

## TEXTURIZZAZIONE DI IMMAGINI TERMICHE SU NUVOLE DI PUNTI DA LASER SCANNER TERRESTRE

Ginevra BOATTO (\*), Vladimiro ACHILLI (\*), Andrea CABRUCCI (\*\*),  
Massimo FABRIS (\*), Marco NARDINI (\*\*), Sergio PADOVANI (\*\*)

(\* ) Laboratorio di Rilevamento e Geomatica – DAUR – Università di Padova,  
via Marzolo, 9 – 35131 Padova, Tel.: 049 827 5579, e-mail: ginevra.boatto@unipd.it  
(\*\*) Leica Geosystems s.p.a., via Codognino, 12 – 26854 Cornegliano Laudense (LO)

### Riassunto

La texturizzazione di immagini acquisite nel visibile, su nuvole di punti ottenute da metodologie di rilievo 3D terrestre, permette di generare prodotti fruibili in modo interattivo e di immediata interpretazione. Per quanto riguarda invece le immagini termiche di un oggetto, dato che non ne forniscono le caratteristiche geometriche, si rende difficoltosa l'operazione di *texture mapping*.

In questo lavoro viene applicata una procedura per la texturizzazione di immagini termiche su nuvole di punti *laser scanning* basata sulla visualizzazione termica dei *target* retro-riflettenti comunemente utilizzati per la georeferenziazione delle scansioni.

### Abstract

Acquired images of an object can be textured on point clouds derived from 3D terrestrial surveying methodologies, generating products interactively available and of immediate interpretation. Nevertheless, thermal images do not show geometrical features of the acquired object, making the texture-mapping process difficult.

In this work, a procedure for projection of thermal images on laser scanning point clouds is shown: the operation is based on thermal visualization of the laser scanning targets, generally used for georeferencing the scans.

### Introduzione

I sistemi di rilievo terrestre 3D ad alta risoluzione, come il *laser scanning* e la fotogrammetria digitale, negli ultimi anni hanno trovato applicazioni sempre maggiori nei più diversi settori come strumento di conoscenza per la catalogazione, progettazione ed esecuzione di opere di restauro (Bitelli, 2002). L'integrazione tra un modello digitale tridimensionale e l'informazione radiometrica, ottenuta mediante acquisizioni fotografiche ad alta risoluzione, permette di aggiungere informazioni fotorealistiche al modello 3D ottenendo un prodotto di immediata interpretazione (Frueh et al., 2004; Laycock, Day, 2004; Fabris et al., 2007); la flessibilità delle metodologie permette un loro utilizzo anche per altri scopi come, ad esempio, per analisi termografiche (Avdelidis, Moropoulou, 2003; Voltolini et al., 2007; Meola et al., 2005).

Nella fattispecie, la direttiva europea 2002/91/CE sulla certificazione energetica degli edifici, che prevede la riduzione dei consumi e di emissioni di energia, mira a sensibilizzare gli utenti sugli aspetti energetici di un immobile in fase di costruzione, compravendita o in locazione. In particolare, la direttiva richiede una metodologia per il calcolo del rendimento energetico (art. 1, a), elaborata e applicata a livello nazionale e regionale (art. 3), comprendente la rilevazione delle caratteristiche termiche dell'edificio, sia per le murature esterne che per le divisioni interne. In questo lavoro viene effettuato uno studio per integrare le immagini acquisite nel *range* dell'infrarosso e le metodologie di rilievo tridimensionale, dalla topografia classica al *laser*

*scanning*, al fine di associare alle rilevazioni termiche effettuate sugli edifici una corrispondenza metrica sulla struttura.

Per questo motivo sono state digitalizzate alcune pareti di manufatti architettonici moderni tramite il *laser scanner* Leica HDS (ex Cyrax) 2500, con *target* Leica HDS ad alta riflettività. I segnali sono stati misurati anche con la stazione integrata Leica TC 2003 per l'allineamento delle nuvole di punti *laser scanning* in uno stesso sistema di riferimento. Le caratteristiche termiche delle superfici architettoniche in oggetto sono state rilevate utilizzando la termocamera Flir B2, mentre per l'acquisizione delle caratteristiche radiometriche è stata utilizzata la camera digitale metrica Canon EOS 1 – Ds *Mark II*. Lo studio ha consentito di integrare fra loro queste metodologie e realizzare modelli tridimensionali con immagini termiche correttamente texturizzate.

