

INTEGRAZIONE DI TECNICHE DI RILEVAMENTO PER IL CONTROLLO DI STABILITÀ DI UNA STRUTTURA STORICA

U. Coppa^a, A. Guarnieri^b, F. Pirotti^b, A. Vettore^b

^aOsservatorio Vesuviano – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Napoli
coppa@ov.ingv.it

^bCIRGEO – Centro Interdipartimentale di Ricerca di Cartografia, Fotogrammetria, Telerilevamento e SIT.
Università di Padova, Viale dell'Università 16, 35020 Legnaro (PD)
e-mail: cirgeo@unipd.it

KEY WORDS: Laser Scanner, modellazione 3D, Analisi Elementi Finiti, controllo stabilità, Beni Culturali

RIASSUNTO

Negli anni recenti, la possibilità offerta dal laser scanner terrestre di acquisire grandi quantità di dati in tempi relativamente brevi, con un grado di precisione e dettaglio elevati, ha spinto l'interesse di topografi, ingegneri, architetti e archeologi a considerare il laser a scansione come uno strumento di rilevamento fondamentale per la modellazione 3D di oggetti e ambienti facenti parte del Patrimonio Culturale di una nazione. Prova di tale fenomeno è costituito dall'ampia varietà di oggetti che sino ad oggi sono stati sottoposti a scansione: dal piccolo pezzo di ceramica alla statua di marmo, dall'edificio storico ad un intero sito archeologico. D'altra parte, nel panorama dei possibili impieghi del laser a scansione, la sua applicazione per il controllo di stabilità di una struttura o edificio di interesse storico appare tutt'ora un campo di ricerca poco indagato. Al fine di approfondire questa tematica di ricerca, è stato attivato un progetto triennale volto a verificare la possibilità di utilizzare in modo integrato una molteplicità di tecniche di rilevamento per il controllo della stabilità di una struttura storica caratterizzata da una geometria complessa. In particolare, tale progetto prevede di utilizzare strumentazione laser scanner terrestre, stazione totale, flessimetri, fotogrammetria e termografia per effettuare una serie di rilievi a cadenza semestrale del Teatro Anatomico dell'Università di Padova. Lo scopo del progetto in questione è quello di verificare la stabilità nel tempo di questo tipo di struttura, considerando in particolare gli effetti del decadimento organico delle parti in legno. In questa nota vengono quindi presentati i risultati ottenuti finora, ponendo particolare attenzione ai problemi e difficoltà insorte nel rilievo laser scanner e modellazione 3D di una struttura di interesse storico e culturale caratterizzata da una geometria inusuale e alquanto complessa.

ABSTRACT

The chance provided by terrestrial laser scanners to achieve, in short time, very dense, accurate and detailed 3D data drew in recent years the interest of surveyors, engineers, architects and archaeologists towards the laser scanning technique as an invaluable surveying mean for 3D modeling of sites and artifacts of cultural heritage. A wide variety of objects, e.g., small pieces of pottery, statues, buildings, and large areas of archaeological sites, have been scanned and modeled for various purposes like preservation, reconstruction, study, and museum exhibitions. However, the use of TLS systems for stability control is still a research field not much investigated. In the view of insight investigation on this topic, a three-years project has been established in order to evaluate the use of multiple surveying techniques for the stability control of a complex historical structure. To this aim, terrestrial laser scanning (TLS), total station (TS), deflectometers, photogrammetry and thermography are being employed to perform on a 6 month basis a set of surveys of the Anatomy Theatre, one of the oldest, most important and best-known historical "medical" buildings. Located inside the *Palazzo del Bo'*, the building seat of the University of Padua, Italy. The main goal of this work is to verify the stability over the time of this kind of structure, given the inherent organic decay of the wooden parts.

In this paper we present the results obtained from the repeated surveys and highlight issues and difficulties related to the laser scanning of an unusual geometry such as the one provided by the Anatomy Theatre of the University of Padua.

1. INTRODUZIONE

La richiesta di rilievi ad alta definizione nell'ambito di progetti relativi al settore dei Beni Culturali rappresenta uno dei principali fattori che ha favorito l'impiego della tecnologia laser a scansione. Come noto, misurando milioni di punti in un tempo relativamente breve, i laser scanner terrestri (TLS) consentono di ottenere, dalle nuvole di punti acquisite, modelli 3D completi e molto dettagliati di oggetti reali. Negli anni recenti, questa caratteristica ha spinto l'interesse di topografi, ingegneri, architetti e archeologi a considerare il laser a scansione come uno strumento di rilevamento fondamentale per la modellazione 3D di oggetti e ambienti facenti parte del Patrimonio Culturale di una nazione. Prova di tale fenomeno è costituito dall'ampia varietà di oggetti che sino ad oggi sono stati sottoposti a scansione: dal piccolo pezzo di ceramica alla statua di marmo, dall'edificio storico ad un intero sito archeologico. I corrispondenti modelli 3D sono stati utilizzati per differenti finalità, quali ad esempio: conservazione in appositi archivi informatici, interventi di restauro, studio dei materiali componenti, studio della funzione storica dell'oggetto o struttura rilevata, mostre in musei virtuali. D'altra parte, nel panorama dei possibili impieghi del laser a scansione, la sua applicazione per il controllo di stabilità di una struttura o edificio di interesse storico appare tutt'ora un campo di ricerca poco indagato.

