidi. Pertanto l'integrazione di diverse tecniche di rilievo, soprattutto per applicazioni terrestri, viene generalmente adottata per rilevare siti molto complessi e ampi (El-Hakim et al., 2007; Stamos et al., 2008; Guidi et al., 2009). La scelta della tecnica migliore o della metodologia d'integrazione dipende da molti fattori, tra cui l'esperienza, il tipo di oggetto o scena da rilevare, il materiale, lo scopo del rilievo, il dettaglio geometrico richiesto, il budget del progetto, ecc. Identificare il migliore approccio è la prima e fondamentale fase per riuscire a ottenere gli obiettivi prefissati. Spesso un rilievo 3D viene eseguito con strumentazione laser scanner perché, benché' costosa, spesso difficile da trasportare e senza un buon sistema per acquisire immagini ad alta risoluzione, non presenta grandi difficoltà nel rilievo di dati geometrici. Ma i recenti sviluppi nel campo della correlazione automatica d'immagini hanno mostrato come sia possibile restituire in 3D, con precisioni molto elevate, anche forme geometriche complesse e dettagliate partendo da dati immagini.

Geo-visualizzazione e GIS 3D

Il rapido avanzamento tecnologico nel campo del rilevamento, delle scienze informatiche e, più specificatamente, nella pubblicazione e distribuzione di contenuti digitali online sta progressivamente contribuendo a ridefinire le modalità di accesso e fruizione di modelli 3D. Grazie alle nuove tecnologie, non solo ricercatori, ma anche nuovi utenti come studenti e turisti possono usufruire di nuovi strumenti per analizzare dati territoriali o condurre analisi riguardanti discipline come la storia dell'arte, l'architettura o l'archeologia. Infatti i modelli 3D possono essere visti come potenziali 'contenitori' per diversi tipi di informazioni, avendo la possibilità arricchire il modello geometrico con dati eterogenei e condurre interrogazioni (anche via web) secondo criteri non solamente geometrici. Ciò permette di esplorare, con una nuova prospettiva, potenziali rapporti tra strutture, oggetti, artefatti, così come possono essere considerati i cambiamenti nel tempo e nello spazio. Se, in generale, strumenti e modelli bidimensionali possono essere sufficienti per determinati ambiti, analisi più complesse o più specifiche richiedono l'uso di modelli e strumenti di analisi 3D, che però non sono ancora completamente sviluppati o disponibili sul mercato.

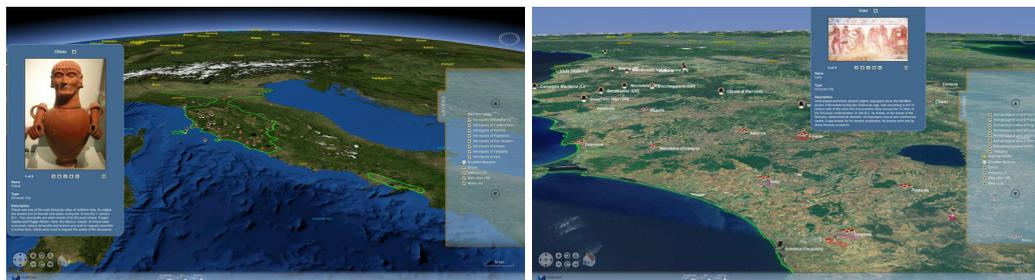


Figura 1 – Geo-browser per la visualizzazione geografica e fruizione di contenuti culturali.

Da una parte esistono potenti strumenti di visualizzazione 3D, ma le possibilità offerte in termini di interrogazione dei modelli ed accesso a dati esterni sono perlopiù scarse o del tutto assenti. Si pensi, per esempio, a Google Earth: è possibile visualizzare e cliccare su oggetti geometrici per ottenere informazioni aggiuntive, oppure è possibile attivare *layer* di dati indipendenti, ma non è tuttavia ancora possibile eseguire ricerche che permettano di evidenziare, per esempio, tutti gli edifici di una città costruiti in un determinato lasso temporale o da un determinato architetto. D'altra parte, proprio la possibilità di eseguire *query* su attributi collegati a geometrie è il campo dove trovano maggiore applicazione i GIS, i quali, al momento, restano ancora fortemente ancorati al mondo 2D o 2,5D. Nonostante esistano strumenti per visualizzare oggetti 3D, tuttavia riescono difficilmente a gestire geometrie complesse e 'pesanti' di modelli *reality-based*. Esistono ciononostante lavori di ricerca che si prefiggono di fornire soluzioni per la gestione e visualizzazione, possibilmente on-line, di dati e modelli 3D (Apollonio et al., 2010; Manfredini and Remondino, 2010; De Luca et al., 2011) ma, a oggi, non è ancora stato proposto o sviluppato un unico pacchetto software onnicomprensivo.

