

Un sistema integrato per la mappatura automatica di immagini IR su scansioni laser di edifici

Mario Ivan Alba, Luigi Barazzetti, Elke Di Flumeri,
Mattia Previtali, Elisabetta Rosina, Marco Scaioni

Politecnico di Milano, Dip. B.E.S.T., P.za Leonardo da Vinci 32, Milano
<mario.alba, luigi.barazzetti, diflumeri, elisabetta.rosina, marco.scaioni>@polimi.it
mattia.previtali@mail.polimi.it

Riassunto

L'articolo illustra una procedura per la mappatura di immagini IR su facciate di edifici rilevate con tecnologia laser scanning terrestre. A differenza delle metodologie normalmente impiegate in questa tipologia di applicazioni, che si basano in genere sulla stima di una trasformazione omografica oppure utilizzano un orientamento indipendente tramite *space resection*, l'approccio proposto è basato su un sistema "bi-camera" che consiste in una termocamera IR associata ad una camera digitale RGB. Le immagini RGB sono poi utilizzate per la stima dei parametri di orientamento del sistema stereo mediante una compensazione del blocco a stelle proiettive, da cui si ricava l'orientamento esterno delle immagini termiche. Il sistema è stato testato per l'analisi di alcuni edifici del Politecnico di Milano a supporto dei lavori di restauro delle facciate.

Abstract

This paper presents a methodology able to map a block of thermal images on 3D models created with terrestrial laser scanning. The method stands out from other approaches (mainly based on homography or space resection techniques) for the acquisition device adopted. Indeed, data acquisition is accomplished by a "bi-camera" system incorporating an IR thermal camera and a RGB camera. The processing pipeline is based on a bundle adjustment with the RGB images only. Then the RGB exterior orientation parameters are transferred to the IR images according to the relative calibration of the "bi-camera" system. The method was tested on different buildings of Politecnico di Milano, where a restoration project of facades is currently in progress.

1. Analisi di edifici con immagini IR

Le immagini termografiche IR sono oggi ampiamente utilizzate per l'analisi dello stato di conservazione degli edifici in quanto capaci di evidenziare, tramite lo studio delle anomalie termiche presenti sugli oggetti, eventuali difetti strutturali. In Maldague (2001) e Lagüela et al. (2011) sono riportati numerosi casi pratici che non si limitano al solo settore delle costruzioni (con esempi che includono anche la diagnostica degli strati di isolamento termico ed il monitoraggio delle tubazioni), ma anche applicazioni mediche o sportive, di pubblica sicurezza, gli studi sugli animali, ecc. In questo articolo sono riportati anche alcuni risultati preliminari ottenuti con immagini all'infrarosso vicino (NIR) che, a differenza delle immagini riprese nell'infrarosso termico, vengono acquisite con camere operanti su lunghezza d'onda più corte (comprese generalmente tra 0,75 1,4 μm) e sono principalmente utilizzate per l'identificazione della vegetazione e del suo stato di salute (Alba et al., 2011).

Lo scopo di questo lavoro è lo sviluppo di una procedura per la mappatura di immagini termografiche su modelli 3D di edifici che consenta di valutare, a livello globale, lo stato di

conservazione della struttura. Il metodo può essere considerato come una ispezione dell'oggetto che non richiede il contatto fisico con lo stesso, finalizzata all'estrazione delle principali caratteristiche relative, oltre alle proprietà geometriche, anche ai materiali che lo compongono e il loro stato attuale di conservazione. E' sin da subito importante ribadire come, al fine di soddisfare i requisiti necessari per una corretta analisi termica a cui va associata una ricostruzione geometrica accurata, la fase di acquisizione dei dati (immagini IR, RGB, NIR e scansioni laser) deve essere correttamente pianificata.

L'ispezione termografica di edifici tramite tecnologia IRT (*Infrared Thermography*) si basa sullo studio del flusso di calore che attraversa l'edificio. La temperatura risulta funzione del flusso e può fornire informazioni di rilievo riguardanti i vari strati che compongono l'oggetto. Il calore si trasferisce rapidamente attraverso gli strati con una elevata coesione e/o con maggiore diffusività termica. Differenze e discontinuità nei valori di temperatura causate dalle proprietà termiche intrinseche di oggetti quali mattoni, legname, rocce, malte, ecc., possono essere visualizzate tramite l'ispezione degli strati più esterni, che sono generalmente intonacati sia per la protezione degli stessi che per fattori estetici. Qualsiasi delaminazione dello strato protettivo modifica il trasferimento di calore aggiungendo una propria componente a quella del segnale dovuto all'involucro dell'edificio.

Il grande vantaggio di una analisi IRT riguarda la possibilità di eseguire analisi non distruttive, senza richiedere il contatto diretto con l'oggetto ed evitando quindi il posizionamento di ponteggi o altre piattaforme (ad esempio cestelli elevatori o trabattelli) che permetterebbero all'utente di raggiungere le zone di interesse. Il campo di temperatura rilevato varia generalmente tra -20 100 C, che corrisponde a lunghezze d'onda (calcolabili tramite la legge di Wien $\lambda = 2897,8/T$) comprese tra 7,7 11,4 μm . Ciò implica che il sensore della termocamera deve essere in grado di rilevare dati nello spettro *Long Wave IR*. Tale intervallo di valori, unitamente ai parametri dell'ottica utilizzata (focale f e diametro di apertura D), causa un diametro del *disco di diffrazione* (calcolabile come $d=2,44 \lambda k$, dove $k=f/D$) che, se nel caso di una comune camera RGB permette di avere una dimensione del pixel di pochi micrometri di lato, corrisponde ad almeno 30-50 μm nel caso di camere termiche.

