

Confronto e integrazione fra tecniche geomatiche per la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali

Raffaella Brigante (*), Donatella Dominici (**), Guido Fastellini (*),
Fabio Radicioni (*), Aurelio Stoppini (*)

(*) DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93,
06125 Perugia, tel. 075 5853765, fax 075 5853756, e-mail topos@unipg.it

(**) DAU – Dipartimento di Architettura e Urbanistica, Università degli Studi dell'Aquila, P. le E. Pontieri 2, 67040
Monteluco di Roio, L'Aquila, e-mail donatella.dominici@univaq.it

Riassunto

L'articolo descrive recenti esperienze del gruppo di ricerca in un rilevamento delle mura civiche preromane della città di Amelia (TR), eseguito sia a scopo di documentazione dello stato attuale che di monitoraggio di eventuali deformazioni future. Le tecniche geomatiche applicate sono la fotogrammetria digitale, la scansione laser e il rilievo tridimensionale ad alta densità con stazione totale automatica di tipo "imaging". Le tre diverse metodologie vengono messe a confronto nei risultati ottenibili utilizzando ciascuna di esse indipendentemente dalle altre. Si passa poi a individuare le sinergie e interazioni possibili fra le tecniche utilizzate, e le combinazioni che possono dar luogo ai risultati migliori per accuratezza, fruibilità e convenienza economica. Il modello tridimensionale delle mura di Amelia, del quale vengono descritte le caratteristiche e le modalità di fruizione, è stato ottenuto mediante un'applicazione integrata delle diverse tecniche.

Abstract

The paper describes some recent experiences of our research group on a survey of the pre-roman city walls of Amelia (near Terni, central Italy). The survey has been carried out for a documentation of the current state of the monument and a monitoring of possible deformations. The geomatic techniques applied are: digital photogrammetry, laser scanning and a three-dimensional high density survey effected with an "imaging" total station. The three different methodologies are compared on the results obtainable using them independently from one another. Thereafter, the possible synergies and interactions among the techniques are investigated, looking for the combinations that can give the best results as for accuracy, usability and economical convenience. The three-dimensional model of the Amelia walls has been obtained by means of an integrated applications of the different techniques. The paper describes the technical specifications and the modes of use of such model.

Introduzione

La geomatica mette a disposizione una serie di metodologie di rilevamento basate su principi diversi (scansione laser, fotogrammetria digitale, rilevamento tridimensionale per distanze/angoli con alta densità di punti) ma che permettono di ottenere un risultato sostanzialmente analogo: un rilievo geometrico tridimensionale pressoché continuo delle superfici di un manufatto, con accuratezza subcentimetrica, "vestito" per così dire con immagini digitali ad alta definizione.

In sostanza, quello che si ottiene è un **modello virtuale tridimensionale** dell'oggetto, ad alta risoluzione sia geometrica che radiometrica, visualizzabile, esplorabile e misurabile su un video grafico, che resta a disposizione sia per finalità di semplice archiviazione, che per il monitoraggio del manufatto nel tempo o per la progettazione di interventi di restauro.

Le diverse tecniche possono essere considerate alternative l'una all'altra, in una sorta di competizione tecnico-economica, valutando caso per caso quale risulti la più conveniente. È però molto più vantaggioso utilizzarle in modo integrato, in sinergia, cercando di ottenere il meglio da ciascuna di esse, alla ricerca della miglior combinazione in termini di prestazioni assolute e di rapporto costi/benefici. Oggetto del rilievo sono le mura preromane (VI-IV sec. a.C.) della città di Amelia, in provincia di Terni. Si tratta di un manufatto di grande interesse storico e monumentale, realizzato con blocchi "ciclopici" di pietra calcarea di forma poligonale irregolare e grandi dimensioni, montati a secco con un ingegnoso sistema di incastri. Le mura sono sopravvissute a quasi tre millenni di storia ma in alcuni tratti mostrano segni di dissesto, anche a causa degli interventi succedutisi nel tempo (realizzazione di riporti di terreno a tergo delle mura, sopraelevazioni medievali, ...) che ne hanno modificato il regime statico. Esse sono pertanto sottoposte a monitoraggio nei tratti giudicati a maggior rischio. Il sistema di monitoraggio basato su metodologie geomatiche è stato progettato e realizzato dal DICA e comprende, oltre alle tecniche sopra citate, reti locali tridimensionali misurate con stazione totale automatica di alta precisione per un controllo ad alta sensibilità per punti (prismi ancorati alle mura), e una rete GNSS per collegare tra loro le diverse reti 3D valutando eventuali movimenti relativi.

