

## Fusione di DSM ed immagini per l'estrazione automatica di linee di rottura dal DSM

Gessica Umili, Gianfranco Forlani

DICATeA, Università degli Studi di Parma, Viale G.P. Usberti 181/a, 43124 Parma (PR), Italy  
Tel. +39 0521 905934, Fax +39 0521 905924, E-mail: gessica.umili@nemo.unipr.it, gianfranco.forlani@unipr.it

Il presente lavoro descrive un metodo per estrarre gli *edge* presenti in un Modello Digitale della Superficie generato con tecniche fotogrammetriche o laser scanner di cui sia disponibile anche un'immagine con parametri di orientamento interni ed esterni noti. Partendo da una *mesh* triangolata si ricostruisce un *edge* connettendo i vertici con curvatura massima locale, chiudendo piccoli gap ed eliminando i vertici ripetuti. Ognuno degli *edge* così assemblati è costituito da un insieme ordinato di vertici connessi tra loro mediante la triangolazione associata alla nuvola di punti; per ogni *edge* viene poi calcolato un segmento approssimante. Per migliorare la completezza e controllare la correttezza del risultato si impiegano anche *edge* estratti da immagini orientate, riproiettati sulla triangolazione. Il campo di applicazione del metodo è quello di oggetti di tipo architettonico, con l'obiettivo di delineare la forma e gli elementi principali dell'oggetto. L'estrazione dal DSM è già stata applicata a dati reali; il metodo di integrazione delle immagini viene qui descritta e verificata su un esempio simulato.

### Abstract

This paper describes the setting of an automatic method to extract *edges* from a Digital Surface Model created by means of photogrammetric technics or a laser scanner; at least one image of the object with known internal and external orientation parameters is required. Starting from a triangulated mesh, edges connecting vertices whose curvature values are local maxima are detected, gaps are closed along the edges and repeated vertices are deleted. A smoothed version of the edge is then computed. This method is turned to the architectural field of application and the aim is to automatically extract *edges* in a complete and correct way, in order to synthetically reconstruct shape and principal elements of the considered object and to obtain a useful database with geometrical information. The operations implemented in a new algorithm are described and tested on a case study object.

### Introduzione

L'utilizzo di strumenti di acquisizione diretta di punti (*laserscanner*) e di tecniche fotogrammetriche per la creazione di Digital Surface Model (DSM) di oggetti sta conoscendo una rapida diffusione in numerosi campi. Entrambe le metodologie sono in grado di fornire come risultato una nuvola di punti e un set di immagini dell'oggetto: come noto le tecniche fotogrammetriche partono proprio da un set di immagini per ricostruire il modello 3D, mentre i *laserscanner* attualmente in uso sono generalmente dotati, oltre all'apparato di acquisizione della nuvola di punti, anche di una camera digitale integrata nello strumento o comunque di un supporto predisposto per ospitarne una esterna, che permetta di acquisire immagini dell'oggetto. L'acquisizione delle immagini in questo secondo caso è di norma semplicemente quella di associare l'informazione colorimetrica al DSM, ad esempio per la produzione di ortofoto o per la visualizzazione con programmi di grafica 3D.

Vantaggi e svantaggi delle due metodologie, specie nel rilievo architettonico, sono stati da tempo discussi ed affrontati in numerosissimi lavori (Boehler et al., 2002; Demir et al., 2004; Kadobayashi

et al, 2004); l'iniziale impressione di alcuni che l'ingresso del laser scanner rendesse obsoleta la fotogrammetria ha lasciato poi il posto ad una prevalenza di pareri che vedono i vantaggi dell'integrazione (Nex et al, 2011) e, comunque, la necessità di valutare caso per caso quale delle due tecnologie sia la più adatta (Habib et al., 2004; Grussenmeyer, 2008).

Da decenni l'elaborazione di immagini ha fra i suoi obiettivi anche il riconoscimento e la classificazione degli oggetti ripresi nella scena; col progresso delle tecniche di telerilevamento e la diffusione di sensori digitali tali obiettivi si sono focalizzati sull'estrazione di edifici, il riconoscimento di strade e, più di recente, la modellazione della vegetazione. Analogamente, proposte di automazione a vari livelli della restituzione nel settore architettonico vengono da qualche anno presentate. La varietà e complessità delle situazioni suggerisce che il percorso sarà certamente più lungo e forse limitato a parziali successi. L'esperienza sull'estrazione di edifici mostra tuttavia che la soluzione, anche nel campo architettonico, deve prendere in considerazione più sorgenti di informazioni e impiegare modelli (ad esempio di tipo parametrico) che consentano almeno una individuazione degli elementi principali (accessi, aperture, ecc.). Per una efficace applicazione di queste tecniche tuttavia resta fondamentale l'estrazione del dato primario, in particolare dei contorni. Per migliorarla, vari autori (Becker e Haala, 2007; Nex e Rinaudo, 2010; etc.) propongono appunto di integrare le informazioni derivanti dal modello 3D con quelle derivanti dalle immagini per ottenere informazioni più complete in termini di linee di rottura, ossia degli elementi fondamentali per ricostruire la forma di un oggetto.

