

## **Ottimizzazione della rappresentazione di immagini termografiche per la valutazione delle strutture tramite rilievi laser scanner**

Gabriella Caroti, Sergio Di Tondo, Andrea Piemonte

Laboratorio A.S.T.R.O., Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Pisa, Largo Lucio Lazzarino 1  
56123 PISA, Tel. 050 221 7770, Fax 050 221 7779, e-mail g.caroti@ing.unipi.it

### **Riassunto**

Lo studio per la valutazione dello stato di conservazione degli strati superficiali delle murature degli edifici o per evidenziare discontinuità sia strutturali sia materiche o per individuare interventi con inserzioni di materiali differenti da quelli preesistenti, come ad esempio tamponature di porte e finestre, si basa sia sull'interpretazione dell'ispezione visiva di operatori esperti del settore sia sull'applicazione di tecniche diagnostiche distruttive o non distruttive. Tra queste ultime quella che negli ultimi anni è stata applicata con successo nell'ambito ingegneristico e nel settore dei Beni Monumentali è la termografia all'infrarosso.

Questa tecnica non prevede il contatto con la superficie dell'oggetto da verificare e fornisce come risultato finale una mappa a colori (termogramma) della risposta termica dell'oggetto ad una sollecitazione termica naturale o artificiale. L'analisi del termogramma mette in evidenza le eventuali anomalie termiche dell'oggetto e quindi permette di individuare le singolarità (ad esempio distacchi, lesioni, materiali occlusi, ...) causa delle anomalie termiche rilevate.

La tecnica termografica non prevede in generale di eseguire anche misure per la georeferenziazione del termogramma e questo può portare limitazioni nell'utilizzo del risultato finale.

Sono ormai noti quali vantaggi offra la tecnologia del laser scanner alla modellazione 3D di oggetti. Le sue potenzialità nella conoscenza metrica tridimensionale possono essere applicate anche alle misure termografiche al fine di collegare lo studio termico alla posizione ed alla geometria degli oggetti rilevati.

Questo lavoro presenta una metodologia di rappresentazione dell'immagine termografica integrata con le informazioni geometriche derivanti da un rilievo laser ad alta risoluzione.

Un modello ad alta risoluzione può servire per georiferire le immagini termografiche, che ne vanno poi a costituire la texture. Da questo modello vengono ricavate delle normal map e, quindi, delle mappe di rugosità della superficie. Applicando tali mappe ad un modello a bassa risoluzione, si conservano dal punto di vista estetico tutte le informazioni geometriche delle variazioni locali ma si può gestire un modello molto più snello. Sovrapponendo, infine, al modello a bassa risoluzione la mappa di rugosità e l'immagine termografica si può procedere all'analisi integrata delle informazioni geometriche e termografiche.

### **Abstract**

Studies to assess the conditions of the surface layers of the walls of buildings, or to highlight discontinuities both structural and material, or to identify interventions with insertions of materials differing from existing ones (e.g. cladding of doors and windows), are based both on visual inspection by industry experts and on the application of diagnostic techniques, both destructive and non destructive. Among the latter is infrared thermography which, in recent years, has been successfully used in both engineering and cultural heritage surveys.

This technique does not require surface contact with the investigated object and provides, as an end result, a color map (thermogram) of the object's thermal response to a natural or artificial heat

stress. Analysis of the thermogram shows any thermal anomalies of the object, hence allowing to detect any related irregularities such as detachments, cracks, clogged materials.

In general, the thermographic technique does not provide for the georeferencing of the thermogram, which can lead to limitations in the use of the final result.

The advantages the technology of laser scanning for 3D-modeling objects are by now well known. Its 3D-related abilities can also be applied to thermographic measurements, in order to connect thermal analysis with the space position and geometry of survey objects.

This paper presents a methodology for thermal representation of the image integrated with the geometric information from a high-resolution laser survey.

High-resolution models can be used to georeference thermographic images, which are in turn used as model textures. These models then yield both normal and surface roughness maps. Applying these maps to low-resolution models preserves all the geometrical information of the local variations; much more lightweight models can also be used. Finally, the overlay of low-resolution models with maps of surface roughness and thermographic images allows for integrated analysis of thermographic and geometric information.

### **Introduzione**

Il Laboratorio A.S.T.R.O. del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa sta conducendo delle sperimentazioni rivolte all'utilizzo di laser a scansione per la generazione di modelli tridimensionali finalizzati al calcolo strutturale ed al monitoraggio degli edifici.