Fotogrammetria digitale

Le prese per l'applicazione qui descritta sono state eseguite con una fotocamera digitale Nikon D200 con obiettivo Nikon a focale fissa 14 mm, calibrata con il software Topcon *Image Master Calib* mediante un apposito reticolo di calibrazione, che ha fornito i parametri voluti, quali distanza focale, coordinate del punto principale, parametri di distorsione radiale e tangenziale, utilizzati nelle elaborazioni successive. Gli angoli di campo con ottica 14 mm sono di 80° e 56° (rispettivamente per il lato maggiore e minore del fotogramma).

Le dimensioni del sensore sono di 23.6 x 15.8 mm; i pixel sono 3872 x 2592 ed hanno quindi un lato di circa 6 micron. Tenuto conto di una distanza media di presa di 15 metri, la scala dell'immagine sul sensore con ottica 14 mm è di circa 1:1000, per una dimensione del pixel di 6 mm circa sulla parete, che in prima approssimazione si può far corrispondere all'accuratezza attesa. I punti di appoggio sulla parete sono costituiti dai prismi delle reti 3D, integrati da altri punti della parete non segnalizzati (spigoli di elementi litici) rilevati con stazione totale dai pilastrini delle reti. Per l'impiego della fotogrammetria digitale in modo convenzionale (restituzione stereoscopica e formazione del DEM dalla stessa restituzione fotogrammetrica) sono state eseguite prese in condizione prossima a quella normale, con ricoprimento $\geq 80\%$ (fig. 1a). Ulteriori prese monoscopiche (fig. 1b) sono state eseguite per l'utilizzo non convenzionale della fotogrammetria basato sull'integrazione con i DEM ottenuti da altre due tecniche (v. paragrafi successivi).

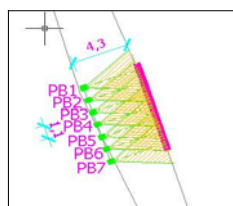


Figura 1a – Prese stereoscopiche

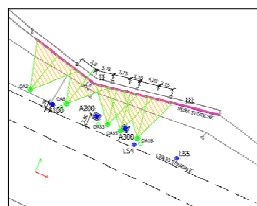


Figura 1b – Prese monoscopiche

Con le prese stereoscopiche sono state effettuate le tradizionali fasi di orientamento interno, esterno mediante triangolazione, creazione di un modello tridimensionale TIN e della ortofoto, utilizzando il software SOCET SET 5.4 della BAe Systems su una workstation con visione stereoscopica. La difficoltà maggiore incontrata nella realizzazione del progetto fotogrammetrico tradizionale è stata l'individuazione automatica dei punti di legame (*tie points*) a causa della tessitura pressoché uniforme delle mura, pertanto la collimazione di tali punti è stata effettuata manualmente.

L'utilizzo della fotogrammetria non convenzionale integrata con le scansioni laser (v. seguito) ha consentito di raggiungere precisioni maggiori con l'ulteriore vantaggio di svincolare l'operatore dalle restrizioni imposte dalla fotogrammetria tradizionale.



Figura 2 – Modello TIN ottenuto tramite fotogrammetria tradizionale

Laser a scansione

È stato impiegato un laser scanner Topcon GLS 1000, avente le seguenti caratteristiche: velocità di scansione 3000 punti/s, portata di 150 m (per oggetti con riflettività 18%), accuratezza lineare di ± 4 mm a 150 m, accuratezza angolare azimutale e zenitale di $\pm 6''$ (corrispondente a circa 5 mm a 150 m), dimensione dello spot di 6 mm a 40 m, densità massima di scansione 1 mm a 100 m, angolo di campo orizzontale 360° e verticale 70°. Lo scanner ha dimensioni compatte (si utilizza con una basetta standard a tre viti) e incorpora una fotocamera digitale da 2 Mp.