### **1. Il metodo combinato DSM-immagini**

Considerando che la complessità di una facciata può variare notevolmente da un oggetto all'altro, in funzione degli elementi strutturali e decorativi presenti, è importante definire caratteristiche salienti che possano accomunare le facciate e siano individuabili nel modello 3D e nelle immagini. Inoltre è necessario stabilire quale dato sia dominante nella procedura di estrazione delle linee di rottura. La scelta degli autori è ricaduta sugli spigoli che definiscono gli elementi e gli spazi, separando generalmente superfici più o meno piane. Per quanto riguarda il DSM, come già proposto da Beinat et al. (2007), tali spigoli possono essere considerati come insiemi di vertici 3D che presentano valori di curvatura maggiori rispetto ai vertici adiacenti. In particolare verrà qui considerata la curvatura principale. Tale concetto, afferente alla geometria differenziale, può essere illustrato considerando un generico punto  $P$  di una superficie differenziabile nello spazio euclideo  $R^3$ : adesso sono infatti associate due curvature principali, che sono il massimo ed il minimo della curvatura di una curva contenuta nella superficie e passante per il punto  $P$ . Di conseguenza si avranno massimi locali della curvatura principale massima nel caso in cui i punti appartengano ad una porzione di massima convessità locale della superficie: in questo caso si parlerà di *edge* di cresta. Al contrario si avranno minimi locali della curvatura principale minima nel caso in cui i punti appartengano ad una porzione di massima concavità locale della superficie e in questo caso si parlerà di *edge* di gola. Per quanto riguarda invece le immagini, gli spigoli possono essere identificati in base all'informazione colorimetrica; in generale un *edge* sarà costituito da pixel caratterizzati da elevati valori del gradiente dei toni di grigio. Secondo Barrow e Tenenbaum (1981), e Lindeberg (2001), tale variazione può essere dovuta a varie cause, quali differenze di profondità, di orientazione delle superfici, variazione delle proprietà dei materiali o di illuminazione della scena. Pertanto, l'*edge* di un'immagine non necessariamente coincide con un *edge* fisico e quindi l'informazione evidenziata dall'estrazione di *edges* spesso mescola elementi utili e non. Per questo motivo gli autori hanno ritenuto opportuno utilizzare come informazione dominante la geometria 3D del DSM, mentre l'informazione derivante dall'immagine è considerata come strumento per aumentare il grado di completezza e in parte di correttezza dei risultati. In pratica la prima fase di estrazione utilizza solamente i vertici del DSM per estrarre gli *edges*, mentre nella seconda fase l'immagine viene utilizzata per colmare gli eventuali *gaps* tra *edges* che nella realtà sono uniti tra loro ma che, a causa di lacune nel modello 3D, quali aree a bassa densità di vertici o effetti di liscio, si presentano "spezzati" e non possono essere uniti mediante la sola informazione sulla curvatura principale. In

funzione delle caratteristiche dell'oggetto da rilevare occorre valutare quale tecnica possa fornire i risultati migliori in termine di precisione, accuratezza e completezza. Su superfici piane e che presentino tessitura omogenea il laser scanner terrestre può fornire risultati migliori rispetto alla fotogrammetria; tuttavia per l'impiego del metodo che gli autori propongono, come precedentemente affermato, l'interesse è rivolto non tanto alle parti piane, quanto invece agli spigoli. In particolare, per il buon funzionamento degli algoritmi di estrazione automatica di linee di rottura mediante le informazioni sulla curvatura principale, è fondamentale che la superficie in corrispondenza degli spigoli sia costituita da un numero sufficientemente elevato di punti, tale da garantire che la forma sia descritta in modo corretto e completo e che siano limitate le interruzioni nel percorso degli spigoli. Il passo di campionamento con il quale vengono acquisiti i punti dell'oggetto dovrebbe quindi rispettare il più possibile tali requisiti; poiché però non sempre questo si verifica, le immagini dell'oggetto possono davvero svolgere un ruolo importante nella fase di controllo e completamento dei risultati.