Al fine di approfondire questa tematica di ricerca, è stato attivato un progetto di ricerca volto a verificare la possibilità di utilizzare in modo integrato una molteplicità di tecniche di rilevamento per il controllo della stabilità di una struttura storica caratterizzata da una geometria complessa. In particolare, tale progetto prevede di effettuare una serie di rilievi a cadenza annuale mediante strumentazione laser scanner terrestre, stazione totale, flessimetri, fotogrammetria e termografia. Come oggetto del rilievo è stato scelto il Teatro Anatomico dell'Università di Padova, edificato nel 1594 come prima struttura permanente del suo genere al mondo, in sostituzione dei "teatri" temporanei che all'epoca venivano approntati per le lezioni di anatomia. Lo scopo del progetto in questione è quello di verificare la stabilità nel tempo di questo tipo di struttura, considerando in particolare gli effetti del decadimento organico delle parti in legno.

Fino ad ora sono stati eseguiti tre rilievi consecutivi del Teatro Anatomico mediante laser scanner Leica HDS 3000 e stazione totale Leica reflectorless. Durante la prima campagna di misura il Teatro è stato rilevato completamente in modo da derivarne un modello 3D utilizzabile per condurre un'analisi strutturale agli Elementi Finiti; nei successivi rilievi, finalizzati al controllo di stabilità, è stata rilevata solamente una porzione della struttura, quella ritenuta maggiormente suscettibile di deformazioni, data l'impossibilità di posizionare la strumentazione in una zona totalmente stabile, esternamente alla struttura da rilevare.

Inoltre, al fine di valutare l'entità di eventuali danni o indebolimenti subiti dalle parti in legno a causa di variazioni di temperatura, umidità o presenza di termiti, è stato inoltre pianificato di eseguire una serie di rilievi termografici su alcune porzioni della struttura.

La presente nota è strutturata nel modo seguente. Nella sezione 2 viene fornita una breve descrizione del Teatro Anatomico, mentre nella successiva sezione 3 viene descritta la procedura di elaborazione dati adottata per produrre un modello 3D utilizzabile per condurre l'analisi agli elementi finiti. Nella sezione 4 vengono presentati i risultati finora ottenuti per quanto riguarda il controllo di stabilità, mentre i risultati relativi all'analisi agli elementi finiti sono riportati nella sezione 5. Infine, nella sezione 6 vengono richiamati brevemente i vantaggi dell'impiego della termografia su una struttura prettamente lignea, quale il Teatro Anatomico, e le principali caratteristiche della camera termica che verrà utilizzata in futuro per il rilievo termografico della struttura, mentre l'ultima sezione è dedicata alle conclusioni del lavoro in oggetto.

2. IL TEATRO ANATOMICO

Il Teatro Anatomico è certamente una delle più antiche, più importanti e meglio conosciute strutture storiche finalizzate ad un utilizzo di tipo "medico". Eretto nel 1594, il Teatro ha rappresentato una delle prime strutture di tipo permanente del suo tipo in sostituzione dei "teatri" temporanei che venivano installati all'epoca quando necessario. Ispirato alle forme del Colosseo e dell'Arena di Verona, consentiva agli spettatori, disposti lungo anelli concentrici, di seguire le lezioni di anatomia da una posizione sopraelevata. La forma particolare della struttura richiama quella di un cono invertito inserito all'interno di un cilindro, entrambi con sezioni trasverse di tipo ellittico, con una suddivisione secondo 6 livelli all'interno di ognuno dei quali è presente uno stretto passaggio di circa 35-40cm lungo i quali gli spettatori potevano disporsi restando in piedi (figure 1 e 2). I livelli sono delimitati verticalmente da un parapetto di ca. 1m di altezza, costituito da elementi in noce intagliati e sagomati sui quali poggia lo scorrimento.

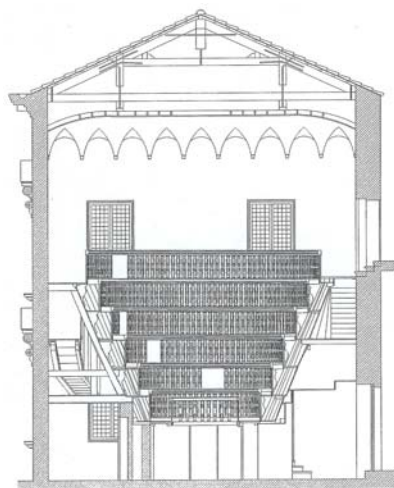


Figura 1: Sezione longitudinale del Teatro Anatomico.



Figura 2: Vista dall'alto della struttura.

L'accesso ai vari livelli avviene tramite scale in pietra e legno, poste lateralmente alla struttura conica (figura 3). Al centro del pavimento del primo livello è presente una larga apertura attraverso la quale il tavolo settorio veniva sollevato e abbassato rispetto al piano sottostante. In questo livello inferiore gli attendenti effettuavano i preparativi per la lezione di anatomia senza dover necessariamente accedere al primo livello (figura 4). Nonostante il Teatro sia stato utilizzato per tre secoli, esso risultò tutt'ora ben conservato e sostanzialmente nel suo stato originale se si eccettuano alcune modifiche apportate nel corso del 18° secolo.