Le termocamere utilizzate oggi si basano su due tecnologie differenti che impiegano *thermal* oppure *quantum detectors*. Nel primo caso i sensori commerciali hanno una sensitività di circa $\pm 0,1$ K e sensori a bassa risoluzione geometrica da 320×240 pixel (dal costo di poche migliaia di euro) sino a un massimo di 1280×960 pixel (con costi nettamente superiori). Nel secondo caso risultano invece estremamente efficaci qualora sia necessario acquisire dati caratterizzati da una maggiore sensitività oppure con frequenze di acquisizione molto elevate. Il principale svantaggio della seconda tipologia di sensori è legato alle ingombranti dimensioni dello strumento con un impiego pratico non sempre semplice.

Al fine di rendere una camera termica utilizzabile per scopi fotogrammetrici è necessaria una preliminare *calibrazione* (Remondino e Fraser, 2006) per la stima dei parametri di orientamento interno e dei coefficienti di distorsione (Gianinetto et al., 2005). Siccome queste camere non sono sviluppate per applicazioni di tipo metrico, essendo l'attenzione soprattutto posta su problematiche relative alla sola calibrazione radiometrica, spesso la distorsione geometrica dell'immagine raggiunge valori notevoli. Le camere termiche impiegate in questo lavoro seguono il modello geometrico a prospettiva centrale, e possono pertanto essere calibrate tramite le normali procedure fotogrammetriche. Il modello di correzione della distorsione impiegato è quello di "Brown" con 8 parametri (distanza principale, posizione del punto principale, 3 coefficienti di distorsione radiale e 2 di distorsione tangenziale), stimabili utilizzando una serie di immagini di un opportuno poligono di calibrazione. L'oggetto deve avere una tessitura tale da consentire la collimazione dei punti di controllo (ad esempio dei chiodi fissati ad un pannello di legno che ripresi durante la fase di irraggiamento solare diventano chiaramente visibili, come proposto in Gianinetto et al., 2005). La stima delle incognite viene condotta tramite una compensazione del blocco che può includere anche punti di appoggio oppure può basarsi su un *free-network adjustment* (Granshaw, 1980). Il blocco

deve comprendere immagini convergenti con rotazioni della camera attorno al proprio asse ottico in modo tale da ridurre le correlazioni tra i valori incogniti. In Figura 1 sono proposti alcuni poligoni utilizzati per la calibrazione di differenti camere termiche, dove è evidente l'effetto di distorsione che se non correttamente rimosso potrebbe deteriorare la qualità del modello *texturizzato*. L'immagine 3D (d) che riporta la posizione dei punti oggetto e della camera durante la ripresa evidenzia come non sia semplice l'acquisizione di immagini molto convergenti, essendo lo strumento sicuramente meno maneggevole di una tradizionale camera RGB.

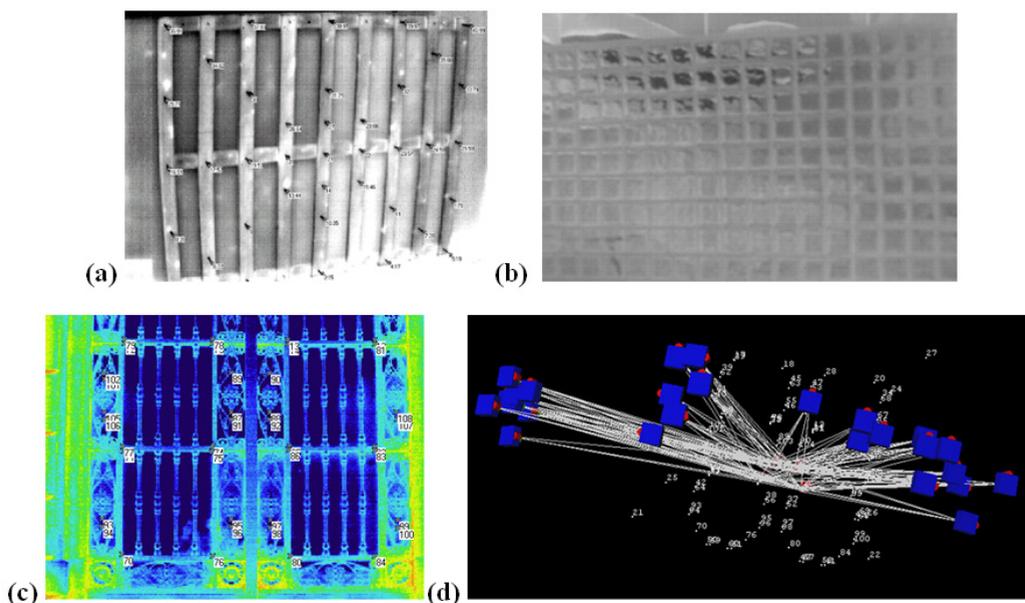


Figura 1 – Alcune immagini di poligoni di calibrazione utilizzati nel caso di immagini IR.

2. Integrazione di immagini IR e modelli 3D di edifici

La maggior parte delle termocamere IR ha una risoluzione geometrica modesta (es. 640×480 pixel) se comparata con quella delle moderne camere RGB, anche se risulta tuttavia sufficiente per l'analisi termografica delle facciate di edifici. Un passaggio fondamentale al fine di semplificare l'interpretazione dei risultati (che in genere si basa sull'analisi dei gradienti di temperatura da parte dell'operatore) riguarda l'equalizzazione preliminare dei dati, che può essere intesa come l'individuazione dell'intervallo di temperatura tale da evidenziare al meglio le anomalie. Siccome questa operazione è relativamente semplice, la tecnica IRT sta diventando sempre più popolare tra i professionisti del settore, sebbene un certo livello di competenza tecnica sia sempre necessario nell'interpretazione dei risultati.

