

UN ALGORITMO PER IL RICONOSCIMENTO AUTOMATICO DEI BORDI DA SCANSIONI LASER TERRESTRI

Domenico VISINTINI, Fabio CROSILLA, Francesco SEPIC

Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine, via Cotonificio 114 - 33100 UDINE
tel. 0432 558719, fax 0432 558700, e-mail: domenico.visintini@uniud.it, fabio.crosilla@uniud.it, sepic@dimi.uniud.it,
<http://geomatica.uniud.it>

Riassunto

In questo articolo si presenta un algoritmo originale per il riconoscimento automatico dei bordi degli oggetti rilevati da una nuvola di punti laser terrestri. Dopo aver esaminato i vari tipi di discontinuità superficiali, sono riassunti i metodi analitici (diretti e indiretti) e geometrici (per decimazione di TIN) proposti in letteratura per tale ricerca. Viene quindi illustrato il nuovo algoritmo, basato essenzialmente sull'analisi dei valori numerici della curvatura media locale, quest'ultima ottenuta applicando un modello non parametrico di interpolazione. I punti con valore di curvatura maggiore di una soglia prefissata corrispondono alle fasce di discontinuità, individuate grazie ad una procedura che implementa tale criterio. Diversi dati laser simulati e reali sono stati elaborati con l'algoritmo implementato e con due procedure di decimazione: per i dati simulati si ottengono risultati corretti ed equivalenti, mentre nel caso reale l'algoritmo proposto individua i bordi principali in modo più soddisfacente di quanto ottenuto con le funzioni di decimazione.

Abstract

The paper proposes an original algorithm for the automatic detection of the edges within a cloud of terrestrial laser points: it is based on the analysis of the numerical values of the local mean curvature, this last estimated by applying a non parametric interpolation model. The discontinuity contours are thus characterized by points having mean curvature greater than a threshold, so automatically detected by means of a procedure implementing such a criterion. Several numerical experiments on simulated and real noisy laser data have shown the proper applicability of the proposed method for the edge detection: if compared with the results obtained by applying TIN decimation software, those accomplished by the proposed algorithm seem very promising.

1. Introduzione

Data una scansione laser terrestre, per ottenere la descrizione geometrica degli oggetti rilevati, si presuppone che le varie entità geometriche si possano efficacemente estrapolare dalla nuvola di punti acquisiti. La difficoltà del problema dipende dal particolare campo di applicazione (industriale, architettonico, archeologico in ordine crescente di difficoltà) e dai livelli di automazione e di dettaglio che si intendono conseguire. L'argomento costituisce uno dei principali problemi metodologici introdotti dalla tecnica di rilevamento laser, caratterizzata da un eccellente livello di automazione in fase di acquisizione dei dati che non deve essere vanificato nell'elaborazione degli stessi. In letteratura si usano diverse espressioni quali l'individuazione dei bordi o delle discontinuità (*breaklines*), il riconoscimento degli oggetti, la classificazione delle

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

forme e la ricostruzione delle superfici, che possono essere considerate quali approcci complementari del più generale problema di “interpretazione automatica” dei dati laser.

2. Tipi di discontinuità di una superficie

Esaminando il problema da un punto di vista matematico, si consideri una superficie S per la quale la coordinata Z (elevazione) sia esprimibile quale funzione $Z = f(X, Y)$ delle coordinate (planimetriche) X, Y . I luoghi geometrici di discontinuità di S possono essere dei seguenti tipi:

- D0: Discontinuità di elevazione (quota): il valore Z presenta localmente una variazione significativa per un certo numero di punti disposti lungo una direzione planimetrica X, Y . In altri termini, esiste un luogo geometrico dove non è rispettata la continuità $C0$ della superficie.
- D1: Discontinuità di pendenza (inclinazione): il valore $\sqrt{(\partial Z/\partial X)^2 + (\partial Z/\partial Y)^2}$ di una superficie a continuità $C0$ presenta localmente una variazione significativa per un certo numero di punti disposti lungo una direzione planimetrica (non è rispettata la continuità $C1$ della superficie).
- D2: Discontinuità di curvatura: (almeno) uno dei valori di curvatura principale di una superficie a continuità $C1$ presenta localmente una variazione significativa per un certo numero di punti disposti lungo una direzione planimetrica (non è rispettata la continuità $C2$ della superficie).

