

ALLA

TECNICHE INTEGRATE DI RILIEVO A SUPPORTO DELLE ANALISI DEL DEGRADO DELLE PIETRE ORNAMENTALI

L. Bornaz (*), L. Peretti (*), C. Porporato (*), F. Rinaudo(*)

(*) DITAG, Politecnico di Torino, 10129 corso Duca degli Abruzzi, 24, Torino, Italy
Tel. 011.564.7687, 7666, 7687, 7659 - Fax 011.564.7699
(leandro.bornaz, leonardo.peretti, chiara.porporato, fulvio.rinaudo)@polito.it

Riassunto

I sistemi di acquisizione di modelli digitali 3D ad elevata risoluzione nascono in ambito meccanico per il controllo automatico dei manufatti prodotti. Vista la qualità del dato generato da questi sistemi gli stessi sono stati, negli anni successivi, utilizzati anche nel campo del rilievo del patrimonio archeologico e culturale. In questi ambiti, infatti, conoscere con sufficiente precisione la forma di un oggetto, consente non solo lo studio dell'oggetto da un punto di vista archeologico, ma offre anche la possibilità di effettuare una sua eventuale riproduzione o sostituzione.

Gli strumenti in grado di acquisire modelli tridimensionali ad elevata precisione sono molti e si basano su principi di acquisizione anche molto differenti.

Nel presente articolo sono illustrate le prime esperienze di utilizzo in ambito archeologico di un laser considerato di terza generazione, l'HANDYSCAN 3D, recentemente acquistato dal gruppo di ricerca DITAG del Politecnico di Torino. Questo sistema di acquisizione, dal costo decisamente contenuto se confrontato con strumenti aventi caratteristiche analoghe, è di facile utilizzo e non necessita di particolari accorgimenti meccanici o simili per la determinazione di un sistema di riferimento.

Abstract

High resolution 3D survey systems have long existed especially for mechanical applications. Prototyping high resolution instruments have also been developed and used in the Cultural Heritage field in order to create accurate 3D models able to form a strong basis for reproduction for restoration and conservation purposes. Different solutions have been proposed and different measuring principles have been successfully adopted.

The paper describes the HANDYSCAN 3D, a new generation of instruments, recently acquired by the Research Group. It tries to solve both the technical problems, that are due to the stability of the acquisition reference systems during the survey or to the need to have direct access to the object, and the economic problems. In the end, the first applications of the HANDYSCAN 3D in Cultural Heritage documentation are described.

Introduzione

La ricerca e l'impiego di nuove tecnologie e metodologie nel rilievo tridimensionale sono argomenti che suscitano molto interesse nell'ambiente universitario e nelle ditte che si occupano di rilevamento dei beni ambientali, architettonici ed archeologici.

Una tra le più interessanti tecnologie oggi presenti sul mercato è rappresentata dagli strumenti a scansione laser in quanto permettono di ottenere modelli di forma sempre più precisi e completi dell'oggetto. Un esempio di strumento a scansione laser molto interessante è l'HANDYSCAN 3D.

Si tratta di uno strumento considerato di nuova generazione in grado di acquisire modelli di forma di qualsiasi oggetto raggiungendo una precisione nel rilevamento sub-millimetrica.

Questo strumento, immesso sul mercato alla fine del 2005, adotta alcune nuove soluzioni che possono essere utili per superare i limiti dei vecchi sistemi aventi precisione analoga, in particolare riguardanti la natura del dato fornito e la metodologia di acquisizione.

L'HANDYSCAN 3D

L'HANDYSCAN 3D è un sistema di acquisizione di forma ad elevata precisione e risoluzione, prodotto dalla Creaform, centro tecnologico canadese per la *reverse engineering* e le soluzioni 3D di tipo digitale. È stato presentato come il primo dispositivo *hand-scan* auto-posizionato al mondo e per questo motivo considerato uno strumento di terza generazione.

L'idea di base di questo strumento è un sistema fotogrammetrico digitale, ma le soluzioni adottate rappresentano una novità nel campo del rilievo dei beni culturali.