Nel caso di strutture complesse con dimensioni notevoli l'uso delle singole immagini IR (in alcuni casi svariate decine o centinaia) potrebbe non essere sufficiente e l'analisi va dunque estesa in modo tale da considerare l'oggetto nel suo insieme. Una possibile soluzione è data dalla texturizzazione di un modello 3D ottenuto da rilievi o disegni esistenti, oppure generato ex novo con metodi fotogrammetrici o tramite scansione laser.

Se l'oggetto può essere scomposto in porzioni aventi una geometria prevalentemente bidimensionale, la mappatura si riduce alla semplice stima di una serie di *omografie* (Liebowitz e Zisserman, 1998) e alla successiva *mosaicatura* delle immagini raddrizzate. In tal caso, una

possibile soluzione si basa sull'uso di punti doppi (almeno 4) tra le immagini IR e il modello dell'oggetto. E' bene notare come spesso non sia immediato individuare gli stessi particolari tra immagini RGB (o scansioni laser) ed immagini termiche, con problematiche che assumono una importanza fondamentale quando sono impiegate termocamere con teleobiettivi (spesso necessarie per raggiungere elementi lontani dal piano calpestabile). L'angolo di vista potrebbe essere così stretto da non fornire il numero minimo di punti per la stima dei coefficienti dell'omografia.

Un approccio generale, quindi in grado di gestire anche situazioni 3D, si basa invece sull'uso di tecniche fotogrammetriche. Come è noto, le *equazioni di collinearità* (Luhmann et al., 2006) esprimono una relazione matematica tra i punti immagine ed i corrispondenti punti oggetto. L'elaborazione indipendente di ciascuna immagine può essere condotta tramite *space resection*, che fornisce i parametri di orientamento esterno senza tuttavia considerare eventuali punti di legame tra le diverse immagini. In alternativa, l'uso della DLT (Abdel-Aziz e Karara, 1971) semplifica queste operazioni offrendo un modello di tipo lineare tramite una trasformazione proiettiva che dipende da 11 parametri. In entrambi i casi è essenziale la conoscenza di alcuni punti doppi immagine-oggetto. Tuttavia, come già citato, l'analisi indipendente di ogni singola immagine presenta numerosi svantaggi. Il metodo innanzitutto risulta piuttosto laborioso, in quanto necessita della collimazione manuale di tutti i punti. Inoltre, la tessitura delle immagini termiche potrebbe risultare insufficiente e non fornire il numero minimo di punti per la stima dei coefficienti della trasformazione. Infine, un'analisi indipendente delle immagini porta ad una serie di discontinuità nelle aree di sovrapposizione.

In questo lavoro viene descritta una procedura in grado di risolvere alcune delle problematiche prima introdotte. Per quanto riguarda la generazione del modello 3D, essa viene eseguita, come già spiegato, tramite rilievi fotogrammetrici o laser scanning. In entrambi i casi il risultato finale è un modello poligonale che potrà poi essere *texturizzato* con le immagini IR, oltre che con quelle RGB o NIR. L'orientamento delle immagini acquisite con la termocamera non viene condotto tramite *space resection* o DLT, ma si basa sull'uso di un sistema "bi-camera" dove la camera termica è resa solidale ad una tradizionale camera digitale RGB mediante una barra metallica. Tale sistema deve essere preventivamente calibrato in modo tale da determinare l'assetto reciproco delle due camere. Inoltre, i singoli sensori devono essere individualmente calibrati per la determinazione dei parametri di orientamento interno e di distorsione. La ripresa dei dati avviene poi tramite coppie di immagini di cui vengono elaborate esclusivamente le RGB con una tradizionale compensazione a stelle proiettive del blocco, partendo da una serie di punti di legame e di appoggio. L'angolo di vista della camera RGB è nettamente superiore a quello della termocamera ed offre quindi ricoprimenti sufficienti all'orientamento del blocco. I parametri di orientamento esterno stimati per la sola camera RGB saranno poi trasferiti alla camera termica conoscendo la calibrazione del sistema. Il vantaggio fondamentale riguarda l'uso delle sole immagini RGB che presentano una migliore tessitura, un abbracciamento dell'oggetto maggiore e la possibilità di eseguire misure più precise dei punti immagine.

In aggiunta, in questo lavoro viene anche proposta una *texturizzazione* dell'edificio basata su immagini NIR riprese con una comune reflex digitale adattata in modo da acquisire anche immagini all'infrarosso vicino (per maggiori dettagli si veda Alba et al., 2011). La camera impiegata è una Nikon D100 a cui è stato rimosso il filtro NIR, poi sostituito da uno trasparente. Tale camera può essere montata sul laser scanner impiegato (Riegl LMS-Z420i) e quindi rende più semplice l'operazione di *texture mapping*, essendo nota la posizione relativa tra i due sensori. E' inoltre possibile acquisire anche immagini NIR indipendenti dallo strumento *laser scanner*, sebbene l'integrazione con il rilievo laser richiederà il calcolo dell'orientamento di ciascuna immagine RGB a partire dai punti di appoggio e di legame.

In questo lavoro verranno mostrati due casi studio ove è in corso un progetto di ristrutturazione. Gli edifici sono il Rettorato e l'edificio denominato "Trifoglio" del Politecnico di Milano.

3. Acquisizione ed elaborazione delle immagini

Alcuni dei sistemi bi-camera utilizzati sono visibili nelle Figure 2a e 2b. In Figura 2c si riporta il laser scanner impiegato su cui, come già detto, può essere installata una camera Nikon D100 RGB o NIR.

