

UN ALGORITMO PER LA CORREZIONE RADIOMETRICA DI DATI LASER TERRESTRI

Franco COREN (*), Domenico VISINTINI (**), Marcello BALZANI (***), Paolo STERZAI (*), Guido PREARO (**), Federico UCCELLI (***)

(*) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Gruppo di ricerca CARS, Borgo Grotta Gigante 42/c 34010 TRIESTE, tel. 040 2140255, *email* fcoren@ogs.trieste.it, psterzai@ogs.trieste.it

(**) Università di Udine, Dipartimento di Georisorse e Territorio, via Cottonificio 114 - 33100 UDINE tel. 0432 558719, *email* domenico.visintini@uniud.it, guido.prearo@uniud.it

(***) Università degli Studi di Ferrara, Centro di Ricerca DIAPReM c/o Dipartimento di Architettura, via Quartieri, 8 44100 FERRARA, tel. 0532 293601, fax 0532 293630, *email* marcello.balzani@unife.it, clf@unife.it

Riassunto

Il presente articolo descrive un algoritmo in grado di ottenere un'accurata correzione radiometrica del dato laser terrestre, allo scopo di condurre ad una quantità nota come pseudo-riflettanza. L'algoritmo proposto, a seguito della definizione della legge di risposta della superficie riflettente e della legge di divergenza del raggio emesso dal laser terrestre, corregge i dati di intensità in funzione della direzione normale uscente di incidenza del raggio, stimata in riferimento ad un piano locale, rispetto all'angolo solido calcolato nell'origine del sistema di presa. L'algoritmo è stato sviluppato sia in ambiente MatLab[®] sia in ambiente C++[®], nell'intento di renderlo pienamente integrabile con numerosi software di gestione di dati laser. Allo scopo di comprovare i risultati così ottenuti, è stata condotta un'ampia di sperimentazione sulle misure acquisite con lo strumento HDS 3000 della Leica[®], sul complesso della chiesa di S.Andrea in Mantova. La campagna di misure è stata autonomamente ed interamente condotta dal Centro di Ricerca D.I.A.P.Re.M. (*Development of Integrated Procedures for Restoration of Monuments*) del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara.

Abstract

This paper deals with the calibration of terrestrial laser intensity measures. As known, 3D terrestrial laser scanner provide with a great amount of geometric data. An important and still seldom used information is the one given by laser backscattering. In this paper we propose a geometric algorithm for terrestrial laser intensity calibration, based onto two different steps. Firstly a distance-based calibration is computed, taking into account the fact that a laser beam varies its intensity when passing through a given medium. In this phase a global air absorption coefficient is estimated. Secondly, two separate geometric reflectance models are implemented, depending on the acquired features whose intensity measures need to be calibrated. Lambertian and Lommel-Seeliger reflectance models were implemented initially in MatLab[®] environment and secondly ported in C++[®] language, both leading to a new DN (Digital Number), defined as pseudo-reflectance. Differently from a common data stretching procedure, results so far obtained with this method, show the possibility to appreciate micro-discontinuities in pseudo-reflectance data, usually corresponding to non homogeneous areas in the object acquired. The data acquisition campaign has been entirely carried on by the D.I.A.P.Re.M. research laboratory group of the Architecture Department of the University of Ferrara.

La ricerca rientra nell'ambito delle attività previste dal progetto INTERREG IIIA Phare/CBC Italia-Slovenia "Ricomposizione della cartografia catastale e integrazione della cartografia tecnica regionale numerica per i sistemi informativi territoriali degli enti locali mediante sperimentazione di nuove tecnologie di rilevamento" svolto dall'Università di Udine in collaborazione con il Geodetski Inštitut Slovenije di Lubiana.

1. Introduzione

Uno dei principali ed indiscutibili vantaggi del rilievo laser a scansione risiede nella rapidità di acquisizione di una vasta quantità di informazioni geometriche. Tuttavia, se per alcuni ambiti applicativi tale enorme mole di dati rappresenta già il “rilevamento finale”, lo stesso non risulta corrispondere al vero quando il rilievo laser a scansione debba essere applicato in ambiti che prevedano la restituzione vettoriale dell'oggetto scansionato attraverso procedure di classificazione/segmentazione. Tale fase di “elaborazione” dei dati ottenuti spesso si fonda sull'utilizzo di criteri che vadano a considerare esclusivamente le eventuali caratteristiche geometriche dissimili tra i punti misurati. Meno note, ma talvolta egualmente efficaci, sono le classificazioni che utilizzano come principio fondante la componente radiometrica o colorimetrica (RGB) dello stesso dato laser. Tali tecniche, che spesso fanno riferimento a quelle maggiormente note e diffuse applicate nell'ambito del telerilevamento classico, necessitano di opportune attenzioni vista l'instabilità del dato di riflettanza, dovuta alla forte dipendenza di quest'ultimo da fattori ambientali e geometrici delle scansioni.