Per una superficie, le discontinuità di tipo D0 sono più evidenti di quelle D1 e queste a loro volta di quelle D2: la difficoltà nell'individuazione delle stesse a partire da una nuvola di punti laser aumenta quindi con il rango delle stesse. In questo articolo ci si concentrerà maggiormente sulla ricerca e l'individuazione delle discontinuità di pendenza D1, che corrisponde al significato corrente che si dà all'espressione di “riconoscimento (automatico) dei bordi”. Si rimanda a Beinat *et al.* (2007) per la descrizione dell'algoritmo di individuazione delle discontinuità D0, D1 e anche di quelle “deboli” di tipo D2, mediante un approccio analitico misto non parametrico - parametrico. Si ricorda che le discontinuità D0 sono dovute prevalentemente alla geometria di scansione e non alla superficie stessa, come ad esempio nelle scansioni aeree (pseudo-nadirali) in corrispondenza delle pareti degli edifici. Nei dati terrestri, effettuando più scansioni da posizioni diverse in modo da evitare zone “occluse” non rilevate, tali discontinuità ricadono nella tipologia D1. Ovviamente permangono le discontinuità D0 fra un oggetto continuo e la superficie che fa da sfondo alla scansione e fra oggetti distinti: tale discontinuità costituisce quindi il bordo esterno dell'oggetto.

3. Metodi di riconoscimento delle discontinuità

Data una scansione laser, p.e. della nicchia architettonica rappresentata in Figura 1.1 per valori di profondità ($-Z$), la ricerca delle sue discontinuità può essere svolta applicando almeno tre approcci.

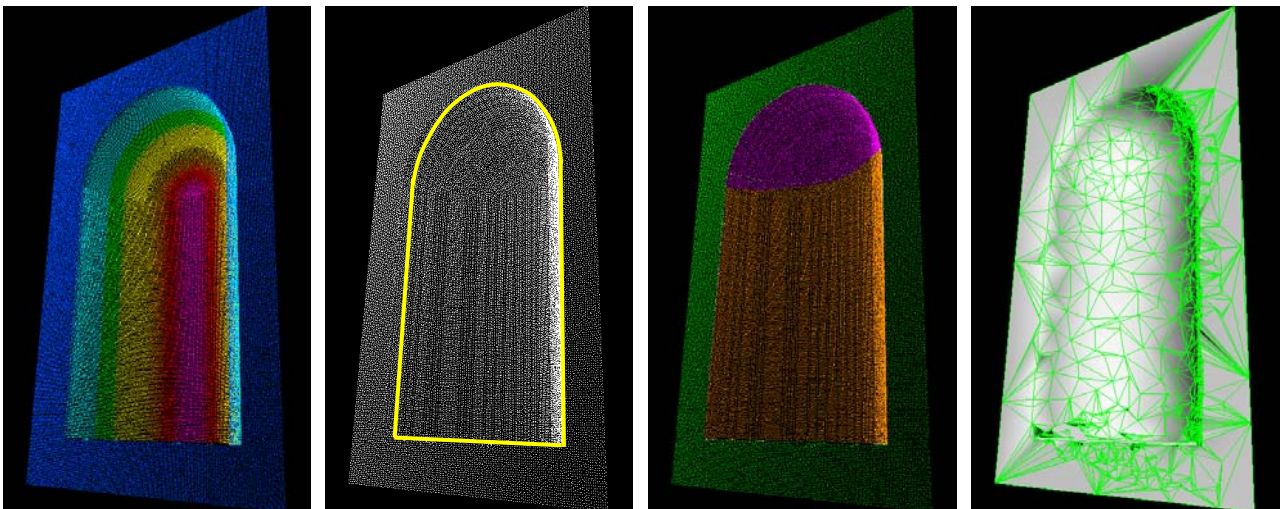


Figura 1 - 1) punti laser di una nicchia colorati per profondità, 2) bordi estratti direttamente, 3) bordi estraibili indirettamente, 4) bordi ottenibili per decimazione di triangoli TIN.