La barra di appoggio utilizzata nel sistema “bi-camera” ha una lunghezza di circa 45 cm e viene in genere posta su treppiede fotografico con testa rotante a 360°. La camera RGB impiegata è una Nikon D80 con obiettivi grandangolari (in genere con focale da 20 mm). L’orientamento delle immagini RGB può essere condotto secondo differenti modalità, che includono le tradizionali collimazioni manuali dei punti di legame, oppure mediante metodi automatici quali quelli basati su target codificati (Fraser et al., 2005) oppure su algoritmi *feature-based matching* (FBM) tramite il modulo di orientamento automatico ATiPE (Barazzetti et al., 2010). In queste applicazioni spesso alcune porzioni della facciata non possono essere raggiunte facilmente ed i target possono essere raramente utilizzati. Nel caso delle misure basate sulle tecniche FBM invece va considerata una particolare geometria del blocco, con basi di presa più corte e angoli tra immagini consecutive abbastanza contenuti.

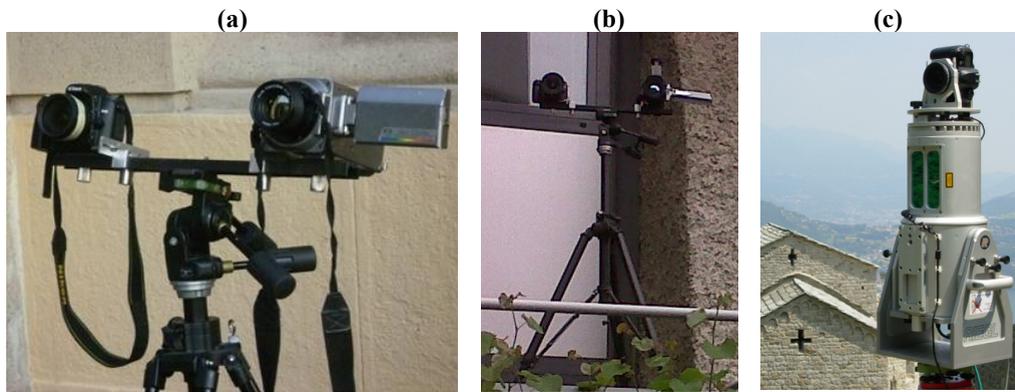


Figura 2 – Due tipologie di sistemi “bi-camera” (a-b) ed il laser scanner Riegl LMS-Z420i usato.

I parametri di orientamento esterno delle camere sulla barra possono essere espressi tramite le rispettive matrici di rotazione (\mathbf{R}_{RGB} , \mathbf{R}_{IR}) ed i vettori con i centri di presa (\mathbf{X}_{0RGB} , \mathbf{X}_{0IR}) riferiti a un sistema di riferimento solidale con l’oggetto ripreso. Lo scopo della barra è ovviamente quello di fornire una posizione relativa stabile nel tempo tra i due sensori. In particolare, la matrice di rotazione relativa tra questi due può essere scritta come:

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{R}_{RGB}^T \mathbf{R}_{IR} \quad (1)$$

\mathbf{R}^* rimane costante quando il sistema stereo viene traslato o ruotato e può essere determinata tramite una calibrazione del sistema. La stima è basata sulla ripresa di una serie di immagini in cui vi siano punti facilmente riconoscibili sia nel visibile che nell’infrarosso. Inoltre, se la barra ha un sistema di smontaggio e riposizionamento stabile nel tempo tramite perni che vincolano la rotazione attorno alla vite di attacco, la procedura di calibrazione potrà essere condotta solo una volta e ripetuta nel caso risultasse necessario verificarne la stabilità nel tempo.

Il secondo vincolo imposto dalla barra riguarda i centri di presa. Sebbene la lunghezza della base $\|\mathbf{X}_{0RGB} - \mathbf{X}_{0IR}\|$ tra le due camere rimanga costante, la differenza vettoriale $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}_{0IR} - \mathbf{X}_{0RGB}$ dipende anche dall’assetto del sistema. Questo problema può essere risolto considerando la posizione

reciproca delle due camere (ad esempio il centro di presa della seconda camera nel sistema di riferimento solidale alla prima) tramite un vettore $t = \mathbf{R}_{RGB}^T \Delta X$ che, al pari di \mathbf{R}^* , potrà essere stimato durante la calibrazione e assunto poi come costante.

Avendo quindi orientato tutte le immagini RGB, gli orientamenti della camera IR, noti che siano \mathbf{R}^* e t , potranno essere stimati come:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{IR} &= \mathbf{R}_{RGB} \mathbf{R}^* \\ X_{0IR} &= \mathbf{R}_{RGB} t + X_{0RGB} \end{aligned} \quad (2)$$

In Figura 3 è riportato lo schema generale di acquisizione. Un tipico progetto comprende, oltre alle scansioni laser e le immagini RGB o NIR riprese con il sistema stereo, anche immagini aggiuntive singole di tipo RGB o NIR. Queste ultime hanno un duplice scopo: innanzitutto possono irrobustire il blocco di immagini, ad esempio tramite riprese di inquadramento generale del rilievo, ed in secondo luogo offrono immagini con una geometria più favorevole per la texturizzazione dell'oggetto.

