

Rilievo tridimensionale di un sito archeologico attraverso l'applicazione della tecnologia LASER SCANNER 3D

Prof. Luciano Blois (*), Cristiano Blois (**), Michele Caponi(**), Vincenzo Lavorio (***),

(*) Università Telematica "Guglielmo Marconi"

(**) Laboratorio di Ricerca Altamente Qualificato IRIDE SRL

(***) Laboratorio di Ricerca Altamente Qualificato DEMETRA SPA

Abstract

Il rilievo laser scanning 3D è ad oggi considerato un importante strumento di indagine della geometria tridimensionale della scena osservata. In particolare, per geometrie complesse come quelle di un sito archeologico risulta necessario catalogare una serie di informazioni relative ai singoli elementi affioranti nelle rispettive stratigrafie.

Nell'esplorazione dei siti archeologici vengono alla luce numerosi frammenti di oggetti, che devono essere misurati e catalogati per poter essere successivamente combinati per tentare di ricostruire, quando possibile, l'oggetto nella sua forma originale. Tale operazione è molto complessa e delicata, dato l'elevato numero di reperti presenti in un sito e la loro fragilità.

L'applicazione di modellatori di superficie consente di ricostruire il modello solido tridimensionale del reperto rilevato e quindi di estrarre oggetti vettoriali in ambiente CAD che descrivono con precisione millimetrica le principali caratteristiche metrologiche.

The laser scanning 3D is at today considered an important tool of investigation of the three-dimensional geometry of the observed scene. In particular, for geometries as complex as that of an archaeological site cataloguing an information series concerning the single appearing stratigraphic elements in the respective ones turns out necessary. In the exploration of the archaeological sites several fragments of objects, which must be measured and catalogued to be able to be subsequently combined to try rebuild, come to the light when possible, the object in his original form. Such operation is very complex and delicate, given the high number of present finds in a site and their fragility. The reverse engineering application allows to rebuild the three-dimensional solid model of the noticed find and so extract vectorial objects in CAD environment which describe with high precision the principal ones metrologiche characteristics.

La tecnica laser scanner 3D

Il lavoro di rilievo richiede una risoluzione spaziale centimetrica che non è possibile ottenere con l'utilizzo della strumentazione topografica tradizionale e fotografica come viene attualmente eseguita dagli archeologi tramite triangolazione con rulline metriche e stazione totali. Inoltre, il rilievo effettuato dall'archeologo consiste nel disegno manuale dei singoli elementi affioranti.

Il sistema proposto basato sulla tecnologia laser scanning 3D consente di risolvere le problematiche tecniche sopra citate in termini di risoluzione spaziale e tempi di acquisizione dei dati.

Infatti, la nuvola di punti laser scanning può presentare una risoluzione spaziale sub-centimetrica con una accuratezza del dato millimetrica. Inoltre, il rilievo laser è possibile effettuarlo in tempo reale con lo stato di avanzamento dello scavo ottenendo un sistema informativo a strati tridimensionale. Questo

aspetto risulta di fondamentale importanza per non rallentare il lavoro di scavo e ottimizzare quindi i costi necessari all'esecuzione della ricerca archeologica.

La nuvola di punti laser scanning 3D è possibile georeferenziarla attraverso l'utilizzo del sistema GPS e stazione totale. La georeferenziazione consente di sovrapporre e quindi aggiornare il modello tridimensionale laser e nel contempo di inquadrare il rilevato nel contesto ambientale.

Infatti, la velocità di esecuzione del rilievo laser associata alla notevole risoluzione spaziale consentono l'acquisizione di una quantità di informazione digitale di assoluta rilevanza scientifica e rappresenta una banca dati grezzi aggiornabile poiché georeferenziata che è possibile utilizzare in post-elaborazione attraverso l'applicazione di algoritmi di filtraggio e di analisi.

La tecnica proposta è stata sperimentata dalla società DEMETRA SPA (Laboratorio di Ricerca Altamente Qualificato) con successo presso il sito archeologico di Adria in provincia di Padova riguardante gli scavi di una chiesa del primo secolo. La superficie interessata è di circa 20 X 30 m e presenta una depressione di circa 1,5 m. Il rilievo è stato effettuato con l'utilizzo dello strumento laser RIEGL LMS-Zi420 e sistema RX/TX GPS Leica 1200. La campagna sperimentale è stata presentata al museo archeologico di Adria.

Il dato laser ha permesso in fase di elaborazione di creare un modello solido e una griglia tridimensionale del rilevato dal quale è stato possibile estrapolare sezioni ad intervalli con risoluzione centimetrica.