### **Esecuzione del *texture mapping* termico**

È stato scelto un caso di studio in cui la superficie in esame presenti delle interruzioni di continuità che rendano più complicata la texturizzazione (presenza di spigoli). Da una vista in pianta, la conformazione è a "Z", con tre pareti, le due laterali fra loro parallele mentre quella centrale risulta ad esse perpendicolare (figura 1a). Sulla superficie sono stati disposti 17 *target laser scanning* tipo Leica retro-riflettenti, ad alta riflettività distribuiti sulle 3 superfici; mediante il *laser scanner* Leica HDS 2500 è stata effettuata una sola scansione con passo di campionamento di 5 mm, ad una distanza *laser scanner*-parete di circa 10 m. I *target* sono stati successivamente acquisiti con scansioni di dettaglio, uno ad uno, e misurati mediante la stazione integrata Leica TC 2003 in un sistema di riferimento locale, secondo il principio dell'intersezione in avanti multipla: l'elaborazione dei dati ha permesso, in questo modo, di ottenere le coordinate dei punti con precisioni sub-millimetriche. Le prese fotografiche nel *range* del visibile sono state effettuate sia sull'intera superficie che per ognuna delle 3 pareti in esame, utilizzando la camera digitale metrica Canon EOS 1 – Ds *Mark II*.

Prima di effettuare le prese con la termocamera, è stato necessario visualizzare termicamente i *target*: infatti, per poter essere correttamente riconosciuti nell'immagine termica ed effettuare in questo modo una corretta texturizzazione, i segnali devono essere anche "termicamente visibili", cioè con una temperatura molto diversa (e quindi cromaticamente riconoscibili), rispetto al contesto della superficie in cui si trovano. Così i *target laser scanner* Leica sono stati vaporizzati con uno *spray* freddo, ossia del ghiaccio secco (prodotto per uso medico). È stato quindi possibile procedere con le prese termiche: anche per le immagini nell'infrarosso, l'acquisizione è stata effettuata sull'intera area e separatamente per ciascuna delle 3 superfici, utilizzando la camera Flir B2 che fornisce immagini di dimensioni 640 x 480 *pixel*.

In fase di elaborazione la nuvola di punti *laser scanning* è stata roto-traslata nel sistema di riferimento dei punti d'appoggio, imponendo le coordinate tridimensionali dei *target* rispettivi utilizzando il software *Cyclone*© v. 5.3 (con errore massimo di mosaicatura di 2 mm); successivamente, il modello 3D finale è stato triangolato in una superficie di tipo *mesh* tramite il software *LeiosMesh*©. Nell'ambiente *RapidForm2004*©, dopo aver evidenziato le coordinate dei 17 segnali posizionati sulla parete e riconoscibili come entità geometriche sulla *mesh* (figura 1b), si è proceduto con la texturizzazione di ciascuna immagine acquisita nel visibile (figura 1c) collimando i punti d'appoggio (*target*) tra superficie *mesh* e immagine. Allo stesso modo è stato possibile texturizzare le immagini termiche sulla *mesh* triangolare (figura 1d).

Nonostante sia più difficile valutare la qualità della texturizzazione di un'immagine nell'infrarosso rispetto ad una nel visibile (visto che non restituisce le geometrie esatte ma le loro caratteristiche termiche), in corrispondenza di particolari riconoscibili, come porte, finestre o elementi architettonici, si nota comunque che il risultato dell'operazione è ancora migliorabile: con riferimento alla parete centrale di figura 1d, la texturizzazione in corrispondenza della porta presenta delle anomalie. Questo è stato causato dall'impossibilità di acquisire immagini termiche con asse della camera perpendicolare alla superficie centrale per mancanza dello spazio necessario: utilizzando un'immagine acquisita di scorcio, il risultato della texturizzazione, con il software

*RapidForm2004*©, risulta peggiore; inoltre, si nota come, al di sotto della finestra visibile in figura 1d, sia presente una dispersione termica piuttosto rilevante (il rosso, che presenta una superficie di circa 0.6 m<sup>2</sup> corrisponde ad una temperatura di circa 12°C, mentre l'area circostante, verde, fornisce una temperatura di circa 10°C): l'immagine è stata acquisita nel mese di dicembre 2007 e all'interno della stanza, sotto la finestra, era presente un termosifone acceso. In questo caso, quindi, la parete dell'edificio non sembra adeguatamente isolata.