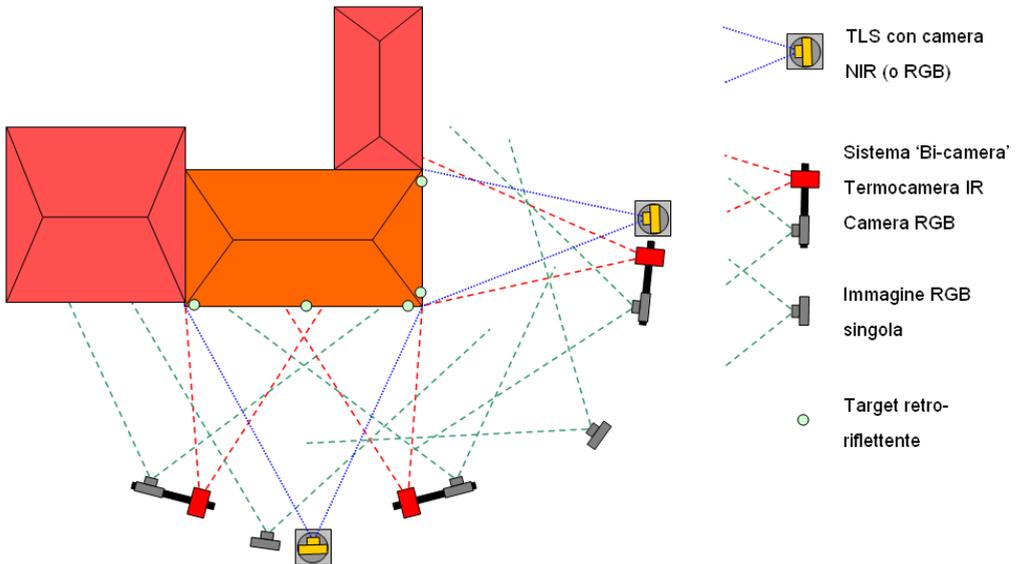


Figura 3 – Schema di presa per la mappatura di immagini RGB, NIR e IR.

Nel caso in cui l'edificio da rilevare richieda una sequenza di acquisizioni laser, sarà necessario registrare i dati in unico sistema di riferimento. L'uso di target retro-riflettenti risulta una scelta ottimale in quanto la stima delle roto-traslazioni 3D tra le varie scansioni avrà una precisione millimetrica (sufficiente per questo tipo di applicazioni data la modesta precisione ottenibile dalle immagini IR) e contemporaneamente saranno disponibili una serie di punti di appoggio utili per inquadrare il progetto fotogrammetrico in un sistema di riferimento comune.

Va infine segnalato come sia necessario pianificare la fase di acquisizione dei dati, considerando sia fattori geometrici tipici delle applicazioni fotogrammetriche, ma anche i parametri che influenzano la qualità di una termografia, dettati dalle condizioni ambientali (temperatura ed umidità) e dal tempo necessario per completare l'acquisizione (in condizioni di transitorio termico, per esempio durante la fase di irraggiamento solare oppure appena dopo il tramonto).

In Figura 4 sono riportate alcune immagini di due particolari dell'edificio "Trifoglio" ripresi ad epoche differenti (a distanza di circa un'ora). Le immagini hanno un contenuto radiometrico completamente differente a causa dalla rapida variazione delle condizioni ambientali. E' semplice verificare come queste immagini genererebbero un modello texturizzato con evidenti discontinuità radiometriche. Va altresì ricordato come lo scopo di tale rilievo non sia un modello per scopi di visualizzazione ove, nel caso di immagini RGB, è spesso necessaria un'equalizzazione con operazioni di fusione nelle zone di ricoprimento in modo da ridurre gli effetti legati ad esposizioni differenti, bensì quello di fornire un supporto all'analisi in cui l'informazione radiometrica originale deve essere, per quanto possibile, preservata.

Infine, siccome le termocamere IR sono spesso equipaggiate con teleobiettivi, diviene complesso acquisire un oggetto nella sua totalità, specialmente se la geometria dello stesso risulta molto irregolare, con numerose sporgenze e rientranze. I dati potrebbero essere integrati con nuove immagini riprese dopo la parziale texturizzazione del modello, avendo quindi ben presente quali siano le zone che presentano vuoti, anche se sarebbe opportuno attendere giornate con condizioni meteo comparabili.

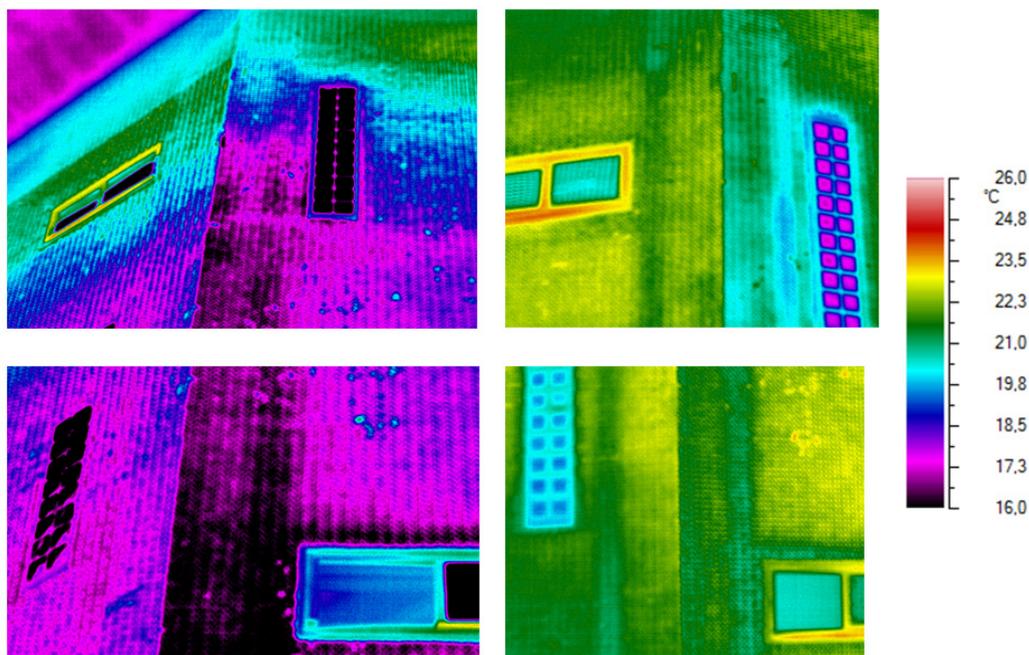


Figura 4 – Immagini riprese ad epoche differenti presentano un contenuto radiometrico variabile in funzione delle condizioni ambientali, rendendo necessaria una accurata pianificazione della fase di ripresa dei dati.