Esempi

Etruschi 3D

Attraverso tecniche di rilievo e modellazione 3D sono stati documentati diversi siti del patrimonio etrusco risalente al VII-IV secolo A.C. I modelli 3D sono utilizzati, oltre a scopi di conservazione digitale, preservazione e trasmissione alle generazioni future anche per finalità di analisi e studi, per creare contenuti digitali per visite virtuali o esposizioni museali e fornire un migliore accesso e comunicazione delle informazioni del patrimonio etrusco (Remondino et al., 2011a).

A partire dai dati raccolti (nuvole di punti acquisite con strumentazione laser scanner e immagini ad alta risoluzione nel campo del visibile, UV e IR) sono stati creati modelli 3D foto-realistici (Figura 2) utilizzati per (i) visualizzazione e interazione, (ii) generazione di nuove planimetrie delle tombe, (iii) analisi geometriche sulle pareti delle tombe al fine di capire l'ortogonalità o planarità dei muri, (iv) calcolo dei volumi scavati o franati, (v) studi di conservazione e restauro e (vi) esposizioni multimediali nei musei.

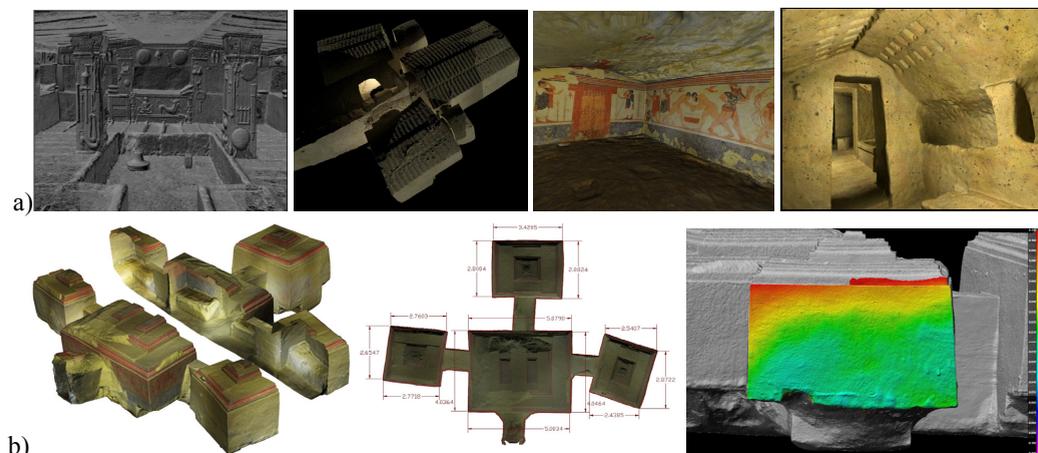


Figura 2 – Modelli 3D con e senza texture di alcune tombe etrusche rilevate con strumentazione laser scanner (a). Modello 3D esploso, planimetria e calcolo dell'ortogonalità di una parete per la Tomba della Scimmia di Chiusi (b).

A partire dalle immagini e dai modelli 3D delle tombe, sono stati anche realizzati dei tour virtuali interattivi all'interno delle necropoli (Figura 3). La soluzione, basata su immagini panoramiche e sviluppata ad hoc in vista della mostra multimediale itinerante "Etruschi in Europa", permette da una parte di poter visitare "virtualmente" luoghi altrimenti distanti o inaccessibili al pubblico per ragioni di protezione e conservazione, dall'altra di avere accesso ad informazioni aggiuntive che facilitano ed arricchiscono la fruizione dei contenuti multimediali. All'interno di ogni tour virtuale sono stati integrati panorami reali e sintetici (ottenuti dai modelli 3D). In questo modo il visitatore può agevolmente percepire lo stato attuale di conservazione delle necropoli, ma anche goderne una visione tridimensionale stereoscopica mediante l'uso di occhiali anaglifi.



Figura 3 – Esempi dal virtual tour della necropoli della Banditaccia a Cerveteri. Diversi panorami ad alta risoluzione sono collegati tra loro permettendo una coinvolgente navigazione del sito, in particolare per le aree chiuse al pubblico per motivi di conservazione. Informazioni aggiuntive (testo, immagini, video, ecc) sono visualizzabili attraverso punti di accesso vincolati.