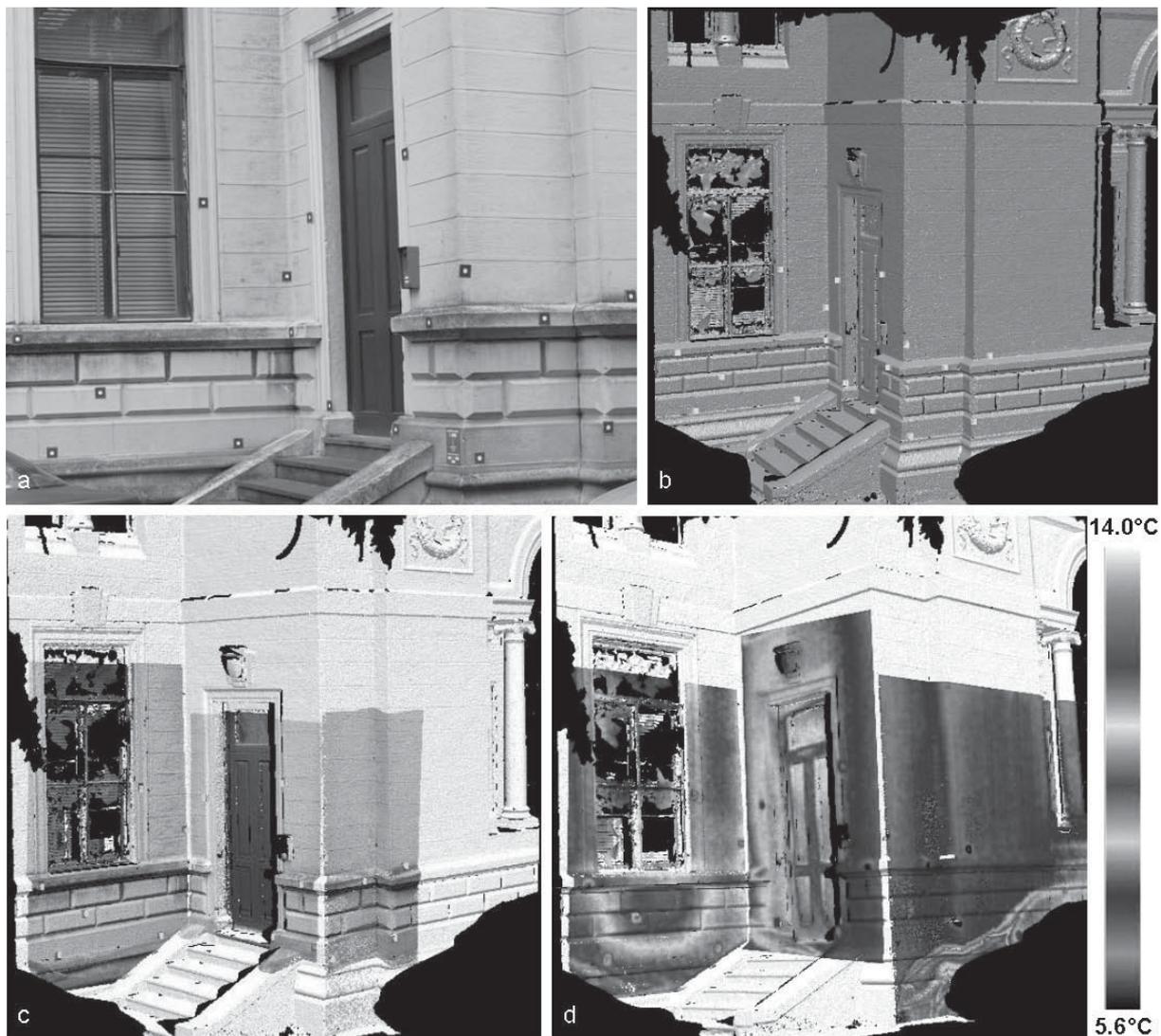


Figura 1 – a) superficie acquisita; b) mesh triangolare con evidenziati i target laser scanning Leica; c) texture mapping delle immagini acquisite nel visibile; d) texture mapping delle immagini acquisite nell'infrarosso

Un'altra applicazione è stata effettuata in corrispondenza alle pareti interna ed esterna di una muratura con lo scopo di fornire una texturizzazione termica completa della parete (interno ed esterno) per individuare fenomeni e comportamenti interni alla muratura.