4. Alcuni casi di studio

4.1 L'edificio "Trifoglio" del Politecnico di Milano

Progettato da Gio Ponti e completato nel 1961, l'edificio del "Trifoglio" contiene tre grandi aule didattiche ed una serie di locali di dimensioni inferiori. Il rivestimento della struttura è stato realizzato con piastrelle in clinker, che presentano una notevole durabilità nel tempo non

richiedendo grandi interventi di manutenzione. Tale materiale è infatti piuttosto resistente agli effetti atmosferici e ha un costo contenuto. Oggigiorno, dopo oltre 50 anni di utilizzo, molte di esse presentano danni imputabili a distacchi di malta causati anche dall'inquinamento atmosferico e che provocano, in alcuni casi, fenomeni di distacco delle piastrelle.

Oltre alle tecniche termografiche sono disponibili altre soluzioni di tipo non distruttivo per lo studio di una facciata, che spesso però includono il contatto con l'oggetto, come nel caso di una battitura a mano o tramite martello. La tecnica IRT ha il vantaggio fondamentale di non richiedere la disposizione di ponteggi o di cestelli elevatori, con un conseguente contenimento dei costi e una rapida esecuzione a distanza.

Il rilievo laser scanning dell'edificio è stato eseguito da due punti di stazione, registrando poi le scansioni tramite target retro-riflettenti. La scansione termica è stata condotta con una termocamera NEC H2640, con focale 50 mm e risoluzione geometrica pari a 640×420 pixel (un pixel proiettato sull'oggetto copre mediamente un'area di circa 6×6 mm²). La fase di ripresa dei dati è durata circa un'ora ed è stata eseguita durante la fase di riscaldamento delle facciate sia per l'irraggiamento solare diretto che per convezione a causa della più elevata temperatura dell'aria rispetto a quella della superficie oggetto dell'indagine (gradiente termico di circa 5°C).

Le immagini RGB riprese (in tutto 77) sono state orientate manualmente ed i corrispondenti parametri di orientamento per le immagini termiche di interesse (33) sono stati trasferiti conoscendo la calibrazione della "bi-camera". La precisione dell'orientamento è risultata pari a $\sigma_{fac} = \pm 5$ mm nel piano della facciata e $\sigma_{orT} = \pm 13$ mm nella direzione normale. In Figura 5 sono riportate alcune immagini del modello texturizzato. Gli elementi nei riquadri 1-8 indicano alcune zone di interesse: nei riquadri 1-2 è evidente la dispersione termica dovuta alla presenza di un pilastro non adeguatamente coibentato, le zone 3-4-7-8 mostrano effetti di delaminazione, mentre in 5-6 si evidenzia la presenza della trave della soletta, anch'essa non adeguatamente coibentata.

Il modello è stato inoltre mappato con le immagini NIR (Figura 6) per evidenziare alcuni gruppi di piastrelle non visibili sia nei dati RGB che IR. Queste ultime sono state sostituite nel recente intervento di restauro, ed il loro differente comportamento non corrisponde a quello delle piastrelle circostanti. Ciò potrebbe essere dovuto da una differente composizione chimica oppure a variabili livelli di rugosità o opacità. Da questa analisi è comunque chiaro come anche i dati NIR possano fornire informazioni rilevanti sulle caratteristiche della struttura.

Infine, è opportuno mostrare come la procedura proposta sia in grado di risolvere alcune problematiche che non potrebbero essere affrontate tramite un approccio classico basato sulla *space resection*. In Figura 7 è riportata una immagine del rilievo ove non sono visibili punti doppi mentre la corrispondente immagine RGB, essendo acquisita con un grandangolo, evidenzia numerosi possibili punti di legame e rende semplice l'orientamento della coppia.

4.2 Il rettorato del Politecnico di Milano

L'edificio è stato costruito nel 1927 e presenta numerose decorazioni aggettanti sulla facciata principale (statue, ornamenti, ecc.). Il ricoprimento esterno è composto da cemento decorativo ed appare piuttosto danneggiato, come evidenziato dalle numerose macchie, incrostazioni, fessure e distacchi. Alcuni di questi problemi sono dovuti ad interventi di recupero tramite materiali non compatibili con quelli preesistenti. Nel 2010 lo stato conservativo dell'edificio è divenuto oggetto di analisi nell'ambito di un vasto programma di recupero attuato dal Politecnico di Milano.

La scansione termica è stata eseguita durante la fase di raffreddamento della facciata, a termine giornata appena dopo la fase di irraggiamento solare. La termocamera utilizzata è una AVIO con focale pari a 74 mm ed un sensore da 320×240 pixel. In totale, sono state riprese ed utilizzate 35 coppie RGB-IR, poi integrate con 21 immagini RGB per irrobustire la geometria del blocco. Per la generazione del modello 3D sono invece state riprese 3 stazioni laser scanning registrate mediante dei target.

In Figura 8 sono riportate alcune immagini del modello texturizzato con evidenziate (riquadri neri) le zone con una anomala distribuzione della temperatura, causata sia dalla forma irregolare dell'oggetto che da alcuni danni strutturali.