Le prime caratteristiche innovative sono la dimensione ed il peso (circa 1 kg) dell'unità di acquisizione che può quindi essere utilizzata per lungo tempo dallo stesso operatore. Lo strumento è direttamente collegato ad un PC portatile tramite un connettore USB che garantisce all'operatore un ampio raggio d'azione e, di conseguenza, offre la possibilità di rilevare anche oggetti molto complessi.

Un altro aspetto interessante è la possibilità di acquisire oggetti di dimensioni molto differenti: dai piccoli oggetti (per esempio anelli, frammenti, ecc.) agli oggetti molto grandi (per esempio statue, grandi epigrafi, ecc.).

Novità interessante è che l'HANDYSCAN 3D è in grado di utilizzare un sistema di riferimento definito mediante il posizionamento di marker direttamente sull'oggetto.

Ultima caratteristica non meno importante è il costo, comprensivo del PC portatile per la gestione, visualizzazione e la memorizzazione dei dati acquisiti, inferiore anche a quello di alcuni dispositivi a scansione laser in grado di acquisire modelli 3D a precisioni inferiori.



Figura 1 – HANDYSCAN 3D

Il sistema di acquisizione dati

L'unità di acquisizione è formata da due videocamere digitali con posizione, orientamento e focale fissi, da 8 led luminosi (4 per videocamera) e da un generatore di luce laser in grado di proiettare un fascio luminoso a forma di croce.

I led luminosi ed il laser generano fasci luminosi alla stessa frequenza. Gli obiettivi delle due videocamere sono inoltre dotati di particolari filtri che permettono alla sola frequenza della luce laser e dei led luminosi di giungere ai sensori digitali delle videocamere.

Per effettuare l'acquisizione è necessario disporre sull'oggetto delle mire, di forma circolare e con diametro pari a 6 mm, riflettenti la specifica luce dei led. L'inter-distanza media tra le mire è di circa 5 cm, valore vincolato dalla posizione e focale fissa delle due videocamere del sistema.

L'acquisizione dei dati è molto semplice. Lo strumento, essendo dotato di due videocamere a focale fissa, deve essere mantenuto ad una distanza dall'oggetto di circa 25 cm. A tal punto può iniziare l'acquisizione dei dati. I led illuminano alcune delle mire posizionate sull'oggetto (almeno 3) mentre lo strumento di acquisizione ne determina la posizione tridimensionale in un sistema di riferimento locale tramite la stereoscopia ottenuta dalla presenza delle due camere. Il sensore si è così auto-posizionato nel sistema di riferimento locale e l'acquisizione può continuare. Questa prima operazione avviene in tempo reale.

L'acquisizione procede muovendo lentamente lo strumento lungo l'oggetto. Lo spostamento dello stesso deve avvenire in modo tale che vi siano sempre almeno 4 mire illuminate dai led. Man mano che lo strumento si muove nello spazio variano le mire illuminate presenti nel campo visivo dello

strumento. Lo strumento determina la posizione spaziale delle nuove mire che riesce a vedere in funzione delle mire, ancora presenti nel proprio campo visivo, di cui già conosce la posizione. Contemporaneamente il sensore è in grado di determinare la propria posizione rispetto al sistema di riferimento locale. L'operazione descritta è quella chiamata di auto-posizionamento del sensore.

In contemporanea a questa avviene la vera e propria fase di acquisizione. Sull'oggetto è proiettata una luce laser a forma di croce. Mediante le due telecamere ed i classici principi di stereoscopia è determinata, istante per istante, la posizione e la normale di tutti i punti appartenenti al fascio di luce laser incidente la superficie dell'oggetto.

I dati memorizzati dal sistema sono la posizione dei marker e la normale alla superficie degli stessi da una parte e, la posizione e la normale dei punti appartenenti all'oggetto, dall'altra.

Riposizionando il sensore su un'area precedentemente acquisita si provoca semplicemente un aggiunta di dati memorizzati.

E' possibile controllare in tempo reale il progredire dell'acquisizione che viene visualizzata direttamente sul monitor del portatile collegato al sensore.