Prima dell'acquisizione dei dati, sulla parete esterna sono stati posizionati 9 *target laser scanner* Leica distribuiti uniformemente sull'area di interesse, mentre sulla parete interna sono stati collocati 15 *target* a causa della difficoltà di operare in ambienti interni, caratterizzati da spazi limitati (utilizzando gli obiettivi disponibili non è stato possibile acquisire, con una sola immagine nel visibile e nell'infrarosso, l'intera parete interna).

Le due porzioni della parete sono state acquisite con il *laser scanner* Leica HDS 2500 con passo di campionamento di 5 mm e ad una distanza *laser scanner*-parete di circa 15 m per la parte esterna e circa 5 m per la parte interna. Per rilevare la parete interna è stata effettuata una sola scansione, mentre per coprire quella esterna sono state necessarie due acquisizioni. Come nei casi precedenti, sui *target* sono state effettuate scansioni di dettaglio per determinare, con elevata precisione, il baricentro dei segnali utilizzati.

E' stata quindi predisposta, materializzata e misurata una rete locale di riferimento necessaria per collegare, in un unico sistema, i *target* posizionati sulla parete interna a quelli presenti sulla parete esterna; la rete è stata misurata con la stazione integrata Leica TC 2003; dai punti rete sono stati quindi acquisiti tutti i segnali *laser scanner*. L'acquisizione fotografica nel visibile è stata effettuata con la camera digitale metrica Canon EOS 1 – Ds Mark II dagli stessi punti di stazionamento del *laser scanner*, utilizzando l'obiettivo di focale 28 mm.

L'acquisizione termografica, con la camera Flir B2, è stata effettuata dopo aver evidenziato termicamente i *target* mediante la bomboletta *spray* di ghiaccio secco, analogamente al caso precedente: complessivamente sono state acquisite 4 immagini nell'infrarosso per la parete interna (dove è stato evidenziato un *range* termico compreso tra 12°C e 37°C) e due per la parete esterna (con intervallo termico compreso tra 5°C e 16°C). Le acquisizioni sono state effettuate nel mese di dicembre 2007 e, anche in questo caso, all'interno della stanza, sotto la finestra di sinistra, era presente un termosifone acceso (figura 2).

L'allineamento delle nuvole di punti è stato effettuato con il software *Cyclone*© v. 5.3, utilizzando i *target* georiferiti. È stato possibile quindi roto-traslare, con errore massimo di mosaicatura di 3 mm, le nuvole di punti nel sistema di riferimento dei punti d'appoggio, ottenendo il modello 3D finale della muratura che presenta uno spessore medio di circa 35 cm.

Il modello così ottenuto è stato triangolato con il software *Reconstructor*©, generando superfici *mesh* sia per la porzione esterna che per quella interna della parete. Il modello è stato quindi gestito nell'ambiente *RapidForm2004*©, utilizzando anche le coordinate di tutti i segnali come entità

geometriche di riferimento. Procedendo come descritto sopra, è stato possibile effettuare la texturizzazione sia delle immagini nel visibile (figura 3a) che di quelle nell'infrarosso, sia per la parete interna (figura 2) che per quella esterna (figura 3a, b).

Dalla texturizzazione delle immagini nell'infrarosso (figura 3) risultano evidenti dispersioni termiche in prossimità degli infissi delle finestre e al di sotto della finestra di destra dove, all'interno, era presente il radiatore acceso (figura 2); tuttavia non è stata osservata alcuna dispersione in corrispondenza della canaletta dell'acqua calda del termosifone.

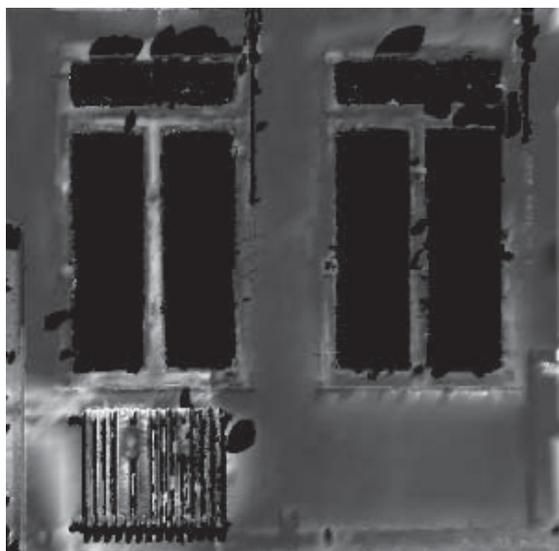


Figura 2 – Texturizzazione delle immagini termiche sulla mesh triangolare per la parete interna della muratura analizzata

### Definizione metrica delle variazioni termiche superficiali di una muratura

In corrispondenza ad una parete test, il *laser scanner* è stato posto ad una distanza di 5 m dalla superficie in due differenti stazionamenti: in questo modo sono state acquisite due nuvole di punti con passo medio di 0.5 cm da due differenti punti di vista, riducendo al massimo le zone d'ombra e le porzioni in sottosquadro.

