

CALIBRAZIONE GEOMETRICA DI IMMAGINI ACQUISITE MEDIANTE CAMERA TERMICA

E.Borgogno Mondino(*), F. Giulio Tonolo(*), A.Lingua(*)

(*) DITAG, Politecnico di Torino, Torino
enrico.borgogno@polito.it; fabio.giuliotonolo@polito.it; andrea.lingua@polito.it

Riassunto

La recente acquisizione da parte del DITAG (Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie) del Politecnico di Torino della camera termica NEC Thermo Tracer TH9100MV/WV, finalizzata ad applicazioni di rilevamento ambientale e architettonico ha suggerito di indirizzare la ricerca verso gli aspetti geometrici delle immagini così generate. La camera è dotata di due ottiche separate che richiedono opportune analisi finalizzate alla comprensione delle relazioni geometriche che le legano, al duplice scopo di co-registrare le immagini derivanti dai due sistemi di presa e di orientarle correttamente nello spazio per la produzione di ortofoto e/o mosaici complessi. Il problema della registrazione delle immagini è stato affrontato con un approccio semplificato basato su trasformazioni piane, nell'ipotesi che i soggetti inquadrati siano complanari e la presa normale. Prove condotte su un idoneo poligono predisposto all'interno del dipartimento ha inoltre consentito di valutare le dipendenze dei parametri di tali trasformazioni dalla distanza del soggetto ripreso. Ulteriori analisi sono state parallelamente condotte per definire la dipendenza delle approssimazioni apportate rispetto alla geometria della presa e dell'oggetto.

Summary

Recently the Geomatics research group of the DITAG (Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie) of Politecnico di Torino has acquired a NEC ThermoTracer TH9100MV/WV in order to face environmental and architectural problems related to thermal emission. This system is equipped with two cameras: a visible and a thermal one. In this work we show a basic approach to the geometric management of the images recorded by the two systems, looking for solutions to the problem of images co-registration and orientation. The proposed solution is a simplified one, based on flat transformations between visible and thermal images. Hypothesis is that recorded objects reasonably lay over the same plane and that the acquisition is a normal one (architectural field). Transformations parameters dependency from object distance has been investigated. Error analysis has been done considering the relationship between the visible and thermal recording systems, which have been preliminarily calibrated.

Il sistema NEC ThermoTracer 9100

Il sistema *NEC ThermoTracer 9100* acquisito dal gruppo di ricerca è dotato di due sistemi ottici, uno termico ed uno visibile, i cui assi principali non risultano coincidenti, ma sovrapposti e giacenti, si suppone, sullo stesso piano.

Specifiche tecniche di dettaglio, descrittive rigorosamente l'architettura del sistema, non è stato ancora possibile reperirle. Le informazioni relative alla geometria dei due sistemi ottici, comunicate nei manuali messi a disposizione dell'utenza, risultano



insufficienti alla loro descrizione finalizzata alle valutazioni che si intendono compiere. Tuttavia, alcuni parametri possono essere utili per le necessarie verifiche alla calibrazione dei sistemi.

I parametri geometrici noti dei due sistemi (le cui ottiche sono facilmente riconoscibili in Figura 2) sono riportati in Tabella 2.

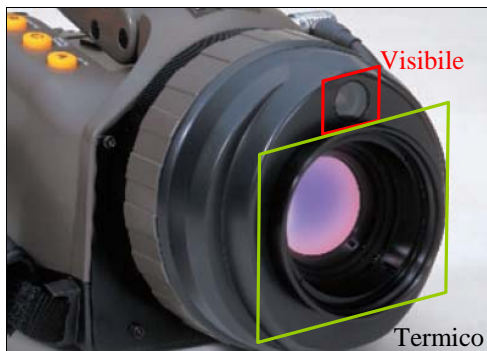


Figura 1 - Ottiche dei sistemi di acquisizione visibile e termico.

Essendo entrambi i sistemi di tipo non fotogrammetrico sono ignoti i parametri di orientamento interno dei due sistemi (distanza principale compresa).