In particolare, la nuvola di punti laser è stata elaborata utilizzando dei modellatori di superficie basati sulla matematica NURBS (**Non Uniform Rational B-Splines**), al fine di ricostruire il modello tridimensionale del sito e quindi estrarre gli elementi vettoriali, quali sezioni verticali e orizzontali con passo millimetrico.

Gli oggetti estratti dal modello 3D vengono automaticamente esportati in ambiente CAD. Particolarmente interessante è questa ultima caratteristica, in quanto, disponendo del modello CAD tridimensionale del frammento rilevato, è possibile effettuare in virtuale tutte le successive operazioni: l'estrazione dei parametri geometrici, la catalogazione e la ricostruzione dell'oggetto intero.

Nell'esplorazione dei siti archeologici vengono alla luce numerosi frammenti di oggetti, che devono essere misurati e catalogati per poter essere successivamente combinati per tentare di ricostruire, quando possibile, l'oggetto nella sua forma originale. Tale operazione è molto complessa e delicata, dato l'elevato numero di reperti presenti in un sito e la loro fragilità. Per poter rilevare, al fine della successiva ricostruzione, le caratteristiche geometriche dei frammenti, c'è la necessità di dover manipolare gli oggetti stessi, con conseguente rischio di danneggiamento, vista la fragilità intrinseca che essi possiedono. Oggi tali operazioni vengono svolte completamente a mano e questo, a causa della fragilità di cui sopra e dell'alto numero dei reperti da rilevare, comporta dei tempi molto lunghi che possono arrivare sino ai tre quarti della durata dell'intero progetto relativo al sito in esame.

Finalità del progetto, in cui si è inserito tale studio, è lo sviluppo di una metodologia che consenta di effettuare in modo veloce ed automatizzato il rilievo, la catalogazione e la ricostruzione di reperti archeologici. E' stata quindi sviluppata una metodologia completa che consente, partendo dal sito archeologico, di rilevarlo, catalogarlo ed estrarne i parametri geometrici in modo completamente automatico.

Modellatori di superficie

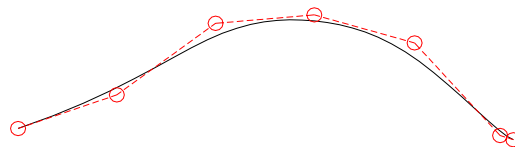
I modellatori di superficie sono utilizzati nella modellazione di oggetti di stile e di forma libera in cui diventano fondamentali caratteristiche imponderabili come la "levigatezza" e la "morbidezza".

Alla base di questo tipo di modellatori vi è una particolare rappresentazione matematica delle curve e delle superfici che le rende modificabili interattivamente dopo la digitalizzazione della nuvola di punti.

La prima rappresentazione matematica di curve di forma libera in sistemi CAD è dovuta a P. Bezier, un ingegnere della Renault che si pose il problema di disegnare le carrozzerie delle automobili con l'ausilio del computer (1960).

La generica formulazione di una curva di Bezier è la seguente:

$$\vec{c}(u) = \sum_{i=0}^n \vec{p}_i f_i(u)$$



dove $\vec{c}(u)$ rappresenta il vettore delle coordinate del punto della curva corrispondente al generico valore del parametro u , $\vec{p}_i$ rappresenta il vettore delle coordinate degli $n + 1$ punti di controllo e le $f_i(u)$ rappresentano le funzioni (*funzioni di miscelamento*) che definiscono l'influenza dei singoli punti sull'andamento della curva.

Le funzioni di miscelamento conferiscono alla curva alcune proprietà essenziali per il design:

- la curva passa sempre per il primo e l'ultimo punto del poligono di controllo;
- la tangente alla curva nel punto iniziale contiene il primo segmento del poligono di controllo e la tangente nel punto finale contiene l'ultimo segmento del poligono di controllo;
- l'influenza dei punti successivi al primo ed al secondo del poligono di controllo interessa le derivate superiori nel punto iniziale della curva;
- le funzioni di miscelamento danno ad ogni punto del poligono di controllo un peso variabile nella determinazione della forma della curva.

Dal momento, però, che le curve di Bezier presentano alcuni problemi, ciò ha spinto i matematici alla formulazione di una nuova tipologia di curve: le **NURBS (Non Uniform Rational B-Splines)**.