GIS 3D in Copan

Il progetto Copan3D ha analizzato l'integrazione, gestione, visualizzazione e fruizione online di dati geo-spaziali, con particolare riferimento al settore dei beni archeologici (Agugiario et al., 2011a)

Il caso di studio è rappresentato dalla città Maya di Copan (Honduras), che per vastità e per complessità di strutture architettoniche e reperti presenti – oltre che per la varietà, eterogeneità ed abbondanza di dati raccolti ed acquisiti nel tempo – rappresenta un esempio concreto delle problematiche sopra esposte. Il progetto ha creato un prototipo per la fruizione on-line (visualizzazione ed interazione 3D) di modelli tridimensionali associati a informazioni testuali e visive. Constatata l'assenza di soluzioni software esistenti che potessero soddisfare i requisiti del progetto, si è proceduto a sviluppare un'applicazione ad hoc, con la definizione di strutture di dati adeguate, la realizzazione di molteplici livelli di dettaglio (LoD) geometrico, la scelta di piattaforme per la gestione online dei dati (database relazionali spaziali) e lo sviluppo di una piattaforma per l'interazione, consultazione e visualizzazione.

Nell'applicazione, chiamata QueryArch3D (Figure 4 e 5), i modelli geometrici sono stati organizzati in LoD successivi per permettere la gestione delle informazioni geometriche a risoluzione diversa. Modelli a bassa risoluzione sono presentati nel LoD1; LoD2 contiene, laddove esistenti, modelli a più alta risoluzione (ma solo l'esterno), mentre il LoD3 contiene anche l'interno degli edifici. Infine il LoD4, contiene modelli geometrici ad alta risoluzione prodotti con laser scanner o fotogrammetria terrestre. La scelta di quale LoD visualizzare avviene in modo automatico, in base alla distanza dell'osservatore dall'oggetto visualizzato.



Figura 4 – LoD successivi di modelli multi-risoluzione relativi ad un tempio Maya in Copan: modelli prismatici (LoD1), modelli 3D più dettagliati ma con solo gli esterni (LoD2), modelli con alcuni dettagli architettonici (LoD3) e modelli ad alta risoluzione geometrica (LoD4).

Per la fruizione dei dati, grazie al collegamento con un database esterno, l'utente può selezionare alcuni oggetti sulla base di attributi (storici, geografici o archeologici), oppure può ottenere informazioni specifiche su un determinato oggetto con un click su di esso. La quantità di informazioni ottenute, così come il livello di dettaglio visualizzato, dipendono dal LoD attivo, permettendo così una maggiore granularità nel livello di informazioni fornite. L'esempio riportato si riferisce al contesto della città Maya di Copan, ma il modello concettuale sottostante, la struttura definita per la base di dati e gli strumenti di visualizzazione ed interrogazione sono facilmente utilizzabili anche in altri contesti simili.

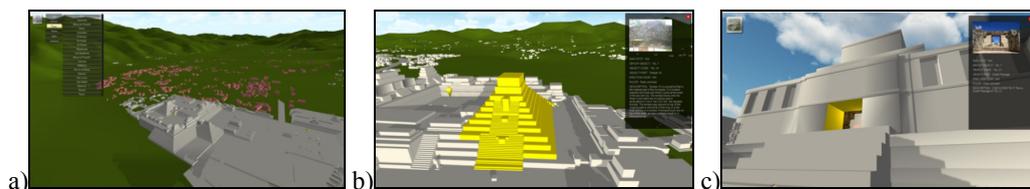


Figura 5 – Esempio di visualizzazione online e navigazione interattive di modelli 3D complessi (a). Selezione di alcuni oggetti sulla base di attributi e ricerca di informazioni specifiche su un determinato oggetto mediante clic su di esso (b, c).

Testfield Trento

L'area della città di Trento e le zone circostanti sono caratterizzate da un'ampia variabilità di altimetria e di uso del terreno: in poche centinaia di metri si può passare da aree densamente urbanizzate come quelle del centro storiche, ad aree scoscese completamente coperte di vegetazione poste a parecchie decine di metri più in quota.