L'utilizzo di immagini termografiche è una delle possibili tecniche non distruttive per l'analisi dello stato delle murature. L'articolo descrive la metodologia di acquisizione e di elaborazione geometrica del dato laser e delle immagini termografiche per ricavare dalla fusione delle informazioni delle due tecniche di rilievo un prodotto utile all'analisi dello stato dei paramenti murari dell'edificio.

La struttura sulla quale è stata testata la metodologia è lo Scoglio della Regina a Livorno.

### **Termografia applicata alla diagnosi energetica degli edifici**

EuroTEC PISA ha messo gentilmente a disposizione per il rilievo una termocamera FLIR 2B.

Una termocamera è costruttivamente simile ad una fotocamera. L'energia infrarossa proveniente da un oggetto viene concentrata dalla parte ottica, costituita da una lente in materiale trasparente all'infrarosso, su un sensore sensibile alla radiazione infrarossa. Attraverso un'opportuna elettronica di gestione e controllo, l'energia incidente sul sensore viene elaborata in modo da formare un'immagine, chiamata termogramma.

Il termogramma è un'immagine bidimensionale visualizzata mediante una scala di falsi colori, in diverse *palette* selezionabili dall'utente, che evidenziano quantitativamente l'intensità di radiazione incidenti sul sensore. In questo modo, possiamo percepire naturalmente quali zone del termogramma sono calde (rosso e bianco) e quali sono fredde (blu, verde, nero). Pertanto il termogramma a colori rende immediatamente visibili le differenze di temperatura all'interno dell'immagine stessa.

Quando la differenza di temperatura è la stessa attraverso tutta la superficie di involucro esaminata, le variazioni del flusso termico e le conseguenti difformità da temperatura superficiale indicano diversi valori locali della resistenza termica, ma possono anche essere dovute all'azione della convezione, alla presenza di impianti o ad altri fattori da indagare.

Le condizioni ambientali interne ed esterne devono essere scelte in modo da avere una differenza di temperatura sufficiente a rilevare i difetti, in relazione alla sensibilità della termocamera utilizzata. E' necessario, quindi, che la struttura da indagare venga riscaldata preventivamente dal Sole o tramite sistemi artificiali. Inoltre, prima dell'ispezione, deve essere nota la stratigrafia del muro da analizzare.

La termografia può individuare rapidamente ed in modo non distruttivo molti fattori: la presenza dell'umidità in vaste superfici, anche se si è in regime di transitorio termico, i difetti che consentono

all'aria di attraversare l'involucro edilizio (possono facilmente produrre variazioni di temperatura superficiale diverse volte più grandi di quelle risultanti da un elevato flusso termico), i ponti termici costituiti dai serramenti e dalle inserzioni metalliche, le tamponature dei vuoti e molti altri.

Le immagini termiche forniscono chiaramente informazioni non evidenti ad occhio nudo, mediante l'esplicitazione dei meccanismi alla base del trasferimento del calore. L'analisi termografica ha molte applicazioni: essa spazia dall'edilizia agli impianti elettrici e industriali in genere, alla medicina e veterinaria, alla scienza dei materiali, al settore aerospaziale, all'ispezione degli scafi ed altre ancora.

La realizzazione di nuovi edifici energeticamente efficienti è, e resterà, il tema guida per l'edilizia per molti anni a venire, finché progettisti e costruttori non ne avranno assimilato i corretti requisiti progettuali e realizzativi.

Il parco edilizio esistente costituisce, inoltre, un'enorme risorsa di indotto per il mercato delle costruzioni, in quanto l'aumento del costo del riscaldamento farà decidere molti proprietari ad avviare interventi di ristrutturazione con riqualificazione energetica.

In questo contesto la termografia è destinata a giocare un ruolo importante, una volta che i progettisti, i costruttori ed i privati avranno acquisito maggiore sensibilità e ne avranno compreso le enormi potenzialità di tecnica non distruttiva.

### **Rilievo laser scanner e restituzione del modello 3D**

Per il rilievo geometrico laser scanner è stata utilizzata una Scan Station Leica C10, messa a disposizione da Leica-Geosystem Italia. Date le precarie condizioni interne del fabbricato, non è stato possibile effettuare un rilievo degli interni ma solo della parte esterna. Per migliorare l'accuratezza in fase di registrazione, sono stati utilizzati riferimenti fissi disposti sulla scena inquadrata e riconosciuti in maniera semiautomatica dallo strumento di scansione. Le prime fasi dell'elaborazione sono state realizzate tramite il software Cyclone, di cui disponevamo una licenza temporanea di prova, anch'essa messa a disposizione da Leica-Geosystem Italia.

