

IL RILIEVO LASER SCANNER DEL TEATRO ROMANO DI VENTIMIGLIA: ESPERIENZE E PROSPETTIVE

Bruno ASTORI(*), Valentina BONORA(**), Gabriele GARNERO(***)

(*) Politecnico di Torino, II Facoltà di Architettura – 011.5644382 – astori@archi.polito.it

(**) Politecnico di Torino, II Facoltà di Architettura – 011.5644380 – ybonora@oasi.asti.it

(***) Università di Torino, Facoltà di Agraria – 011.6708601 – gabriele.garnero@unito.it

Il rilievo metrico del teatro romano di Ventimiglia era stato eseguito negli scorsi anni per conto della Soprintendenza Archeologica della Liguria. Nel presente lavoro viene dettagliata l'esperienza di rilievo eseguita con sistemi a scansione da più stazioni e vengono presentati i primi risultati ottenuti, analizzando in particolare metodologia e impostazione del rilievo, confronto tra i due tipi di rilievo, precisioni ottenibili, estrazione automatica di rappresentazioni 2D dal modello 3D.

The survey of roman theatre of Ventimiglia has been performed during last years for *Soprintendenza Archeologica della Liguria*. The present paper concerns the new surveying experience carried out using scanning systems, acquiring in different spots of the site. We explain the first issues of the project, particularly analysing the surveying methodology and comparing the two kinds of datasets. The most important aim is the evaluation of different accuracies and the automatic extraction of 2D representations from 3D model.

Introduzione e obiettivi della ricerca

Quanto viene di seguito presentato va inserito in un più ampio panorama di ricerca dedicata alla documentazione metrica del patrimonio archeologico, portata avanti ormai da lungo tempo dal gruppo di ricerca del DINSE, in Italia e all'estero, e che spesso è stata occasione di collaborazioni sinergiche tra esperti di discipline differenti. Il rilievo per l'archeologia necessita frequentemente di un contenuto descrittivo che non si limiti a forma e dimensione: di fronte ad oggetti complessi, per forma, vicende storiche, tecniche costruttive, diventano infatti indispensabili competenze differenti e complementari.

Il trattamento di dati provenienti da scansioni laser è stato testato nell'area archeologica Nervia di Ventimiglia, ed in particolare sul teatro romano, edificato parzialmente in sovrapposizione con le mura della città antica.¹ Dell'edificio, forse mai completato, sono visibili i nove gradoni dell'*ima cavea*, le strutture di sostegno dei gradoni della *summa cavea*, i *parodoi* di accesso all'orchestra e alcune strutture della scena. Le gradinate della *cavea*, sulla quali si è concentrata la sperimentazione presentata, sono costituite da muratura che sostiene gradini in pietra bianca della Turbia. Pur trovandosi di fronte ad un oggetto in spiccato, caratterizzato da una struttura geometrica facilmente individuabile, il trattamento dei dati acquisiti è stato in parte complicato dalla presenza di una rigogliosa vegetazione tanto sul piano dell'orchestra quanto tra i blocchi in pietra dei gradini che ha ovviamente generato numerose zone d'ombra.

¹ L'acquisizione dei dati è stata effettuata con laser scanner *RIEGL LMS-Z210*. Si ringrazia Simone Orlandini e Daniele Rispoli per la disponibilità. Le specifiche tecniche del sensore utilizzato sono disponibili in: http://riegl.com/lms-z210/e_lms-z210.htm



Figura 1 – Il teatro romano di Ventimiglia

Uno degli obiettivi preliminarmente fissati per questa prima esperienza del gruppo di ricerca con tecnologie di scansione tridimensionale era la comparazione dei risultati ottenibili elaborando sia scansioni referenziate singolarmente, sia orientate sfruttando le porzioni di superficie riprese in scansioni adiacenti; un controllo puntuale, oltre al collaudo dei risultati ottenuti, è stato effettuato tramite il confronto con il preesistente rilievo celerimetrico effettuato negli anni '90 dall'arch. M. L. De Bernardi e ripreso recentemente, nel più ampio insieme di tutta la zona archeologica di Ventimiglia, dallo stesso gruppo di ricerca.