Prima di iniziare qualsiasi rilevamento con l'HANDYSCAN 3D è necessario calibrare il sistema. In particolare le calibrazioni da effettuare sono due: una geometrica, l'altra radiometrica.

La calibrazione geometrica viene realizzata utilizzando uno specifico piano di controllo di cui lo strumento è corredato (figura 2a). Il piatto di calibrazione serve a ricalcolare l'orientamento relativo delle due camere stereoscopiche.

Viene poi effettuata la calibrazione radiometrica. Il sensore funziona utilizzando fasci luminosi ad una specifica lunghezza d'onda. A seconda infatti del materiale colpito la riflessione dell'impulso luminoso cambia sensibilmente. Il procedimento di calibrazione radiometrica consiste nel regolare l'intensità del fascio laser. Superfici scure come la pietra naturale necessitano di un fascio a potenza maggiore. Un fascio di ridotta potenza verrebbe, infatti, completamente assorbito e non consentirebbe l'acquisizione della forma dell'oggetto.



a)



b)

Figura 2 – Fasi di calibrazione del sensore:

- a) calibrazione geometrica,
- b) calibrazione radiometrica.

La gestione dei dati dati

Come già accennato in precedenza i dati memorizzati dal sistema sono la posizione dei marker, la normale alla loro superficie e la posizione e la normale dei punti appartenenti all'oggetto. Tutti i dati sono memorizzati nella memoria fisica del calcolatore che provvede alla loro gestione ed alla generazione automatica di una superficie continua. Per prima cosa viene definito da parte dell'utente il volume in cui l'oggetto (o una parte di esso) è contenuto e la sua posizione ed orientamento nello spazio rispetto al sistema di riferimento locale del sensore. Questo volume viene quindi suddiviso in *voxel*, che rappresentano un elemento di volume in uno spazio tridimensionale. Il *voxel* può avere dimensioni differenti a seconda del volume scelto ed a seconda della risoluzione impostata. In particolare possono essere utilizzati tre gradi di risoluzione differenti: bassa (il volume è suddiviso in 2,1 *Megavoxel*), media (16,8 *Megavoxel*) o alta (134 *Megavoxel*).

Stabiliti la posizione, l'orientamento e la risoluzione del volume di lavoro, tutti i dati acquisiti (coordinate 3D e normali) sono associati al corrispondente *voxel* a seconda della posizione in cui si trovano all'interno del volume stesso. I *voxel* privi di informazione sono scartati mentre per

ciascuno degli altri si calcolano una tripletta di coordinate ed una normale alla superficie come media dei valori associati al *voxel* stesso.

Dai valori calcolati si procede alla generazione della superficie tridimensionale sottoforma di *mesh*. L'output del procedimento è un formato grafico di interscambio (*,stl - *stereolithography*)

L'utilizzo dell'HandyScan in due casi reali.

Il gruppo di ricerca del DITAG del Politecnico di Torino è la prima istituzione italiana dotata del sistema di acquisizione HANDYSCAN 3D. L'utilizzo del sensore è previsto nel campo della documentazione dei beni culturali, attività sostenuta dal Ministero Italiano per Ricerca in un progetto nazionale (PRIN2004), coordinato a livello nazionale dal prof. Carlo Monti.

Sono due le esperienze di utilizzo finora effettuate: la fontana del Melograno (Castello di Issogne - Regione Autonoma Valle d'Aosta) ed alcuni elementi lapidei danneggiati della cappella del Guarini nel Duomo di Torino, distrutta nel 1997 da un incendio ed ora laboratorio sperimentale di diverse tecniche di restauro.