La nuvola di punti è stata utilizzata per la creazione delle piante, delle sezioni e dei prospetti dello stato attuale del fabbricato. Per le piante e le sezioni sono stati creati vari piani di taglio alle quote desiderate. Per inserire nelle piante e nelle sezioni lo spessore murario sono stati utilizzati dei precedenti rilievi celeri metrici degli interni opportunamente orientati ed allineati al rilievo laser scanner.

I prospetti, invece, sono stati generati effettuando la fotomosaicatura degli *screenshot* delle viste ortografiche del modello a nuvola di punti. Le immagini sono state mosaicate tramite il software Photoshop, utilizzando la griglia di riferimento di un *referenceplane* opportunamente importato nel software di visualizzazione della nuvola di punti. Infine, il fotomosaico è stato esportato e scalato in ambiente Autocad per la lucidatura finale. In figura 1 sono riportati a sinistra il modello a nuvola di punti e a destra il prospetto lucidato, sovrapposto allo *screenshot* della vista ortografica del modello stesso. Se disponibile, il modello a nuvola di punti è utile, quindi, per generare in modo speditivo gli elaborati classici (piante, sezioni e prospetti) necessari all'analisi degli edifici, dei quali si debba eseguire monitoraggi strutturali e progetti di conservazione e restauro.

La conversione da modello a nuvola di punti a modello a superficie poligonale triangolare è a tutti gli effetti una operazione di *re-topology*; le informazioni quantitative e qualitative del modello a punti vengono coerentemente interpretate e riadattate per una rappresentazione tassellata della frontiera (schema di rappresentazione che esplicita la superficie poligonale quadrangolare o triangolare). Le operazioni di conversione introducono alterazioni geometriche all'interno del modello, tuttavia le applicazioni informatiche dedicate permettono di valutare se l'entità delle deviazioni introdotte è coerente rispetto alle tolleranze ammesse dalle finalità del rilievo. Il passaggio dalla nube grezza di punti 3D prodotta dal sensore ad un reticolo di poligoni connessi fra loro, i cui vertici coincidono con i punti misurati (*mesh*), è quanto viene indicato con il termine *meshing*.



Figura 1 – Modello 3D a nuvola di punti e restituzione del prospetto principale.

Nel caso della nube di punti dello Scoglio della Regina, generata da un laser scanner a tempo di volo (TOF), essendo una *unstructured pointcloud*, la procedura di *meshing* fa uso del cosiddetto algoritmo di Delaunay. I punti 3D vengono proiettati sul piano e, individuati quelli a distanza minima, vengono tracciati i reciproci collegamenti; una volta determinati i triangoli nel piano i punti vengono riconsiderati nello spazio 3D mantenendo valide le connessioni a meno di una soglia angolare tra poligoni adiacenti o una massima lunghezza dei lati dei poligoni. Per questa elaborazione è stato utilizzato il software Geomagic Studio, nel quale sono implementati diversi algoritmi, efficienti nella rimozione del rumore presente nei dati. In particolare sono stati usati gli strumenti *select disconnect* (valuta la prossimità dei punti e seleziona gruppi di punti isolati), *select outlier* (seleziona i punti non appartenenti alla giacitura principale), *reduce noise* (rimozione statistica del rumore del laser), *uniform sample* (riduce uniformemente il numero di punti sulle superfici piane e mantiene una densità prefissata su quelle curve). La funzione *wrap* ha convertito, infine, la nuvola di punti in un modello *mesh*.

A questo punto il processo di *re-topology* è concluso. L'architettura rigida della rappresentazione tassellata della frontiera non ammette relazioni ambigue tra le entità che compongono il modello (vertici, spigoli e facce). Per questo motivo, le applicazioni software implementano strumenti di correzione degli errori topologici al fine di ottimizzare il modello computazionale, che, per essere utile ai nostri scopi, deve rispettare varietà topologica due.

Dopo aver effettuato la fusione per creare un unico reticolo poligonale, sono stati corretti, quindi, tali errori. Per tale correzioni sono stati utilizzati nuovamente degli algoritmi del software Geomagic Studio: *remove spikes* (riduce le sporgenze a singolo punto sulla *mesh* poligonale), *fill holes* (algoritmo utilizzabile in modo automatico, semiautomatico e manuale per colmare le lacune di dati del modello, in modalità singola lacuna o *batch*), *sand paper* (leviga la superficie riducendo ulteriormente il rumore), *mesh doctor* (esamina il modello completo individuando le residue imperfezioni: autointersezioni, *spikes*, poligoni piccoli isolati, *tunnel* e fori).