## 2. Estrazione delle linee di rottura dal DSM

### 2.1. Calcolo della curvatura principale massima e minima e definizione delle soglie

Gli algoritmi descritti in questo paragrafo sono stati scritti in linguaggio Matlab e il software che li contiene è stato denominato CurvaTool. Il file di input necessario al software è un file di testo che contiene le coordinate XYZ dei vertici della *mesh* e al termine di tale elenco riporta, per ogni triangolo della *mesh*, i numeri identificativi dei tre vertici che lo compongono. Per calcolare la curvatura principale massima e minima e le corrispondenti direzioni principali di curvatura di ogni punto della nuvola triangolata viene utilizzato il metodo proposto da Chen & Schmitt (1992) ed ampliato da Dong & Wang (2005). La curvatura principale massima, indicativa della convessità della superficie, permetterà di identificare gli *edge* di cresta, mentre quella minima, indicativa della concavità, permetterà di identificare gli *edge* di gola (Fig. 1). In valore assoluto una curvatura principale maggiore di 0 indica non planarità della superficie: nello specifico, si tratterà di convessità se la curvatura principale massima è positiva, concavità se la curvatura principale minima è negativa. Occorre però stabilire quale grado di convessità e concavità siano significativi e possano rappresentare *edge* da estrarre.

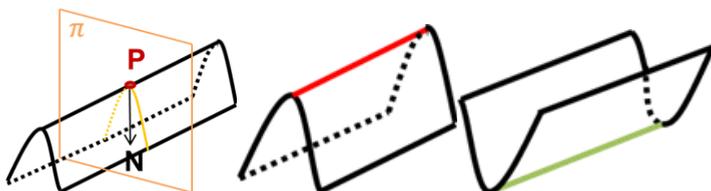


Figura 1 – a) definizione di curvature principale, b) *edge* di cresta (rosso), c) *edge* di gola (verde).

Tale operazione è svolta interattivamente dall'operatore assegnando le soglie *ThreshMax* (positiva) e *ThreshMin* (negativa) rispettivamente per la curvatura principale massima (*kmax*) e minima (*kmin*). L'operatore assegna le soglie con un'interfaccia grafica che consente di valutare visivamente mediante scale di colori la curvatura di ogni vertice e quindi se gli *edge* di interesse verranno estratti coi valori di soglia impostati. In genere la superficie di una *mesh* ottenuta da dati reali non contiene spigoli composti da vertici perfettamente allineati, perciò l'ampiezza della fascia di vertici che compone visivamente l'*edge* non è costante. La ricerca della soglia ottimale deve avere come obiettivo la riduzione dell'ampiezza di tale fascia. L'assegnazione della soglia *ThreshMax* considera *edge* di cresta solamente quei vertici con valori di curvatura principale massima maggiori. Viceversa sono *edge* di gola vertici i con valori di curvatura principale minima minori di *ThreshMin*. E' bene specificare che i due valori di soglia non devono necessariamente essere uguali tra loro in valore assoluto. La scelta dei valori di soglia influenza tutta la successiva applicazione del metodo.

## 2.2. Estrazione automatica degli *edge*

Il procedimento di estrazione automatica degli *edge* applica gli stessi algoritmi prima ai vertici  $K_{maxT}$ , che hanno valori di curvatura principale massima maggiori della soglia, poi a quelli  $K_{minT}$ , che hanno valori di curvatura principale minima minori della soglia. Detti  $KT$  i vertici selezionati, per prima cosa si memorizzano tutti i triangoli a cui appartengono i vertici  $KT$ ; di ognuno di questi triangoli vengono identificati come lati significativi quelli che hanno per estremi due vertici di  $KT$ . In questo modo si memorizzano tutti i possibili lati di connessione tra i vertici di  $KT$ . Si opera poi la suddivisione dei lati in gruppi omogenei: ogni gruppo è composto da vertici che sono tra loro connessi mediante lati e che perciò potenzialmente appartengono ad uno stesso *edge*. Con il termine *edge* si intende un percorso che unisce vari vertici in modo univoco: partendo da un estremo si toccano tutti i vertici una sola volta fino ad arrivare all'altro estremo. In questa fase si arriverà alla creazione di *edge* a partire da gruppi di lati della triangolazione; quindi si dovranno scegliere i lati che compongono il percorso e scartare gli altri. Pertanto quando si parlerà di *edge* potenziale si intenderà non lo spigolo vero e proprio, ma l'insieme di tutti i lati tra cui scegliere il percorso (Fig. 2).

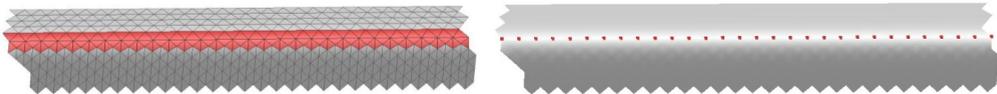


Figura 2 – Definizione di a) *edge* potenziale (fascia rossa), b) *edge* vero e proprio (sequenza di punti rossi).