In tale modo le curve di Bezier costituiscono un caso particolare di NURBS, che presentano così i seguenti vantaggi:

- Consentono di impostare il grado delle funzioni di miscelamento da 1 a $n-1$ con n pari al numero di punti di controllo;
- Consentono di rappresentare esattamente le curve analitiche classiche come rette, cerchi, ellissi;
- Consentono di associare un peso ad ogni punto del poligono di controllo;
- Permettono di definire un numero di archi (spans) di cui è composta la curva e l'ordine della continuità all'interfaccia fra essi;
- Permettono di modificare localmente la curva senza influenzarla tutta.

La formulazione delle curve **NURBS** risulta così la seguente:

$$\vec{c}(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \vec{p}_i w_i B_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i B_{i,k}(u)}$$

Dove $\mathbf{c}(u)$ è il vettore delle coordinate del generico punto della **NURBS**, p_i è il vettore delle coordinate dell'i-mo punto del poligono di controllo, w_i è il peso associato all'i-mo punto del poligono di controllo, $B_{i,k}$ è la ‘*Blending Function*’ associata all'i-mo punto del poligono di controllo e di grado $K-1$ con K impostabile dall'utente.

La NURBS presenta $n+k+1$ nodi in sequenza non decrescente. Le funzioni $B_{i,k}$ sono definite ricorsivamente come segue:

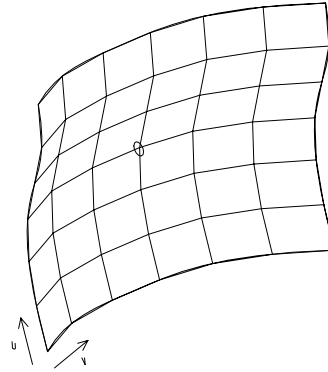
$$B_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{per } t_i \leq u < t_{i+1} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \begin{aligned} t_i &= 0 & \text{se } i < k \\ t_i &= i - k + 1 & \text{se } k \leq i \leq n \\ t_i &= n - k + 2 & \text{se } i > n \end{aligned}$$

$$B_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k} - u}{t_{i+k} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u)$$

La matematica **NURBS** è oggi universalmente adottata da tutti i modellatori di superfici. L'estensione da curve a superfici è immediata, aggiungendo semplicemente un secondo parametro V al parametro U delle curve.

In tal modo, la nuova equazione delle superfici NURBS in due coordinate U e V risulta essere la seguente:

$$\vec{s}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \vec{p}_{i,j} w_{i,j} B_{i,k}(u) B_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} B_{i,k}(u) B_{j,l}(v)}$$



Ad esempio, il punto evidenziato al centro della superficie è relativo ai valori $U=0.5$ e $V=0.5$.

Attraverso l'implementazione delle equazioni delle superfici NURBS, un oggetto complesso viene modellato, generando le singole superfici che lo compongono ed unendole fra di loro come tante ‘*patches*’. Così facendo, le superfici NURBS risultano modellatori che non realizzano una vera e propria superficie, ma una nuvola di punti molto fitta tale da approssimare la superficie stessa.

Gestire una nuvola di punti è molto più costoso, in termini di capacità di elaborazione, rispetto alla gestione delle superfici NURBS, essendo modellatori che approssimano le superfici con tanti elementi piani a contorno poligonale e, quindi, di matematica molto semplice.

Caso di studio: Modellazione 3D di un sito archeologico

Importazione e editing della nuvola

A partire dalla nuvola di punti grezzi agganciata (vedi Figura 1) è necessario applicare una serie di operazioni preliminari tali da permettere la creazione del modello tridimensionale. Tali operazioni possono essere riassunte in tre principali fasi:

