

**La statua del faraone Rhamses II: integrazione della
fotogrammetria digitale con tecniche laser scanner
per la modellazione tridimensionale**

L. Bornaz, A. Lingua, F. Rinaudo

La statua del faraone Rhamses II: integrazione della fotogrammetria digitale con tecniche laser scanner per la modellazione tridimensionale

L. Bornaz (*), A. Lingua (*), F. Rinaudo (*)

(*) Politecnico di Torino – Dipartimento di Georisorse e Territorio
C.so Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 TORINO
E-mail: bornaz@polito.it; lingua@polito.it; rinaudo@polito.it;

SOMMARIO

Il rilevamento dei beni culturali ed ambientali è oggi in grado di ottenere notevoli vantaggi, agli effetti dell'analisi dimensionale e della navigazione tridimensionale, dalla ricostruzione di modelli 3D degli oggetti stessi. Tale operazione avviene attualmente mediante la creazione di un modello tridimensionale tradizionalmente ottenuto utilizzando procedure di tipo fotogrammetrico attraverso la restituzione di coppie stereoscopiche dell'oggetto fotografato o utilizzando stazioni totali motorizzate.

Recentemente sono stati introdotti sul mercato nuovi dispositivi laser scanner, con lo scopo principale di realizzare rilievi metrici di oggetti mediante la misura di un elevato numero di punti con tempi rapidi di acquisizione e precisioni sufficienti in molti campi applicativi. La creazione di un modello digitale 3D così ottenuto risulta compatibile con numerose rappresentazioni tecniche e può servire da integrazione alle metodologie di rilevamento classiche.

In questo articolo si descrive un esempio di integrazione di tecniche fotogrammetriche digitali con tecniche di scansione laser riferito alla statua del faraone Rhamses II, di proprietà del Museo Egizio di Torino (catalogo # 1380).

ABSTRACT

3D modelling can give a lot of advantages to cultural heritage recording mainly allowing dimensional analysis and 3D navigation. Up to now 3D modelling is performed by means of photogrammetry or by using motorized total stations. Recently new laser scanner devices have been introduced into the market. The main performances of the new instruments consist in a quick survey of a big amount of points; the accuracy today achievable can satisfy a large number of application fields. The resulting 3D model can be used to produce technical representations of the objects and can reach a good level of integration with the traditional techniques. The paper describes a first experience of integration of the laser scanner devices with digital photogrammetry performed on the Rhamses II statue of the Egyptian Museum in Turin (catalog number 1380).

1. INTRODUZIONE

Le tecniche laser scanner vengono da molti anni impiegate nel settore industriale per il controllo di robot e la descrizione metrica delle superfici con risultati interessanti e precisioni apprezzabili.

L'utilizzo di queste tecnologie in ambito topografico ha permesso la misurazione di distanze senza l'utilizzo di specifiche apparecchiature per la riflessione di tipo artificiale. Più di dieci anni fa, AGA e *Wild instruments* perfezionarono questo tipo di tecnologia per l'impiego di essa su stazioni totali e teodoliti di tipo elettronico (stazione totale AGA IMS1000 e distanziometro WILD DIOR 3002). Oggi le più recenti stazioni totali motorizzate possono quindi ritenersi i primi prototipi dei moderni laser scanner terrestri.

Per l'individuazione spaziale dei punti i laser scanner terrestri utilizzano un sistema di riferimento sferico locale con origine posta in corrispondenza di un punto interno dello strumento. I valori rilevati, per ogni punto acquisito, sono la distanza tra il centro di presa dello strumento e l'oggetto colpito dal raggio laser (d), l'angolo di inclinazione del raggio emesso rispetto all'asse verticale dello strumento (φ), l'angolo azimutale del raggio stesso rispetto ad un asse orizzontale di riferimento (ψ) ed il valore di riflessione del segnale laser nei confronti dell'oggetto colpito. Il processo di rilevamento si basa sull'acquisizione di migliaia di punti in tempi ridotti mentre l'insieme delle informazioni ottenute (coordinate sferiche, coordinate cartesiane e valore di riflettività) vengono inviate ad un PC o conservate direttamente nella memoria interna dello strumento.

La densità dei punti ottenuti dal procedimento di rilevamento, regolarmente spaziatosi nel sistema sferico, dipende in primo luogo dalla distanza che intercorre tra il punto di stazione dello strumento e l'oggetto che si intende rilevare, in secondo luogo dal passo angolare utilizzato dall'apparecchiatura laser.

Per quanto riguarda l'affidabilità del rilievo, dall'analisi dei dati ottenuti da una scansione laser è facilmente comprensibile come l'insieme dei dati sia affetto da un notevole disturbo che risulta essere spesso non trascurabile.

Le tecniche laser oggi utilizzate possono dividersi in aeree o terrestri a seconda del supporto utilizzato per la scansione.

Nelle applicazioni di tipo aereo, per poter utilizzare correttamente le tecnologie laser, è necessario individuare il corretto posizionamento dello strumento durante l'acquisizione, che avviene in movimento, ed un corretto valore delle coordinate di punti osservati in un sistema di riferimento comune. Questa determinazione è oggi ottenuta attraverso l'utilizzo del GPS (*Global Positioning System*) e di piattaforme inerziali montate sull'apparecchio di volo.

Nelle applicazioni di tipo terrestre, al contrario, la tecnologia laser è caratterizzata da una notevole facilità di impiego in quanto, essendo lo strumento immobile durante l'acquisizione, il sistema di riferimento risulta essere stabile e definito.

Gli apparecchi laser di tipo terrestre sono in grado di rilevare distanze variabili da pochi millimetri fino ad alcune centinaia di metri, permettendo così il rilevamento riguardante tutti gli ambiti applicativi per i quali la scansione laser di tipo aereo non risulta soddisfacente.

Le tecniche laser scanner risultano oggi molto attraenti grazie ai ridotti tempi di acquisizione, al limitato costo delle fasi di rilevamento ed al notevole numero di informazioni che è possibile ricavare da ognuna delle scansioni laser. Nessuna tra le altre tecniche fino ad oggi utilizzate per il rilevamento (topografia, GPS e fotogrammetria) è in grado di fornire lo stesso grado prestazionale per la creazione di modelli di forma.

I numerosi studi in corso tendono a ricercare maggiori precisioni degli strumenti per aumentare l'integrazione con tecnologie più classiche presenti sul mercato sviluppando una serie di nuove possibilità di impiego offerte dalla descrizione metrica tridimensionale.

Il presente articolo dimostra con un esempio pratico l'integrazione di tecniche fotogrammetriche digitali con tecniche di scansione laser. L'esempio si riferisce alla statua del faraone Rhamses II, di proprietà del Museo Egizio di Torino (Fig. 1).

Si tratta di una statua raffigurante il faraone Rhamses II seduto sul trono e contornato dagli attributi tipici della regalità, cobra con la gola gonfia nell'atto di attaccare (*ureo*) e scettro (*heka*). A lato delle gambe del faraone seduto trovano posto la rappresentazione scultorea del figlio del re, *Amonherkhepeshef*, e della regina *Nefertari*. La statua, oggi esposta presso la sala

Il dello statuario del Museo Egizio di Torino, risale al periodo del regno di Rhamses II (1290 – 1224 a.C.) ed è stata ricavata intagliando finemente un blocco di Basanite, materiale lapideo di colore nero scuro. La scultura nel suo complesso è alta 2 m, larga 0.5 m e presenta una profondità di 1 m circa. La base sulla quale la statua oggi è collocata ne eleva l'altezza di circa 1 m rispetto alla quota del pavimento. Per il trasporto dall'Egitto in Italia la statua fu scomposta in una serie di blocchi, riassembleti soltanto alla fine del secolo XIX. Le vibrazioni causate dai bombardamenti avvenuti durante il secondo conflitto mondiale e quotidianamente dal traffico cittadino nonché il deterioramento dei materiali utilizzati per il riassettaggio hanno reso critica la stabilità della statua.



Fig.1 – La statua del faraone Rhamses II.
Museo egizio di Torino (Italia)

La modellazione 3D della statua è oggi necessaria, di complemento alle analisi geofisiche (effettuate dai ricercatori di geofisica del Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino) atte a definire quali siano le condizioni della fratturazione interna della statua, per la creazione di un supporto metrico indispensabile per le fasi successive di recupero dell'opera.

2.ACQUISIZIONE DEI DATI

Le operazioni di acquisizione hanno riguardato sia le prese fotogrammetriche ed il rilievo di punti per l'orientamento delle stesse, sia la scansione laser della statua nel suo complesso. Ragioni di inaccessibilità non hanno consentito la scansione laser del lato posteriore della statua. La figura 2 mostra l'organizzazione delle tre fasi eseguite.

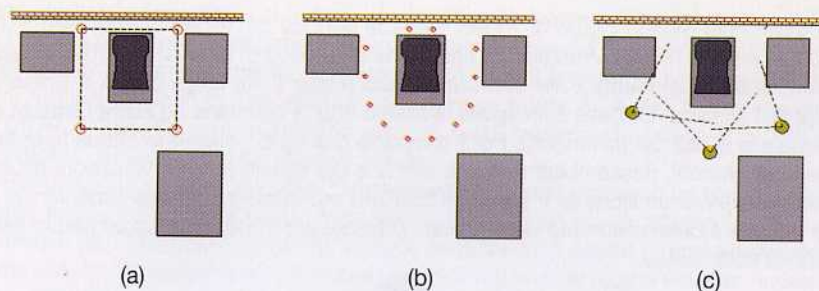


Fig.2 - Disposizione strumentale per: la determinazione dei punti di controllo con stazioni totali (a), la realizzazione delle immagini stereoscopiche dell'oggetto (b), la scansione laser dell'oggetto (c).

Lo strumento utilizzato per le scansioni è il laser scanner LPM-25HA (*Laser Profile Measuring system*) prodotto dalla *RIEGL Laser Measurement System* di Horn in Austria e commercializzato nel nostro Paese dalla Nikon Italia (Fig. 3).

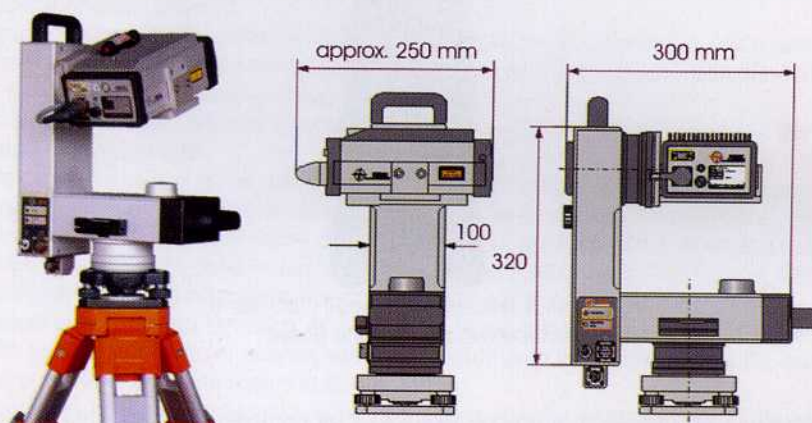


Fig.3 - Laser scanner RIEGL LPM-25HA

Il principio di funzionamento della misura di distanza effettuata col laser può essere schematizzato come segue.

Un generatore di impulsi elettrici impone periodicamente ad un diodo laser semi-conduttore di emettere degli impulsi di luce infrarossa, i quali vengono indirizzati e convogliati da una lente di emissione. Una seconda lente, di ricezione, capta la parte del segnale di eco del raggio laser riflesso dalla superficie di impatto dell'oggetto, mentre un fotodiodo produce un segnale di ricezione elettrico. L'intervallo di tempo tra il segnale emesso e l'eco del segnale ricevuto è quantificato da un orologio stabilizzato al quarzo. Il risultato viene dunque trasmesso ad un micro elaboratore interno che trasforma il dato ricevuto in una misura di distanza

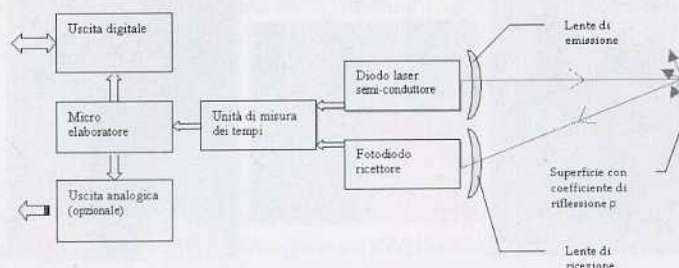


Fig.4 – Principio di funzionamento del distanziometro laser

Il Laser scanner LPM-25HA è in grado di rilevare oggetti posti ad una distanza compresa tra 2 m e 60 m con una precisione nominale di ± 8 mm ad una velocità di acquisizione pari a circa 1000 punti al secondo. La divergenza del raggio laser varia tra 15 mm alla distanza di 10 m dal sensore e 60 mm alla distanza di 60 m.

L'abbracciamento massimo consentito dalla strumento è di 400gon in senso orizzontale x 340gon in senso verticale.

Il segnale analogico fornito dal sensore laser viene digitalizzato attraverso un convertitore A/D parallelo ad 8 bit connesso direttamente alla porta seriale ECP compatibile LPT di un PC. Il calcolatore deve essere equipaggiato con un apposito *software* operante in ambiente *Windows*, fornito direttamente dalla casa costruttrice, per la ricezione e l'immediata visualizzazione dei dati.

Per l'individuazione spaziale dei punti rilevati lo strumento utilizza un sistema di riferimento sferico con origine posta in corrispondenza di un punto interno dello strumento. I valori rilevati, per ogni punto acquisito, sono la distanza tra il centro di presa dello strumento e l'oggetto colpito dal raggio laser d , l'angolo di inclinazione φ del raggio emesso rispetto all'asse verticale dello strumento e l'angolo azimutale ϑ del raggio emesso rispetto ad un asse orizzontale di riferimento.

Le coordinate sferiche così ottenute possono facilmente essere espresse nel sistema di riferimento cartesiano interno attraverso semplici formule di conversione.

Il laser, oltre alle informazioni riguardanti la posizione spaziale dei punti colpiti dal raggio, è in grado di fornire il loro valore di riflettività, ovvero la capacità di riflessione degli oggetti alla lunghezza d'onda del laser.

La precisione nominale delle grandezze misurate è la seguente:

$$\sigma = \pm 8 \text{ mm per le distanze;}$$

$$\sigma = \pm 0.01 \text{ gon per gli angoli.}$$

Il *software* fornito con il laser scanner (3DRiSCAN) permette la visualizzazione immediata dei dati acquisiti sottoforma di immagini nelle quali le distanze sono codificate in servendosi di una scala cromatica garantendo un controllo istantaneo della scena acquisita (v. Fig. 5). Ad ogni punto rilevato è associata la posizione di un pixel dell'immagine mentre il colore associato al *pixel* è definito in base al valore di riflettività oppure in base alla lettura di distanza (vedi fig. 5).

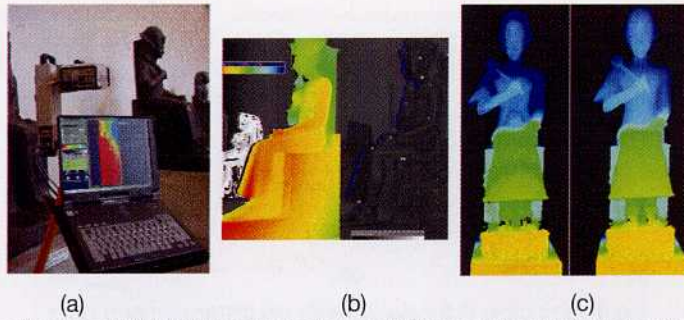


Fig.5 – Il Laser Scanner LPM-25HA nelle fasi di acquisizione (a) ed il risultato visivo delle acquisizioni del lato sinistro (b) e del fronte della statua (c).

Per poter orientare le scansioni laser effettuate con lo strumento descritto secondo lo stesso sistema di riferimento utilizzato nel rilievo fotogrammetrico i punti di controllo sono stati presegnalizzati con adesivi catarifrangenti di dimensione 5 mm e 10 mm. Questi adesivi hanno la proprietà di riflettere quasi totalmente il raggio laser e risultano fortemente individuabili grazie all'elevato valore di riflettività rispetto all'ambiente circostante.

La figura 6 rappresenta il tipo di segnale utilizzato ed un dettaglio raffigurante la testa del faraone con evidenziati i punti di controllo presegnalizzati (tutti gli altri punti di forma circolare che è possibile scorgere nell'immagine indicano l'ubicazione delle misurazioni geofisiche radar effettuate sulla statua per l'analisi delle condizioni di fratturazione interna della statua).



Fig. 6 – Materializzazione dei punti di controllo sulla statua.

Le acquisizioni con il laser scanner sono state effettuate secondo due risoluzioni angolari differenti: rispettivamente con incremento angolare di 40 mgon e 100 mgon.

3. ANALISI DEI RISULTATI

La prima analisi effettuata sui dati ottenuti dalla scansione laser ha riguardato la verifica della precisione della misurazione. Prima di effettuare la scansione laser sono stati applicati sulla statua 50 adesivi rifrangenti (marker) omogeneamente distribuiti sulla stessa. Di ognuno di essi è stata quindi determinata la posizione spaziale in un sistema di riferimento locale utilizzando le classiche procedure topografiche. Sono state quindi calcolate tutte le possibili distanze tra i punti oggetto del rilevamento topografico e comparate con le medesime distanze ottenute con le acquisizioni del laser scanner. Le differenze ottenute dal paragone sono riportate nella tabella seguente:

Risoluzione angolare [gon]	Valore minimo della differenza [mm]	Valore massimo della differenza [mm]	Valore medio della differenza [mm]	M.s.e. [mm]
0.04	-6.5	7.3	1.3	± 6.5
0.1	-7.2	8.5	0.8	± 7.3

Tab.1 – Risultati statistici delle differenze tra le distanze conosciute e le distanze valutate utilizzando il laser scanner.

I risultati ottenuti consentono di confermare le buone caratteristiche di rilevamento dei punti ad alta riflettività del laser scanner LPM-25HA in quanto la precisione nominale dichiarata dalla casa costruttrice è di ± 8 mm. Questo risultato non può essere esteso a tutti i punti rilevati. Visualizzando infatti il dato puro, acquisito con il laser scanner, si evidenzia la presenza di notevole disturbo nella determinazione spaziale dei punti appartenenti alle superfici poco riflettenti. Questo effetto risulta inoltre in qualche modo enfatizzato nei confronti della statua del faraone Rhamses II a causa del materiale lapideo particolarmente lucido e scuro.

Questo aspetto è facilmente comprensibile dall'analisi della figura 7 che visualizza una parte del viso del faraone.

E' facilmente comprensibile come non sia possibile fare uso direttamente del dato grezzo fornito dalla scansione laser. Per poter ottenere un'insieme di informazioni utili è necessario utilizzare un *software* creato appositamente per la riduzione del disturbo presente. L'approccio seguito deriva direttamente dalle analoghe esperienze dell'Unità di Ricerca del Politecnico di Torino con i laser scanner aerotrasportati [ROGGERO 2001].

Questo *software* permette la regolarizzazione e pulizia dei dati mediante l'utilizzo di mesh regolari, impostate dall'operatore, all'interno di ognuna delle quali devono trovarsi almeno 5 punti appartenenti alla griglia originale. Per ogni elemento della mesh viene applicato un procedimento di stima, basato sulla mediana, per l'individuazione di un unico punto rappresentativo.

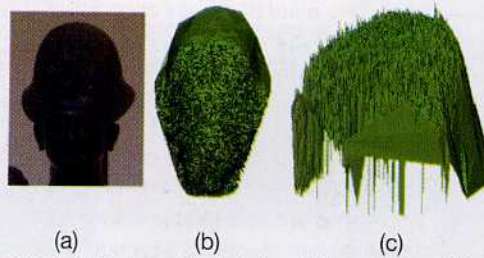


Fig.7 – La statua di Rhamses II. Fotografia del viso (a), rendering 3D del dato grezzo ottenuto dalla scansione (b), visualizzazione assonometria del rendering 3D del dato grezzo ottenuto dalla scansione (c).

Di tutti i punti presenti nell'elemento della *mesh* si considera la coordinata di quota e di questa viene calcolata la mediana. Si classificano quindi tutti i punti che distano dalla mediana di una quantità maggiore di r (assunto pari alla precisione nominale dello strumento utilizzato) quali *outliers* e tutti i punti che distano dalla mediana più di un valore R (assunto pari a 3 volte la precisione nominale dello strumento utilizzato) quali *gross errors*. Nella valutazione del punto rappresentativo di ogni *mesh*, calcolato come media dei punti presenti nella *mesh*, non vengono utilizzati tutti i punti classificati come *outliers* e *gross errors*.

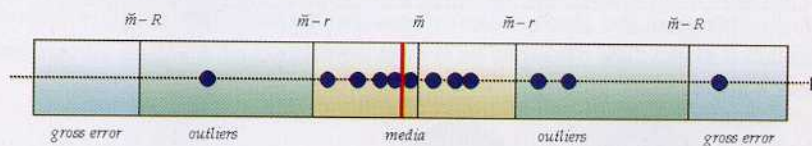


Fig.8 – Schema di valutazione delle coordinate del punto rappresentativo dell'elemento *mesh*.

Questo tipo di valutazione non è altro che una stima di tipo robusto, che permette di eliminare le misure affette da errori notevoli senza causare errate valutazioni delle misure finali. L'insieme delle acquisizioni effettuate sulla statua di Rhamses II è stato trattato con la procedura descritta. La dimensione degli elementi della *mesh* è stata impostata secondo un passo regolare di 1 cm. Sono quindi state trattate tutte le celle con al loro interno un numero di punti superiore a 5. Del modello digitale 3D risultante è stata valutata la validità attraverso il confronto con un analogo modello ottenuto con procedure di tipo fotogrammetrico avente lo stesso passo di grigliatura. Nella tabella seguente sono posti in evidenza le differenze ricavate, sulla coordinata Z, tra il modello fotogrammetrico e quello ottenuto dall'elaborazione precedentemente descritta dei dati laser. La figura 9 rappresenta graficamente i risultati ottenuti.

	$ \Delta Z < 8\text{mm}$	$8\text{mm} < \Delta Z < 16\text{mm}$	$16\text{mm} < \Delta Z < 24\text{mm}$	$ \Delta Z > 24\text{mm}$
Differenze tra Fotogrammetria – DTM originale	38 %	25 %	21 %	16 %
Differenze tra Fotogrammetria – DTM trattato	89 %	11 %	-	-

Tab.2 – Valutazione delle differenze tra modello fotogrammetrico, modello laser originale e modello laser trattato.

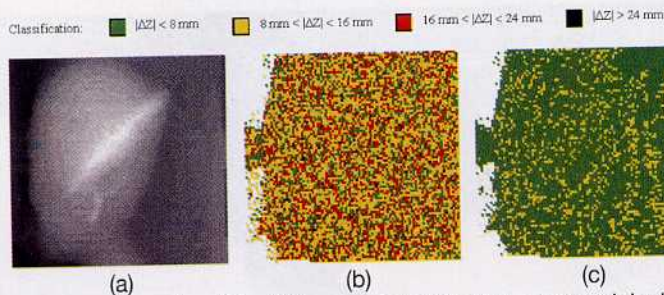


Fig.9 – Modello fotogrammetrico (a) – Differenze con il modello laser originale (b) – Differenze con il modello laser trattato con la stima basata sulla mediana (c)

4. CREAZIONE DEL MODELLO TRIDIMENSIONALE DELLA STATUA DEL FARAONE

Una ulteriore elaborazione riguardante i dati acquisiti con lo scanner è consistita nella creazione di un modello tridimensionale a punti della statua del faraone. Per fare ciò è stato utilizzato uno specifico pacchetto informatico (Laser Scanner Registration 1.0) in grado di filtrare il dato iniziale, l'eliminazione del disturbo presente avviene tramite l'utilizzo di metodi di stima basati sul calcolo della mediana, ed orientare in modo del tutto automatico un modello tridimensionale rispetto al modello successivo, tramite l'utilizzo di algoritmi appositamente studiati. Si tratta di un *software* sviluppato presso l'unità di Ricerca del Politecnico di Torino esistente solo sotto forma di prototipo. Il *software* in esame è in grado di gestire contemporaneamente 2 *file*, di individuare i marker in comune sulle due scansioni e di conseguenza orientare uno dei due file secondo il sistema di riferimento dell'altro. La stessa procedura permette di ottenere un unico *file* contenente il modello tridimensionale completo dell'oggetto nei formati VRML o DXF, facilmente visualizzabili attraverso appositi *software* di visualizzazione 3D.

Dall'elaborazione descritta sono stati ricavati i modelli tridimensionali completi della statua del faraone Rhamses II. Le immagini riportate in figura 10 sono il risultato visivo dell'elaborazione effettuata.

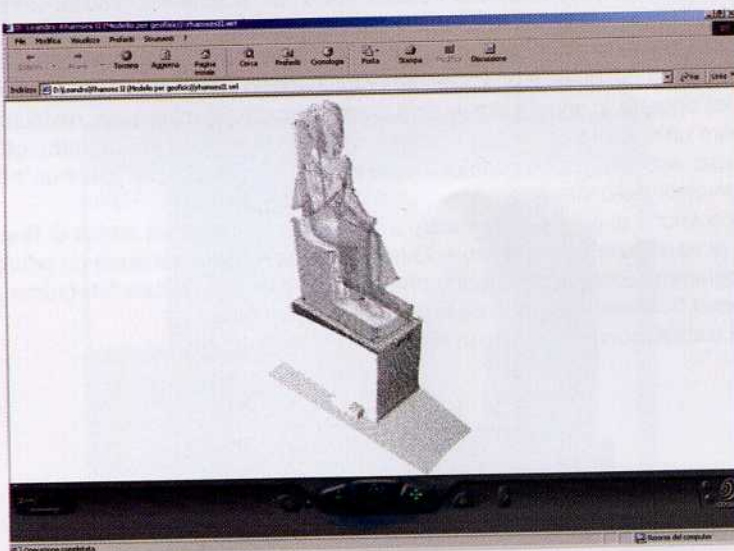


Fig. 10 (a) - vista assometrica del modello tridimensionale della statua in formato VRML

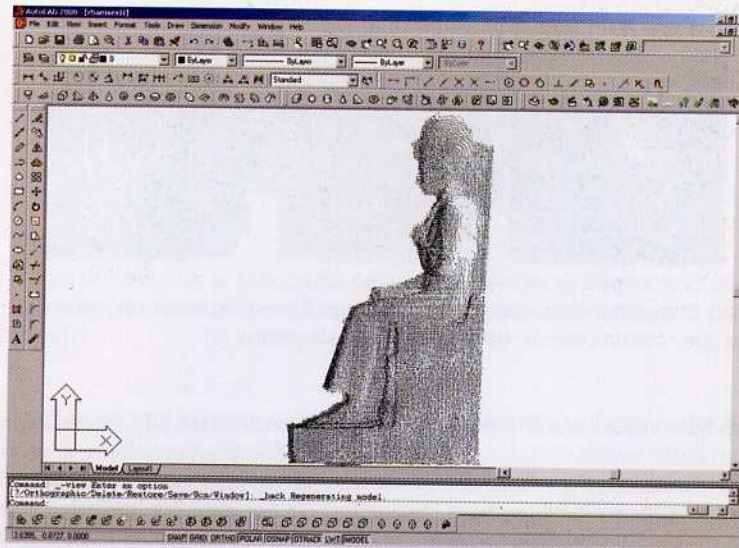


Fig.10 (b) – vista laterale del modello in formato Dxf

5. INTEGRAZIONE TRA FOTOGRAMMETRIA DIGITALE E TECNICHE LASER SCANNER

Il dato così ottenuto in precedenza può essere utilizzato come supporto metrico in alcune operazioni fotogrammetriche. In questo caso sono stati realizzati due differenti integrazioni tra il modello digitale ottenuto con il laser e la fotogrammetria digitale: la produzione di ortofoto 3D e la creazione di modelli di navigazione 3D.

L'ortofoto 3D non è altro che un modello digitale tridimensionale di un oggetto al quale viene applicata una trama ottenuta attraverso l'utilizzo dell'informazione fotografica. Un prodotto di questo tipo può essere utilizzato in diversi modi. E' possibile creare un catalogo virtuale di oggetti ed infrastrutture di vario genere, avendo a disposizione sia il contenuto metrico che radiometrico a partire dal quale è possibile generare in modo automatico viste piane, prospettive e sezioni dell'oggetto, o ancora simulazioni di vario genere (illuminazione, restauro, ...)

Per poter creare un'ortofoto 3D sono necessari un modello digitale dell'oggetto, ottenuto con l'utilizzo del laser scanner, ed un completo rilievo fotogrammetrico, per avere un'informazione fotografica completa dello stesso.

Un test di generazione di ortofoto 3D è stato sviluppato nel caso della statua di Rhamse II su una porzione di viso. Sulla base del modello laser del viso è stata generata un'ortofoto 3D utilizzando il programma *Stereoview* (programma per il trattamento digitale fotogrammetrico prodotto dalla Menci Software e commercializzato dalla Nikon Italia).

Il risultato dell'elaborazione è riportato in figura 11.