L'idea di base esposta con il presente elaborato, è quella di calibrare e correggere opportunamente i valori di intensità acquisiti per sfruttarli vantaggiosamente ai fini del rilievo. La principale difficoltà nello sfruttamento ed interpretazione del dato radiometrico risiede purtroppo nella scarsa ampiezza del valore di banda emessa dai comuni strumenti (generalmente $\lambda = 1.500 \mu\text{m}$). Comunque sia, nel caso di scansioni sufficientemente raffittite si è in grado di apprezzare visivamente la differenza tra materiali eterogenei proprio grazie al colore attribuito a seguito del valore di riflettanza registrato. Nel caso del rilievo con laser scanner di superfici prevalentemente omogenee (una parete intonacata, un muro in laterizio, ecc...), si possono ancor meglio evidenziare le aree di eterogeneità agendo opportunamente sulla scala dei colori con cui visualizzare i dati di riflettanza, tecnica di grande utilizzo nel settore della diagnostica strutturale. In realtà, attualmente l'informazione radiometrica è sfruttata solo per automatizzare l'individuazione di *targets* adesivi costituiti da materiale di elevata riflettività, ottimizzando così l'allineamento e la georeferenziazione di diverse scansioni. Tale parziale utilizzo risulta spesso dovuto al fatto che, per ridurre il numero di posizioni di scansione e per esigenze logistiche nell'effettuazione delle stesse, si acquisiscono dati radiometrici non immediatamente interpretabili. Tali valori infatti risentono fortemente degli angoli di incidenza e della distanza dalla sorgente e non sono quindi registrati in modo omogeneo.

La possibilità di correggere a posteriori il valore di riflettanza, consente allora la trasformazione di dati “disordinati” in dati “interpretabili”, favorendo l'opera di chi intende effettuare un'indagine diagnostica su nuvole di punti composte da scansioni effettuate da postazioni differenti e orientamenti angolari variabili. Allo stesso tempo, il rilevatore non dovrà più prestare particolare attenzione alla disposizione dell'attrezzatura nella fase di scansione poiché non sarà più necessario mettersi in quelle condizioni di presa che assicurano dati radiometrici omogenei.

Le principali strumentazioni laser terrestri registrano l'intensità dell'onda di ritorno come un DN (*Digital Number*) compreso tra un valore minimo di soglia ed il massimo registrato in corrispondenza dei *target* riflettenti posizionati sull'oggetto scansionato. Tale DN, il cui campionamento non è quasi mai una funzione lineare, è principalmente funzione di alcune importanti grandezze fisiche, come illustrato al successivo punto 2. La presenza di particelle e di disomogeneità nel mezzo fluido (atmosfera) fa sì che l'onda che l'attraversa venga diffusa: ciò porta principalmente ad una riduzione del contrasto (perdita d'informazione) ed un filtraggio indesiderato della radiazione utilizzata. Il processo risulta comunque coerente, ovvero in grado di mantenere molte delle informazioni e delle proprietà della radiazione incidente. Tuttavia, mentre nelle applicazioni tradizionali del telerilevamento si dispone di un numero elevato di lunghezze d'onda, memorizzando l'andamento della riflettanza in funzione delle stesse ottenendo così le ben note “curve di riflettanza” (o “firme spettrali”), nel caso del rilievo laser terrestre, la monocromia dell'acquisizione richiede ancora a maggior ragione nuovamente una calibrazione radiometrica. I

modelli teorici di calibrazione qui presentati sono stati sviluppati dal dott. Franco Coren del gruppo di ricerca CARS presso l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale.