Il Teatro Anatomico è stato edificato all'interno di una stanza di forma trapezoidale utilizzando come unità di misura per il suo dimensionamento il cosiddetto "piede padovano", corrispondente a circa 36 cm. In base a tale riferimento la stanza misura 24 per 28 piedi con un'altezza stimata di 12m, al centro della stanza. La larghezza degli accessi ai vari livelli risulta essere pari a 2 piedi con

un'altezza di 5, la larghezza minima tra le pareti della stanza ed il parapetto del livello più alto è pari a 3 piedi in direzione Est-Ovest e di 2 piedi in direzione Nord-Sud (figura 5a). Dal punto di vista geometrico, il primo livello costituisce l'elemento più interessante della struttura: esso mostra infatti una forma ellittica con asse maggiore di 10 piedi, i cui fuochi sembrano formare un triangolo equilatero rispetto all'asse minore. Spostandosi gradualmente verso l'alto, i successivi livelli presentano anch'essi una geometria ellittica i cui fuochi però non risultano localizzati in posizioni coincidenti, bensì tendono ad avvicinarsi creando così una forma più centralizzata (figura 5b).

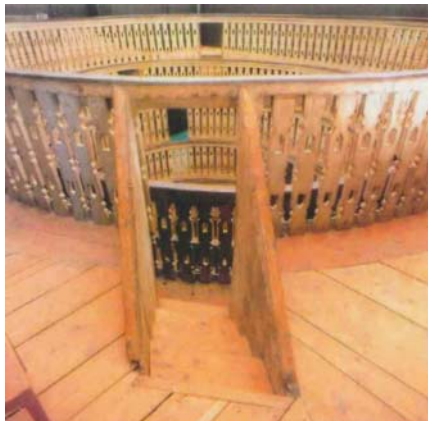


Figura 3: Entrata al 6° livello.

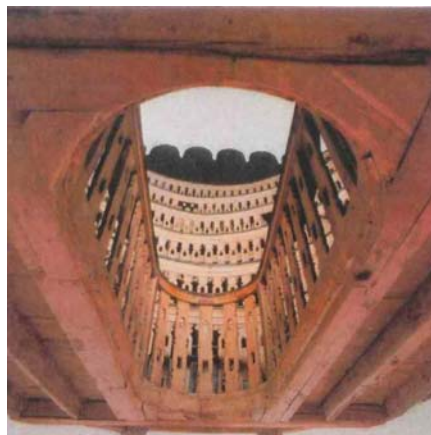


Figura 4: Vista del Teatro dall'apertura per il tavolo settorio.

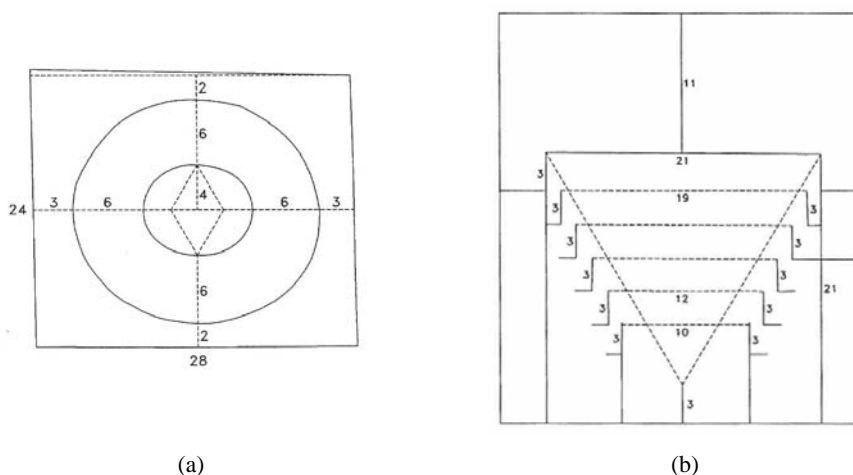


Figura 5: Schema delle dimensioni in piedi Padovani della sezione trasversa (a) e longitudinale (b).

3. ACQUISIZIONE DATI E MODELLAZIONE

Tutti i dati utilizzati per la modellazione 3D e per il controllo di stabilità del Teatro Anatomico sono stati acquisiti mediante laser scanner terrestre Leica HDS 3000. Come noto, tale sistema di scansione consente di operare in un ampio campo di vista (360° H x 270° V), garantendo al tempo stesso buone prestazioni in termini di collimazione del fascio laser e di precisione delle misure (entrambe ≤ 6 mm @ 50 m). Nel corso dei rilievi effettuati finora sono state adottate differenti strategie di acquisizione. Per quanto riguarda la produzione di un modello 3D su cui basare la successiva analisi agli elementi finiti, l'intera struttura è stata rilevata adottando una risoluzione spaziale di 1 cm per gli elementi lignei, mentre target bianchi e neri, non retroriflettenti, sono stati misurati con una risoluzione di 2 mm (figura 6). L'impiego di mire artificiali si è reso necessario onde evitare possibili errori di selezione dei punti omologhi nel corso della registrazione delle scansioni, dato l'elevato grado di similarità presente tra esse. Complessivamente sono state acquisite 7 scansioni per un totale di circa 25.850.000 nell'arco di due giorni di lavoro. In questa prima fase del progetto la maggior parte del tempo è stata spesa per spostare il laser tra le varie stazioni di presa, operazione rallentata e resa difficile dalle ristrette dimensioni dei passaggi compresi tra i vari livelli.