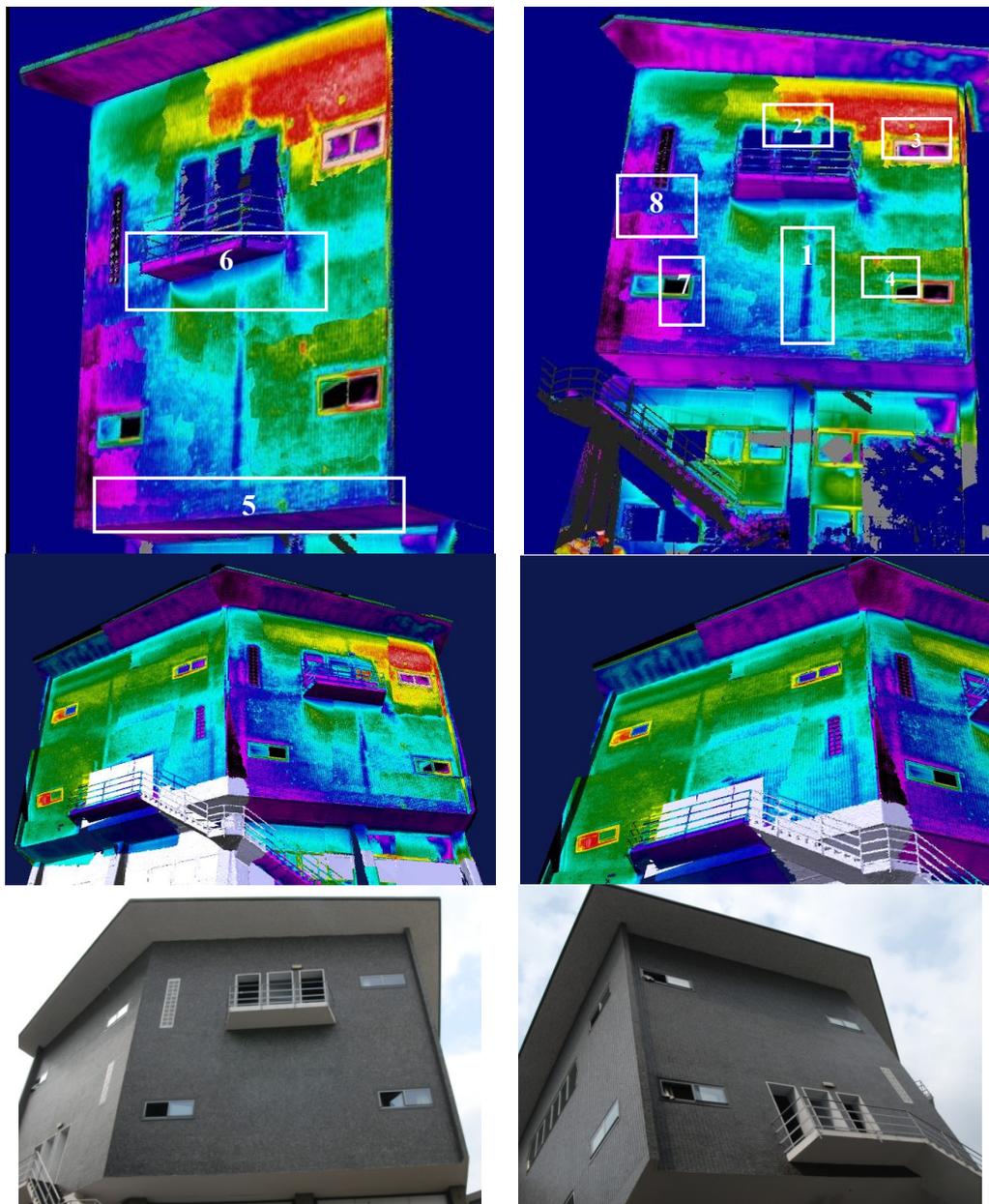


Figura 5 – Alcune immagini con evidenziate i difetti riscontrati (in alto), una visione generale del modello 3D ottenuto (medio), ed alcune immagini RGB usate per l'orientamento.

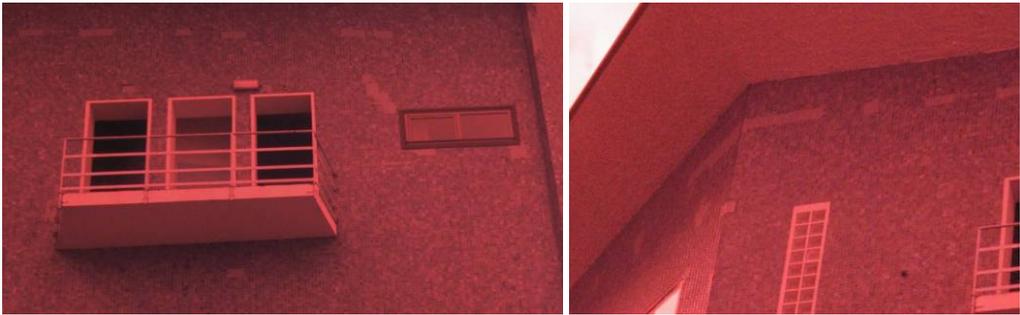


Figura 6 – Le immagini NIR evidenziano alcune piastrelle con un comportamento differente, non ugualmente identificabili a vista.

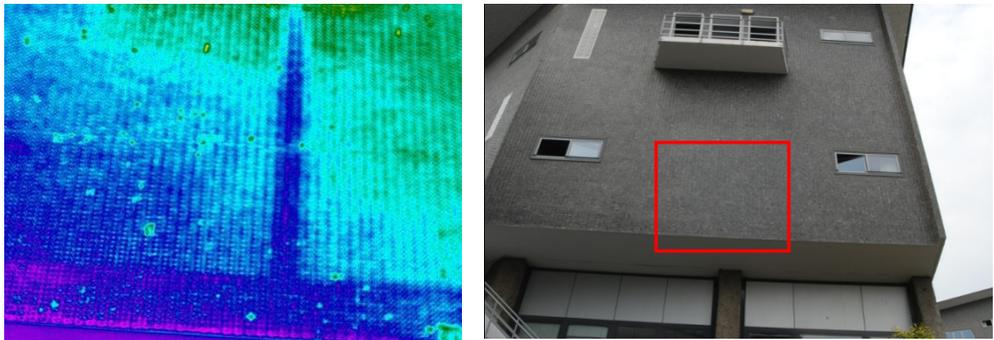


Figura 7 – L'uso del sistema bi-camera consente di orientare immagini termiche anche nelle zone prive di tessitura radiometrica.