2. Cenni sulla teoria dei modelli di riflettanza

L'albedo ρ è la misura del rapporto tra radiazione elettromagnetica riflessa da una superficie o da un oggetto e la radiazione incidente. Nel presente paragrafo viene descritta la natura ed i principi di calcolo degli albedi di maggior utilizzo pratico nella modellistica superficiale. Tale quantità rappresenta una proprietà intrinseca della superficie riflettente, cui è possibile riferirsi con il nome di "albedo fondamentale" ρ_0 , dal momento che ogni altra tipologia di albedo risulterà essere funzione dello stesso ρ_0 . (Coren e Sterzai, 2005). In funzione invece della natura geometrica della superficie colpita andrebbero definiti diversi albedo superficiali: le caratteristiche dei due principali modelli, quello normale e quello emisferico, sono brevemente riportati nella seguente Tabella 1.

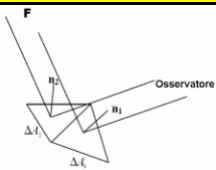
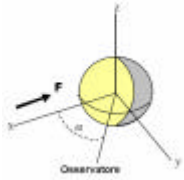
| Albedo | schema | Direzione risposta radiante | Definizione |
|------------|--|-----------------------------------|--|
| Normale |  | Tutte le direzioni con valore F/p | $\rho_n = \pi f_r (\mu_0 = \mu_1 = 1)$ |
| Emisferico |  | Tutte le direzioni con valore F/p | $\rho(\mu_0, \beta_0) = \frac{M}{E(\mu_0, \beta_0)}$ |

Tabella 1: Principali caratteristiche dei modelli di albedo normale ed emisferico.

Semplificando, l'energia riflessa dalla superficie colpita dal sensore dipende:

- dalla direzione della sorgente luminosa rispetto all'oggetto osservato, ovvero dalla direzione dell'energia incidente, valutabile secondo angoli zenitali e azimutali;
- dalla direzione lungo la quale il sensore vede la superficie investigata (cioè dalla direzione di osservazione);
- dalla lunghezza d'onda impiegata;
- dall'albedo superficiale, modellizzabile secondo il principio di riflettanza bi-direzionale;
- dalle condizioni termo-igrometriche del mezzo di propagazione dell'onda elettromagnetica;
- dalla prossimità dell'oggetto colpito ad altri corpi fortemente riflettenti.

Data la monocromia della sorgente costituita dal laser terrestre, e dato il fatto che nelle applicazioni *close range* può essere di fondamentale importanza la presenza di sorgenti luminose esterne, si è scelto di implementare il modello lambertiano ed il modello di Lommel-Seeliger. Per la teoria del modello lambertiano di riflettanza, di facile interpretazione, si rimanda alla letteratura, mentre di diversa complessità è invece la legge di Lommel-Seeliger, che rappresenta una relazione basata sull'isotropia del principio della riflessione diffusa.

Il modello di Lommel-Seeliger può essere sinteticamente riassunto come segue:

1. la luce emessa dalla sorgente luminosa penetra la superficie dell'oggetto scansionato, subendo un'attenuazione di tipo esponenziale;
2. ogni volume infinitesimo che venga incontrato dal fascio luminoso, riflette parte dello stesso in maniera isotropa, ovvero in maniera del tutto equipollente nei 4π steradiani che lo circondano;
3. ne consegue che, dell'intera radiazione retrodiffusa, solamente la metà sarà reindirizzata in uscita dalla superficie colpita dal raggio di luce, e questa stessa quota parte subirà inoltre un'ulteriore attenuazione prima di riemergere dalla superficie stessa e di raggiungere il sensore.

Analiticamente, si supponga che la superficie *target*, sia irradiata all'istante t da una intensità di flusso radiante nota F , con un generico angolo di incidenza θ_i . In questo caso varrà che l'irradianza E potrà essere espressa come $E = F \cos \theta_i$. Considerando ora l'irradianza riflessa nella direzione espressa dall'angolo θ_r , e ricordando come debba valere che $\theta_r < \pi/2$, ponendo $\mu_0 = \cos \theta_i$ e $\mu_1 = \cos \theta_r$, la densità di flusso incidente nello spessore superficiale esistente tra t e $(t+\Delta t)$ è:

$$F_{t+\Delta t} = F \cdot e^{\pm \frac{\Delta t}{m_0}}$$

mentre il contributo dovuto alla radianza diffusa in direzione μ_1 dallo *scattering* isotropo è:

$$L = \frac{w_0}{4p} F \cdot e^{\pm \frac{\Delta t}{m_0}} \cdot \frac{\partial t}{\partial \mathbf{m}} \quad f_r = \frac{\omega_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{\mu_0 + \mu_1}$$

dove w_0 rappresenta il singolo albedo superficiale ed f_r è la funzione di distribuzione bidirezionale della riflettanza secondo la legge di Lommel-Seeliger.