Il sistema visibile risulta estremamente utile in fase operativa per il corretto inquadramento dei soggetti che spesso non sono riconoscibili nella loro rappresentazione

termica (soprattutto in applicazioni architettoniche).

Camera Termica		Camera Visibile	
Tipo di Sensore	Uncooled focal plane array (microbolometro)	Tipo di Sensore	CCD
Distanza di messa a fuoco	Da 30 cm a ∞	Distanza di messa a fuoco	Da 30 cm a ∞
I.F.O.V.	1.2 mrad	I.F.O.V.	
Campo di vista	21.7°(H) x 16.4°(V)	Campo di vista	30.1° (H) x 22.7° (V)
Dimensioni immagine termica	320 (H) x 240 (V) celle	Dimensioni effettive immagine visibile	752 (H) x 480 (V) celle
Dim. cella	Incognita	Dim. cella	9.5 micron
Focale	Variabile ed incognita	Focale	Fissa incognita

Tabella 2 - Parametri noti dei sistemi di acquisizione visibile e termico.

Obiettivi della ricerca

La disponibilità dei due sistemi di presa accoppiati, suggerisce l'idea di utilizzare le immagini visibili anche per il corretto orientamento delle prese termiche, sfruttandone la migliore interpretabilità derivante dalla superiore risoluzione geometrica delle stesse e dalle dinamiche riflettive del segnale visibile rispetto a quelle radiative del segnale termico. Preme far notare come bordi radiometrici (tradizionalmente utilizzati per l'individuazione di punti di appoggio) facilmente ed univocamente riconoscibili sulle immagini visibili, risultino spesso incerti o assenti in quelle termiche. Tale esigenza risulta tanto più forte con soggetti estesi (tali per cui siano richieste più prese per coprirli) a variazione termica graduale, quindi privi di bordi radiometrici certi e riconoscibili (es. affreschi murari). Considerando la quasi planarità di soggetti di questo tipo (muri e facciate) è ipotizzabile pensare di appoggiare in modo automatico l'immagine termica sull'immagine visibile (attraverso una trasformazione piana) e successivamente procedere all'orientamento di quest'ultima realizzando nel contempo quello dell'immagine termica.

In questo lavoro sono state prese in considerazione tre trasformazioni piane a complessità variabile, analizzandone le prestazioni e le dipendenze dalla distanza media del soggetto inquadrato. Sono state inoltre condotte analisi finalizzate all'individuazione dei limiti di applicabilità dell'ipotesi di soggetto piano, cioè alla formalizzazione degli errori di registrazione delle immagini termica e visibile derivanti dalla non coincidenza degli assi ottici per soggetti posti a distanze differenti. Le prove condotte si riferiscono ad un modello di presa semplificato (come descritto di seguito) e presuppongono la conoscenza, almeno approssimata, di alcuni parametri di orientamento interno (distanza principale e dimensione fisica delle celle dei due sistemi). Questi sono stati determinati utilizzando punti di appoggio appartenenti ad un poligono opportunamente calibrato disponibile

presso il Dipartimento e trattando le prese con un software proprietario sviluppato dal gruppo di ricerca.

Il poligono calibrato è costituito da una serie di bersagli fissi posti sulle pareti esterne del dipartimento e (per le prese più vicine) su un pannello indeformabile. Questo è munito di barre metalliche sporgenti di diversa lunghezza che garantiscono variabilità altimetrica (nel sistema fotogrammetrico terrestre) sulla scena. Di tutti i bersagli sono note le coordinate (in un sistema metrico locale) rilevate con idonea strumentazione topografica.

Registrazione delle immagini termica e visibile

La mancata coincidenza degli assi ottici dei due sistemi impone, anche per oggetti piani, di procedere alla determinazione di un'opportuna trasformazione che legghi le due prese e possibilmente ne consenta la registrazione automatica anche in assenza di punti omologhi. In queste prove la trasformazione viene ipotizzata piana, pur riconoscendo che condizioni diverse dalla normalità della presa rendono restrittiva tale ipotesi. Risulta evidente una dipendenza dei parametri della trasformazione adottata dalla distanza del soggetto dai centri di presa. Pertanto duplice scopo di questa fase è stato:

- la determinazione della migliore trasformazione piana da adottare;
- la formalizzazione dei rapporti di dipendenza dei parametri che la definiscono dalla distanza dell'oggetto.