A questo punto si effettua l'operazione di connessione vera e propria (*linking*) dei vertici per creare gli *edge*. Operativamente l'algoritmo parte dal vertice dell'*edge* potenziale col massimo (in valore assoluto) di curvatura. Identifichiamo questo vertice con  $A$ . Si considera ora la direzione principale  $t_A$  di curvatura di  $A$  (direzione principale minima se si stanno unendo punti di cresta, massima per i punti di gola): essa per definizione indica la direzione lungo la quale ci si aspetta che la curvatura continui ad avere un massimo locale, perciò è di fondamentale importanza in questa operazione di connessione. A questo punto si crea il piano passante per  $A$  e di normale pari a  $t_A$ . Il piano è funzionale all'operazione di unione dei punti poiché opera una separazione dell'*edge* potenziale in due settori, che si possono genericamente identificare come "settore positivo", contenente i punti nella direzione concorde a quella principale, e "settore negativo", che contiene i punti rimanenti. Poiché il punto  $A$  si trova in una posizione generica all'interno della linea potenziale, per effettuare l'operazione di *linking* si partirà da  $A$  procedendo prima nel settore positivo, poi, una volta esauriti i punti da unire, si tornerà ad  $A$  per procedere nel settore negativo (Fig. 3). I candidati tra i quali scegliere il vertice da connettere ad  $A$  sono tutti i vertici del settore positivo che appartengono al secondo anello di vicinanza di  $A$ . Esso è composto dai triangoli adiacenti ad  $A$  e dai triangoli adiacenti a tali triangoli: i vertici del secondo anello di vicinanza di  $A$  sono quelli che formano i triangoli così classificati.

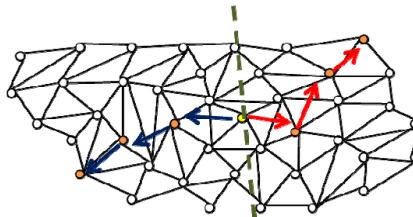


Figura 3 – Definizione di settore positivo e negativo.

E' bene specificare che la direzione principale di curvatura di un vertice in generale non punta verso un altro vertice. In questo algoritmo si è scelto di connettere solo vertici esistenti, senza crearne di

ausiliari. Pertanto è necessario valutare sia la direzione principale di curvatura sia il valore di curvatura: in particolare, si vuole massimizzare il valore di curvatura  $k$  e minimizzare l'angolo  $\alpha$  compreso tra la direzione principale di  $A$  e il lato che collega  $A$  al vertice candidato. Pertanto il vertice  $B$  che verrà scelto per proseguire il percorso sarà quello con rapporto  $k/\alpha$  massimo (Fig. 4).

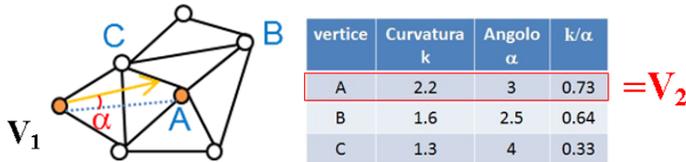


Figura 4 – Criterio di scelta del vertice successivo.

Creato il nuovo piano passante  $B$  e di normale pari a  $t_B$ , si eliminano dall'elenco dei vertici del settore positivo tutti quelli a distanza negativa da tale piano. Il processo di connessione nel settore positivo si ferma quando i vertici rimanenti tra cui scegliere sono in numero minore di una soglia fissata. Il processo nel settore negativo inizia solo se la numerosità dei suoi punti è maggiore di tale soglia ed è sostanzialmente identico, a parte il fatto che le direzioni principali vengono assunte di segno opposto a quelle reali. L'edge risultante, data la procedura di scelta all'interno del secondo anello di vicinanza, sarà costituito da un elenco ordinato di vertici, nel quale ogni vertice è connesso al precedente e al successivo da uno o al massimo due lati di triangoli (Fig. 5). Questa procedura viene ripetuta per tutti gli edge potenziali.

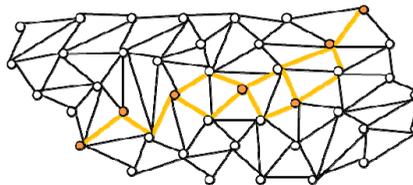


Figura 5 – Per passare tra un vertice dell'edge al successivo si percorrono al massimo due lati di triangoli.

### 2.3. Infittimento, raffinamento e connessione degli edge

E' stato creato un algoritmo per infittire l'edge inserendo un punto intermedio ogni volta che il percorso da un vertice al successivo nella linea è composto da più di un lato di triangolo (cioè in tutti i casi in cui il punto di connessione scelto durante il link appartiene all'anello di vicinanza del secondo ordine): presi due vertici successivi  $V_i$  e  $V_j$  dell'edge non direttamente connessi mediante un lato di triangolo, esso inserisce il vertice intermedio che giace sul percorso di minima distanza tra  $V_i$  e  $V_j$ . Successivamente si impiega un algoritmo per il raffinamento degli edge, cioè l'ottimizzazione del percorso di connessione dei vertici, con l'obiettivo di ridurre la "larghezza" dell'edge nella direzione perpendicolare a quella dell'edge stesso (Fig. 6).



Figura 6 – Procedura di infittimento e raffinamento degli edge.