3. Descrizione sintetica dell'algoritmo implementato

Come precedentemente illustrato, l'informazione radiometrica dei dati laser non può essere utilizzata nella sua forma originaria. La struttura dei dati laser terrestri è costituita da una matrice di dimensioni $[n_p \times 7]$, con n_p numero di punti acquisiti. Il dato radiometrico relativo all'intensità del segnale di ritorno, viene memorizzato secondo un sistema proprietario della società produttrice dello strumento. Esso si basa su algoritmi di conversione della potenza in arrivo al sensore in DN, con formato di campionamento a 8 bit. Allo scopo di giungere alla calibrazione della radiometria laser terrestre, sulla base dei modelli teorici sin qui descritti è stato sviluppato un algoritmo in grado di giungere ad una quantità nota come pseudo-riflettanza e dimensionalmente esprimibile come $[m^{-2} e^{-m}]$. L'algoritmo sviluppato, pur garantendo un elevato grado di automazione, richiede comunque la definizione manuale, da parte dell'utente, di alcuni parametri iniziali (Figura 1), quali:

1. il coefficiente a di assorbimento dell'aria, strettamente legato alle condizioni ambientali durante l'acquisizione;
 2. l'origine $\mathbf{O}(E,N,Z)$ di ogni singola posizione di scansione, memorizzata in alcuni sistemi direttamente nel file di *output* dopo aver eseguito l'allineamento delle scansioni.
 3. il modello di riflessione (Lambertiano o Lommel-Seeliger) scelto per la superficie scansionata.
- Dopo di ciò, l'algoritmo computa n_p distanze D punto-origine, e per ogni punto \mathbf{P} ricerca un insieme di punti vicini $n_{i(P)}$ all'interno di un prefissato raggio di ricerca. Noto allora il coefficiente α di assorbimento dell'aria, si corregge il valore radiometrico originario $I_i^{(raw)}$ mediante la relazione:

$$I_i^{(air)} = \frac{1}{4D^2} \cdot e^{-2\alpha D} \cdot I_i^{(raw)}$$

Detta $\mathbf{A}_{(P)}$ la matrice di dimensioni $[n_{i(P)} \times 3]$, contenente le coordinate dei punti ricadenti entro l'intervallo prescelto, e $\mathbf{z}_{(P)}$ il vettore di dimensioni $n_{i(P)}$ delle sole quote dei medesimi punti, si ha:

$$\hat{\mathbf{z}}_{(P)} = \left[\mathbf{A}_{(P)}^T \mathbf{A}_{(P)} \right]^{-1} \mathbf{A}_{(P)}^T \mathbf{z}_{(P)}$$

rappresenta la stima ai minimi quadrati del vettore $\hat{\mathbf{z}}_{(P)}$ contenente i parametri del piano nello spazio interpolante gli $n_{i(P)}$ punti. Detto \mathbf{n} il versore $[n_x, n_y, n_z]$ normale uscente al piano $\hat{\mathbf{z}}_{(P)}$ e \mathbf{t} il versore $[t_x, t_y, t_z]$ contenente le componenti congiungenti l' i -esimo punto \mathbf{P} con l'origine \mathbf{O} della scansione, l'algoritmo procede al calcolo dell'angolo β compreso tra \mathbf{n} e \mathbf{t} , attraverso il prodotto scalare delle componenti dei due versori. A seguito della scelta dell'utente del modello geometrico di calibrazione più opportuno, funzione della natura della superficie dell'oggetto, avremo che:

$$I_i^{\text{lambertian}} = \left(\frac{1}{\cos \beta} \right) \cdot I_i^{(\text{air})}$$

rappresenta il valore di pseudo-riflettanza secondo una modellizzazione di tipo lambertiano, mentre:

$$I_i^{\text{lommel}} = \left(\frac{\omega_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{2 \cos \beta} \right) \cdot I_i^{(\text{air})}$$

rappresenta la correzione radiometrica secondo il modello di Lommel-Seeliger, secondo la notazione già utilizzata nel paragrafo precedente. In Figura 1 è riportato il diagramma di flusso completo dell'algoritmo implementato, unitamente al principale *dialog-box* proposto all'utente.