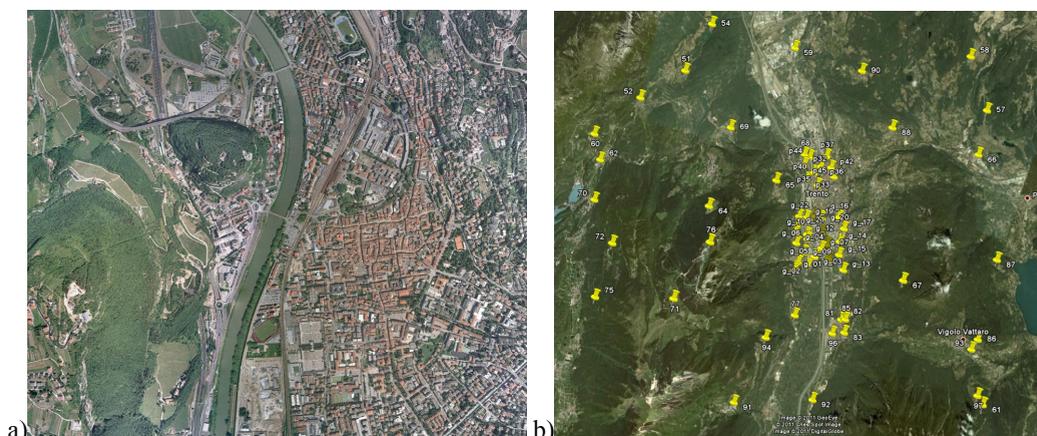


Figura 6 – Vista parziale dell'area testfield sopra Trento dove sono state raccolte immagini aeree e satellitari a risoluzione geometrica e temporale diversa (a). Rete di punti di controllo sopra il testfield (b).

Proprio per questo, tale area (Figura 6a) è sembrata idonea come area test, sulla quale validare nuovi strumenti, algoritmi e metodologie di processamento di immagini UAV, aeree e satellitari. Nel tempo sono state acquistate o ricevute dalla Provincia Autonoma e dal Comune di Trento, dati LiDAR, immagini aeree a differenti risoluzioni (geometriche e temporali) ed immagini satellitari.

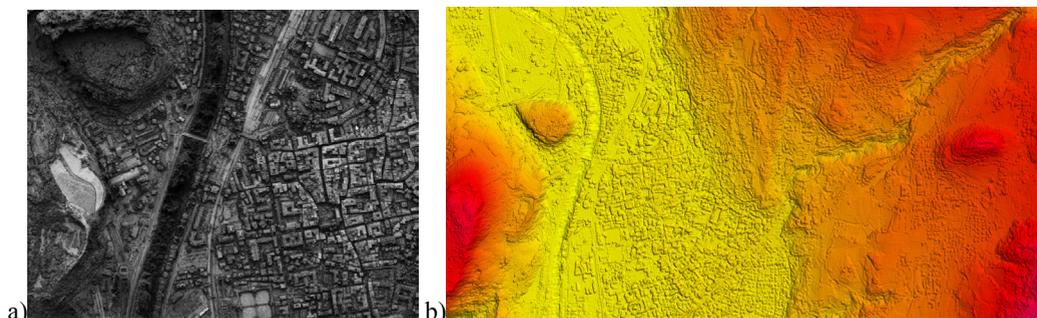


Figura 7 – DSM generati da immagini aeree (a) e da WorldView-2 (b).

La geo-referenziazione di questi dati è stata resa possibile grazie alla realizzazione di una rete di punti di appoggio che si estende su gran parte del territorio provinciale (Figura 6b).

Grazie a questi set di dati, è stato possibile iniziare progetti di ricerca sulla generazione automatica di modelli digitali (Figura 7) e sull'estrazione di *feature* di interesse (strade, edifici, vegetazione, ecc.) nonché definire metodologie di valutazione del potenziale fotovoltaico di un'area urbanizzata.

Potenziale fotovoltaico dei tetti

L'obiettivo del progetto di ricerca è la stima del potenziale fotovoltaico dei tetti di edifici, ipotizzando che tutta la superficie sia coperta da pannelli (Agugiario et al., 2011b). Esistono oggi strumenti e piattaforme che permettono la stima a scala territoriale del potenziale fotovoltaico di un determinato sito (p.e. SOLEMI, SoDa, PVGIS), ma i valori stimati di massima produzione annuale di energia sono disponibili su base raster con risoluzione molto basse (ad esempio PVGIS fornisce valori ad un 1 km di risoluzione). Esistono anche lavori che si concentrano di più sul riconoscimento, la segmentazione, la modellazione e l'analisi di tetti da nuvole di punti molto dense relative a piccole zone residenziali e che pertanto trascurano (se presente) l'orografia circostante, il cui ombreggiamento viene eventualmente inglobato in opportuni coefficienti di correzione atmosferica (p.e. il CSI, Clear Sky Index).