Realizzazione delle scansioni

Solo occasionalmente si può immaginare sufficiente per la completa acquisizione dei dati tramite laser scanner la realizzazione di un'unica scansione. La necessità di mantenere omogenea la densità di punti rilevati, di documentare anche aggetti, nicchie, cornici, ed ogni altro elemento in sottosquadro, che quindi genererebbe zone di ombra in un'unica scansione, oltre all'opportunità di contenere l'angolo di incidenza del laser sulla superficie (per evitare misure "di scorcio") rende, in linea generale, indispensabile progettare ed eseguire più scansioni, seguendo criteri analoghi a quelli che guiderebbero ad una completa documentazione fotografica dell'oggetto da rilevare. La geometria di una scansione laser può infatti essere assimilata a quella di una prospettiva centrale e, quindi, di una fotografia. Una completa documentazione fotografica richiede infatti lo scatto di più prese, da punti di vista differenti e capaci di documentare ogni particolare con una scala pressoché uniforme.

Nel progettare la geometria ed il numero delle scansioni da eseguire occorre ricercare inoltre un punto di conveniente equilibrio tra due esigenze opposte. Da un lato si deve considerare che la mole di dati ottenuta con una campagna di scansioni raggiunge rapidamente dimensioni importanti, con conseguenti ricadute sulle capacità, o perlomeno sui tempi, di elaborazione dei computer comunemente diffusi; dall'altro che la precisione a valle del processo di trattamento dei dati grezzi è influenzata (anche) dalla loro ridondanza.

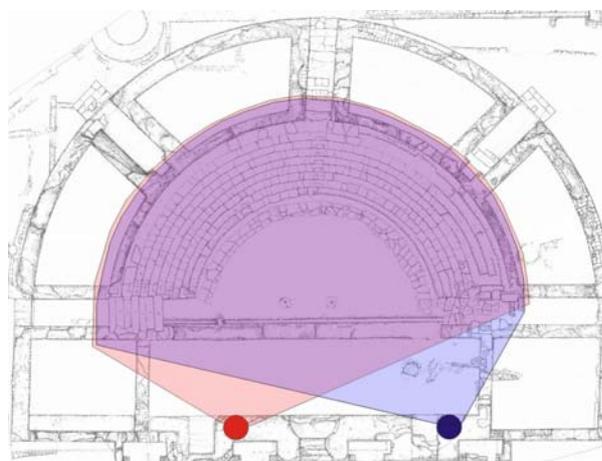


Figura 2 – Pianta del teatro con indicazione delle posizioni del laser

Il teatro di Ventimiglia è stato scandito posizionando il sensore sulle strutture della scena, come illustrato in figura 2.

La geometria di presa è stata progettata in modo che ognuna delle due scansioni riprenda interamente la cavea, la densità dei punti acquisiti con la somma delle due scansioni sia pressoché uniforme, si è contenuto l'angolo di incidenza del raggio di misura e contemporaneamente si è limitata la distanza sensore-oggetto ad un intervallo compreso tra circa 10 e 30 m. Inoltre, come illustrato sopra, il ricorso a due punti di vista ha consentito di

completare le informazioni in quelle zone che, in un'unica scansione, sarebbero risultate in ombra. Si sottolinea che sussiste un forte parallelismo, peraltro già ampiamente discusso da più Autori (Menci, Cabrucci, 2001; Lemmens, van den Heuvel, 2001; Colombo, Marana, 2001), tra le problematiche di presa con laser scanner e quelle legate alla fotogrammetria.

Al fine di consentire la referenziazione delle scansioni in modo indipendente l'una dall'altra è stato necessario utilizzare una serie di target catarifrangenti. La posizione di tali segnali, sempre collocati su superfici verticali per evitare riprese scorciate, è stata preventivamente determinata per via topografica a partire da una piccola rete locale di raffittimento.

Elaborazione dei dati

Possibili cause di imprecisione nell'acquisizione dei dati, in riguardo al caso in analisi, sono legate a:

- riflessioni originate nello spazio tra laser ed oggetto, dovute in particolare alla presenza di vegetazione e al suo movimento per effetto del vento, oltre ad effetti atmosferici,
- riflessioni parziali dello spot laser sugli spigoli dei gradini,
- riflessioni multiple,
- incertezza strumentale nell'acquisizione del singolo punto.

L'effetto degli errori sopraelencati può essere contenuto attraverso operazioni di pulizia dei dati grezzi (*data clearing*). In realtà gli algoritmi che sono generalmente utilizzati si basano sul *clustering* [fig. 3]: lo spazio occupato dalla nuvola di punti viene partizionato secondo una matrice tridimensionale, nella quale l'ampiezza delle celle è definita da un valore di "tolleranza", e viene conservato un unico punto per ogni cella. Algoritmi di questo tipo agiscono su tutta la nuvola di punti allo stesso modo.