I successivi rilievi sono stati invece eseguiti solamente per acquisire dati utili al controllo della stabilità. A causa della complessità geometrica del Teatro Anatomico e soprattutto data l'impossibilità di posizionare la strumentazione laser all'esterno del Teatro medesimo in zona ritenuta totalmente stabile, le misure hanno riguardato solo una porzione specifica della struttura, quella ritenuta più suscettibile di subire gli effetti di eventuali deformazioni. In tale zona 10 target retroriflettenti sono stati rilevati mediante la

stazione totale reflectorless: le misure ottenute sono state successivamente impiegate per valutare, tramite confronto sugli stessi punti, la capacità del laser scanner di misurare eventuali spostamenti verticali della struttura.

1.1. Elaborazione dati

Le scansioni acquisite sono state registrate in Cyclone adottando la classica procedura a due passi, consistente in una fase di pre-allineamento basata sulla selezione manuale dei target omologhi, seguita dalla fase di registrazione globale, basata sull'algoritmo ICP (Besl et al., 1992; Chen et al., 1992; Bergevin et al., 1996). Per quanto riguarda il pre-allineamento sono state utilizzate le scansioni laser renderizzate in scala di grigio sulla base del dato di Intensità in modo da individuare più facilmente la posizione dei target all'interno delle nuvole di punti (figura 6). Come evidenziato in figura 7, l'RMS medio dell'allineamento globale è risultato pari a circa 7 mm, valore abbastanza buono se si considera che la precisione di misura sul singolo punto dichiarata da Leica per l'HDS 3000 è di 6 mm. Un esempio del modello 3D completamente allineato è mostrato in figura 8: la colorazione dei punti è derivata dall'informazione RGB fornita dalla camera CCD montata internamente al laser stesso.

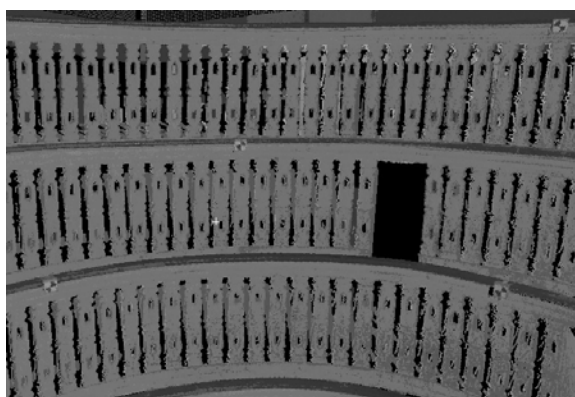


Figura 6: Porzione di scansione renderizzata sulla base del dato di Intensità con alcuni target B&W in primo piano.

ScanWorld	ScanWorld	Status	Weight	Error Vector
Scw_01	Scw_06	On	1.0000	aligned [0.007 m]
Scw_01	Scw_02	On	1.0000	aligned [0.008 m]
Scw_01	Scw_03	On	1.0000	aligned [0.008 m]
Scw_01	Scw_04	On	1.0000	aligned [0.007 m]
Scw_02	Scw_05	On	1.0000	aligned [0.005 m]
Scw_02	Scw_07	On	1.0000	aligned [0.005 m]
Scw_02	Scw_03	On	1.0000	aligned [0.005 m]
Scw_03	Scw_05	On	1.0000	aligned [0.005 m]
Scw_04	Scw_03	On	1.0000	aligned [0.009 m]
Scw_05	Scw_01	On	1.0000	aligned [0.011 m]
Scw_05	Scw_04	On	1.0000	aligned [0.007 m]
Scw_05	Scw_06	On	1.0000	aligned [0.010 m]
Scw_06	Scw_04	On	1.0000	aligned [0.007 m]
Scw_07	Scw_03	On	1.0000	aligned [0.005 m]
Scw_07	Scw_04	On	1.0000	aligned [0.007 m]

Figura 7: Risultati della registrazione delle scansioni.

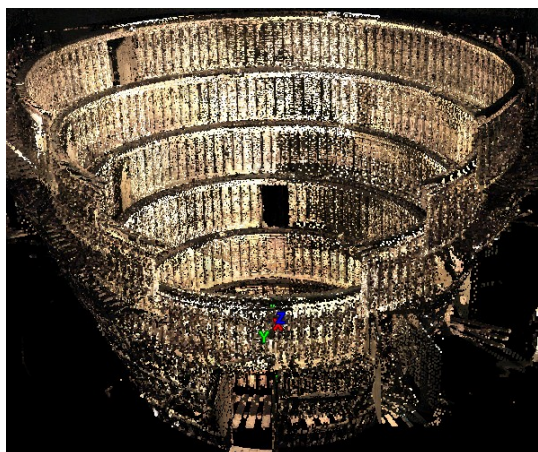


Figura 8: Vista laterale del modello 3D allineato.

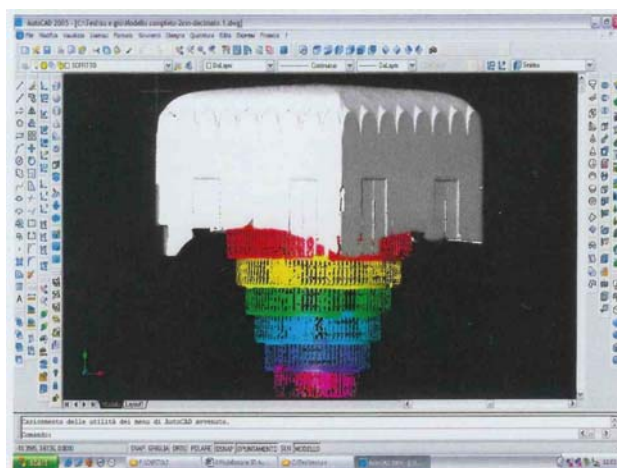


Figura 9: Segmentazione del modello triangolato.