Il modello ottenuto al termine del processo di *meshing* può presentare un tale sovra-campionamento di poligoni da non renderlo direttamente utilizzabile per applicazioni interattive. Bisogna procedere, quindi, alla decimazione del numero di poligoni che descrivono la superficie. Tale decimazione deve essere definita in funzione dell'utilizzo previsto per il modello. Per le applicazioni di calcolo strutturale e monitoraggio è stato necessario produrre due modelli diversi con parametri di

decimazione diversi. Sono stati creati un modello ad alta densità di poligoni (*high poly*) per le applicazioni in campo architettonico e l'integrazione con le informazioni termografiche ed un modello a bassa densità di poligoni (*low poly*) per rendere lo stesso modello più leggero, pur mantenendo le caratteristiche formali e geometriche, ed utilizzarlo nella creazione di *shell* per i programmi di analisi strutturale.

Gli algoritmi di riduzione del numero di poligoni e, quindi, di semplificazione del modello, forniscono dei parametri per monitorare, seppur parzialmente, le variazioni geometriche introdotte in relazione alla precisione iniziale.

Il modello ad alta densità di poligoni, denominato *high poly*, è stato creato cercando di mantenere il maggior numero di poligoni, conservando, quindi, le caratteristiche di rugosità dei materiali della superficie esterna e mantenendo evidenti anche le più piccole scrostature dell'intonaco e le diverse *texture* presenti sulle facciate. Inoltre, nel modello sono state conservate anche tutte le componenti non strutturali, come bozze, soglie e cornici, in modo da avere il maggior grado di dettaglio possibile.

Una volta ottenuto il modello completo dello Scoglio, è stato realizzato il *texture mapping*, ossia sono state aggiunte al modello a *mesh* poligonali le informazioni riguardanti il materiale ed i dettagli formali senza modificarne la complessità geometrica. Ciò è stato ottenuto proiettando opportunamente un'immagine (*texture*) sulla superficie dell'oggetto, che è resa fruibile al momento della restituzione visiva del modello, o *rendering*. La *texture* è tipicamente un'immagine digitale che riproduce la variazione cromatica di una superficie. Nella nostra sperimentazione, tuttavia, le *texture* sono state utilizzate per simulare sia le caratteristiche visive come colore, lucidità, trasparenza, rifrazione, che associare al modello le informazioni ottenute dal rilievo con la termocamera, utilizzando proprio come *texture* le immagini termografiche.

Il modello a bassa densità di punti, denominato *low poly*, è stato creato per due utilizzi principali, il primo per ottenere un modello necessario al calcolo strutturale, il secondo per avere un modello più leggero al quale poter applicare le immagini termografiche. Per il calcolo strutturale bisogna creare un modello molto snello, che possa essere computato nel programma di calcolo, vanno tolti tutti gli elementi non strutturali come soglie, infissi, cornici e bozze, va individuata la superficie media tra quella esterna ottenuta dalla nuvola di punti e quella interna (tale superficie va poi suddivisa in *mesh* poligonali alle quali viene attribuito lo spessore della parete).

Per creare questo modello più snello è stata effettuata una decimazione del numero di poligoni in modo da ottenere delle *mesh* triangolari con lunghezza dei lati inferiore a cinquanta centimetri, mantenendo la priorità di curvatura per avere un numero maggiore di *mesh* nelle zone più critiche e riuscendo in questo modo ad ottenere un modello semplificato a 35.000 triangoli.

Per l'applicazione delle immagini termografiche, è stato utilizzato direttamente questo modello completo, seppure decimato, nel quale sono state mantenute le informazioni riguardanti componenti non strutturali. Per riportare le informazioni materiche e morfologiche, che sono state perse nel passaggio dal modello *high poly* a quello *low poly*, sono state ricavate delle *texture* dal modello ad alto numero di poligoni (*high poly*) nelle quali l'orientamento delle normali delle *mesh* poligonali della superficie ad alta densità è stato tradotto in pixel di diversa gradazione di colore tramite un'operazione di *baking* e applicato alla superficie a bassa densità. Una volta utilizzate le *texture* per la rugosità sono state applicate le immagini termografiche con lo stesso procedimento del *texture mapping*, riuscendo in questo modo a localizzare correttamente tutte le informazioni che si possono ricavare da un rilievo termografico.