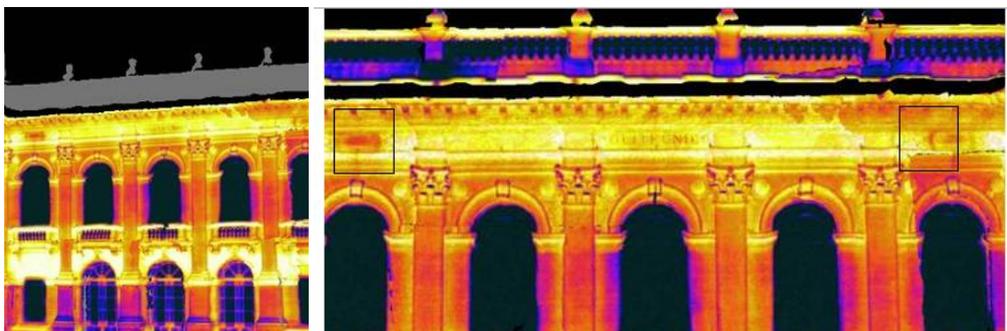


Figura 8 – Alcune immagini del modello texturizzato della facciata del rettorato. L'analisi non ha portato alla ricostruzione dell'intera facciata a causa di oclusioni dovute alla presenza di vegetazione adiacente l'edificio.

Conclusioni

L'uso del sistema "bi-camera" proposto ha permesso di semplificare la texturizzazione con immagini all'infrarosso termico di modelli 3D di edifici generati tramite tecnologia laser scanning terrestre. La procedura proposta ha lo scopo di semplificare la fase di mappatura evitando i classici approcci basati sulla misura di punti doppi tra le immagini e l'oggetto che, nel caso di dati IR, spesso non consentono di eseguire misure precise. Inoltre, in alcuni casi ove non vi sia una sufficiente tessitura radiometrica, l'impiego della "bi-camera" rappresenta l'unica soluzione al problema. La compensazione del blocco RGB a fasci proiettivi e il trasferimento dei parametri di orientamento stimati tramite la calibrazione del sistema costituiscono un'alternativa efficace rispetto alle tradizionali procedure quali la stima di trasformazioni omografiche oppure *space resection*. Resta ancora da valutare, nei casi in cui siano impiegabili entrambi le metodologie ("bi-camera" e *space resection*), quale tra esse sia più vantaggiosa dal punto di vista operativo. In particolare, questo confronto deve essere condotto in quelle situazioni ove non sia possibile eseguire un orientamento di tipo automatico delle immagini RGB.

Il prodotto finale è un modello texturizzato dal quale possono essere facilmente generati altri prodotti, ad esempio ortofoto digitali che possono poi essere stampate o distribuite tramite programmi GIS o sistemi CAD per un semplice utilizzo pratico del risultato. E' inoltre importante ribadire come la fase di ripresa dei dati debba essere pianificata in modo tale da ottenere un compromesso tra le classiche esigenze che portano alla creazione di un'analisi termografica e quelle di carattere prettamente metrico tipiche del settore fotogrammetrico.

Sono stati presentati anche alcuni risultati preliminari ottenuti con una camera NIR, che da un certo punto di vista sono da ritenersi piuttosto innovativi perché hanno consentito l'individuazione di diverse tipologie di piastrelle in clinker posate in momenti differenti.

Bibliografia

Abdel Aziz, Y.I. and Karara, H.M., 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object-space coordinates. *Close-range Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia. 433 pages: 1-18.

Alba, M.I., Barazzetti, L., Roncoroni, F., Scaioni, M., 2011. Filtering vegetation in terrestrial point clouds with low-cost near infrared cameras. *Italian Journal of Remote Sensing*, 43(2), pp. 55-75.

Barazzetti, L., Remondino, F., Scaioni, M., 2010. Orientation and 3D modelling from markerless terrestrial images: combining accuracy with automation. *Photogrammetric Record*, 25(132): 356-381.

Fraser, C.S., Hanley, H. and Cronk, S., 2005. Close-range photogrammetry for accident reconstruction. *Optical 3D Measurements VII*, (2): 115-123.

Gianinetto, M., Giussani, A., Roncoroni, F., Scaioni, M., 2005. Integration of Multi-Source Close-Range Data. Proc. CIPA 2005, 26 Sept-1 Oct 2005, Turin, Italy, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36, Part 5/C34, pp. 304-309.

Granshaw, S.I., 1980. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 10(56): 181-207.

- Hartley, R.I. and Zisserman A., 2004. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 672 pages.
- Lagüela, S., González-Jorge, H., Armesto, J., Arias, P., 2011. Calibration and verification of thermographic cameras for geometric measurements. *Infrared Physics & Technology*, Volume 54, pp. 92-99.
- Liebowitz, D. and Zisserman, A., 1998. Metric rectification for perspective images of planes, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Harley, I., 2006. *Close Range Photogrammetry: Principles, Techniques and Applications*. John Wiley & Sons. 510 pages.
- Maldague, X., 2001. Non Destructive Testing Handbook, 3rd edition, Vol. 3 - Infrared and Thermal Testing, ASNT Columbus, OH-USA.
- Remondino, F. and Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5): 266-272.