1.2. Texturizzazione e semplificazione

Successivamente alla registrazione, la nuvola di punti è stata segmentata in due blocchi principali, l'uno contenente la sola porzione di soffitto, l'altro i 6 livelli (figura 9). Ciascun blocco è stato quindi sottoposto ad una procedura di decimazione utilizzando differenti valori del passo di campionamento e precisamente: 5 cm per il soffitto e 2 cm per i livelli. Tali valori sono stati individuati dopo vari tentativi finalizzati ad ottenere un modello sufficientemente semplificato tale da garantire comunque il grado di dettaglio necessario per la successiva fase di creazione di un modello texturizzato finalizzato a presentazioni multimediali. A tal fine si è proceduto a selezionare alcuni elementi del modello triangolato ritenuti rappresentativi dell'intera struttura rilevata, ovvero: una balaustra per ciascun livello, gli scorrimento e porzioni della pavimentazione di ciascun livello. Ciascuno di tali elementi è stato rimodellato

separatamente in AutoCAD in modo da derivarne una rappresentazione ulteriormente semplificata che è stata poi impiegata come replica per sostituire elementi analoghi all'interno del modello 3D. Sostanzialmente al profilo di ciascun elemento campione, estratto manualmente dal modello laser (figura 10), è stata applicata un'operazione di estrusione utilizzando per la profondità l'informazione desunta dal modello laser originale (Guarnieri et al., 2006). Per poter eseguire queste procedure con una certa accuratezza era necessario poter disporre di un modello 3D sufficientemente dettagliato ancorchè non eccessivamente denso: da tale considerazione è nata l'esigenza di operare una prima semplificazione del modello laser come descritto in precedenza. Il prodotto così ottenuto è stato successivamente importato in ambiente 3D Studio Max dove si è proceduto alla sua texturizzazione utilizzando sia librerie di materiali già disponibili in tale software sia informazioni più specifiche sulle caratteristiche degli elementi lignei, ottenendo come risultato finale quanto mostrato in figura 11.

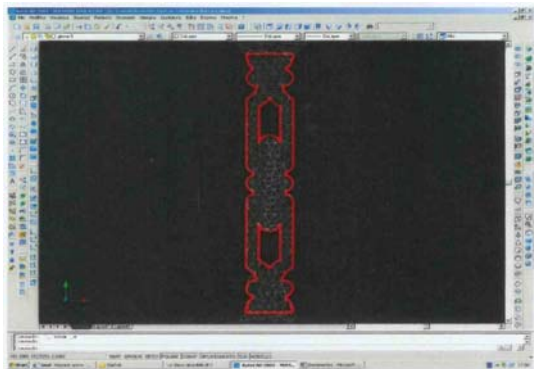


Figura 10: Esempio di estrazione di un profilo di una balaustra campione.

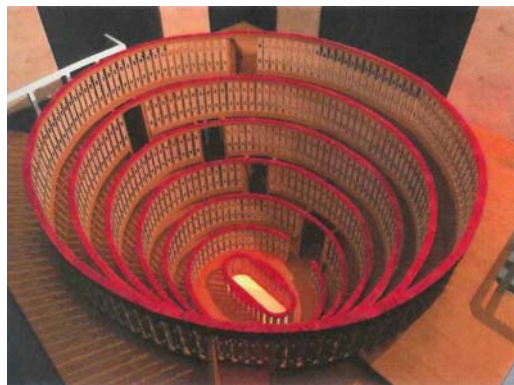


Figura 11: Vista del modello 3D renderizzato.

4. CONTROLLO DI STABILITA'

Al fine di verificare se la strumentazione laser scanner terrestre potesse essere utilizzata per eseguire controlli di stabilità di strutture antiche di interesse storico, culturale e architettonico, si è proceduto ad eseguire ulteriori rilievi misti, TLS stazione totale su una porzione dei sei livelli. Per determinare eventuali scostamenti in direzione verticale, una serie di target retroriflettenti quadrati, di dimensioni 3" x 3", sono stati misurati con entrambi gli strumenti. In particolare 10 di essi sono stati posizionati lungo i corrimano dei vari livelli mentre altri 6 sono stati affissi alle pareti del Teatro, considerate stabili, ed utilizzati come riferimenti per orientare i rilievi successivi. Per valutare la presenza di eventuali scostamenti lungo la direzione verticale, sono stati confrontati tra loro i valori della coordinata Z del centro di ciascun target, ottenuti in corrispondenza di rilievi consecutivi. Allo scopo di poter disporre di misure laser di precisione in qualche modo confrontabile con quelle ottenute dalla stazione totale, le coordinate dei suddetti centri sono state calcolate applicando il metodo descritto in (Valanis and Tsakiri, 2004). Inizialmente per ogni target sono state acquisite 4 scansioni ad alta risoluzione spaziale (2 mm), quindi le corrispondenti nuvole di punti sono state elaborate insieme suddividendo i dati in tre classi in base ai valori dell'Intensità riflessa: alta, media e bassa riflettività. Le coordinate dei centri dei vari target sono state infine ottenute come baricentro delle due classi caratterizzate dai più alti valori medi di riflettività. Come dimostrato in (Valanis and Tsakiri, 2004) questo approccio consente di misurare le suddette coordinate con una precisione molto maggiore (0.1 mm) rispetto a quella ottenibile utilizzando la funzione di identificazione automatica fornita dal software Cyclone (1.5 mm).