Infine, si considera il primo edge estratto  $E_1$  e si cerca nel secondo anello di vicinanza di ogni vertice di  $E_1$  se siano presenti vertici di altri edge. Si connette poi  $E_1$  ad ogni edge che abbia dato esito positivo. Si ripete tale procedimento per ognuno degli edge.

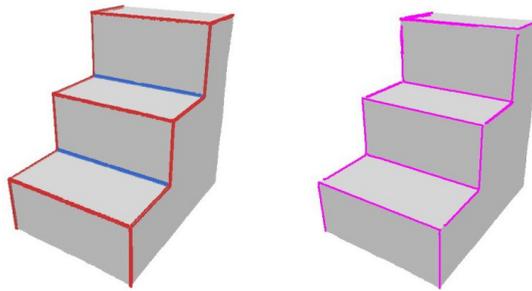


Figura 7 – Oggetto di prova (Scala): a) vertici appartenenti a potenziali edge di cresta (rosso) e di gola (blu), b) edge estratti.

### 3. Chiusura degli edge incompleti mediante immagini orientate

Come detto, è spesso necessario migliorare la completezza degli *edge* 3D individuati sulla *mesh*; in particolare, a causa di effetti locali di liscio della superficie o per effetto di un'errata triangolazione, è possibile che gli *edge* siano più corti degli spigoli reali, oppure che lungo uno spigolo si trovino più *edge* non connessi tra loro. Si possono a tale fine utilizzare una o più immagini dell'oggetto di cui si sta analizzando il DSM, purché i loro parametri di orientamento interno ed esterno siano noti in modo accurato e preciso. Le immagini vengono convertite da RGB a toni di grigio utilizzando i coefficienti dello standard NTCS ed elaborate con il filtro di Wallis per aumentare localmente il contrasto. Successivamente si utilizza il filtro di Canny (1986) per l'estrazione degli *edge* mediante la ricerca dei massimi locali del gradiente di  $I$  generando una matrice binaria. Al momento si considerano solo *edge* che possano essere descritti da un segmento di retta; ovviamente in questo modo molti *edge* vengono scartati, perciò ci si propone in futuro di rimuovere tale limite. Alla matrice binaria viene applicata la Trasformazione di Hough per l'estrazione delle rette, ottenendo le coordinate immagine dei pixel che compongono ogni segmento.

Nel caso di una facciata di un edificio, ossia di un oggetto assimilabile ad un piano, potrebbe essere sufficiente usare una sola immagine circa nadirale per ottenere i segmenti cercati, mentre per oggetti più complessi potrebbero essere necessarie più immagini scattate da diverse angolature; al momento la procedura impiega un'unica immagine.

Viene ora descritto in dettaglio l'algoritmo. Preliminarmente occorre fissare alcuni valori di soglia:

- $T_{\text{piano}}$  = distanza massima di un vertice della *mesh* dal piano  $\pi$  affinché il vertice sia considerato.
- $T_{\text{cornice}}$  = dimensione della cornice attorno al rettangolo formato dai vertici  $M_1M_2P_1P_2$  (vedi oltre).
- $T_{\text{ransac}}$  = soglia per considerare i vertici *inlier* durante la stima della retta interpolante
- $T_{\text{angolo}}$  = angolo limite per considerare due *edge* appartenenti alla medesima retta 3D.

Inoltre occorre definire un piano che approssima il DSM nella zona da elaborare. Il procedimento per integrare le informazioni 2D derivanti dall'immagine con quelle 3D ricavate dalla *mesh* si compone delle seguenti fasi:

- 1) Si considera il primo segmento di retta individuato sull'immagine  $I$ ; di esso sono noti i pixel estremi  $v_1$  e  $v_2$ .
- 2) Si trasformano gli estremi  $v_1$  e  $v_2$  sull'immagine nei corrispondenti punti  $V_1$  e  $V_2$  dello spazio oggetto:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R^T \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} [1]$$

dove R è la matrice di rotazione da sistema di riferimento terreno a quello immagine,  $(x_0, y_0)$  sono le coordinate pixel del punto principale,  $c$  è la distanza focale e  $(X_0, Y_0, Z_0)$  sono le coordinate del centro di presa C.

- 3) Si stima il piano  $\pi$  passante per i due estremi  $V_1$  e  $V_2$  e per il centro di presa C dell'immagine (Fig. 8a).
- 4) Si stimano le due rette  $r_1$  ed  $r_2$  rispettivamente passanti per C e  $V_1$  e per C e  $V_2$  (Fig. 8a).
- 5) Sull'immagine il segmento considerato definisce un *range*, rappresentato dal rettangolo che ha per estremi della diagonale i due estremi del segmento  $v_1$  e  $v_2$  (Fig. 8b).