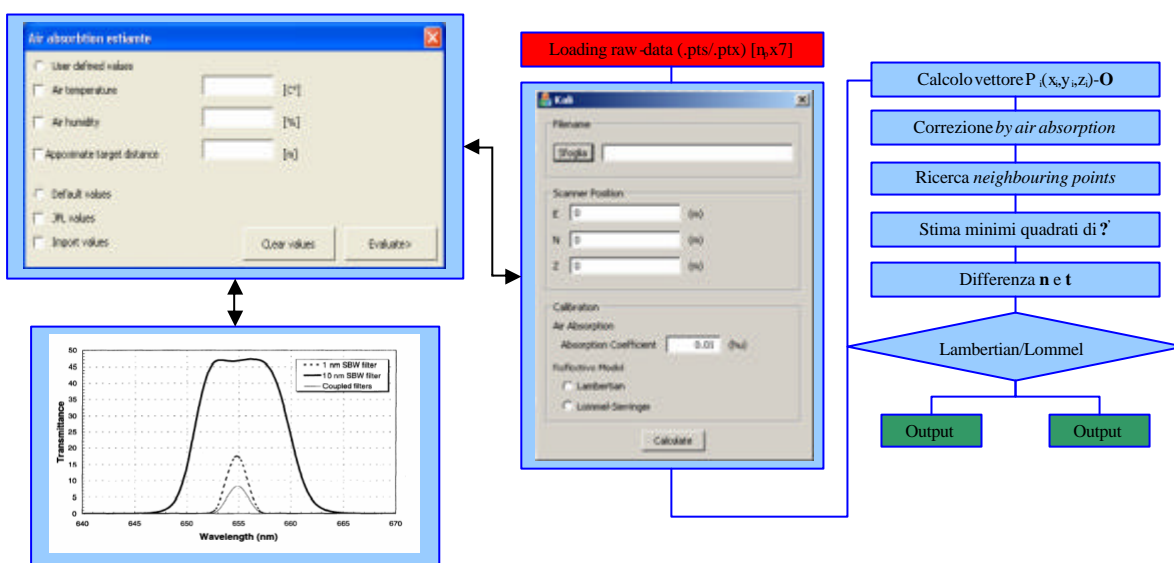


Figura 1: Diagramma di flusso dell'algoritmo di calibrazione radiometrica.

4. Sperimentazione sui dati del rilievo laser della basilica di Sant'Andrea in Mantova

Allo scopo di comprovare la fondatezza e la piena efficienza del modello analitico implementato, è stata condotta una campagna di rilievo laser 3D della Chiesa di Sant'Andrea in Mantova, complesso rinascimentale di grande interesse storico ed architettonico, noto non solo per la fama del suo progettista, Leon Battista Alberti, ma anche per le numerose novità formali rispetto al periodo storico suo proprio e complessità del sedime dell'edificio. Le scansioni laser sono state eseguite con un sistema HDS 3000 della Leica® unitamente alle misure topografiche con una stazione totale Leica TCR 1101 allo scopo di georeferenziare le scansioni in un unico modello 3D. Durante la campagna di acquisizione delle misure tuttavia, non si è proceduto alla registrazione delle informazioni relativa alle condizioni climatiche. Tale mancanza non ha consentito dunque la possibilità di studiare, in maniera specifica, la possibile correlazione tra il coefficiente a di assorbimento dell'aria sopra descritto, implementato nel modello di calibrazione, e le condizioni di umidità e temperatura dell'aria. A tal proposito, si è dunque dovuti ricorrere, in fase di calibrazione del dato radiometrico, a valori noti del suddetto coefficiente a , riportati in letteratura (Figura 1-basso). Si è proceduto alla calibrazione del dato radiometrico suddividendo anzitutto il *dataset*, attraverso l'utilizzo del software Cyclone ver 5.3 della Leica®, in sotto-insiemi di acquisizione dalle caratteristiche di materiale omogenee, studiandone le distribuzioni statistiche. La Figura 2, ad esempio, relativa a tale analisi condotta rispetto ai punti laser appartenenti alla copertura in tegolo della basilica, mostra come, dopo il processo di calibrazione, l'istogramma del *dataset* risultante tenda a disporsi perfettamente secondo una distribuzione normale. Sono stati allora calcolati i principali parametri statistici di tali distribuzioni, e da questi si sono ricavate le percentuali di riflettanza media per i singoli sotto-insiemi di punti considerati, i cui valori sono riportati in Tabella