Essendo interessati agli scostamenti tra le posizioni rilevate per ognuno dei 10 target nel corso di successive scansioni, le misure acquisite dal laser scanner e dalla stazione totale non sono state riportate in un comune sistema di riferimento, bensì le differenze tra le coordinate Z delle misure laser sono state confrontate con le corrispondenti ottenute dalla stazione totale, assumendo come valore di riferimento (scostamento nullo) le posizioni dei target dopo il secondo rilievo. Tale confronto è stato reso possibile considerando che entrambi gli strumenti sono stati adeguatamente livellati ad ogni sessione di scansione, rendendo così paralleli tra loro i rispettivi assi Z. I risultati relativi agli scostamenti calcolati per le tre sessioni di misura finora eseguite sono mostrati nelle tabelle 1 e 2.

Come si può notare le differenze tra gli scostamenti misurati con il laser scanner Leica HDS 3000 e quelli ottenuti dalla stazione totale sono nell'ordine di 0.2 – 0.4 mm, ovvero dello stesso ordine di grandezza con cui sono state calcolate le coordinate X,Y,Z dei centri dei target a partire dalle misure laser.

Target ID	Scostamenti verticali (mm)		Delta (mm) (TLS - TS)
	HDS 3000	Stazione Totale	
1	-3.6	-3.4	-0.2
2	-3.0	-2.6	-0.4
3	0.3	0.1	0.2
4	-3.0	-3.2	0.2
5	0.7	0.3	0.4
6	0.2	-0.1	0.3
7	-0.1	-0.3	0.2
8	-0.4	-0.1	0.3
9	0.4	0.2	0.2
10	-0.2	0.1	-0.3

Tabella 1: Confronto tra gli scostamenti verticali derivati dalle misure laser e stazione totale tra i rilievi 2 e 3.

Target ID	Scostamenti verticali (mm)		Delta (mm) (TLS - TS)
	HDS 3000	Stazione Totale	
1	-3.6	-3.3	-0.3
2	-3.1	-2.65	-0.45
3	0.3	0.16	0.14
4	-3.2	-3.2	0.0
5	0.6	0.3	0.3
6	0.2	-0.1	0.3
7	-0.1	-0.2	0.1
8	-0.3	-0.1	0.2
9	0.4	0.25	0.15
10	-0.2	0.1	-0.3

Tabella 2: Confronto tra gli scostamenti verticali derivati dalle misure laser scanner e stazione totale tra i rilievi 3 e 4.

5. ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI

Anche per quanto riguarda la generazione di un modello 3D del Teatro Anatomico atto ad essere impiegato come base dati su cui condurre un'analisi FEM, è stato necessario operare un'ulteriore semplificazione, decimando il modello 3D ottenuto precedentemente con un passo di campionamento pari a 5 cm. Il modello è stato quindi triangolato in Geomagic derivando una mesh di circa 117000 triangoli, la quale è stata successivamente importata in formato dxf in Straus, software realizzato da un'azienda italiana (HSH) appositamente per condurre analisi strutturali. In tale ambiente alle superfici dei vari triangoli (*plates*) componenti la mesh sono state assegnate le medesime proprietà fisico-meccaniche, ovvero la mesh è stata assimilata ad un'unica struttura in noce, continua ed omogenea caratterizzata da uno spessore di 3 cm. La struttura è stata quindi considerata vincolata sia al pavimento sottostante al primo livello sia alle pareti circostanti, rimuovendo i gradi di libertà sia dei nodi (vertici dei triangoli) posti nella parte inferiore del modello sia dei nodi appartenenti al pavimento del livello più elevato, come mostrato in figura 11 (punti in colore viola). Infine si è supposto che a ciascun *plate* fosse applicata una forza di 400 kg/m^2 , agente lungo l'asse Z, in modo da simulare l'effetto di una massa compatta di persone distribuita lungo i sei livelli (figura 14). Si può dimostrare che gli effetti di un tale carico si sviluppano soprattutto sul pavimento di ogni livelli, mentre gli effetti su altre parti della struttura sono trascurabili.

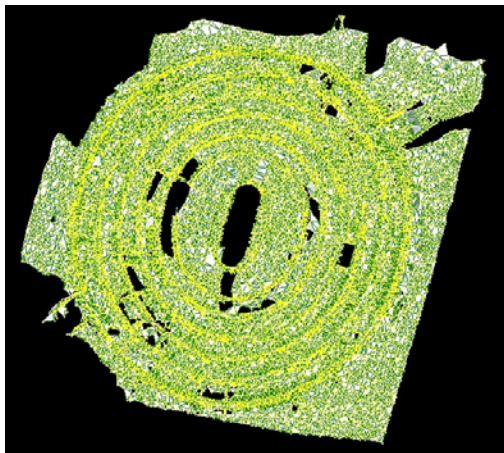


Figura 12: Suddivisione del modello 3D in nodi e *plates* in Straus.