Figura 3 – Rilievo delle mura megalitiche con laser scanner Topcon GLS-1000

Grazie all'elevata velocità di scansione, il rilievo è stato molto rapido, pur avendo impostato una risoluzione elevata (1 punto/5 mm). Dal rilievo è stato ottenuto un DEM di tipo TIN avente risoluzione e affidabilità considerevolmente superiori a quelli ottenuti dalla restituzione fotogrammetrica e dalla stazione Imaging. I files ottenuti hanno però grandi dimensioni e comportano qualche problema di gestione per la lentezza delle operazioni ad essi relative.

Rilevamento ad alta densità con stazione totale robotizzata

Le stazioni totali motorizzate di ultima generazione hanno raggiunto una rapidità di funzionamento talmente elevata da poter fornire prestazioni in qualche modo paragonabili a quelle di un laser scanner. E' possibile effettuare vere e proprie scansioni di oggetti mediante una successione di

misure di distanza e angoli su una griglia regolare ad alta densità all'interno di una finestra che abbraccia l'oggetto del rilievo. La velocità di scansione è ovviamente inferiore, dell'ordine delle decine di punti al secondo, ma l'accuratezza e la tipologia dei dati ottenuti (nuvole di punti) sono assimilabili a quelle di un laser scanner.

Nel caso in oggetto è stata utilizzata una stazione totale Topcon IS (figg. 4a – 4b). La velocità di acquisizione è di 20 punti/secondo. Le prestazioni sono quelle del distanziometro a impulsi integrato: accuratezza di circa ± 5 mm sino a 250 metri di distanza e $\pm (10 \text{ mm} + 10 \text{ ppm} \cdot D)$ su distanze più lunghe fino a 2000 m circa. Lo strumento viene definito "Imaging" in quanto integra una camera digitale coassiale al cannocchiale, con varie funzionalità (ripresa di immagini associabili alla nuvola di punti, zoom su punti caratteristici dell'oggetto, ecc.). Per contenere i tempi di scansione entro limiti accettabili, la densità dei punti rilevati è stata impostata su valori inferiori rispetto al laser scanner, rilevando mediamente 1 punto ogni 3-4 cm. Come per lo scanner laser, dal rilievo si è ottenuto un DEM di tipo TIN dei paramenti murari scanditi.



Figura 4a – Rilievo con stazione totale Topcon IS Figura 4b – Immagine durante la misura di un prisma

Elaborazione dei dati acquisiti e integrazione tra le diverse tecniche

L'elaborazione definitiva dei rilievi dei tratti di mura sottoposti a monitoraggio è stata eseguita con quella che può essere considerata una tecnica fotogrammetrica digitale non convenzionale, che integra le immagini monoscopiche ad alta risoluzione acquisite con la fotocamera Nikon D200 con le nuvole di punti e i DEM tridimensionali ottenuti mediante laser scanner e stazione totale robotica. L'orientamento delle immagini e la loro integrazione con le scansioni è stato eseguito con il software *Image Master* della Topcon. Per l'orientamento delle immagini sono stati misurati diversi punti di controllo (minimo 4 per fotogramma) successivamente collimati sulle immagini, ottenendo dal calcolo i parametri di orientamento esterno per ogni foto, ovvero posizione ed assetto della camera al momento della presa. Nella fase successiva sono state importate, filtrate ed orientate nel sistema di riferimento esterno le nuvole di punti laser (fig. 5), con cui è stato creato un modello TIN della superficie delle mura (fig. 6).