Prima delle scansioni, sulla parete sono stati posti 6 *target* retro-riflettenti in corrispondenza ai quali sono state effettuate, come al solito, scansioni di dettaglio, definendo con precisione il baricentro dei segnali attraverso la media dei punti acquisiti. I *target* sono stati successivamente rilevati con la

stazione integrata Leica TC 2003 mediante intersezioni in avanti multiple, associando al centro dei segnali stessi coordinate 3D riferite ad un sistema locale.



Figura 3 – Texture mapping delle immagini acquisite nel visibile (a) e di quelle termografiche (b) per la parete esterna della muratura analizzata

L'allineamento delle due nuvole di punti è stato effettuato con il software *Cyclone*© v. 5.3 secondo la modalità *survey registration*: ogni singola scansione è stata roto-traslata direttamente nel sistema di riferimento locale mediante l'imposizione delle coordinate dei *target* della scansione; in questo modo è stato possibile georeferenziare in uno stesso sistema di riferimento le due scansioni con un errore massimo di mosaicatura di 1 mm, ottenendo il relativo modello tridimensionale.

Dopo l'acquisizione delle scansioni, i segnali sono stati resi termicamente visibili mediante l'utilizzo di ghiaccio secco; inoltre, in questo caso è stata provocata artificialmente una variazione termica su un'area limitata di circa 0.50 m<sup>2</sup> (versando acqua calda direttamente sulla parete); successivamente, sono state acquisite immagini termiche ogni 5 minuti per monitorare la fase di asciugatura/raffreddamento, che potrebbe non essere uniforme sull'area interessata e quindi fornire informazioni sulle caratteristiche, anche differenziali, della muratura (figura 4). La temperatura dell'area interessata dal fenomeno è cambiata progressivamente, passando da 13.6°C al tempo  $t = 0$  (figura 4a), a 11.7°C dopo 5 minuti (figura 4b), a 10.4°C dopo 10 minuti (figura 4c) e a 9.9°C dopo 15 minuti (figura 4d), dimostrando la non linearità del processo di raffreddamento della superficie (l'area circostante presentava una temperatura di 8.7°C, figura 4). Invece, l'area interessata dal fenomeno è passata da 0.50 m<sup>2</sup>, 0.26 m<sup>2</sup>, 0.19 m<sup>2</sup>, 0.15 m<sup>2</sup> seguendo, pertanto, una legge analoga.