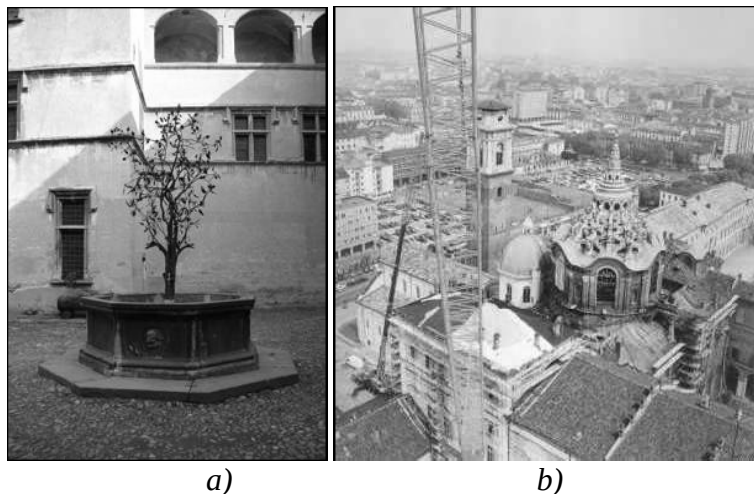


Figura 4 – a) Fontana del melograno, castello di Issogne, b) veduta della cappella del Guarini nel Duomo di Torino.

Il modello 3D della fontana del Melograno

La fontana del Melograno si trova all'interno del castello di Issogne, in Valle d'Aosta. Si tratta di una fontana di notevole pregio costruita verso la metà del 1500 come dono di nozze agli allora proprietari del castello.

Scopo del rilievo è quello di ottenere un modello 3D completo della sola vasca della fontana, ed in particolare, della parte interna della vasca, della quale era richiesto un modello 3D di elevata precisione che consentisse degli studi accurati per la sua futura ristrutturazione. La parte esterna della vasca è stata acquisita ad una precisione inferiore in quanto di minore interesse in questo specifico lavoro. Solo i 4 fregi presenti su quattro delle otto facce esterne della fontana sono stati acquisiti ad elevata precisione perché considerati di notevole pregio ed importanza artistica.

Le operazioni del rilevamento sono state:

- Preparazione della fontana per le successive fasi di acquisizione (posizionamento dei marker per il rilevamento laser e delle mire per le acquisizioni con l'HANDYSCAN 3D per un totale di circa 30 marker e 4000 mire);
- Creazione di una rete topografica di inquadramento costituita da 5 vertici;
- Rilievo topografico dei marker e di parte delle mire posizionate sull'oggetto;
- Rilievo fotogrammetrico delle facciate esterne ed interne della fontana. La macchina fotografica utilizzata è una Rolleiflex 6008 con dorso digitale da 22 Mpixel e obiettivo calibrato a focale fissa di 40 mm;
- Rilievo laser delle pareti esterne con il sensore terrestre Riegl LMS-Z420. Le scansioni effettuate sono 4;
- Rilievo delle pareti interne della vasca e dei 4 fregi sulle pareti esterne con l'HANDYSCAN 3D.

La rete di inquadramento topografica è stata utilizzata per esprimere in un unico sistema di riferimento tutti i dati acquisiti con le differenti strumentazioni e metodologie.

Il rilevamento fotogrammetrico della fontana è stato effettuato per mettere in evidenza lo stato di degrado dovuto a muffe e perdite d'acqua altrimenti non valutabili mediante l'utilizzo della sola acquisizione laser o HANDYSCAN3D.