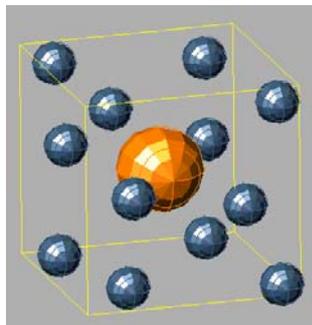


Figura 3 – Clustering di una nuvola di punti

Tale procedimento può essere applicato con risultati positivi quando l'oggetto è costituito da superfici con curvature continue e pressoché privo di spigoli. Nei ben più ricorrenti casi contrari (perlomeno in campo architettonico ed archeologico) occorrerebbe invece poter ridurre in modo anche consistente i punti che descrivono porzioni di piano e mantenere invece integralmente quelli collocati in prossimità degli spigoli (Boheler et al., 2001). Algoritmi di riduzione "intelligente", cioè in grado di preservare informazioni topologiche introducendo dei vincoli nel processo di riduzione, sono invece disponibili per operare riduzioni sulle mesh (Franc, 2002). Per questo motivo si è scelto di non operare alcun filtraggio preventivo sui dati grezzi acquisiti al teatro di Ventimiglia.

La fase di *registrazione* consiste sostanzialmente nel rototraslare le coordinate cartesiane dei punti acquisiti con ogni scansione dal sistema intrinseco del sensore ad un sistema definito dall'operatore e comune a tutte le scansioni.

Si può adottare come sistema di riferimento unico (spesso definito *sistema globale*) un sistema arbitrario coincidente per esempio con quello del sensore in una scansione scelta come riferimento, o definirlo imponendo il passaggio dei suoi assi per alcuni punti notevoli dell'oggetto ritratto nelle scansioni.

Poiché nella documentazione del patrimonio culturale si incontrano oggetti con dimensioni anche molto differenti, è ovvio che un'unica tecnica di rilievo (o meglio: un unico livello di dettaglio dell'analisi, metrica ma non solo) non è generalmente sufficiente. D'altronde il metodo di indagine da sempre applicato, cosiddetto *dal generale al particolare*, prevede l'interazione di metodi e strumenti differenti. Questa esigenza è ancora più manifesta oggi che, grazie tanto all'evoluzione dei supporti informatici quanto ad una diffusa consapevolezza del plus valore prodotto dalla collaborazione tra discipline differenti, ogni rilievo di natura metrica è pronto, almeno

potenzialmente, a diventare supporto geometrico referenziato per analisi tematiche finalizzate alla conoscenza, alla tutela ed alla valorizzazione (Chiabrando et al., 2000).

Ecco allora che, essendosi posto quest'ultimo obbiettivo (almeno potenziale, come si è detto) non si può che considerare limitativa l'adozione di sistemi di riferimento legati alla posizione del sensore² rispetto al ricorso ad un sistema locale predefinito e quindi utilizzabile per referenziare correttamente e integrare informazioni ottenute con tecniche di rilievo laser, fotogrammetriche e topografiche. Tale esigenza è stata particolarmente sentita per l'area archeologica di Ventimiglia, da lungo tempo, e con strumenti e tecniche differenti, oggetto di analisi del nostro gruppo di ricerca (Astori et al., 2002).

Confronto tra la registrazione di mesh tramite punti di appoggio e tramite sovrapposizione di superfici comuni a più scansioni

Come si è accennato, i punti di appoggio sono stati materializzati prima dell'esecuzione delle scansioni tramite otto target catarifrangenti adesivi, distribuiti in modo uniforme sulle alzate dei gradini della cavea, nella posizione cioè geometricamente più favorevole per le riprese.

Il software *RiScan Riegl* provvede ad analizzare l'immagine di riflettanza acquisita individuando, in base ai parametri impostati (dimensioni e tipologia del target, intervallo di valori di riflettanza entro i quali limitare la ricerca, ecc.), la posizione baricentrica di ogni target. Associando ai target così individuati le coordinate nel sistema di riferimento voluto si ottiene la matrice di rototraslazione e, ovviamente, il valore dei relativi s.q.m., pari a 0,8 cm per la prima scansione e 2,4 cm per la seconda.

Nel caso in analisi il sistema di riferimento adottato è quello cartografico nazionale Gauss Boaga.