Il procedimento è stato effettuato con il software Modo nel quale è stato utilizzato lo strumento *baking* (genera la *normal map* dal modello ad alta densità di poligoni) ed è stata applicata la *normal map* al modello *low poly* come proprietà del materiale utilizzando il canale *normal*. In questo modo il modello a bassa densità di poligoni non cambia la sua geometria ma si ottiene solo un'introduzione di ombre attraverso lo *shader*. Con il comando *export UV to EPS* è stata esportata poi la mappa UV e rasterizzata a 1024x1024 pixel.

Quindi, per applicare l'immagine termografica, è stato utilizzato il programma Lightwave 3D, nel quale, una volta importato il modello, sono state impostate due camere, una per il *front projection*, che deve avere la stessa risoluzione dell'immagine termografica e serve per ottenere la stessa inquadratura del modello fatta con la termocamera al momento del rilievo, l'altra, chiamata *bake camera*, che serve proprio per il *baking*, ossia per associare il colore dell'immagine termografica alla mappa UV. Il *camera matching* viene poi effettuato tramite un *plugin* che permette di unire i punti del modello con i punti omologhi dell'immagine termografica.

Il risultato è, quindi, un modello geometricamente semplificato facilmente gestibile dai software di visualizzazione, che mantiene però, grazie alle *texture* sovrapposte, tutte le informazioni del modello ad alta densità (Figura 2).

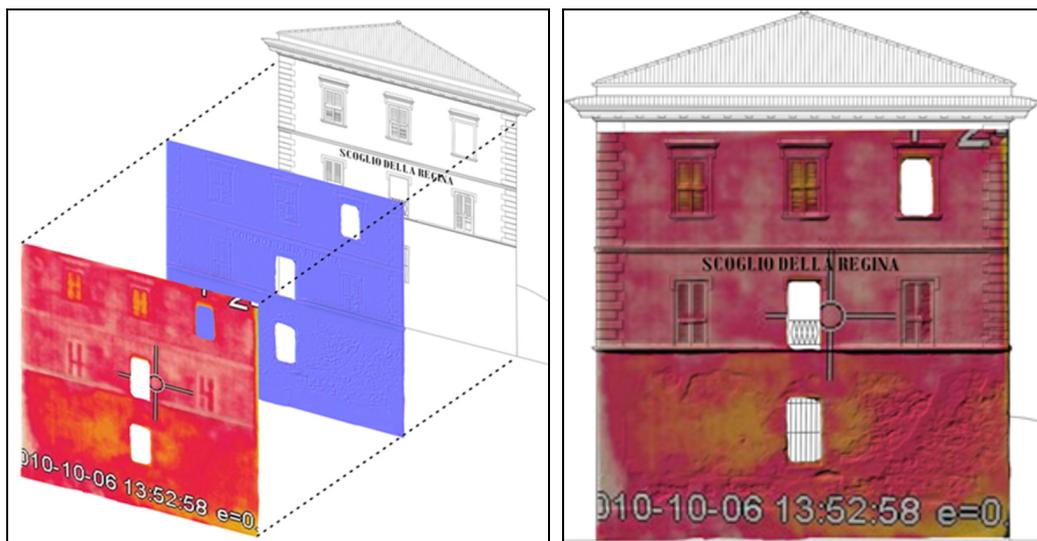


Figura 2 – Normal map ed immagine termografica sovrapposte.

### Conclusioni

Nel caso si disponga di un rilievo laser scanner di un edificio, sul quale si voglia effettuare un'indagine termografica, è possibile migliorare le informazioni delle immagini della termocamera grazie alle informazioni geometriche ad alta densità della nuvola di punti e del modello poligonale derivato.

Queste informazioni, opportunamente elaborate ed integrate tramite software tipici della modellazione architettonica, possono associare all'immagine termografica, non legata alla geometria della struttura, la georeferenziazione e, appunto, la caratterizzazione geometrica dettagliata.

### Riferimenti bibliografici

Cengel Y.C. (1998), "Termodinamica e trasmissione del calore", McGraw-Hill

Holst H.C. (2000), "Common sense approach to thermal imaging", SPIE, The International Society for Optical Engineering.

### Ringraziamenti

Si ringrazia Leica-Geosystem Italia ed in particolare EuroTEC PISA per il supporto nella fase di rilievo e per gli strumenti hardware e software forniti per la sperimentazione. Si ringrazia, inoltre, la Dott.ssa Azzurra Franconi per la collaborazione nell'esecuzione e nell'elaborazione dei rilievi.