Le trasformazioni piane verificate sono state, in successione, quelle di tabella 3.

$c = \frac{aX + bY + c}{dX + eY + 1}$ $d = \frac{fX + gY + h}{dX + eY + 1}$	Omografia (OM)
$c = aX + b$ $r = eY + d$	Traslazione con variazione di scala anisotropa (4 parametri, TSA)
$c = aX + cost$ $r = eY + d$	Traslazione con variazione di scala anisotropa e con traslazione orizzontale (ΔX) fissata (3 parametri, TSA ΔX).

Tabella 3 – Trasformazioni adottate nel corso delle prove.

La scelta di procedere da una trasformazione più complessa, quale l'omografia, verso trasformazioni più semplici è stata suggerita sia dal modello proposto sul manuale d'uso della camera, sia in conseguenza all'analisi dei valori dei parametri stimati che evidenzia la trascurabilità dei termini diversi dalle traslazioni e

dalle variazioni di scala. L'analisi statistica di non significatività dei parametri stimati non è stata, al momento, ancora effettuata. In particolare si è scelto di testare anche la TSA ΔX poiché i valori della stima del parametro c nel modello TSA sono risultati quasi invariati rispetto alla distanza.

Per le prove sono state considerate 18 distanze camera-oggetto variabili tra i 3 m e i 40 m cui corrispondono altrettante acquisizioni. Le stime dei parametri delle tre trasformazioni sono state condotte, per ciascuna distanza, utilizzando un idoneo numero di punti omologhi (in nessun caso inferiori a 8) preventivamente riconosciuti sulle due scene (visibile e termico).

Siano definiti gli scarti sui punti omologhi $\begin{bmatrix} \Delta c_i = c_{si} - c_{oi} \\ \Delta r_i = r_{si} - r_{oi} \end{bmatrix}$, dove (c_{si}, r_{si}) sono le coordinate

immagine (termica) determinate in base ai modelli definiti e (c_{oi}, r_{oi}) sono le coordinate immagine (termica) collimate. Sia $E_i = \sqrt{\Delta c_i^2 + \Delta r_i^2}$ lo scarto complessivo. In figura 4 sono riportati gli

andamenti dell'errore quadratico medio (RMSE) definito come $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{punti}} E_i^2}{N-1}}$ in funzione

della distanza degli oggetti e del tipo di trasformazione. Si noti che i minori RMSE si realizzano per la trasformazione omografica mantenendosi sempre al di sotto della cella di immagine termica.

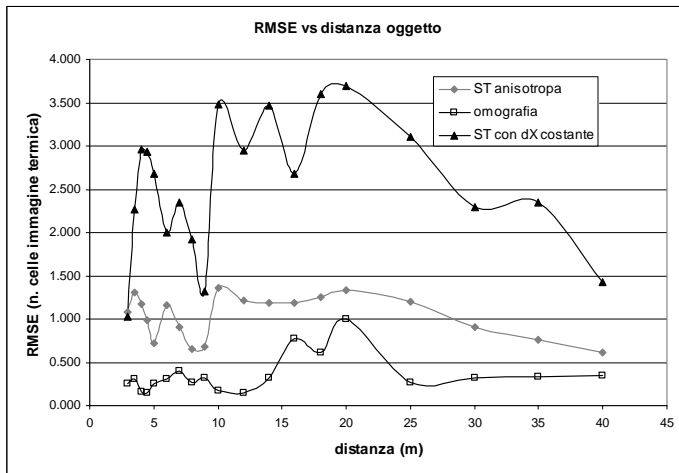


Figura 4 – Dipendenza dell’RMSE dalla distanza dell’oggetto considerato e dal tipo di trasformazione piana prescelta.

moltiplicativi applicati alla dimensione nota della cella visibile consentono di stimare una dimensione fisica della cella termica di 16.5 x 14.1 micron. Considerando la stessa trasformazione (TSA) come un buon compromesso tra la possibilità di interpretazione geometrica delle deformazioni e la validità della registrazione dell’immagine termica sul visibile, è possibile inoltre verificare che la traslazione verticale (d) è ben modellizzabile con una funzione di tipo polinomiale del tipo riportato in Figura 5.