Metodi analitici diretti

A partire da una qualsiasi funzione analitica di interpolazione superficiale, gli algoritmi di questa classe calcolano uno o più valori numerici locali indicatori delle discontinuità superficiali interpolanti, che quindi sono individuate direttamente, come rappresentato in Figura 1.2. Fra i modelli analitici diretti più significativi vi sono il metodo “*Breakline Modeling and Growing*” proposto dal Politecnico di Vienna (Briese, 2006), un algoritmo semi-automatico riadattato dal caso aereo, e il metodo automatico “*2D-3D Feature Extraction*” dell’Università di Stoccarda (Alshawabkeh, Haala e Fritsch, 2006), basato sull’applicazione di operazioni di convoluzione 2D su *range images* per stimare la curvatura media H , usata quale indicatore delle discontinuità.

Metodi analitici indiretti

I metodi che appartengono alla seconda classe hanno invece lo scopo principale di stimare le diverse superfici continue che interpolano i punti laser secondo criteri di ottimalità statistica e/o geometrica. Soltanto in un secondo tempo, quindi indirettamente, si ricercano le discontinuità fra le varie superfici, considerando le loro intersezioni nello spazio o analizzando a quale superficie sono assegnati i punti. In Figura 1.3 sono indicati con diversi colori i punti classificati con una procedura analitica proposta dagli autori (Crosilla, Visintini e Sepic, 2007). Si noti come sono stati classificati correttamente i punti appartenenti al piano (in verde), al semi-cilindro e al quarto di sfera (in viola) e quindi riconoscere indirettamente, non solo la discontinuità $D1$ fra piano e cilindrico, ma anche quella $D2$ fra cilindro e sfera, quest’ultima in generale non individuabile con i metodi diretti.

Metodi geometrici di decimazione

Questa classe di metodi non si basa su funzioni analitiche di interpolazione ma ha un approccio prevalentemente geometrico, nel senso che considera inizialmente una superficie TIN (*mesh*) con vertici in tutti i punti: tale triangolazione è un’operazione ben nota ed implementata in moltissimi software commerciali di elaborazioni di dati laser e di modellazione solida 3D. L’ottimizzazione di questa superficie TIN con procedure di regolarizzazione (*smoothing*) e soprattutto di decimazione (*decimation*) permette di ridurre notevolmente il numero dei triangoli, conservando teoricamente soltanto quelli strettamente necessari (vedi Figura 1.4). Considerando le normali a due triangoli rimasti adiacenti, se l’angolo fra queste è superiore ad un dato valore di soglia, il lato comune è detto “*feature edge*” (Garland, 1999): la successione delle *feature edges* ben corrisponde alle discontinuità $D1$ che quindi vengono individuate con questo procedimento.

I diversi metodi possono essere anche integrati fra loro come nel procedimento proposto da Bonora e Tucci (2005) dove si considerano valori locali di curvatura per individuare dei vincoli geometrici nella decimazione del TIN, diversificata per le zone pseudo-piane e per quelle prossime ai bordi.

4. L’algoritmo di riconoscimento automatico delle discontinuità $D0$ e $D1$

Come già detto, è stato proposto dagli autori (2007) un algoritmo per la classificazione e la segmentazione di una nuvola laser che permette di determinare i bordi indirettamente per via analitica; si presenta ora il suo adattamento a metodo diretto di riconoscimento delle discontinuità.