La qualità del software per il trattamento e la gestione dei dati acquisiti tramite scansione influenza in modo significativo la qualità finale del modello tridimensionale ed il tempo necessario per ottenerlo. Ad oggi i programmi forniti con la strumentazione dalle case produttrici si limitano alla gestione delle operazioni di scansione (individuazione dell'area da scandire, impostazione dei parametri di risoluzione, controllo in tempo reale dello stato di avanzamento della scansione, ecc.), dei calcoli di trasformazione delle coordinate polari misurate in cartesiane, dell'esportazione in formati compatibili con altri applicativi e spesso anche della registrazione in un unico sistema di riferimento di scansioni differenti (talvolta, come per *RiScan* della *Riegl*, anche attraverso il riconoscimento automatico di target). Per proseguire nel trattamento dei dati acquisiti si deve poi passare ad applicativi legati al mondo del CAD e della modellazione. Sono ormai disponibili numerosi pacchetti, di cui alcuni parzialmente o totalmente dedicati alla gestione di dati provenienti da scansioni 3D. Esigenze di mercato legate probabilmente al limitato numero di utilizzatori stanno definendo un trend di notevole diffusione per quei programmi, spesso strutturati in modo modulare, che sono in grado di gestire tutte le fasi del processo di trattamento (filtraggio dei punti, triangolazione delle superfici, loro allineamento e fusione, semplificazione e post-trattamento del modello, ecc.). Saranno infatti sempre meno gli utenti disposti a passare attraverso più software differenti durante il processamento dei dati.³

Nell'affrontare la presente ricerca si è scelto di sperimentare l'uso di più software differenti, compresi alcuni che gestiscono solo certe fasi del processo di elaborazione che conduce al modello finale. Così, per esempio, la triangolazione delle superfici è stata calcolata sia con *Spider* della *Alias|Wavfront* che con *Geomagic Studio* della *Raindrop Geomagic*.

Rapidform della *INUS Technologies* consente di visualizzare una rappresentazione in falsi colori dello scostamento tra le due mesh precedentemente orientate tramite i punti di appoggio [fig. 4] che

² A meno che essa non coincida ovviamente con un punto noto, ma tale condizione appesantirebbe con vincoli tutto sommato inutili il progetto di presa, costituito frequentemente da un numero elevato di scansioni

³ Un andamento di questo tipo, già verificatosi peraltro per pacchetti di programmi ben più noti, non è detto che sostenga la diffusione del prodotto *migliore* per ogni fase di trattamento. A solo titolo di esempio si vedano le interessanti ricerche che sono in corso presso la University of West Bohemia, dove è stato sviluppato il software MVE (disponibile in <http://heracles.zcu.cz>).

evidenzia risultati assolutamente soddisfacenti, con scarti inferiori al centimetro (le zone con scarti apparentemente più elevati -sino circa $\pm 5\text{cm}$ - sono infatti quelle che risultano in ombra in una delle due scansioni e che quindi sono state inevitabilmente triangolate in modo non corretto). Un'analisi del tutto analoga, e che di fatto conferma i risultati sopra esposti, è stata fatta anche con *Geomagic* [fig. 5]⁴.