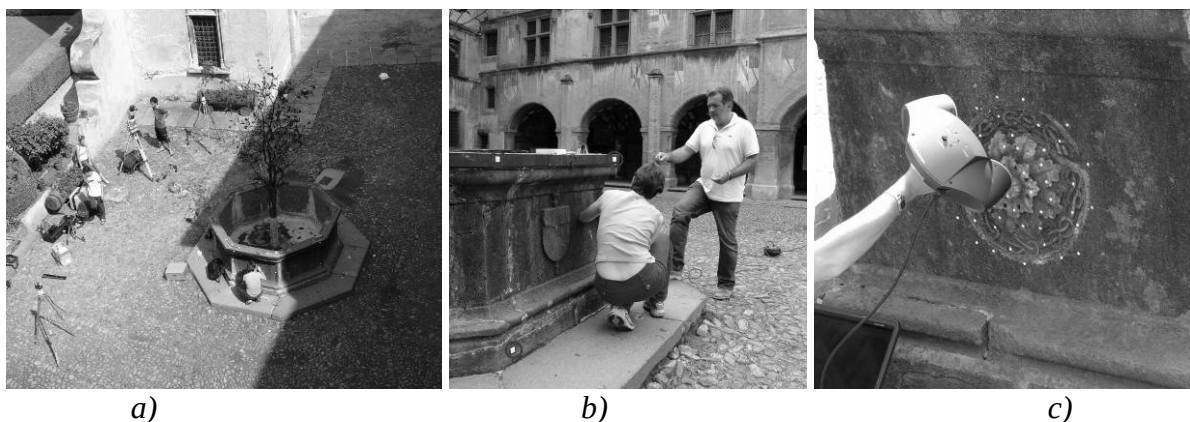


*Figura 5 – Rilevamento della fontana del melograno di Issogne:
a) posizionamento e rilievo della rete di inquadramento;
b) posizionamento delle mire e dei marker;
c) acquisizione dati con il sistema HandyScan3D.*

Elaborazione dei dati e realizzazione del modello 3D multiscala.

La prima operazione effettuata è stato il trattamento dei dati laser terrestri Riegl LMS-Z420. Il software utilizzato è LSR2004 sviluppato dal gruppo di ricerca del DITAG del Politecnico di Torino. I dati delle 4 scansioni effettuate sono stati filtrati ed allineati al sistema di riferimento della rete di inquadramento topografica. La nuvola di punti così ottenuta è stata quindi modellata ottenendo una superficie con accuratezza di circa 1,2 cm.

Successivamente sono state elaborate ed allineate al sistema di riferimento locale le superfici acquisite con l'HANDYSCAN 3D. Le superfici ottenute, di accuratezza variabile in funzione della dimensione delle superfici stesse, sono la parte interna della vasca, di accuratezza 4 mm, e i 4 fregi esterni, con accuratezza pari a circa 0,8 mm. L'allineamento delle superfici rispetto al sistema di riferimento topografico è stato effettuato utilizzando l'informazione di posizione delle mire disposte sull'oggetto. I parametri dell'allineamento di questi modelli sono stati stimati con un software sviluppato dagli autori.

Per ottenere un modello quanto più realistico dell'oggetto sono infine state colorate alcune parti del modello utilizzando le informazioni radiometriche acquisite con la Rolleiflex 6008 con dorso digitale utilizzata per il rilevamento fotogrammetrico.

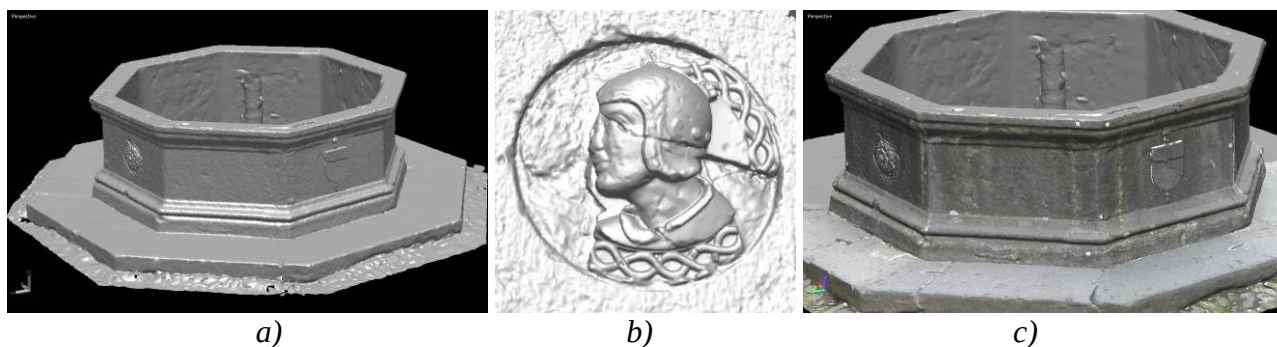


*Figura 6 – Fontana del melograno di Issogne:
a) modello 3D dell'intera vasca della fontana,
b) dettaglio di un fregio di una delle facce esterne della vasca della fontana,
c) modello 3D a colori reali.*

L'unione di tutti questi prodotti porta ad un nuovo e interessante prodotto finale generato da un rilievo integrato multi-scala e che consente di descrivere l'oggetto di studio distinguendo il livello di precisione necessario a definire metricamente le sue porzioni.