Si è voluto pertanto identificare e testare una metodologia "ibrida" che si ponga idealmente a metà strada tra i due approcci accennati precedentemente e che combini dati che variano dalla scala regionale a quella architettonica, al fine di considerare l'ombreggiamento dovuto sia alla morfologia del territorio che agli edifici circostanti. Come area di studio si è scelta un'area nel comune di Trento (Mattarello), che per posizione e caratteristiche orografiche ben si presta a questo tipo di analisi. Particolare attenzione è stata dedicata ai diversi risultati ottenuti nella modellazione 3D dei tetti, al fine di capire quali dati di partenza meglio si addicono in termini non solo di accuratezza, ma anche di risorse e tempi di elaborazione richiesti (computazionali ed umani). I tetti delle case sono stati ricostruiti (Figura 8) con approcci diversi (estrazione da dati vettoriali catastali, restituzione 3D automatica e manuale da immagini aeree, rilievo LiDAR) e risoluzioni geometriche diverse (1 m e 25 cm) e infine integrati all'interno del DTM della zona di studio. La metodologia di calcolo, sviluppata in ambiente Grass GIS, ha fornito, per ogni edificio e per ogni modello 3D, la stima del valore mensile medio di radiazione solare incidente (in $Wh/m^2/d$). I valori sono poi stati plottati e confrontati, in base al modello di provenienza ed alla categoria dell'edificio (residenziale o industriale). È stato pertanto possibile includere nei risultati e quantificare l'effetto dell'ombreggiamento dovuto all'orografia circostante ed è stato possibile ottenere stime a livello di singolo edificio, passando dai valori con passo di griglia di 1 km precedentemente disponibili per l'area di Trento mediante PVGIS a mappe di radiazione incidente con risoluzione di 1 m o migliore. Per l'area di studio, ad esempio, la differenza tra le stime di radiazione diretta con e senza l'inclusione dell'ombreggiamento delle montagne circostanti può arrivare fino all'8% su base annuale, con punte del 38% nei mesi invernali per alcuni edifici.

Il confronto dei risultati ottenuti con i vari modelli geometrici dei tetti ha permesso inoltre di trarre delle prime conclusioni su quali modelli usare. Per l'area di test si è visto, per esempio, che per edifici industriali, generalmente di dimensioni maggiori e dalla semplice geometria, le stime che si ottengono usando modelli prismatici a tetto piatto non si discostano sostanzialmente da quelle ottenute con modelli geometricamente più dettagliati (ma più onerosi da ottenere). Per gli edifici residenziali, invece, questa semplificazione non è più possibile, la peculiare geometria di ogni tetto incide nelle stime dei valori di radiazione incidente, per cui la sovrastima ottenuta con i modelli piani dei tetti da dati catastali non può essere trascurata rispetto ai valori ottenuti utilizzando modelli di tetti da dati LiDAR o fotogrammetria. I risultati, che verranno estesi a tutta la città di Trento, sono un'utile informazione al fine della gestione e della pianificazione delle risorse (umane e computazionali) da investire nel progetto.