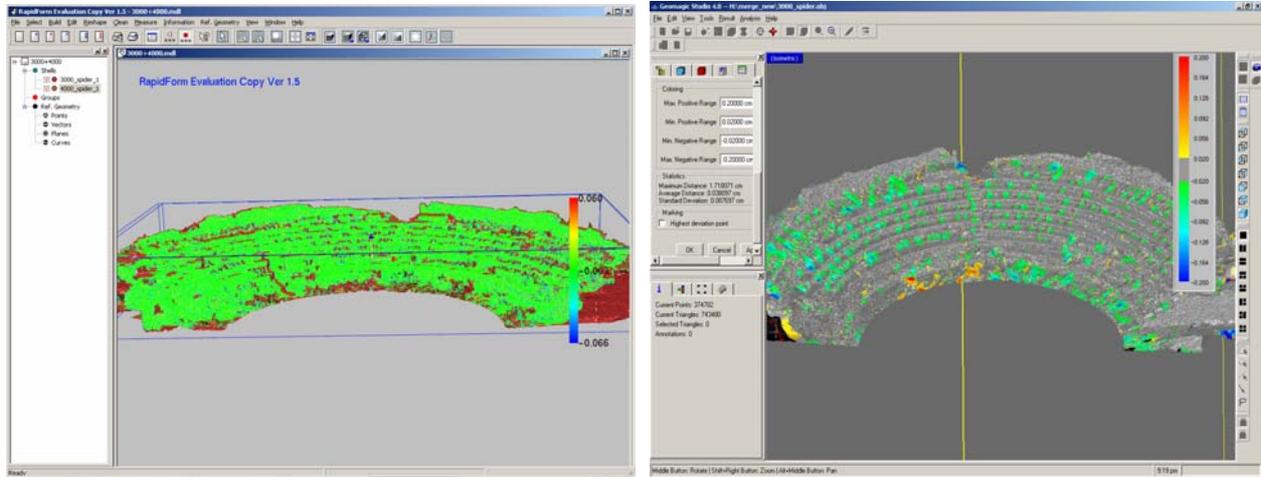


Figure 4 e 5 – Confronto tra le mesh visualizzate con due applicativi differenti

In modo analogo a quanto effettuato in precedenza si è poi proceduto all'esportazione da *RiScan* dei dati di entrambe le scansioni, senza che però in questo caso si fosse effettuata l'operazione di orientamento.

La visualizzazione delle mesh ottenute da tali nuvole di punti è quindi quella presentata in figura 6.

Per la registrazione delle mesh in questo caso si è mantenuta la prima scansione come riferimento. La seconda è stata quindi orientata in modo grossolanamente congruente.

Tramite l'individuazione di sette coppie di punti corrispondenti il software procede al calcolo della rototraslazione richiesta, prima in modo approssimato, quindi definitivo, fornendo anche indicazioni numeriche della qualità del calcolo prodotto [fig. 7].

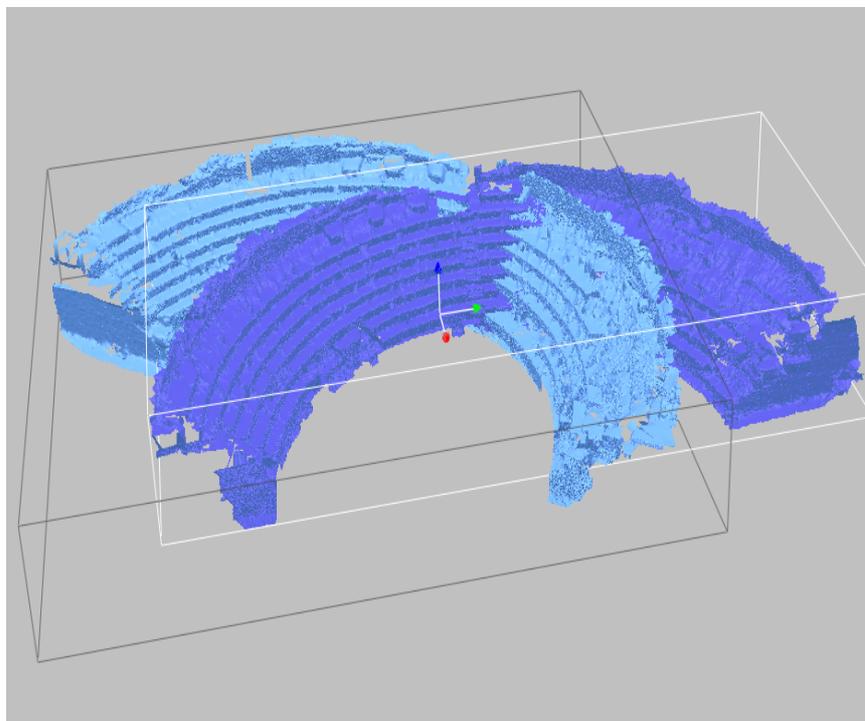


Figura 6 – Mesh non orientate

⁴ Nel testo le immagini sono riprodotte in bianco e nero, quindi risultano difficilmente leggibili le anomalie descritte.

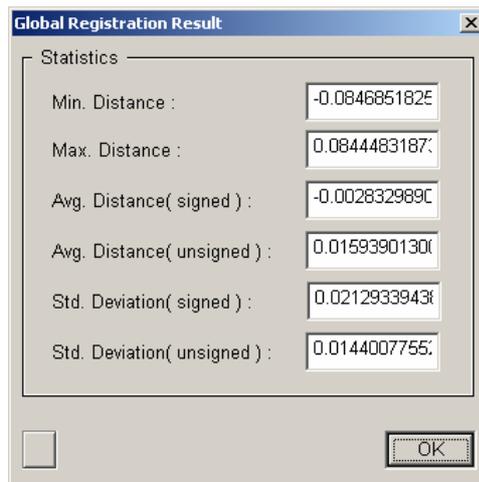


Figura 7 – Risultati dell'orientamento globale – valori espressi in metri

Sia l'analisi di tali risultati che quella della loro rappresentazione in scala di colori, analoga a quella ottenuta precedentemente, evidenzia la sostanziale equivalenza, dal punto di vista della qualità metrica ottenibile a livello locale, dei due metodi di registrazione delle mesh testati.