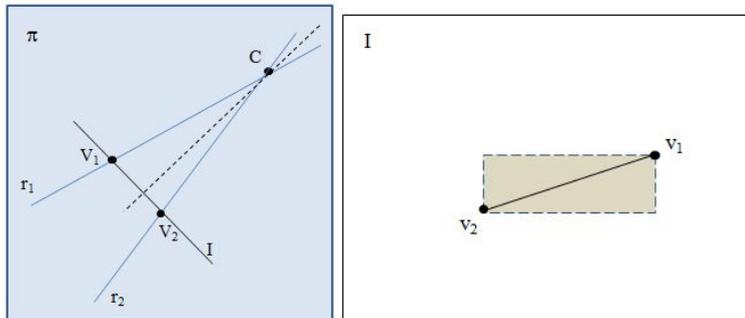


Figura 8 – a) stima del piano  $\pi$ ; b) definizione del range (in grigio) sull'immagine I.

- 6) Si cercano i vertici della *mesh* corrispondenti ai pixel appartenenti al segmento considerato. Questa operazione è particolarmente articolata a causa della impossibilità di individuare in modo univoco la relazione per passare dai pixel immagine ai vertici della *mesh*. Perciò occorre procedere restringendo via via il numero dei vertici della *mesh* associati ai pixel del segmento.
  - a. Si considerano i vertici della *mesh* che si trovano a distanza inferiore alla soglia  $T_{\text{piano}}$  dal piano  $\pi$ ; in questo modo si considera la striscia di vertici individuata dall'intersezione tra la *mesh* e il piano  $\pi$ . Tale striscia si estende lungo tutta la *mesh* ed ha ampiezza pari al massimo a  $2 * T_{\text{piano}}$ .
  - b. Si riproiettano i vertici trovati al punto a. sull'immagine e si eliminano quelli che cadono al di fuori del range del segmento (calcolato al punto 5). In questo modo si limita l'estensione della striscia di vertici.

- Per ognuno dei vertici  $v$  rimasti al punto b. si considera la retta  $r_1$  e si calcola il valore del parametro  $t$  lungo i tre assi  $X, Y, Z$  con le relazioni ricavate dalla forma parametrica della retta:

$$t_x = \frac{X - X_0}{l} \quad t_y = \frac{Y - Y_0}{m} \quad t_z = \frac{Z - Z_0}{n} \quad [2]$$

Si individua l'asse coordinato lungo il quale è massima la variazione del parametro  $t$ : il minimo valore di  $t$  lungo questa direzione appartiene al vertice che identifico con  $M_1$ . Si

ripete il procedimento considerando la retta  $r_2$ : questa volta il massimo valore di  $t$  lungo a direzione di massima variazione appartiene al vertice che identifico con  $M_2$ .

- d. Si considera il piano interpolante della mesh e si intersecano le due rette  $r_1$  ed  $r_2$  con tale piano, per trovare rispettivamente i punti  $P_1$  e  $P_2$ (Fig. 9a). Per ogni vertice  $v$  di quelli rimasti al punto b. si considera il triangolo  $V_1P_1v$ , di base  $V_1P_1$ : l'altezza del triangolo rappresenta perciò la distanza del vertice  $v$  dalla retta  $r_1$ . Lo stesso vale per il triangolo  $V_2P_2v$ , la cui altezza rappresenta la distanza del vertice  $v$  dalla retta  $r_2$ . Tra tutti i vertici vengono scelti quello a distanza minore da  $r_1$  e quello a distanza minore da  $r_2$ , chiamati rispettivamente  $D_1$  e  $D_2$  (Fig. 9b).

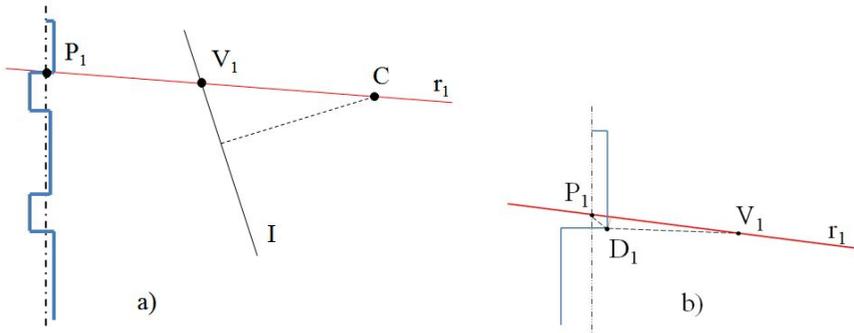


Figura 9 – a) intersezione della retta  $r_1$  con il piano medio del DSM (in pianta);  
b) definizione del punto  $D_1$  (in pianta).

- e. Si eliminano i vertici che cadono al di fuori dall'area definita dai vertici  $M_1M_2P_1P_2$ , incrementata di una cornice di spessore  $T_{\text{cornice}}$ . Si ottiene così un gruppo di vertici che ben corrisponde, anche se non univocamente, ai pixel che formano il segmento considerato.