Il problema analitico è dato da una nuvola X, Y, Z di punti laser per la quale il valore delle coordinate Z è modellizzabile secondo una serie di Taylor di secondo ordine nelle coordinate X, Y :

$$Z_j = a_0 + a_1u + a_2v + a_3u^2 + a_4uv + a_5v^2 + \varepsilon_j \quad [1]$$

con:

$$a_0 = Z_{0_i}; \quad a_1 = \left(\frac{\partial Z}{\partial X} \right)_{X_i}; \quad a_2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial Y} \right)_{Y_i}; \quad a_3 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} \right)_{X_i}; \quad a_4 = \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial X \partial Y} \right)_{X_i, Y_i}; \quad a_5 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Y^2} \right)_{Y_i};$$

$u = (X_j - X_i)$; $v = (Y_j - Y_i)$ dove X_i, Y_i e X_j, Y_j sono le coordinate planimetriche dei punti i e j .

I termini a_i ($i \neq 0$) corrispondono alle derivate parziali prime e seconde lungo X e Y di una funzione non parametrica di miglior interpolazione locale nel punto i , raccolti nel vettore:

$$\boldsymbol{\beta} = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5]^T$$

dove a_0 corrisponde al valore della funzione stimata nello stesso punto i .

La stima pesata ai minimi quadrati del vettore incognito $\boldsymbol{\beta}$, a partire da p punti adiacenti, è data da:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{z} \quad [2]$$

dove \mathbf{X} è una matrice [$p \times 6$] le cui righe contengono i coefficienti:

$$\mathbf{X}_j = \begin{bmatrix} 1 & u & v & u^2 & uv & v^2 \end{bmatrix}$$

e \mathbf{Q} è una matrice diagonale di pesi ottenuta da una funzione simmetrica centrata sul punto i :

$$q_{ij} = \left[1 - (d_{ij}/b)^3 \right]^3 \text{ per } d_{ij}/b < 1 \quad \text{e} \quad q_{ij} = 0 \text{ per } d_{ij}/b \geq 1$$

con d_{ij} distanza planimetrica fra i e j , b metà raggio del cerchio contenente i p punti più vicini ad i .

Dopo aver stimato localmente il vettore $\boldsymbol{\beta}$, si considera il termine $a_0 = Z_{0i}$ e la differenza $Z_i - Z_{0i}$ che corrisponde all'effetto di smussamento dell'interpolazione: nelle zone dove questa è maggiore in valore assoluto ad un certo valore di soglia, si deduce la presenza di una discontinuità D0.

Considerando invece la matrice \mathbf{A} detta "Weingarten map" della superficie S (Do Carmo, 1976):

$$\mathbf{A} = - \begin{bmatrix} e & f \\ f & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix}^{-1}$$

con coefficienti E, F, G ("prima forma fondamentale") ed e, f, g ("seconda forma fondamentale"):

$$E = 1 + a_1^2; \quad F = a_1 a_2; \quad G = 1 + a_3^2$$

$$e = 2a_3 / \sqrt{a_1^2 + 1 + a_2^2}; \quad f = a_4 / \sqrt{a_1^2 + 1 + a_2^2}; \quad g = 2a_5 / \sqrt{a_1^2 + 1 + a_2^2}$$

la curvatura media H della superficie S può essere stimata localmente mediante la relazione:

$$H = \frac{eG - 2fF + gE}{2(EG - F^2)} \quad [3]$$

In definitiva, a partire dal modello non parametrico [1], fissato il valore b , si stima automaticamente grazie alle relazioni [2] e [3] la curvatura media H della superficie in corrispondenza di ogni punto. Dopo di che, è sufficiente analizzare tutti i valori di H ottenuti: le zone con valori elevati e maggiori (in valore assoluto) ad un certo valore di soglia H_{lim} presentano una notevole curvatura della superficie, ovvero un ridotto raggio di curvatura e quindi, in definitiva, corrispondono proprio alle discontinuità D1 degli oggetti rilevati. È stata implementata una procedura informatica che evidenzia cromaticamente in blu i punti con $H < -H_{lim}$ (discontinuità D1 convessa) e in rosso i punti con $H > H_{lim}$ (discontinuità D1 concava), come riportato nelle figure successive. Inoltre in corrispondenza delle discontinuità D0, poiché si stima una superficie interpolante, si avranno ancora elevati valori di H ma con cambio di segno e quindi tali zone saranno colorate in blu e in rosso. Tenendo conto dell'inevitabile rumore presente nei dati laser, l'analisi dei valori di curvatura media H , che è la media (aritmetica) delle curvature locali massima e minima, è da preferire rispetto a quella dei valori di curvatura Gaussiana K , che è data dal prodotto (media geometrica), in quanto numericamente più stabile. In ogni caso, si riscontrano valori numerici estremi della curvatura Gaussiana in corrispondenza dei vertici dell'oggetto rilevato: il riconoscimento di tali punti singolari su più scansioni per la registrazione automatica è descritto in Beinart *et al.* (2007).