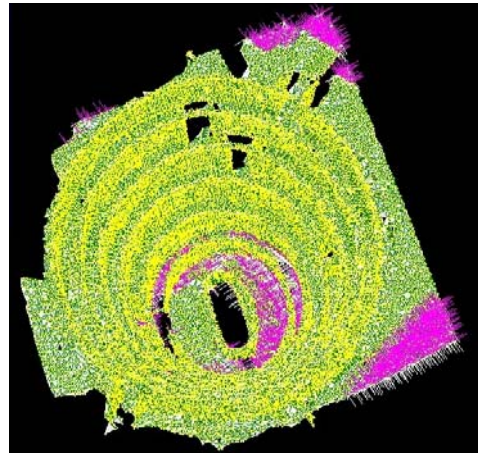


Figura 13: Assegnazione dei gdl, punti vincolati in viola.

In accordo con quanto stabilito dalla vigente legislazione italiana in materia di analisi strutturale, sono state condotte due diverse tipologie di analisi:

1. Statica, dalla quale sono stati derivati grafici delle tensioni e dei momenti applicati ai vari *plates*, come risultato dell'esecuzione in cascata delle seguenti tre procedure:
 - Analisi statica lineare;
 - Analisi lineare "Buckling";
 - Analisi statica non lineare.
2. Dinamica, attraverso la simulazione di un sisma applicato alla struttura in oggetto. A tal fine, benchè la città di Padova appartenga alla zona di sismicità di livello 4 (bassa probabilità di terremoti) si è supposto che il modello del Teatro Anatomico fosse sottoposto agli effetti di un sisma tipico di zone a livello 3.

I risultati ottenuti dall'analisi statica sono mostrati rispettivamente nelle figure 15, 16 e 17, mentre per quanto riguarda l'analisi dinamica i risultati vengono forniti da Straus sottoforma di video e pertanto non sono riportati in questa nota.

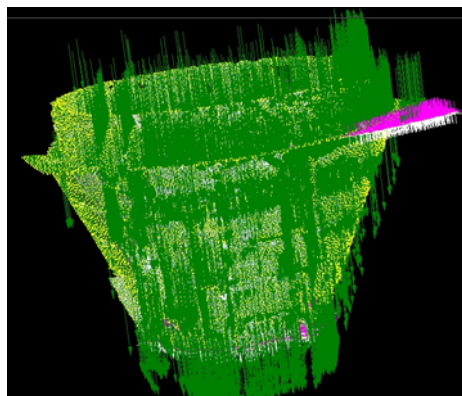


Figura 14: Applicazione della forza ai singoli plates lungo Z.



Figura 15: Risultato dell'analisi statica lineare.

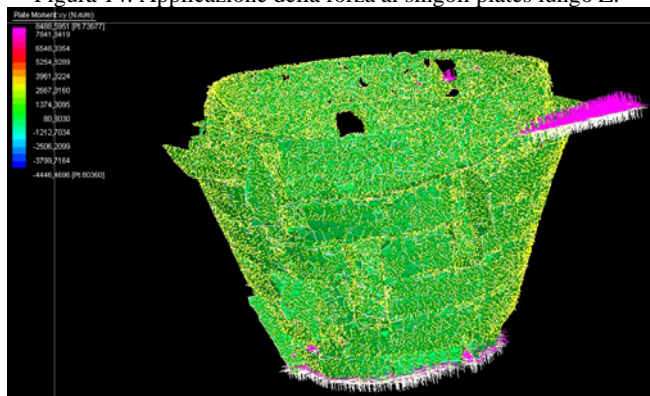


Figura 16: Risultato dell'analisi "Buckling".

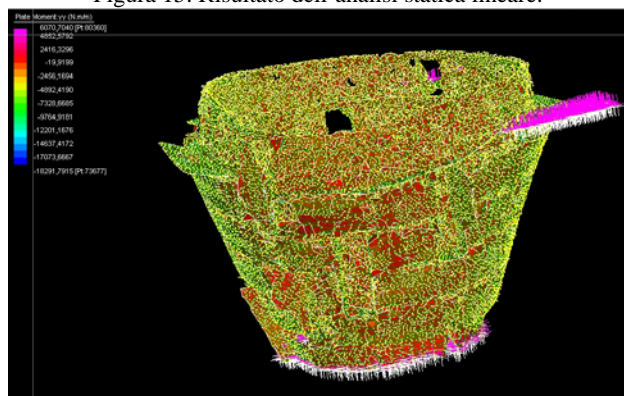


Figura 17: Risultato dell'analisi statica non lineare.

6. SVILUPPI FUTURI

Come sottolineato nell'introduzione, il progetto di ricerca in corso prevede di studiare il Teatro Anatomico utilizzando una combinazione di tecniche di rilievo, tra cui anche la termografia. In particolare, al fine di poter individuare eventuali danni o indebolimenti incorsi nelle parti in legno a causa di variazioni di temperatura, umidità o dovuti alla presenza di termiti, il progetto prevede l'esecuzione di una serie di misure con termocamera.