2. Pur considerando tale risultato ancora parziale ed incompleto, ciò nonostante attraverso questo approccio è stato possibile giungere ad una classificazione sufficientemente accurata dell'intero *dataset* acquisito, giungendo ad apprezzabili risultati ai fini della restituzione/classificazione del rilievo. Il rilievo oggetto della sperimentazione, è stato effettuato all'interno del più ampio progetto di ricerca in corso tra la Fondazione Centro Studi Leon Battista Alberti con sede in Mantova, e il Centro di Ricerca D.I.A.P.Re.M afferente al Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara

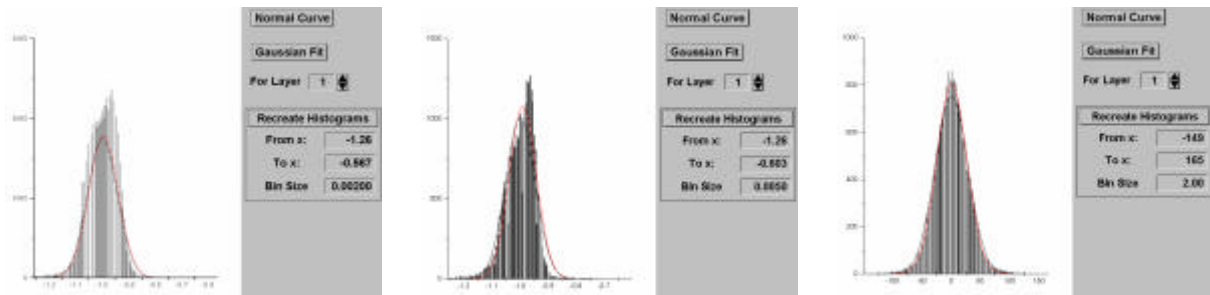


Figura 2: (a) *raw dataset*, (b) *dataset* normalizzato, (c) *dataset* calibrato.

| Materiale | media | mediana | varianza | curtosi | intervallo 99% | percentuale di riflettanza |
|-------------------|-------|---------|----------|---------|----------------|----------------------------|
| Intonaco facciata | 421 | 417 | 107 | 14.853 | 0.4586 | 66.37 % |
| Muratura | 233 | 229 | 141 | 12.106 | 0.3364 | 51.69 % |
| Vetro | 568 | 554 | 601 | 26.111 | 0.0025 | 91.35 % |
| Manto copertura | 380 | 379 | 460 | 22.756 | 0.1197 | 79.22 % |

Tabella 2: Principali parametri statistici dei *dataset* calibrati.

5. Conclusioni

L'articolo illustra l'implementazione di un algoritmo per la calibrazione della risposta radiometrica di dati laser terrestri, allo scopo di condurre ad una quantità nota che definiamo pseudo-riflettanza. I differenti modelli teorici implementati hanno dimostrato come sia possibile ottenere un'accurata correzione del valore d'ampiezza, sia attraverso la modellizzazione della risposta della superficie colpita sia attraverso la quantificazione dell'effetto di assorbimento costituito dall'aria. Il modello teorico, implementato di un software *stand-alone*, ipotizza il comportamento della superficie colpita come appartenente ad una famiglia di risposte lambertiane. A seguito della definizione della legge di divergenza del raggio emesso dal laser terrestre, l'algoritmo corregge i dati di ampiezza in funzione della normale uscente di incidenza del raggio, stimata in riferimento ad un piano locale, rispetto all'angolo solido calcolato nell'origine del sistema di presa. I risultati ottenuti incoraggiano lo sviluppo di un simile approccio basato però sulla piena conoscenza delle condizioni termometriche presenti durante la campagna di acquisizione.

Bibliografia

- Boccardo, P., Borgogno Mondino E., Giulio Tonolo, F., 2004. Application based on orthorectified high resolution and hyperspectral images. In: *Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istanbul, Turkey, Vol. XXXV, Part B7, pp. 1067-1072.
- Coren F., Sterzai P., 2005. Radiometric correction in laser scanning, *International Journal of Remote Sensing*, in stampa.
- Prearo G., Balzani M., Coren F., Visintini D, Sterzai P., Zaltron N., 2005. Un modello geometrico di calibrazione terrestre, Relazione al 50° Convegno Nazionale della SIFET, Mondello - Palermo, 2005, Bollettino della SIFET, in stampa.