Si sottolineano però ancora una volta i limiti del secondo sistema rispetto al primo, quando sia necessario integrare o confrontare i dati ottenuti⁵.

Per le elaborazioni successive si sono quindi utilizzate le scansioni orientate nel sistema cartografico.

Vestizione fotorealistica del modello – valutazione metrica

Poiché, come si è detto, il teatro è stato oggetto di un precedente e dettagliato rilievo topografico, realizzato quale supporto per la redazione di elaborati di carattere prettamente archeologico, è stato possibile confrontare le

coordinate di alcuni punti provenienti da detto rilievo con quelle estratte rispettivamente da un modello texturizzato e da uno solo ombreggiato. Il primo modello adottato per il confronto proviene dall'esportazione, in formato VRML⁶ dal software *RiScan*. Come è noto, tale formato è utilizzato per la descrizione interattiva di oggetti e mondi 3D, sviluppato prevalentemente per l'uso su Internet e su reti locali. Poiché è un formato di interscambio per l'integrazione di file grafici tridimensionali e multimedia trova applicazione in visualizzazioni scientifiche, presentazioni multimediali, applicazioni didattiche, ecc. Oltre a conservare le informazioni sul colore del modello mantiene anche la sua referenziazione: ogni file VRML contiene infatti la definizione di un sistema di coordinate di riferimento per tutti gli oggetti contenuti nel file stesso.

Il secondo modello confrontato con il rilievo topografico è invece stato ottenuto dall'unione della coppia di scansioni effettuata in *Geomagic*. Le misure delle coordinate sono sempre state effettuate in *3DS Max* in quanto ad oggi non sono disponibili ambienti di visualizzazione interattiva di mondi VRML che consentano anche di effettuare delle misure.

La texture valutata è quella costituita dai valori cromatici acquisiti contemporaneamente alla scansione. La definizione della *pseudo-immagine* non è uniforme; varia, come varia la densità dei punti, diminuendo all'aumentare della distanza dal sensore.

I dati cromatici acquisiti con le scansioni del teatro, a causa della geometria di presa adottata, hanno dimostrato di poter fornire una texturizzazione con un livello qualitativo utile per fornire generali indicazioni sulla matericità dell'oggetto esaminato, ma non sufficienti per analisi dettagliate, per esempio sulle tessiture murarie o sullo stato di degrado. Inoltre va considerata la presenza dei ciuffi di vegetazione cresciuti tra blocchi di pietra contigui che, inevitabilmente scanditi, si presentano sul modello come rigonfiamenti e sull'immagine come striature verdi. Le deformazioni prodotte al modello possono essere almeno parzialmente corrette imponendo condizioni geometriche quali la contiguità tra superfici documentate correttamente o l'orizzontalità del piano superiore dei blocchi dei gradoni. Sulle immagini di colore acquisite, invece, si possono operare esclusivamente correzioni globali, simili alla regolazione del contrasto o della luminosità, mentre sarebbe ovviamente scorretto fare "ritocchi" locali per la ricostruzione di caratteristiche geometriche come, nel caso in analisi, gli spigoli dei blocchi nascosti dalla vegetazione.

⁵ E' ovviamente possibile rototraslare anche successivamente il modello ottenuto in un qualsiasi sistema adottando come riferimento punti naturali ben individuabili sul modello stesso; quando però le scansioni non sono progettate per ottenere un modello ad elevata definizione, tale riconoscimento risulta essere poco agevole.

⁶ Le caratteristiche del formato VRML sono disponibili in: <http://www.vrml.org/Specifications/VRML97>

Poiché il livello di dettaglio è inversamente legato alla scala di rappresentazione, la texture così acquisita è stata utilizzata per la mappatura di un modello con visualizzazione prevista a piccola scala.