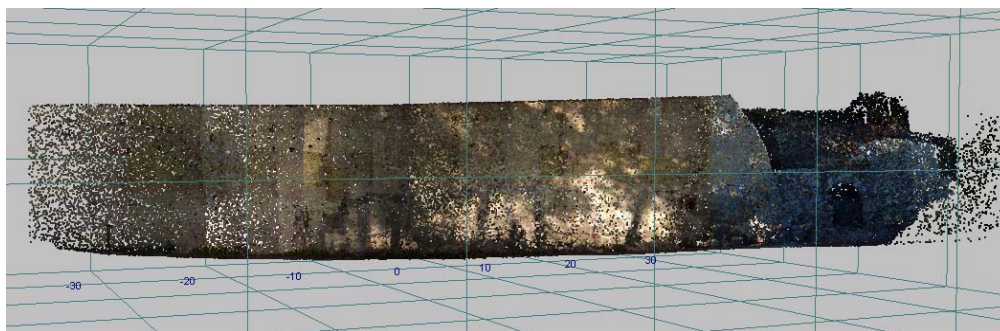


Figura 5 – Nuvola di punti colorata

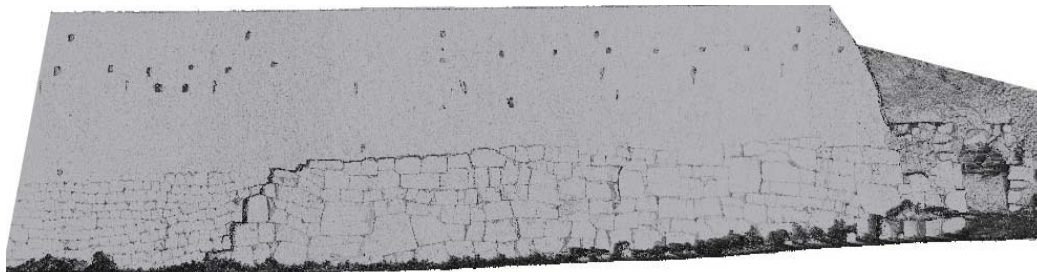


Figura 6 – Modello TIN

Si sottolinea il fatto che l'elaborazione è del tutto analoga per le scansioni eseguite con il laser scanning e la stazione totale robotica, e il software impiegato è lo stesso (Image master). Quello che cambia è la mole dei dati acquisiti e le dimensioni di files, notevolmente maggiori per il laser scanner, che lo penalizzano in termini di lentezza di caricamento e gestione degli elaborati a video. Tale modello è stato successivamente rototraslato nel datum WGS84-ETRF89 mediante punti di legame.

L'integrazione tra le foto digitali e le scansioni laser è avvenuta nel modo seguente:

- conoscendo posizione e assetto della camera e i parametri di calibrazione è stata ricostruita la proiezione centrale che ha generato l'immagine;
- successivamente l'immagine è stata proiettata sul modello 3D tramite una proiezione ortogonale.