Allo stato attuale della ricerca non è stata ancora individuata una legge di dipendenza dalla distanza del parametro traslazionale b , che per il momento è stato modellizzato con una regressione di tipo lineare al fine di disporre di uno strumento operativo (seppure approssimato) in grado di operare una registrazione automatica dell’immagine termica su quella visibile. Prime prove (Figura 6) evidenziano risultati accettabili con errori massimi di 2-3 celle. Si intende procedere alla determinazione della natura di tali errori residui, affrontando in primo luogo le eventuali approssimazioni introdotte dalla non perfetta planarità dell’oggetto.

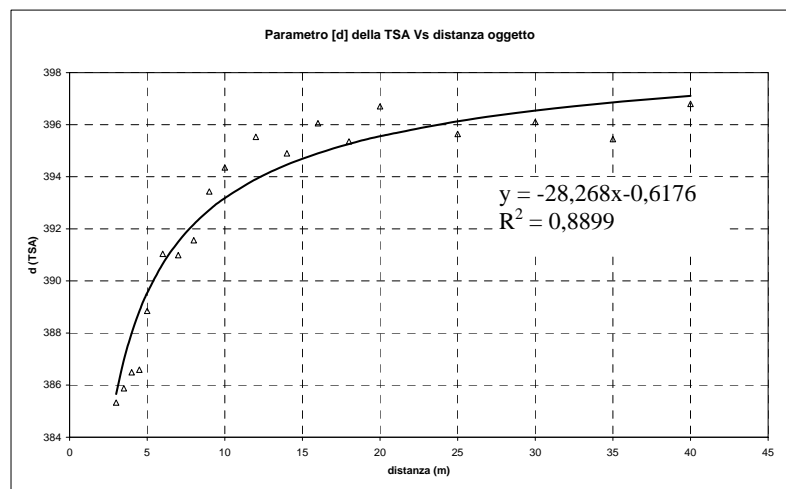


Figura 5 –Dipendenza del parametro d della TSA dalla distanza dell’oggetto.

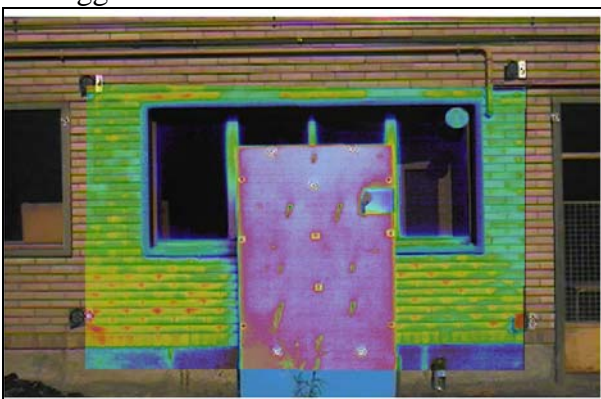


Figura 6 – Risultato della registrazione automatica dell’immagine termica su quella visibile condotta utilizzando la trasformazione a parametri dipendenti dalla distanza ($d = 8$ m).

Limiti di validità dell'ipotesi di complanarità degli oggetti

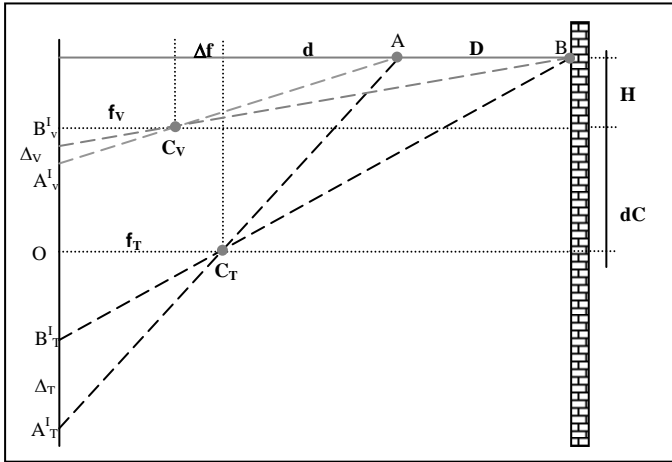


Figura 7 - Schema della presa (vista laterale) in cui è stata enfatizzata la distanza (verticale) tra gli assi ottici delle camere visibile e termica.