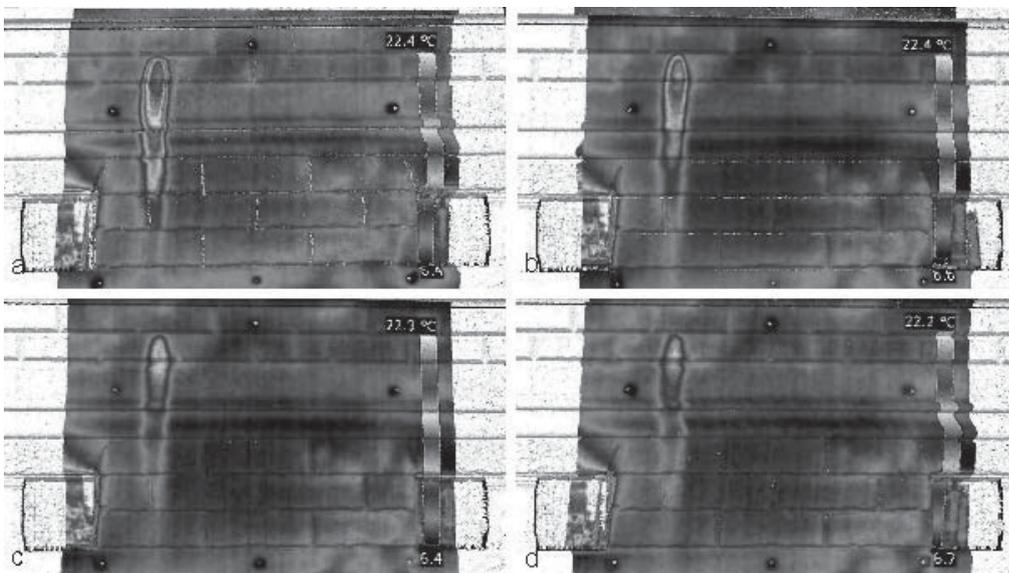


Figura 4 – Texture mapping di immagini termiche sulla mesh triangolare di una parete test per il monitoraggio di un fenomeno termico: immagini acquisite al tempo  $t = 0$  (a),  $t = 5$  minuti (b);  $t = 10$  minuti (c) e  $t = 15$  minuti (d)

### **Conclusioni e sviluppi futuri**

Nel lavoro è stato dimostrato come possano essere utilizzati *target laser scanner* Leica HDS 2500 (ideali soprattutto per effettuare la rototraslazione e quindi l'allineamento delle nuvole di punti) per realizzare la texturizzazione di immagini termiche direttamente sulle superfici *mesh* ottenute dai dati *laser scanning*; prima dell'acquisizione con la termocamera Flir B2, i *target* sono stati resi termicamente visibili mediante ghiaccio secco vaporizzato. Operativamente, nelle applicazioni discusse, sono stati sempre posizionati almeno 6 segnali come punti d'appoggio per la georeferenziazione di ogni singola immagine sul modello virtuale (software *RapidForm2004*©).

Nel caso di edifici di notevole complessità strutturale, risulta più conveniente affrontare il problema parete per parete: è necessario acquisire immagini, sia nel visibile che nell'infrarosso, per ogni singola parete, procedendo con asse della camera perpendicolare alla superficie in oggetto. In questo modo viene effettuata la texturizzazione su elementi più semplici, potendo poi aggregare le singole *texture* sul modello finale 3D; sono stati utilizzati, anche in questo caso, almeno 6 *target* visibili su ogni immagine termica.

Le applicazioni hanno evidenziato la validità della metodologia: i risultati ottenuti hanno fornito *texture mapping* di buona qualità, confrontabili con quelle ottenute da immagini acquisite nel visibile (nonostante le dimensioni delle immagini termiche siano di 640 x 480 *pixel*, al contrario di quelle nel visibile che presentano invece dimensioni di 4992 x 3328 *pixel*).

Nel caso di oggetti di particolare interesse storico-artistico, sui quali non sia possibile posizionare *target laser scanning* termicamente visibili, sarà necessario individuare una procedura differente: in questi casi può essere utile l'integrazione di immagini termiche con quelle acquisite nel visibile per individuare su quest'ultime i punti necessari per l'operazione di *texture mapping*.

### **Bibliografia**

- Avdelidis N. P., Moropoulou A. (2003), "Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures", *Journal of Cultural Heritage*, 5: 119-127
- Bitelli G. (2002), "Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei beni culturali", *Atti della 6<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, 1: IX-XXIV
- Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico dell'edilizia, <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it/doc/dir91-02.pdf>
- Fabris M., Achilli V., Bragagnolo D., Menin A., Ongarato F., Salemi G. (2007), "Analisi di procedure per texture mapping. Test site: il Cortile cinquecentesco del Palazzo del Bo a Padova", *atti della 11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, Novembre 6-9, 2007, Torino, 1: 1039-1044
- Frueh C., Sammon R., Zachor A. (2004), "Automated Texture Mapping of 3D City Model With Oblique Aerial Imagery", *Proceedings of the 3D Data Processing, Visualization, and Transmission, 2<sup>nd</sup> International Symposium on (3DPVT'04)*: 396-403
- Laycock R. G., Day A. M. (2004), "Automatic techniques for texture mapping in virtual urban environments", *Proceedings of Computer Graphics International*: 586-589
- Meola C., Di Maio R., Roberti N., Carlomagno G. M. (2005), "Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures", *Engineering Failure Analysis*, 12: 875-892, doi: 10.1016/j.engfailanal.2004.12.030
- Voltolini F., Rizzi A., Remondino F., Girardi S., Gonzo L. (2007), "Integration of non-invasive techniques for documentation and preservation of complex architectures and artworks", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2007: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, ETH, Zurich, Switzerland, 12-13 July 2007