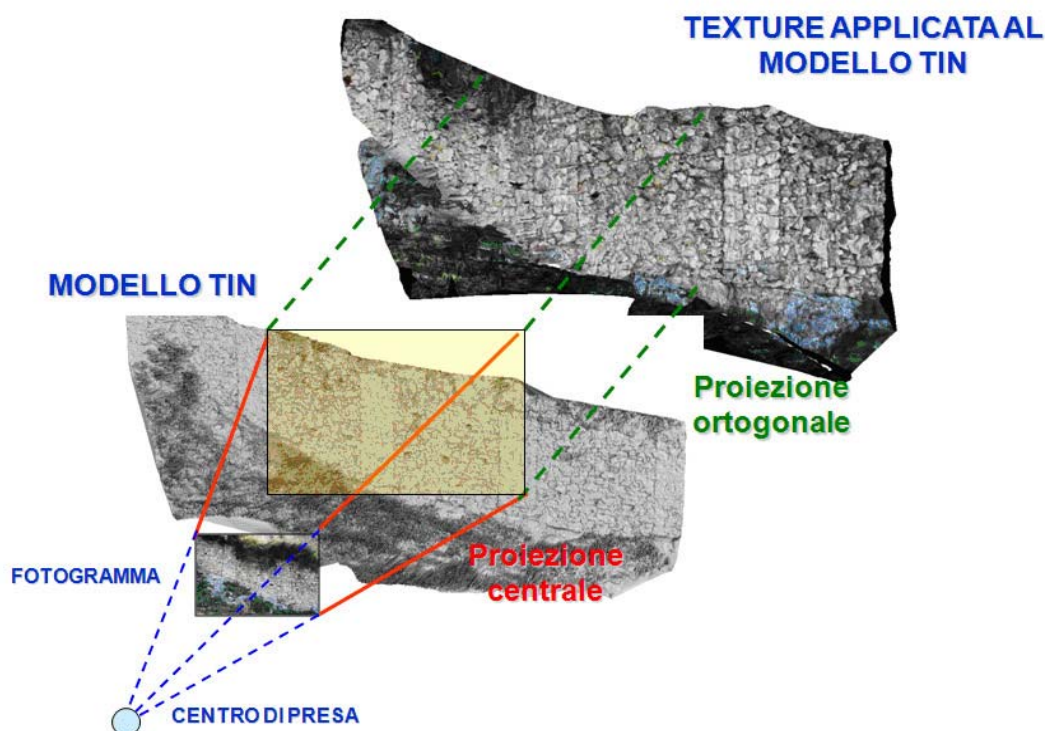


Figura 7 – Schema della procedura adottata, che integra fotogrammetria e scansioni 3D

Dalla integrazione tra le immagini orientate ed il modello TIN è stato quindi possibile ottenere un'ortofoto delle mura ed un modello tridimensionale “vestito”, ovvero colorato mediante le foto.

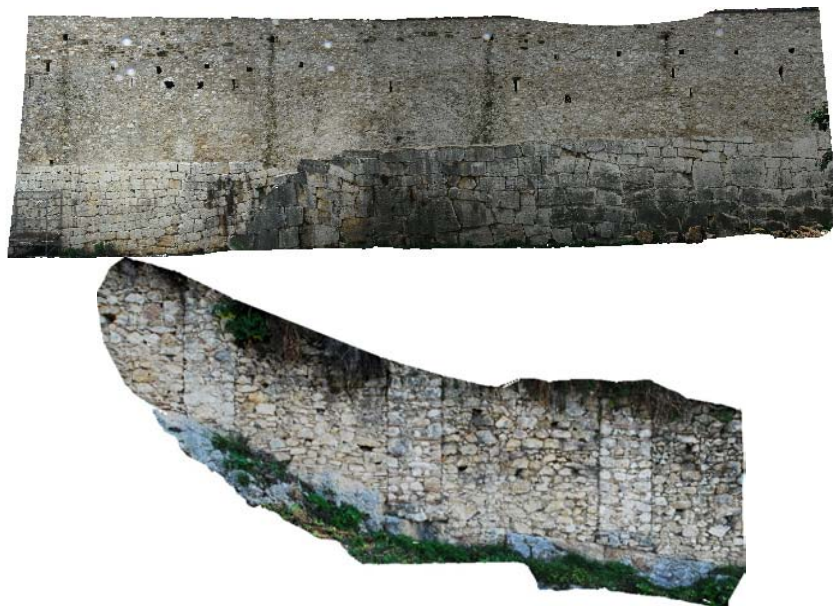


Figura 8 – Esempi di ortofoto digitali di tratti delle mura



Figura 9 – Immagine di modello 3D

I modelli 3D possono essere esplorati tridimensionalmente dagli utenti finali a video mediante il software *Image Master Viewer* della Topcon. Si tratta di un software di libera distribuzione e semplice utilizzo, che consente la sola visualizzazione e navigazione dei modelli tridimensionali. È possibile effettuare misure di coordinate, distanze, sezioni, in sostanza estrarre informazioni metriche dal modello oltre a visualizzarlo.

Bibliografia

Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A., 2008: An integrated monitoring system for the monumental walls of Amelia. Proc. of “Measuring the Changes”, 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis - 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisbon, May 2008
Brigante R., Dominici D., Fastellini G., Radicioni F., Stoppini A., 2008: Test di accuratezza e ripetibilità di posizionamenti NRTK su sessioni di lunga durata. Atti della XII Conferenza Nazionale ASITA, L'Aquila, Ottobre 2008