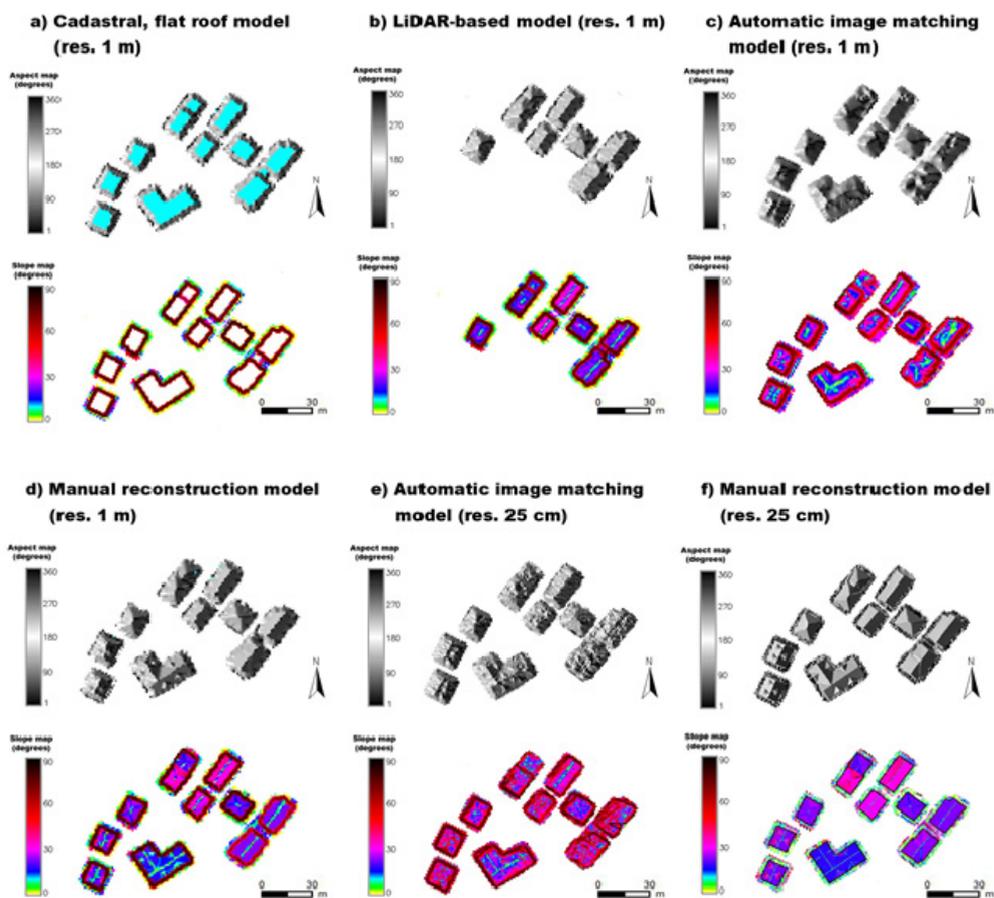


Figure 8 – Mappe raster di esposizione (aspect) e di pendenza (slope) ottenute rasterizzando differenti modelli geometrici dei tetti creati con: a) cartografia catastale (tetti piani), b) DSM da dati LiDAR, c-e) matching automatico di immagini aeree, d-f) restituzione manuale da immagini aeree.

Rilievo e modellazione 3D con piattaforme UAV

Negli ultimi anni si è avuto un forte incremento ed utilizzo di piattaforme UAV (droni) per l'acquisizione di immagini aeree ad alta risoluzione (basse quote) in maniera rapida e veloce. Tali strumenti sono comunemente utilizzati per diverse finalità quali ad esempio rilievi archeologici, indagini geologiche e geotecniche, *precision farming*, studi sull'efficienza energetica (dispersioni termiche) di edifici o impianti, monitoraggio, ecc. Il successo di queste piattaforme è principalmente da imputare alla rapidità e all'economicità (se comparate ai tradizionali voli fotogrammetrici) con cui sono eseguiti i voli e alla maggior completezza dell'informazione ottenibile rispetto alla sola acquisizione terrestre. Il trattamento in maniera rapida ed efficace di queste immagini è ancora una questione aperta, poiché i problemi da affrontare variano notevolmente a seconda delle condizioni operative in cui si lavora, della tipologia del drone, dalla camera utilizzata e dall'obiettivo del rilievo. Per questi motivi, capita sovente che queste immagini siano utilizzate per meri scopi puramente documentativi e di visualizzazione, senza giungere all'estrazione di dati metrici. 3DOM ha sviluppato una metodologia di trattamento delle immagini acquisite da piattaforme UAV per derivare informazioni metriche (modelli di superficie, ortofoto,

etc.) in tempi brevi (Remondino et al., 2011b). L'affidabilità degli algoritmi utilizzati ha fino ad oggi permesso di ottenere risultati confacenti le aspettative in diverse applicazioni quali, ad esempio, rilievi di scavi archeologici (Figure 9 e 10), monitoraggio di frane e subsidenza, studi di coltivazioni, ecc. Per far fronte ai problemi citati si sono impiegate procedure il più possibile flessibili, in modo da potersi adattare al maggior numero di situazioni e applicazioni. Al momento sono sempre necessari dei punti a terra per la georeferenziazione poiché le coordinate dei centri di presa fornite dai sistemi di navigazione (GNSS/INS) non permettono di effettuare un orientamento diretto del blocco di immagini. In futuro, l'uso di strumenti di posizionamento più precisi, lo sfruttamento di computer sempre più prestanti e l'uso delle GPU (*Graphics Processing Unit*) o calcolo parallelo, potrebbero ulteriormente velocizzare l'intero processo di restituzione permettendo di ottenere risultati quasi in tempo reale.



Figura 9 – Area archeologica di Pava (Siena) rilevata con un UAV Microdrone MD4-200 e DSM generato con tecniche automatiche di image matching.

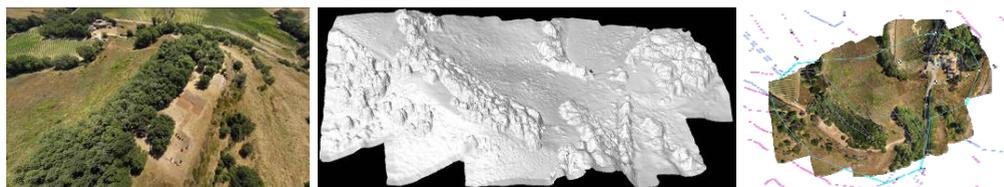


Figura 10 – Modello digitale della superficie, ortofoto e curve di livello dell'area archeologica vicino a Montalcino.