Come ultima considerazione, si osserva che le zone riconosciute come discontinuità D0 e D1 devono essere geometricamente significative, nel senso che devono essere costituite da un numero sufficiente di punti distribuiti in uno spazio (*buffer volume*) stretto e allungato lungo una linea/curva 3D. Inoltre per trasformare opportunamente tali punti in una polilinea vettoriale 3D che costituisce il bordo *wireframe* dell'oggetto, è necessario applicare un procedimento di interpolazione spaziale.

5. Sperimentazioni numeriche

Sono state svolte diverse sperimentazioni numeriche su dati laser simulati e su scansioni effettivamente acquisite applicando l'algoritmo proposto, il programma QSlim-2.1 che implementa l'algoritmo di decimazione "*Pair and Edge Contraction*" di Garland (1999) e la procedura di decimazione disponibile nel software RiSCAN Pro (www.riegl.com): le elaborazioni di decimazione costituiscono i risultati di confronto dei bordi ottenibili per via geometrica.

Per quanto riguarda la precedente nicchia simulata (146.000 punti, s.q.m. ± 2 mm), in Figura 1.4 è presentata la decimazione (984 triangoli e 619 punti) ottenuta con QSlim, in Figura 2.1 i bordi D1 ottenuti con l'algoritmo proposto, in Figura 2.2 i 3.407 triangoli decimati con RiSCAN Pro e in Figura 2.3 i 2.074 vertici relativi. Le tre sperimentazioni hanno fornito risultati pressoché analoghi.

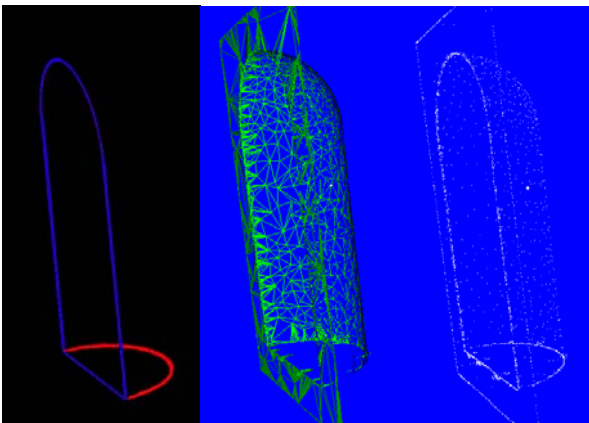


Figura 2 - Nicchia: 1) bordi convessi (blu) e concavi (rosso) 2-3) TIN e punti decimati.

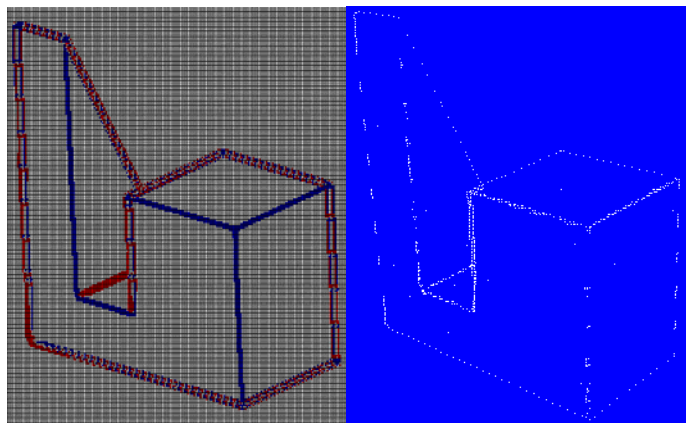


Figura 3 - Modello "block2": 1) bordi convessi (blu) e concavi (rosso), 2) punti decimati.