ottici delle due camere, ed in particolare le focali (f_T e f_V) e la dimensione della cella del sensore termico da utilizzarsi come soglia discriminante. Quest'ultima è nota con sufficiente approssimazione grazie ai parametri della trasformazione piana.

Le focali dei due sistemi sono state invece stimate con l'ausilio di un software sviluppato dal gruppo di ricerca operante su acquisizioni stereoscopiche per le quali siano noti un sufficiente numero di punti di appoggio. Prove ripetute, pur presentando qualche incongruenza nella stima dei parametri di orientamento esterno, hanno indicato i seguenti valori per le distanze principali: f_T (termico) $\cong 11$ mm, f_V (visibile) $\cong 25$ mm.

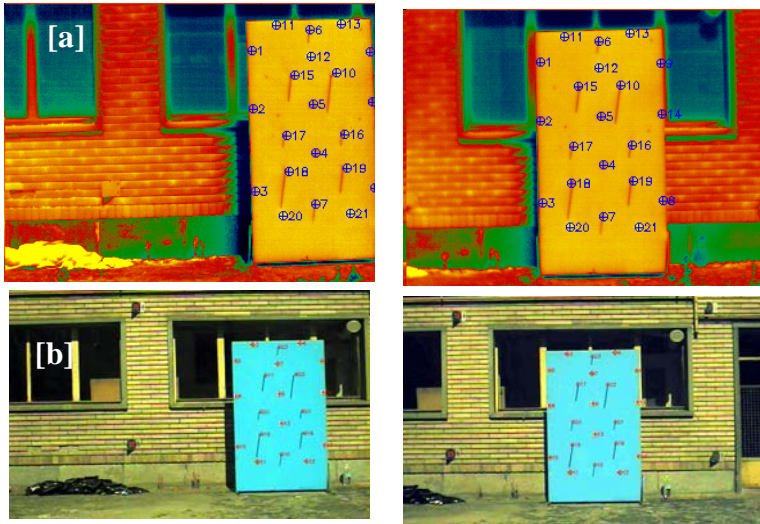


Figura 8 – Coppie stereoscopiche (una termica [a]) ed una visibile e colori reali [b]) utilizzate per la calibrazione degli obiettivi ($d = 8$ m). Da notare come l'area inquadrata dalla camera termica risulti più limitata di quella visibile.

Facili considerazioni di tipo geometrico consentono di definire le dipendenze della differenza ($\Delta_V - \Delta_T$), nei grafici di Figura 9 denominata "Delta":

- dalla distanza degli oggetti (d) fissando differenza di quota che li separa (D);
- dalla differenza di quota (D) fissando la distanza minima (d);
- dalla posizione del punto immagine (a_T) rispetto al punto principale fissando d e D .

Tali dipendenze risultano dalle seguenti relazioni, facilmente deducibili geometricamente:

$$\Delta_V - \Delta_T = \left[\frac{f_V}{d + (f_T - f_V)} \cdot \frac{H \cdot D}{d + (f_T - f_V) + D} \right] - \left[\frac{f_T}{d} \cdot \frac{D + dC}{d + D} \right] \quad [1]$$

$$H = \frac{a_T}{f_T} \cdot (d + D) - dC \quad \text{con} \quad a_T = \overline{OA^I_T} \quad [2]$$