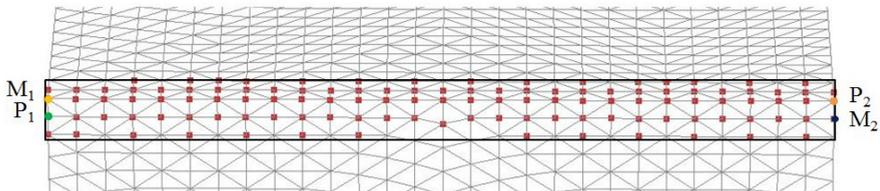


Figura 10 – Definizione (in nero) dell'area  $M_1M_2P_1P_2$  incrementata di  $T_{\text{spessore}}$

- 7) Con il metodo RANSAC si stima la retta interpolante i vertici ottenuti al punto e.; la soglia  $T_{\text{ransac}}$  viene utilizzata per definire i vertici *inlier* potenzialmente appartenenti alla retta.
- 8) Si crea il percorso di connessione dei vertici ottenuti al punto e., in modo che abbia la stessa struttura degli *edge* 3D estratti geometricamente. Il percorso parte quindi da un estremo e, muovendosi lungo la triangolazione, unisce i vertici appartenenti alla retta interpolante.
- 9) A questo punto si passa alla connessione di *edge* per colmare eventuali *gap*. Si confronta l'*edge* ricavato dall'immagine (Fig. 11a) con quelli estratti geometricamente che ricadono nelle sue vicinanze (Fig. 11b). Per far ciò, per prima cosa si considerano i vertici connessi al punto 8e i vertici nel loro anello di vicinanza di ordine 1; poi si verifica, per ogni *edge* geometrico, se tra

questi punti ci sia almeno 1 punto in comune con quellidell'*edge* ricavato dall'immagine. In caso affermativo, si calcola l'angolo tra le direzioni dei due *edge*; se l'angolo è minore o uguale a  $T_{angolo}$  vengono memorizzati in una matrice gli indici dei due *edge* da unire.

Il procedimento dal punto 1 al punto 9 viene ripetuto per ognuno dei segmenti di retta individuati sull'immagine. Infine, per ogni *edge* estratto geometricamente, si uniscono all'*edge* geometrico considerato tutti gli *edge* da immagine che hanno dato esito positivo per tale *edge* al punto 9 (Fig. 11c).

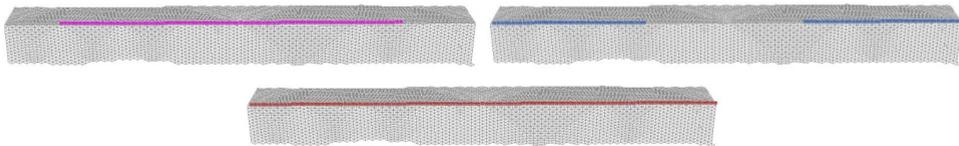


Figura 11 – Esempio di “riempimento” di un gap: a) *edge* ricavato dall'immagine, b) *edge* estratti da DSM che si trovano nelle vicinanze dell'*edge* ricavato dall'immagine, c) *edge* finale.

A questo punto per ogni nuovo *edge* assemblato si stima la retta interpolante come media tra le direzioni degli *edge* assemblati. I vertici appartenenti all'*edge* vengono ordinati lungo questa retta, operando un raffinamento ed eliminando i vertici ripetuti.

#### 4. Test su oggetto sintetico

Per verificare la correttezza di funzionamento dell'implementazione del metodo in un caso ideale si è impiegato sempre l'oggetto sintetico costituito da 3 gradini ed il corrispondente DSM; si sono poi generate immagini dell'oggetto in ambiente virtuale. La prova è consistita in due fasi: nella prima gli *edge* del DSM sono stati estratti mediante i soli algoritmi basati sulla curvatura principale; dopodiché alcuni di questi *edge* sono stati spezzati, eliminando un certo numero di vertici dalla sequenza che compone ogni *edge*. A questo punto si è utilizzato l'algoritmo di estrazione di *edge* da immagini per colmare i gap creati. La figura 12 a) mostra l'oggetto generato, di tessitura uniforme, mentre la figura 12 b) mostra una delle immagini generate, dalla quale evidentemente sono rilevabili solo alcuni degli *edge*.

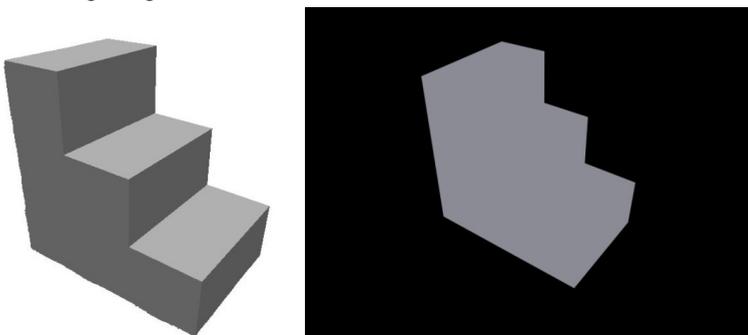


Figura 12 – a) DSM [116601 vertici], b) immagine utilizzata [1600x1200 pixel].