Successivamente sono stati elaborati alcuni modelli appartenenti all'OSU *Range Image Database* (Ohio State University), oggetto di sperimentazione anche in Alshwabkeh, Haala e Fritsch (2006). In Figura 3.1 è illustrata l'individuazione con l'algoritmo proposto dei bordi del modello "block2" (24.000 punti) costituito da facce piane; si noti la colorazione blu e rossa dei bordi esterni D0. L'analogo risultato soddisfacente fornito da RiSCAN Pro (655 punti) è mostrato in Figura 3.2.

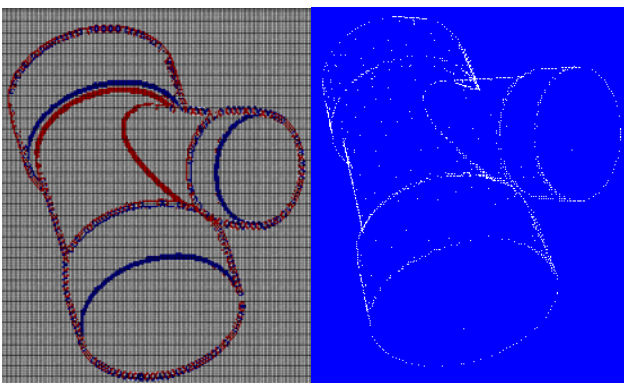


Figura 4 - Modello "bigwye": 1) bordi convessi (blu) e concavi (rosso), 2) punti decimati.

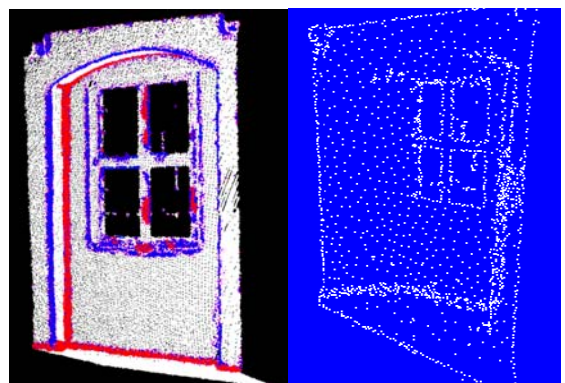


Figura 5 - Dati reali "castello": 1) bordi convessi (blu) e concavi (rosso), 2) punti decimati.

Il modello "bigwye" (25.000 punti) è formato in prevalenza da superfici curve: la Figura 4.1 riporta le discontinuità D0 e D1 trovate dall'algoritmo: si osservino i due bordi ravvicinati circolari concavi e convessi esattamente identificati. In Figura 4.2 sono raffigurati i 1.293 punti decimati con QSlim.

Passando ai dati reali, sono state elaborate alcune scansioni acquisite con il sistema Riegl Z360i in una sala del castello di Gorizia (70.000 punti in Figura 5) e sulla facciata della Chiesa di S. Ignazio a Gorizia (500.000 punti in Figura 6). Mentre l'algoritmo proposto consente di estrarre correttamente le principali discontinuità D1 delle superfici rilevate, p.e. in Figura 5.1 si distingue la spalletta della nicchia, i metodi geometrici per decimazione hanno fornito risultati insoddisfacenti, come quelli di Figura 5.2 ottenuti con QSlim che invece non riconoscono in nessun modo la stessa spalletta. Ciò è dovuto al fatto che il risultato delle decimazioni progressive è strettamente legato alla qualità della triangolazione di partenza. In presenza di dati ad alta densità e di rumore strumentale si possono avere dei triangoli millimetrici per i quali il lato è dello stesso ordine di grandezza della variazione altimetrica. Si parte quindi da una prima superficie TIN con forti variazioni di pendenza ed estremamente rugosa (lo *smoothing* porterebbe peraltro al non controllo del processo) per la quale la decimazione evidenzia false discontinuità dovute al rumore e non le vere discontinuità D1.