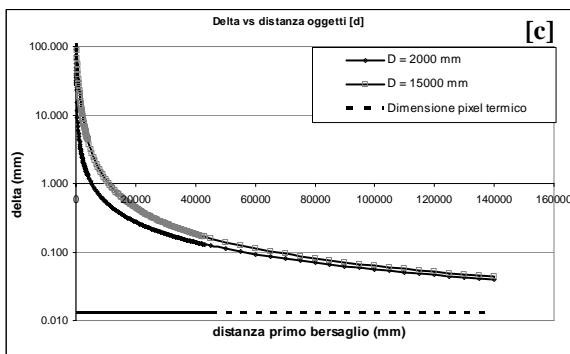
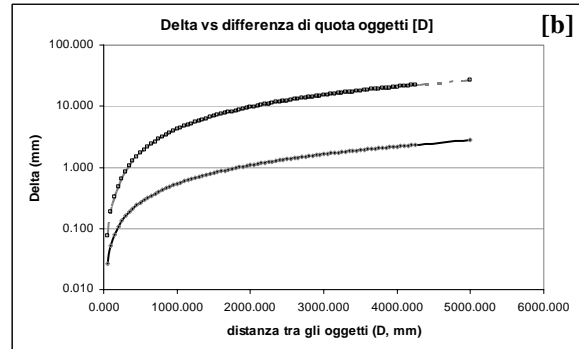
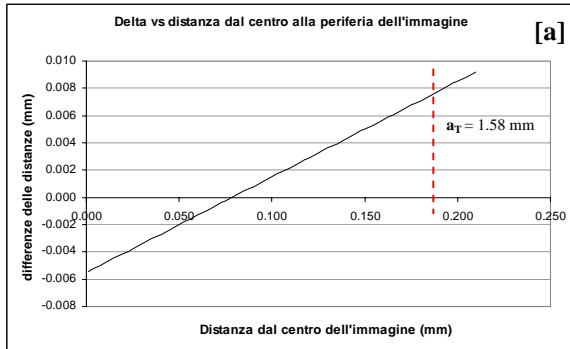


Figura 9 – Dipendenze dell'errore di registrazione dell'immagine termica su quella visibile:
 [a] - dalla posizione della cella rispetto al punto principale dell'immagine [$d=10m, D=0.5m$];
 [b] - dalla differenza di quota degli oggetti inquadrati [$d=0.5m, d=5m$];
 [c] - dalla distanza degli oggetti [$D=2m, D=15m$].

Ricostruendo le dipendenze e visualizzandole in forma grafica appaiono evidenti alcuni elementi interessanti:

- 1) da Figura 9 [a] si può dedurre che l'errore di registrazione indotto dalla posizione delle celle termiche rispetto al punto principale si mantiene sempre al disotto della cella (il caso rappresentato si riferisce a distanze di 10 m e differenze in quota degli oggetti di 0.5 m) e varia con andamento lineare;
- 2) da Figura 9 [b] si può dedurre che l'errore di registrazione indotto da una differenza di quota tra gli oggetti è inferiore alla cella solo se questa è prossima ai 5 cm;
- 3) da Figura 9 [c] risulta invece evidente come solo per oggetti molto lontani l'errore di registrazione si mantenga al di sotto della singola cella termica.

Conclusioni

Le prove eseguite mostrano una sostanziale difficoltà di registrazione accurata tra le immagini visibile e termica mediante trasformazioni piane, principalmente dovuta alla non coincidenza dei due sistemi ottici. Sono, però, state individuate le condizioni operative per cui l'assunzione di trasformazione piana consenta di ottenere errori accettabili. La soglia di accettabilità dell'errore è stata restrittivamente fissata alla singola cella termica. Tale valore, tuttavia, per molte applicazioni tematiche (non fotogrammetriche) può essere spinto anche oltre. In tal caso l'approccio di registrazione automatica proposto può rivelarsi uno strumento utile e di facile utilizzo, richiedendo all'utente la sola conoscenza della distanza della presa. Sono tuttora in corso ricerche mirate alla calibrazione rigorosa degli obiettivi attraverso la predisposizione di nuovi poligoni più appropriati, con l'intento di affinare l'approccio e definire trasformazioni che coinvolgano la terza dimensione spaziale.