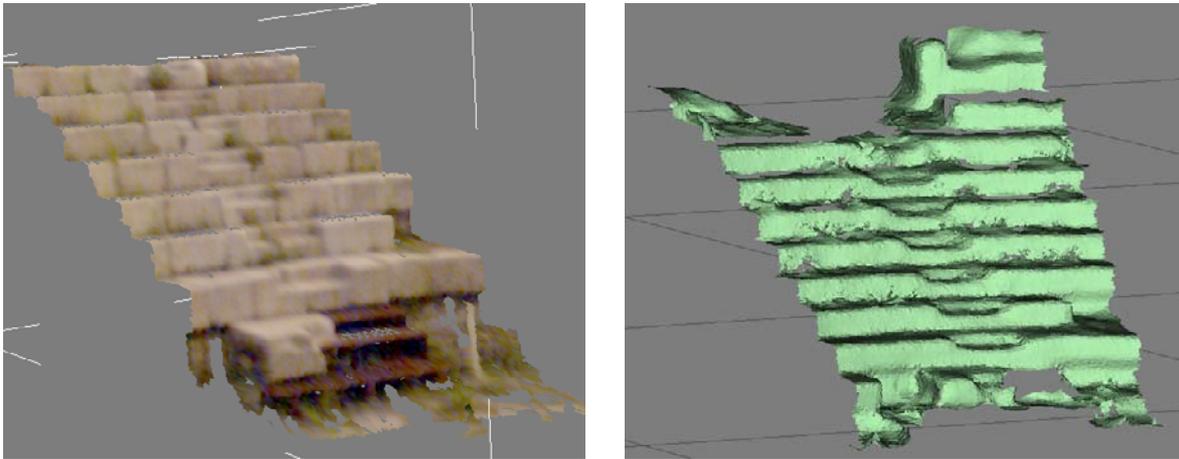


Figure 8 e 9 – Porzioni del modello texturizzato e di quello monocromatico

Il confronto tra gli scarti rispetto al rilievo topografico dei punti dei modelli, texturizzato e non, presenta risultati sostanzialmente analoghi: la distanza media tra rilievo topografico ed entrambi i modelli ottenuti da elaborazione dei dati acquisiti con laser scanner è inferiore al decimetro. Occorre però sottolineare che per alcuni punti non è stato possibile effettuare le misure sul modello ombreggiato, in quanto non è riconoscibile la discontinuità tra gradoni adiacenti. Tale inconveniente sarebbe certo stato risolvibile diminuendo la distanza del sensore e quindi migliorando la definizione del modello, che ne sarebbe però stato anche notevolmente appesantito, acquisendo caratteristiche esuberanti rispetto alle finalità che ci si era proposti.

Con successive elaborazioni del modello tridimensionale prodotto sono state ricavate una serie di sezioni orizzontali, successivamente sovrapposte alla rappresentazione della pianta con vestizione archeologica. Si è così potuto confermare non solo la validità metrica del rilievo effettuato (tramite il confronto con il rilievo preesistente), ma anche le potenzialità e la flessibilità delle possibili rappresentazioni ottenibili a partire da un modello di questo tipo.

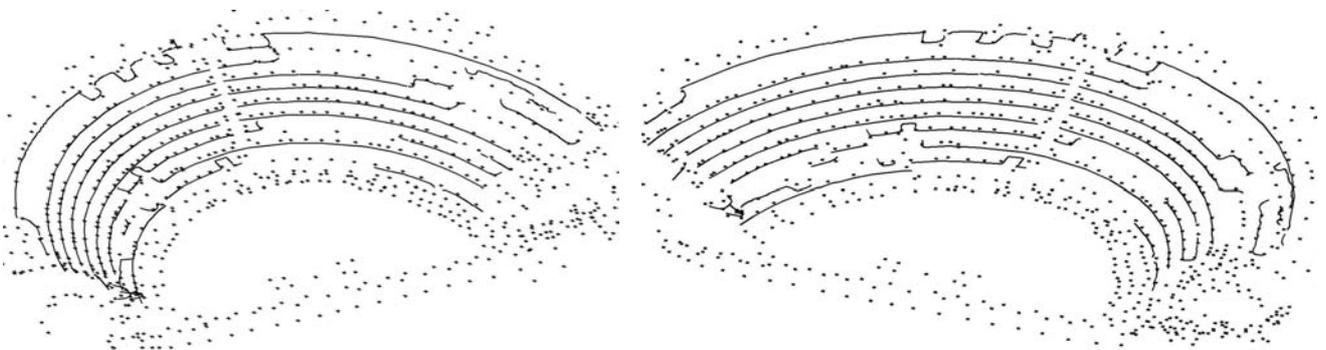


Figure 10 e 11 – Viste assonometriche delle sezioni orizzontali ricavate dal modello e dei punti misurati per via celerimetrica