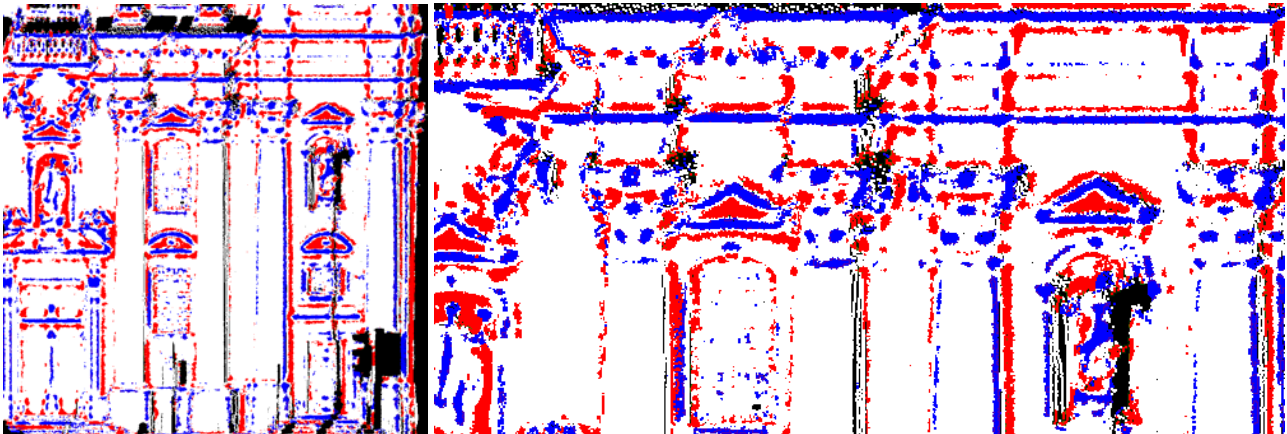


Figura 6 - 1) Dati reali "S. Ignazio": bordi convessi (blu) e concavi (rosso), 2) particolare.

6. Conclusioni

È stato presentato un algoritmo completamente automatico per il riconoscimento delle zone di bordo da dati laser terrestri basato essenzialmente sull'analisi dei valori numerici della curvatura media locale ottenuta a partire da un modello non parametrico di interpolazione.

Dall'ampia sperimentazione effettuata si sono ottenuti risultati più che soddisfacenti per dati laser simulati, equivalenti a quelli ottenuti con due procedure di decimazione di TIN ed addirittura migliori nel caso di dati reali caratterizzati dall'effettivo rumore strumentale di scansione.

Bibliografia

- Alshwabkeh Y., Haala N., Fritsch D. (2006), "2D-3D feature extraction and registration of real world scenes", Proc. of the ISPRS Comm. V Symposium, Dresden, *IAPRS&SIS*, XXXVI, 5: 32-37.
- Beinat A., Crosilla F., Visintini D., Sepic F. (2007), "Automatic non parametric procedures for terrestrial laser point clouds processing", Proceedings of the ISPRS Workshop "Photogrammetric Image Analysis 2007", Munich, *IAPRS&SIS*, 6 pag. (in printing).
- Bonora V., Tucci G. (2005), "Individuazione degli spigoli su un modello architettonico realizzato da scansioni 3D", Atti della IX Conferenza Nazionale ASITA, Catania, I: 431-438.
- Briese C. (2006), "Structure line modelling based on terrestrial laser scanner data", Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium, Dresden, *IAPRS&SIS*, XXXVI, 5 (on CD).
- Crosilla F., Visintini D., Sepic F. (2007), "An automatic classification and robust segmentation procedure of spatial objects", *Statistical Methods & Applications*, 15: 329-341.
- Do Carmo M.P. (1976), *Differential geometry of curves and surfaces*, Prentice-Hill Int., London.
- Garland M. (1999), "Multiresolution modeling: Survey & future opportunities", *Eurographics '99*, State of the Art Report, September.
- Ohio State University, *OSU MSU/WSU Range Image Database*, <http://sampl.ece.ohio-state.edu/data/3DDDB/RID/index.htm>