La regolamentazione della navigazione degli UAV in Italia come in altri paesi, per quanto ancora in via di definizione, potrebbe permettere l'uso di tali strumenti anche su zone urbanizzate, ampliando ulteriormente il numero delle applicazioni per cui sono utilizzati questi strumenti.

Texture mapping automatico

Il *texturing* è un processo fondamentale all'intero del flusso di generazione di modelli 3D foto-realistici poiché consente di fondere assieme l'informazione radiometrica al modello geometrico in forma di superficie poligonale. Un modello 3D con *texture* è in genere il prodotto finale della procedura di modellazione, utilizzabile per scopi di visualizzazione, analisi visive e ambienti di realtà virtuale o aumentata ma è anche un punto di partenza per la produzione dei classici prodotti geomatici bidimensionali. Al contempo la realizzazione di modelli 3D foto-realistici è sicuramente uno dei passi più dispendiosi da un punto di vista computazionale. In particolare, se le immagini non sono orientate, l'individuazione delle corrispondenze tra la geometria 3D e l'informazione colorimetrica sulle immagini 2D (RGB, infrarosso, ultravioletto, ecc.) risulta un'operazione lunga e difficile, specialmente per modelli di grandi dimensioni e alto livello di dettaglio. Le procedure manuali implementate nei software commerciali richiedono operatori esperti e soprattutto non sono praticabili quando il numero di immagini da mappare è elevato. In letteratura scientifica sono stati proposti alcuni approcci (semi- o completamente automatici) ma finora testati su oggetti di dimensioni limitate e spesso di semplici forme geometriche.



Figura 12 – Modellazione 3D con laser scanner e texturing automatico. Dato geometrico (a) e modello finale texturizzato usando circa 60 immagini (b).

E' stata pertanto sviluppata una procedura completamente automatica per il *texturing* di modelli 3D complessi utilizzando immagini dotate o non di orientamenti interni ed esterni. Il metodo è applicato a mesh poligonali con normali orientate o nuvole di punti con informazioni sull'orientamento delle normali locali. La procedura di mappatura automatica delle immagini è basata sui seguenti passi:

1. estrazione automatica di *tie points* tra i set di immagini da mappare;
2. bundle adjustment con o senza determinazione dei parametri di calibrazione della camera per la determinazione degli orientamenti esterni e delle coordinate 3D dei *tie points*;
3. registrazione ICP tra la nuvola sparsa derivata dal bundle adjustment e la mesh poligonale;
4. determinazione delle migliori immagini considerando occlusioni, scala immagine e angoli di vista;
5. mappatura dell'informazione radiometrica utilizzando le equazioni di collinearità.

La procedura è flessibile e affidabile anche in caso di scene complesse (Figure 11 e 12). Nel caso in cui i parametri di orientamento esterno sono noti a priori, i passi 1-3 non vengono eseguiti.

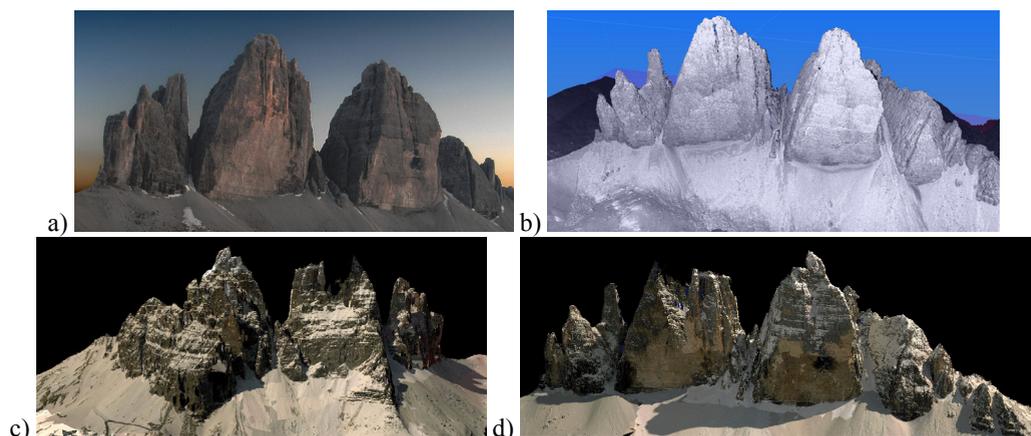


Figura 11 – Rilievo e modellazione 3D delle 3 Cime di Lavaredo (a) tramite LiDAR da elicottero. Dato geometrico (b) e modello finale texturizzato con 84 immagini (c, d).