Il restauro di elementi lapidei della Cappella del Guarini

La Cappella della Sacra Sindone è una mirabile opera architettonica dell'architetto Guarino Guarini, costruita a Torino alla fine del XVII secolo.

L'interno della Cappella del Guarini, dopo l'incendio del 1997, è stato trasformato in un laboratorio in cui vengono testate tecniche di restauro tradizionali ed innovative.

Uno degli intenti dei restauratori è ripristinare le parti mancanti delle decorazioni danneggiate nell'incendio. A tal fine è necessario eseguire un rilievo metrico dell'esistente, caratterizzato da un livello di dettaglio sufficientemente elevato (millimetrico). A causa delle vibrazioni del ponteggio presente all'interno della cupola per i lavori di ripristino strutturale e di restauro, l'HANDYSCAN 3D è attualmente una delle poche strumentazioni di acquisizione laser che garantisce le precisioni richieste in quanto non richiede un supporto fisso su cui essere posizionato.

Per testare la qualità del prodotto finale sono stati acquisiti due oggetti ritenuti significativi: una porzione di un braccio appartenente ad una statua, ed un ornamento architettonico a forma di doppia conchiglia. I risultati ottenuti soddisfano l'impegnativa richiesta dei restauratori.

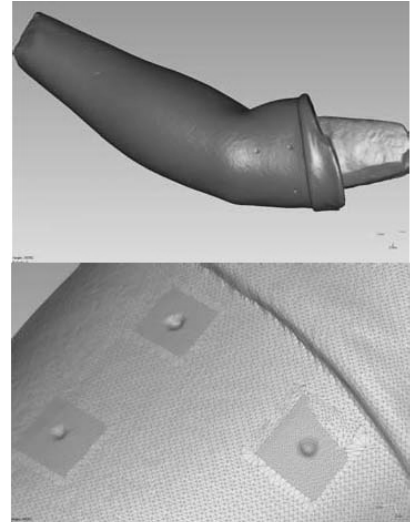


Figura 7 – I modelli ottenuti con l'HANDYSCAN 3D nella cupola del Guarini.

Conclusioni.

L'HANDYSCAN 3D rappresenta uno strumento innovativo e di grande precisione nella digitalizzazione di modelli tridimensionali. La facilità d'uso ed i costi ridotti sono vantaggi non trascurabili. A discapito di questi, l'HANDYSCAN 3D necessita il posizionamento sull'oggetto che si vuole rilevare di un numero sufficiente di mire, il cui numero è funzione della grandezza della superficie da acquisire. Per superfici di dimensione elevata, come nel caso della parte interna della fontana del Melograno, è maggiore il tempo impiegato a posizionare le mire dell'effettivo tempo di digitalizzazione.

Poiché i modelli ottenuti sono perfettamente integrabili con i modelli 3D laser di tipo terrestre, è possibile ottenere agevolmente modelli multi-scala, particolarmente utili in campo architettonico od archeologico.

Bibliografia.

Bornaz, L., Lingua, A., Rinaudo, F. (2003), *Multiple scan registration in LIDAR close range applications*, ISPRS Commission V, WGV/4, Ancona, ITALY.
Forlani, G., Roncella, R. (2005), *Photogrammetry and Laser Scanning: a Metric Reliability Comparison*, DICATA, Dept. of Civil Engineering, Parma University, Parma, Italy.

Ringraziamenti

Si ringraziano:

per il rilievo nella Cappella della Sindone: la Soprintendente l'arch. Mirella Macera;

per il rilievo della fontana del Melograno:

il Sovrintendente ai beni culturali: Dott. Arch. Roberto Domaine;

il Direttore servizio restauro e valorizzazione: Dott. Arch. Gaetano Degattis;

il Dott. Arch. Roberto Focareta.