- Processo di decimazione
- Riduzione del rumore
- Filtraggio dei punti

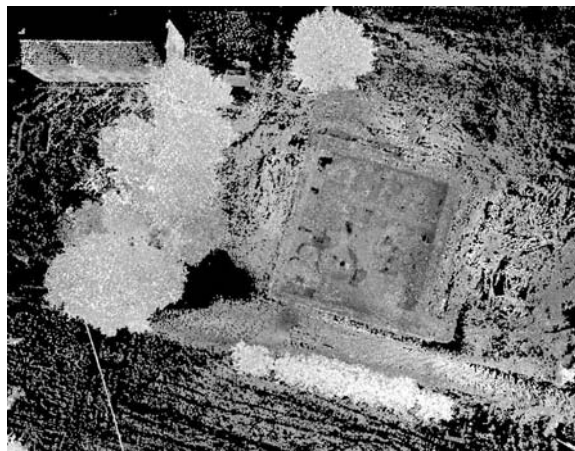


Figura 1 - Nuvola di punti agganciata del sito archeologico

Creazione della MESH 3D

- La meshatura poligonale è un metodo standard per realizzare una descrizione geometrica di una superficie irregolare. Per la maggior parte delle applicazioni topografiche la soluzione a 2 ½ D è sufficiente, ossia l'intera geometria può essere descritta fissando un valore di altezza in base alle distanze verticali da un piano di riferimento fino ai vertici bidimensionali definiti su questo stesso piano. In questo particolare caso, invece, è stato necessario applicare il metodo di meshatura 3D e di volume che permette la restituzione di geometrie chiuse e la modellazione di forme concave.
- I limiti presenti in ogni algoritmo di meshing spesso determinano degli errori di risultato che si traducono in irregolarità della maglia (fori, triangoli irregolari) e necessitano quindi di un editing della maglia triangolare. Le procedure per la rilevazione degli errori e loro correzione sono presenti in modo tale da pervenire ad un risultato soddisfacente in tempi ragionevoli (hole detection, riorganizzazione dei triangoli, smoothing, etc.).

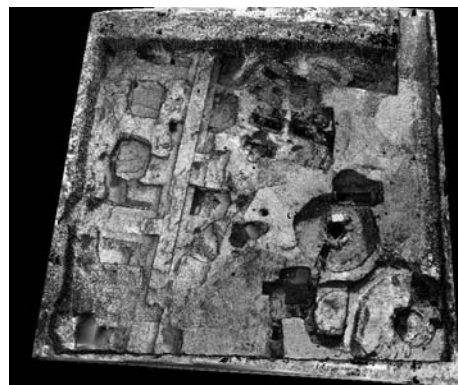


Figura -2: Mesh 3D del sito archeologico

Presentazione e utilizzo dei risultati

- Alla fine del processo di estrazione di una geometria a partire da una nuvola di punti la visualizzazione dei risultati ha un'importanza fondamentale, soprattutto nel caso di applicazione ai beni architettonici. Questa fase può essere enfatizzata da un buon algoritmo di texturizzazione dell'insieme di superfici trovate. Le texture possono derivare da un database di default a secondo del materiale o più facilmente dalle foto scattate dal dispositivo di acquisizione durante la scansione.
- Un software per il reverse engineering può essere utilizzato per marcare e misurare le differenze geometriche fra il prototipo (scansione) e il progetto (modello cad). Ciò risulta uno strumento utilissimo per l'ottimizzazione del processo produttivo. La funzione di ispezione fra due geometrie può essere introdotta facilmente nel campo dei beni culturali per il monitoraggio nel tempo dello stato di degrado.
- Dalla superficie ottenuta tramite NURBS si possono automaticamente estrarre le sezioni planari di interesse esportabili in ambiente CAD (Figura 3) ed eventualmente utilizzabili per la prototipazione o la ricostruzione di parti mancanti.

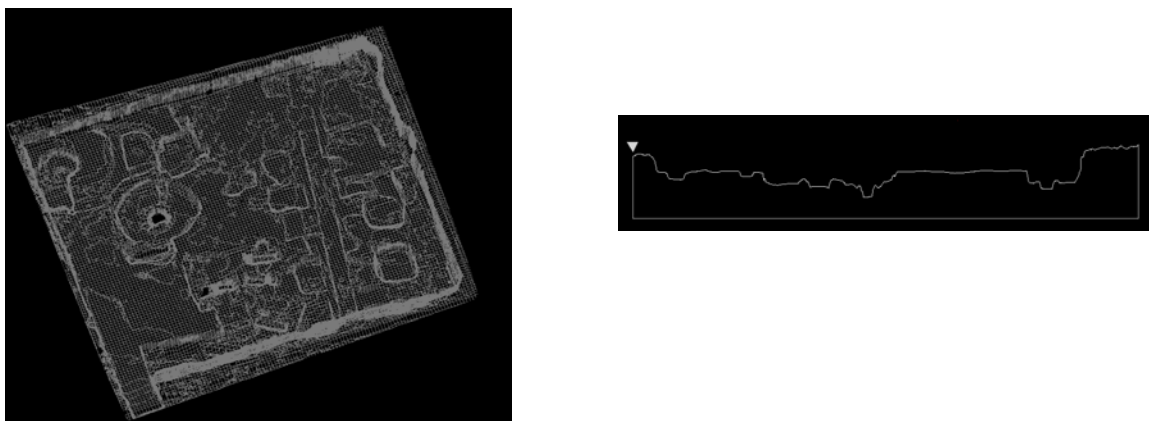


Figura – 3: sezioni