Conclusioni

L'articolo ha rivisto le principali tecniche di rilievo e modellazione 3D nel campo della geomatica e ha poi presentato alcuni esempi di progetti in essere presso l'unità di ricerca 3DOM di FBK Trento. Le potenzialità dei modelli 3D sono oggi innumerevoli a patto che il dato 3D sia metrico e accurato. Applicazioni come il monitoraggio e la protezione del territorio, documentazione e conservazione dei beni culturali, city modeling, pianificazione e gestione territoriale sono tematiche sempre più importanti sia in ambito scientifico che governativo. La geomatica, e più nello specifico, il rilievo fotogrammetrico o laser scanner, possono fornire il giusto supporto tecnico al fine di pianificare, decidere e agire in maniera corretta e migliore.

Bibliografia

Agugiario, G., Remondino, F., Girardi, G., Von Schwerin, J., Richards-Rissetto, H., De Amicis, R., 2011a, "A web-based interactive tool for multi-resolution 3D models of a Maya archaeological site", *IAPRS&SIS*, Vol. 38(5/W16), Trento, Italy (CD-ROM).

Agugiario, G., Remondino, F., Stevanato G., De Filippi R., Furlanello C., 2011b, "Estimation of solar radiation on building roofs in mountainous areas", *IAPRS&SIS*, Vol. 38(3/W22), Munich, Germany (CD-ROM).

Apollonio, F.I., Corsi, C., Gaiani, M., Baldissini, S., 2010, "An integrated 3D geodatabase for Palladio's work", *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 2(8).

Barazzetti, L., Scaioni, M., Remondino, F., 2010, "Orientation and 3D modeling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation", *The Photogrammetric Record*, Vol. 25(132), pp. 356–381.

De Luca, L., Busarayat, C., Stefani, C., Veron, P., Florenzano, M., 2011, "A semantic-based platform for the digital analysis of the architectural heritage", *Computers & Graphics*, Vol. 35(2), pp. 227-241.

El-Hakim, S., Gonzo, L. Voltolini, F., Girardi, S., Rizzi, A., Remondino, F., Whiting, E., 2007, "Detailed 3D modelling of castles", *International Journal of Architectural Computing*, Vol. 5(2), pp. 199-220.

Furukawa, Y., Ponce, J., 2010, "Accurate, dense and robust multiview stereopsis", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, 32(8), pp. 1362-1376.

Guidi, G., Remondino, F., Russo, M., Menna, F., Rizzi, A., Ercoli, S., 2009, "A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archaeological areas", *International Journal of Architectural Computing*, 7(1), pp. 40-55.

Manferdini, A., Remondino, F., 2010, "Reality-based 3D modeling, segmentation and web-based visualisation", *Proc. of Euromed 2010*, LNCS 6436, Springer Verlag, pp. 110-124.

Pierrot-Deseilligny, M., De Luca, L., Remondino, F., 2011, "Automated image-based procedures for accurate artifacts 3D modeling and orthoimage generation", *Proc. of 23th Int. CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic.

- Pierrot-Deseilligny, M. and Clery, I., 2011, "APERO, An Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images", *IAPRS&SIS*, Vol. 38(5/W16), Trento, Italia (CD-ROM).
- Remondino, F., El-Hakim, S., 2006, Image-based 3D modelling: a review, *The Photogrammetric Record*, Vol.21(115), pp. 269-291.
- Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A., Zhang, L., 2008: Turning images into 3D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 25(4), pp. 55-64.
- Remondino, F., Rizzi, A., Jimenez, B., Agugiaro, G., Baratti, G., De Amicis, R., 2011a, "The Etruscan in 3D – from space to underground", *Proc. of 23th Int. CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011b, "UAV photogrammetry and 3D modeling – Current status and future perspectives", *IAPRS&SIS*, Vol.38(1/C22), Zurich, Switzerland.
- Stamos I, Liu L, Chen C, Woldberg G, Yu G, Zokai S., 2008, "Integrating automated range registration with multiview geometry for photorealistic modelling of large-scale scenes", *Int J. Computer Vision*, Vol. 78(2-3), pp. 237-260.
- Vosselman, G., Maas, H-G. (Eds), 2010, *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC, Boca Raton, 318 pp. ISBN: 978-1904445-87-6.
- Vu., H. H., Keriven, R., Labatut, P., Pons, J.-P., 2009, "Towards high-resolution large-scale multi-view stereo", *Proc. IEEE Conf. CVPR'09*, pp. 1430-1437.