E' noto che la termografia all'infrarosso misura la radiazione termica emessa da un oggetto nella banda IR dello spettro elettromagnetico e restituisce l'immagine della superficie dell'oggetto investigato attraverso una scala di colori o di grigi, in funzione della scala di temperatura. La termografia, in generale, rappresenta sia un metodo di analisi non distruttivo sia una tecnica di indagine che viene applicata a materiali e strutture allo scopo di valutare il comportamento fisico-chimico dei trattamenti di conservazione, per rilevare difetti nascosti e disomogeneità, per monitorare la presenza di strutture nascoste, analizzare gli effetti della corrosione e controllare la qualità delle saldature e degli elementi di rinforzo. L'individuazione di strutture nascoste, il controllo dello stato di conservazione di affreschi, la mappatura di crepe e fessurazioni e lo studio dei flussi d'aria costituiscono alcune delle più importanti applicazioni per coloro che operano nel campo della conservazione e del restauro dei Beni Culturali. La moderna strumentazione IR è in grado di individuare differenze di temperatura di 0.1°C o inferiori. Questa elevata sensibilità consente di apprezzare anche tenui fenomeni termici che si rivelano solamente sottoforma di lievi gradienti di temperatura.

In riferimento alle strutture in legno, una particolare ed utile applicazione della termografia IR riguarda l'individuazione e l'analisi dei danni causati dalle termiti. Infatti una termocamera è in grado di rilevare il calore generato dall'attività concentrata delle termiti all'interno dei materiali lignei. D'altra parte questo tipo di indagine non sempre ha successo, in quanto se l'infestazione non è sufficientemente concentrata da alterare la temperatura superficiale del materiale sottoposto a scansione, l'area indagata non apparirà più calda sulla termocamera. Inoltre se al momento dell'ispezione non è presente alcuna attività delle termiti, poco o nulla può essere rivelato con la termografia IR.

In considerazione di quanto esposto, si prevede di utilizzare una termocamera ThermoCAM B2 (FLYR Systems), mostrata in figura 15, per condurre una serie di rilievi termografici su alcune porzioni dei livelli secondo le finalità espresse all'inizio di questa sezione. Lo strumento è costituito da un rilevatore IR di tipo FPA (Focal Plane Array), dotato di microbolometro da 160 x 120 pixels, con campo di vista di 19° x 14° ed una distanza focale minima di 0.3m (con ottica da 17 mm). L'intervallo di temperature di esercizio è compreso tra -20°C e +100°C con un'accuratezza di ±2°C (±2%) ed una ripetibilità ±1°C (±1%).



Figure 18: La termocamera IR ThermoCAM B2.

CONCLUSIONI

In questa nota sono stati presentati alcuni dei risultati finora ottenuti nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato all'impiego integrato di diverse tecniche di rilevamento applicate al Teatro Anatomico di Padova. Al momento attuale sono state condotte 4 sessioni di misura utilizzando sia strumentazione laser scanner terrestre sia stazione totale. A partire dai dati acquisiti è stato realizzato a scopo multimediale un primo modello 3D texturizzato, ottenuto attraverso una procedura a cascata costituita dai seguenti passi: definizione dei profili di alcuni elementi distintivi della struttura, estrusione dei medesimi e replicazione dei componenti così ottenuti in corrispondenza di elementi analoghi del modello. Un secondo modello è stato quindi appositamente prodotto per condurre un'analisi agli elementi finiti, di tipo statico e dinamico. Nel primo caso alla struttura, opportunamente vincolata, è stata applicata una forza distribuita lungo i vari livelli in modo da simulare gli effetti della presenza di una massa compatta di persone, mentre nel secondo caso sono stati valutati gli effetti di un sisma. Una successiva serie di scansioni è stata eseguita su una porzione del Teatro Anatomico sia tramite TLS che stazione totale, rilevando una quindicina di target retroriflettenti disposti lungo la struttura e sulle pareti circostanti. Sulla base delle misure ottenute sono state calcolate le differenze lungo la verticale delle coordinate Z dei centri dei target: il confronto tra i dati laser scanner e quelli derivati dalle misure con stazione totale ha evidenziato che è possibile utilizzare strumentazione TLS per effettuare controlli di stabilità purché si adottino dei metodi di misura dei centri dei target in grado di garantire precisioni elevate dell'ordine del decimo di millimetro.

Il progetto di ricerca è tutt'ora in corso, in particolare si prevede nel prossimo futuro di eseguire una serie di rilievi termografici su alcune porzioni limitate della struttura e di integrare questi dati con quelli laser scanner in modo da poter fornire una descrizione spaziale di eventuali danneggiamenti dovuti a fenomeni rilevabili termograficamente.

BIBLIOGRAFIA

- Besl P. J., McKay N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 4(2): 239–256.
- Bergevin R., Soucy M., Gagnon H. and Laurendeau D. (1996). Towards a general multi-view registration technique. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(5):540–547.
- Chen Y., Medioni G, 1992. Object modelling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, 10(3):145–155.
- Guarnieri A., Remondino F., Vettore A., 2006. Digital photogrammetry and TLS data fusion applied to Cultural Heritage 3D modeling. In *Proc. of ISPRS Comm. V Symposium "Image Engineering and Vision Metrology"*, Dresden, Germany.
- FLYR Systems, <http://www.flirthermography.com> (sito visitato il 28/05/2008)
- Leica Geosystems (2007). The HDS 3000 technical specifications. URL: <http://www.leicageosystems.com>.
- STRAUS, <http://www.hsh.info> (sito visitato il 28/05/2008)
- Tsakiri M., Licht D., Pfeifer N (2006). Terrestrial laser scanning for deformation monitoring, *Proc. of 3rd IAG/12 FIG Symposium*, Baden, Austria.
- Valanis A., Tsakiri M., 2004. Automatic target identification for laser scanners. *Proc. of XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey