

L'ALLINEAMENTO DELLE SCANSIONI LASER SCANNER MEDIANTE L'IMPLEMENTAZIONE DI UN INSIEME RIDONDANTE DI SISTEMI RISOLUTIVI

Massimo CHILLEMI, Luigi GIACOBBE¹

DISIA Facoltà di Ingegneria Università di Messina, 0903977208, massimochillemi@ingegneria.unime.it, luigigiacobbe@libero.it

Riassunto

Un uso corretto e consapevole della tecnologia laser scanning 3D non può prescindere da un approccio ragionato sui termini di precisione conseguibili in relazione al risultato atteso.

Il problema assume rilevanza particolare quando dello stesso oggetto è necessario eseguire più scansioni, che devono essere allineate, cioè georeferenziate rispetto al medesimo sistema di riferimento, per giungere alla costruzione del modello digitale.

Con la presente nota si vuole introdurre una procedura operativa che, mediante l'implementazione di un insieme ridondante di sistemi risolutivi, consenta l'ottimizzazione della fase di registrazione delle scansioni, riducendone le conseguenze negative sulla precisione del modello finale.

Abstract

A correct and aware use of the laser scanning 3D technology cannot put aside from a reasoned approach on the achievable terms of precision in relationship to the attended result.

The problem assumes particular importance when is necessary to perform more scanings of the same object, that must have aligned up to reach the construction of the digital model.

With the present note is introduced an operational procedure that, through the implementation of redundant systems, allows the optimization of the phase of recording of the scanings reducing the negative consequences on the precision of the final model.

1. Indagine sperimentale sulle tecniche di registrazione

Il tema del progetto dell'allineamento richiede un approccio sperimentale, in quanto solo l'analisi di un congruo numero di dati può fornire la possibile chiave di lettura per individuare una corretta procedura di registrazione, che limiti entro una tolleranza prestabilita l'incertezza di posizionamento del modello finale.

A tale scopo, è stata eseguita un'indagine sui database relativi al rilievo di Piazza San Giovanni a Siracusa, di cui si è già riferito in una precedente nota e, successivamente, su una popolazione di dati derivante da una simulazione.

L'allineamento è stato effettuato applicando il metodo procustiano Orthogonal Procrustes Analysis (OPA), trattando la registrazione delle scansioni come un problema piano. Lo scanner durante le varie acquisizioni lavora infatti ad asse generale verticale, per cui i piani orizzontali passanti per i centri delle stazioni di presa sono fra loro paralleli.

L'allineamento delle quote non richiede allora alcuna operazione particolare e si ottiene con una semplice traslazione verticale, il cui valore sarà dato dalla differenza delle coordinate z, costante per ogni coppia di punti omologhi.

L'analisi dei risultati derivanti dall'allineamento delle scansioni eseguite in Piazza S. Giovanni ha evidenziato in maniera netta l'influenza della procedura di registrazione delle scansioni sulla precisione del modello finale restituito.

L'insufficienza del campione acquisito (il rilievo non era stato infatti preordinato allo studio in oggetto), non ha però consentito la formulazione di ipotesi sul numero e sulla disposizione dei target necessari per garantire un risultato coerente con l'incertezza attesa del rilievo.

Partendo dalla considerazione, largamente condivisa in letteratura, che il risultato dell'allineamento non può che migliorare al crescere del numero di target, è stato allora elaborato un database simulato costituito da due scansioni legate da nove punti omologhi.

¹ Il contributo dei due Autori alla stesura del presente articolo è da intendersi paritetico.

Il ricorso a dati simulati si è reso necessario per poter controllare a posteriori i risultati confrontando le coordinate dei vertici dopo la trasformazione con quelle esatte già note a priori. In figura 1 è rappresentato il modello utilizzato, in cui i nove target sono stati indicati con le lettere maiuscole da A ad I. I vertici “rilevati” durante le scansioni S1 ed S2 sono invece numerati rispettivamente da 1 a 8 e da 9 a 14.

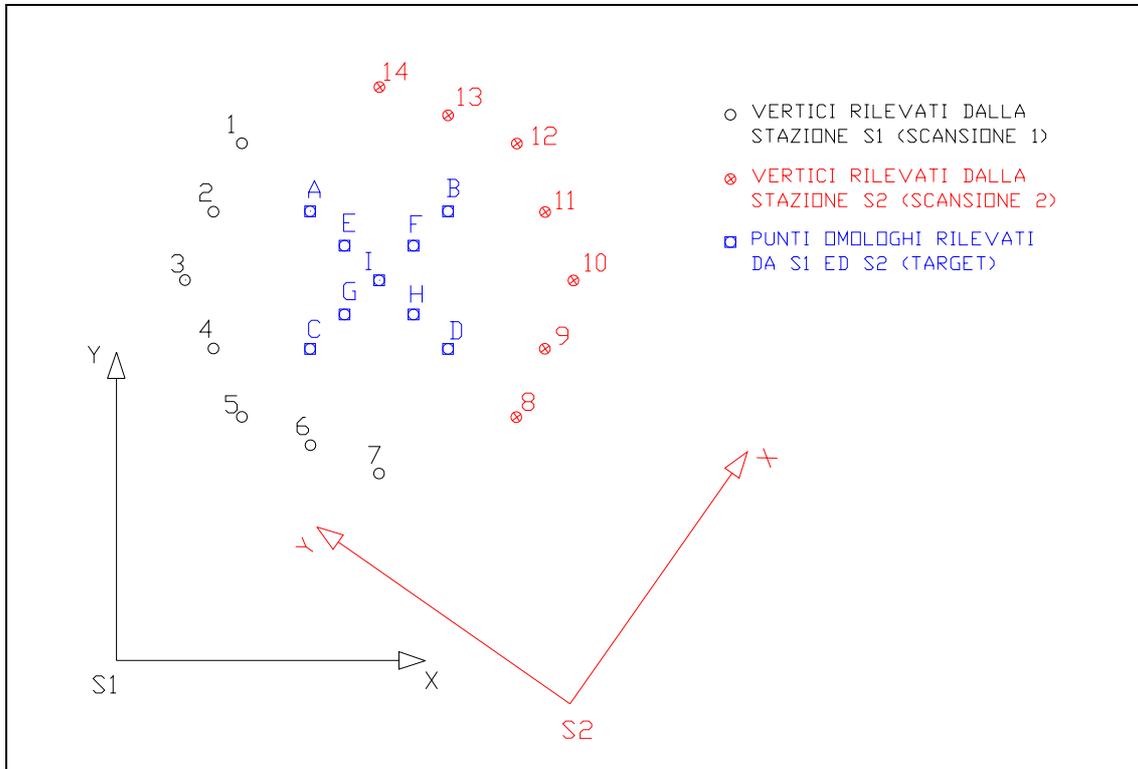


Figura 1: modello base discretizzato utilizzato per la simulazione

Dal momento che le coordinate “rilevate” sono esatte in quanto derivanti da una simulazione, è stato necessario introdurre l’errore accidentale di posizionamento proprio del laser scanner attraverso una funzione random, ottenendo in definitiva gli insiemi matriciali [S1] ed [S2], di cui si è eseguita la georeferenziazione, assumendo come sistema principale di riferimento quello relativo ad S2. Sui nove target a disposizione è stata effettuata una parziale permutazione a gruppi di k elementi (con k=1, 2, 3,..., 9) ottenendo le 119 combinazioni che costituiscono il campione dell’indagine. Ad ogni combinazione di target è stata quindi applicata l’analisi procustiana OPA, ottenendo in corrispondenza 119 terne dei parametri a_x , a_y , e θ , che consentono la trasformazione dell’insieme matriciale S1 in S2.

Utilizzando tutte le terne di parametri di trasformazione così determinate, sono state quindi calcolate le coordinate dei vertici 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 nel sistema di riferimento S2.

Sfruttando l’opportunità offerta dalla conoscenza delle coordinate esatte degli stessi punti, è stato inoltre possibile calcolare anche gli scarti $\Delta_{xi,k}$, $\Delta_{yi,k}$ e $\Delta_{i,k}$ così definiti:

$$\Delta_{xi,k} = X_{i,k}^{S2} - X_{ei,k}^{S2}$$

$$\Delta_{yi,k} = Y_{i,k}^{S2} - Y_{ei,k}^{S2}$$

$$\Delta_{i,k} = \sqrt{\Delta_{xi,k}^2 + \Delta_{yi,k}^2}$$

in cui $X_{i,k}^{S2}$ e $Y_{i,k}^{S2}$ sono le coordinate stimate del vertice i nel sistema S2 nella generica combinazione k, mentre $X_{i,e}^{S2}$ e $Y_{i,e}^{S2}$ sono le corrispondenti coordinate esatte note a priori.

Un primo esame dei risultati ha evidenziato che, utilizzando tutte le terne di parametri ottenute dalle combinazioni di vertici comprendenti il target I, i valori degli scarti Δ assumono valori particolarmente elevati, evidentemente a causa di un errore di posizionamento dello stesso vertice I non compatibile con l’incertezza predeterminata. Di conseguenza, tutte queste terne sono state

escluse dalle successive elaborazioni, per cui il campione si è ridotto a 83 unità, che è stato analizzato disaggregando i risultati per ogni vertice e per ogni gruppo di combinazioni, ottenendo dei diagrammi di dispersione, che si omettono per necessità di sintesi.

Analizzando i risultati, si osserva che:

1) coerentemente con l'ipotesi iniziale, aumentando il numero di target utilizzati in ciascuna combinazione, la dispersione degli scarti diminuisce, compattandosi in un range gradualmente decrescente. I valori degli scarti Δ sono quindi più omogenei per le combinazioni di un numero elevato di target.

Ad esempio, per il vertice 1 Δ assume valori compresi tra 0,38 mm e 11,76 mm nelle combinazioni di due target, tra 0,22 mm e 3,72 mm nelle combinazioni di tre target, tra 0,86 mm e 1,41 mm nelle combinazioni di sei target e tra 1,00 mm e 1,17 mm nelle combinazioni di sette target.

2) I valori più bassi di Δ non si ottengono sempre per combinazioni di un numero elevato di target. Il miglior risultato per il vertice 1 si ottiene infatti con i parametri determinati a partire dai target C, D e G.

3) La procedura di allineamento può influenzare in maniera determinante la restituzione del rilievo. A titolo esemplificativo, si consideri infatti che, utilizzando tre target per il vertice 3 si ottengono otto scarti su venti superiori a 2 mm e diciassette scarti su venti superiori ad 1 mm.

Se poi avessimo utilizzato i parametri di trasformazione determinati utilizzando tutti i nove target a disposizione, avremmo posizionato il vertice 3 con un errore di 8,46 mm.

Alla luce di queste considerazioni, si può concludere, a conferma delle ipotesi iniziali, che la procedura di registrazione delle scansioni, a maggior ragione se in numero superiore a due, può introdurre un degrado della precisione del modello finale non compatibile con gli scopi del rilievo. Di contro, aumentare il numero di target non comporta necessariamente l'ottimizzazione dei parametri di trasformazione e non sembra neanche possibile formulare ipotesi più rigorose di semplici valutazioni empiriche sulla migliore configurazione geometrica dei target.

Si ritiene comunque possibile affrontare con successo il problema di ottimizzare la fase di georeferenziazione delle scansioni mediante la procedura di seguito proposta.

2. Una procedura per l'ottimizzazione dell'allineamento

La procedura proposta è in grado di attivare una serie di controlli convergendo in definitiva verso il calcolo dei valori più probabili dei parametri di trasformazione mediante un criterio di stima ai minimi quadrati.

In sintesi, il metodo prevede la scelta di un numero di target sufficiente a generare un elevato numero di sistemi risolutivi e di testare i risultati ottenuti per le varie terne di parametri di trasformazione calcolati su un gruppo di vertici controllo, di cui si conoscono a priori le coordinate nel sistema di riferimento finale. Individuate attraverso questa procedura le combinazioni di target più attendibili, le corrispondenti terne di parametri vengono trattate statisticamente al fine di determinare i valori più probabili.

Più in dettaglio, la procedura può essere meglio esposta attraverso il diagramma di flusso di fig. 2, che evidenzia i passi operativi previsti:

- nella zona di sovrapposizione delle scansioni ed ai margini dell'oggetto da rilevare vengono rispettivamente scelti un gruppo di punti omologhi (target) ed un gruppo di vertici di controllo;
- si esegue un rilievo topografico A.P. o un posizionamento G.P.S. dei punti omologhi e dei vertici di controllo. Nella seconda ipotesi (rilievo G.P.S.) le coordinate saranno riferite al sistema geocentrico W.G.S. 84, per cui, ai fini della presente applicazione, se ne dovrà effettuare la conversione rispetto ad una terna locale. Le coordinate così determinate saranno considerate esatte ai fini della procedura di registrazione delle scansioni;
- si eseguono le scansioni S1 ed S2 dell'oggetto, avendo cura che il sistema di riferimento della scansione S2 sia lo stesso utilizzato per il rilievo di inquadramento dei target e dei vertici di controllo;
- gli n target rilevati vengono combinati tra loro a gruppi di k elementi (con $K=1, 2, 3, \dots, n$), ottenendo un sistema ridondante di m combinazioni;
- utilizzando il modello procustiano OPA (ovvero un qualsiasi altro metodo di stima) si calcolano i parametri di trasformazione per ogni combinazione di target;
- si applicano le m terne di parametri di trasformazione alla rototraslazione dei vertici di controllo da S1 a S2;

- per ogni combinazione m si calcolano le coordinate dei vertici di controllo nel sistema S2 e, in corrispondenza, si determinano i valori dei relativi scarti rispetto al posizionamento effettuato col rilievo topografico o G.P.S. d'inquadramento;
- si assegna una tolleranza ε_{Δ} con cui confrontare i valori degli scarti Δ_i ;
- si esegue il confronto tra i residui Δ_i e la tolleranza ε_{Δ} ; le combinazioni per cui si ha $\Delta_i < \varepsilon_{\Delta}$ vengono accettate, mentre le altre vengono scartate;
- i parametri di trasformazione corrispondenti alle combinazioni accettate vengono elaborati statisticamente mediante un criterio di stima ai minimi quadrati, determinando i valori più probabili dei parametri di trasformazione da applicare alla scansione S1.

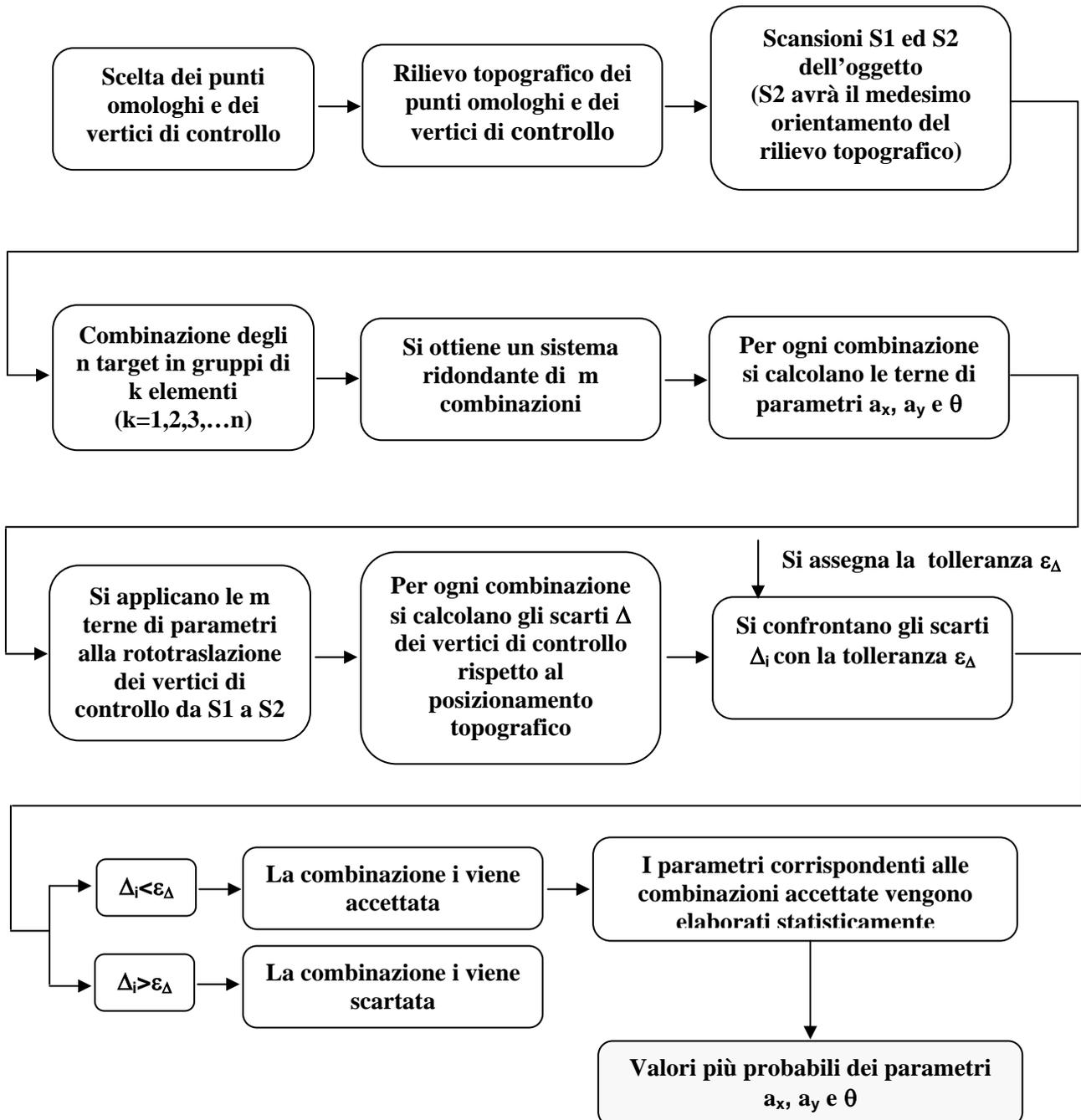


Figura 2: procedura operativa proposta per l'allineamento delle scansioni laser

3. Applicazioni del metodo proposto

Un primo test della procedura proposta è stato eseguito sui database simulati già utilizzati in precedenza, in cui i punti 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 hanno assunto il ruolo di vertici di controllo.

Assegnata una tolleranza $\varepsilon_{\Delta} = 3$ mm, si è eseguito il confronto tra i residui Δ_i e la stessa tolleranza, scartando 41 combinazioni su 83 e validando, di conseguenza, le restanti 42.

Un'altra combinazione, la DEFG, veniva successivamente scartata durante l'applicazione del criterio di stima ai minimi quadrati, al termine del quale venivano determinati i seguenti parametri di trasformazione:

$$a_x = -64,6855 \text{ m}$$

$$a_y = 115,9207 \text{ m}$$

$$\theta = -0,96828 \text{ rad}$$

Con tale terna di parametri si sono infine calcolate le coordinate finali dei vertici di controllo (fig. 3), verificando che i residui risultassero inferiori alla tolleranza assegnata (fig. 4).

Vertice	X_{S2} (m)	Y_{S2} (m)	Δ_x (mm)	Δ_y (mm)	Δ (mm)
1	79,80571	171,1919	-3,06E-04	-9,22E-04	9,71E-04
2	28,11065	130,484	1,32E-04	6,65E-04	6,78E-04
3	37,70133	162,2256	-1,13E-03	-2,96E-04	1,17E-03
4	25,98207	144,1686	1,53E-03	3,74E-04	1,57E-03
5	14,26646	126,113	5,37E-04	-2,89E-04	6,10E-04
6	18,75084	105,0601	-9,38E-04	-8,02E-05	9,41E-04
7	23,23471	84,00657	-2,01E-03	9,26E-04	2,22E-03

Figura 3: coordinate dei vertici di controllo nel modello finale

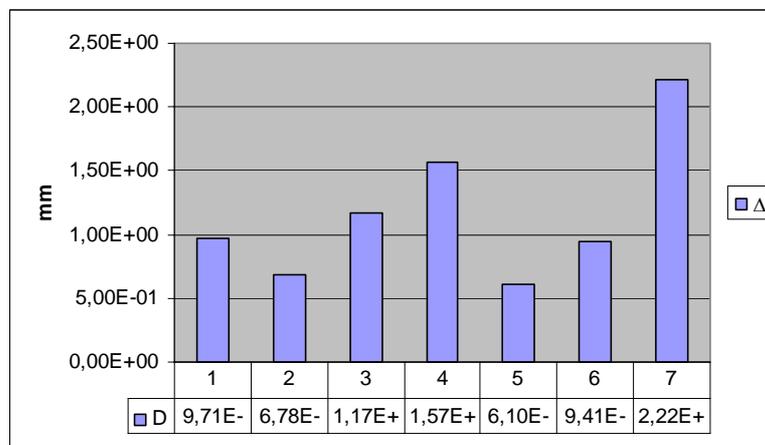


Figura 4: residui dei vertici di controllo nel modello finale

L'elaborazione evidenzia dei buoni risultati, in quanto i residui dei vertici sono inferiori ad 1mm in quattro casi su sette (vertici 1, 2, 5 e 6), sono compresi tra 1 e 2 mm in due casi (vertici 3 e 4), mentre soltanto per il vertice 7 si registra uno scarto superiore a 2 mm, ma comunque significativamente inferiore al valore della tolleranza assegnata.

Altri due test, relativi a database acquisiti durante il rilievo di alcuni particolari architettonici di Palazzo Ciampoli a Taormina e del Duomo di Messina, hanno dato risultati in linea con le aspettative, confermandone la corretta impostazione.

Il metodo proposto è stato automatizzato con la realizzazione di una procedura in ambiente Excel. L'applicazione è estremamente semplice, in quanto richiede un input essenziale, costituito dal valore assegnato della tolleranza e dalle coordinate dei target e dei vertici di controllo nelle due scansioni, restituendo in output i parametri ottimali di rototraslazione.

4. Conclusioni

Il metodo proposto consente di ottimizzare i parametri di rototraslazione necessari per eseguire l'allineamento delle scansioni laser attraverso fasi operative, che richiedono particolare cura durante le fasi di progettazione ed esecuzione del rilievo, ma estremamente semplici, grazie all'utilizzo della procedura automatizzata, in fase di restituzione.

Pur non essendone ancora stata realizzata una diffusa applicazione a casi pratici, si ritiene che il metodo possa essere proficuamente adottato almeno in tutti quei casi in cui la precisione del modello restituito debba avere un ordine di grandezza millimetrico.

L'adozione della procedura automatizzata in ambiente Excel (che sarà prossimamente sviluppata in linguaggio Visual-Basic) non appesantisce infatti in misura apprezzabile l'elaborazione dei dati in fase di post-processing, per cui non comporta un particolare onere, richiedendo soltanto una maggiore attenzione in fase di progettazione del rilievo.

Si evidenzia inoltre che la procedura, anche in assenza di un rilievo preventivo dei target, è in grado di individuare su base probabilistica eventuali incongruenze nel posizionamento di uno o più segnali con la geometria d'insieme rilevata.

In quest'ultimo caso la possibilità di evidenziare probabili errori di posizionamento costituisce un vantaggio non trascurabile, considerato che tali errori, se non rilevati, si propagherebbero nel modello restituito.

Bibliografia:

Crosilla F., Beinat A., 2004: "Applicazioni dell'analisi procustiana alla trasformazione di datum in ambiente GIS", Atti 8^a Conferenza ASITA

Rinaudo F., 2002: "La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche" in "La tecnica del laser scanning: teoria ed applicazioni" – ed. CISM

Beinat, A. Crosilla F., 2002: "Tecniche avanzate di allineamento di scansioni laser" in "La tecnica del laser scanning: teoria ed applicazioni" – ed. CISM

Crosilla F., 1999: "Procrustes Analysis and Geodetic Sciences" in "Quo vadis geodesia...?" Department of Geodesy and GeoInformatics University of Stuttgart

Goodall C., 1991: "Procrustes methods in the statistical analysis of shape", Journal Royal Stat. Soc., B53, 2, 285-339