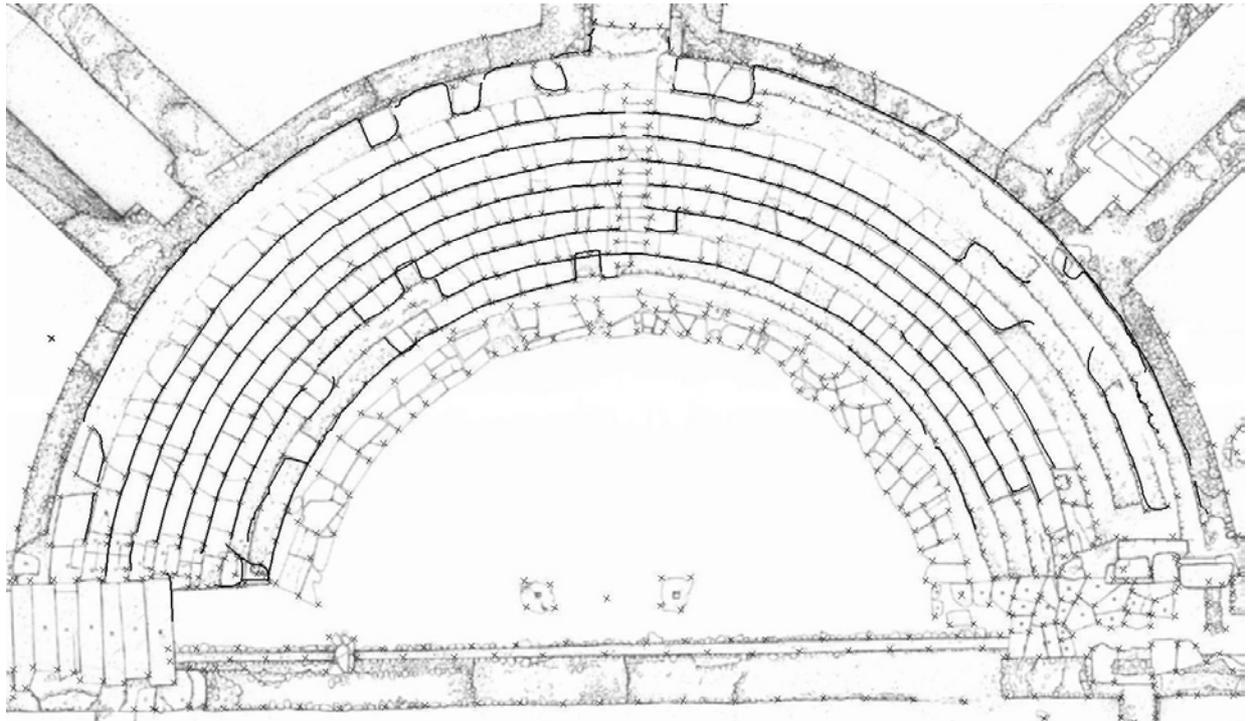


Figura 12 – Pianta del teatro con sovrapposizione della rappresentazione "archeologica" e delle sezioni del modello

Riferimenti bibliografici

- Astori B., Bezoari G., De Bernardi M. L., Guzzetti F., Mataloni G. (2002), "Un esperimento di rilievo archeologico con rappresentazione multiscala", *Rivista dell'agenzia del Territorio*
- Boehler W., Heinz G., Merbs A., Siebold M. (2001), "3D scanning software: an introduction", *Atti del XVIII CIPA Symposium*
- Chiabrando R., Brusi B., Garnero G. (2000), "GIS as an instrument for historical territorial analysis and its sustainable development management. A methodological application in the historical centre of Aosta", *Atti del convegno Histocity Historical cities sustainable development*
- Colombo L., Marana B. (2001), "La visualizzazione tridimensionale del costruito: tecnologie a confronto", *Rivista dell'agenzia del Territorio*, 3
- Franc M. (2002), "Methods for Polygonal Mesh Simplification", *Technical Report No. DCSE/TR-2002-01*, disponibile in <http://herakles.zcu.cz/~marty/html/rig/mpms.html>
- Lemmens M., van den Heuvel F. (2001), "3D Close range Laser Mapping Systems", *GIM International*, 1
- Menci L. D., Cabrucci A. (2001), "Fotogrammetria digitale e scansione laser, similitudini e differenze: la nostra esperienza", *Atti Congresso ASITA*

Riferimenti relativi ai software utilizzati:

<http://riegl.com>

<http://rapidform.com>

<http://www.paraform.com>

<http://aliaswawefront.com>

<http://www.geomagic.com>

<http://www.kinetix.com>