La figura 13 mostra i risultati dell'elaborazione; a sinistra vi sono gli *edge* rilevati direttamente dal DSM, già modificati inserendo delle interruzioni nella porzione dove sono presenti *edge* rilevati sull'immagine; al centro sono mostrati gli *edge* estratti con l'algoritmo di Canny; infine a destra si mostra la sovrapposizione dei risultati con la chiusura delle interruzioni. Le immagini e il DSM impiegato sono privi di noise, quindi (a parte il passo di discretizzazione del DSM e la

risoluzione dell'immagine) non sono presenti cause di disturbo. Anche i parametri interni ed esterni della camera sono privi di errore: si tratta come detto sostanzialmente di un test di funzionamento del programma.

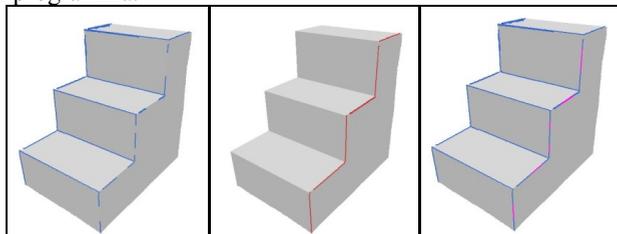


Figura 13 – a) rette estratte dal DSM con introduzione di gaps; b) rette estratte con trasformata di Hough; c) chiusura dei gaps dalla fusione delle informazioni DSM e immagine.

## 5. Conclusioni

L'estrazione da nuvole di punti rilevate su elementi architettonici di informazioni strutturate quali piante e sezioni è un obiettivo ambizioso ed assai articolato sul quale molti gruppi di ricerca stanno investendo. Il lavoro qui presentato, come evidente, è solo agli inizi, in particolare per quanto riguarda l'impiego delle immagini.

L'algoritmo di estrazione di contorni dal DSM è stato finora applicato sia a pareti rocciose sia a una serie di rilievi laser scanner su edifici; come già osservato, la correttezza e la completezza riscontrate dipendono fortemente dalla risoluzione del DSM. Dall'integrazione delle immagini nella procedura, al momento solo ad uno stadio di test di funzionamento, ci si attende un consistente miglioramento in molte situazioni. L'informazione dalle immagini è attualmente pensata come ancillare rispetto al DSM, che è ritenuto pertanto più affidabile; in futuro l'esperienza dirà se è più opportuno un ruolo paritario delle due sorgenti.

Quanto prima si intende passare dagli esempi sintetici a casi reali, per verificare la robustezza e l'utilità del metodo integrato nelle situazioni pratiche, vero banco di prova di ogni metodo.

## Bibliografia

Barrow H.G., Tenenbaum J.M. (1981). "Interpreting line drawings as three-dimensional surfaces", *Artificial Intelligence*, vol 17, issues 1-3, pages 75-116

Becker, S., Haala, N. (2007). Combined feature extraction for façade reconstruction. In: *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, September 12-14, 2007, Finland.

Beinat, A., Crosilla, F., Visintini, D., Sepic, F. (2007). "Automatic non parametric procedures for terrestrial laser point clouds processing". *Proceedings of: PIA07 Photogrammetric Image Analysis*, Munich, Germany September 19-21, 2007

Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., (2002). The potential of noncontact close range laser scanners for cultural heritage recording. In: *Int. Arch. of Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Inform. Sciences*, Potsdam, Germany, Vol. XXXIV, Part 5/C7, pp. 430-436.

Canny J. (1986). "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-8, No. 6, 1986, pp. 679-698.

Chen X., Schmitt F. (1992). "Intrinsic Surface Properties from Surface Triangulation". *Proceedings of the European Conference on Computer Vision*, (p. 739-743).

Demir, N., Bayram, B., Alkþb, Z., Helvaci, C., Çetin, I, Vögtle, T, Ringle, K., Steinle, E., 2004. Laser scanning for terrestrial photogrammetry, alternative system or combined with traditional system? XXth Congress of ISPRS, Istanbul 12-23 July 2004. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, part B5, pp.193-197.

Dong C., Wang G. (2005). "Curvatures estimation on triangular mesh". *Journal of Zhejiang University SCIENCE 6A(Suppl 1)*, 128-136.

Grussenmeyer P., Landes T. , Voegtler T., Ringle K. (2008) Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008, pp. 213-218.

Habib, A.F., Ghanma, M.S., Tait, M., (2004) "Integration of LiDAR and photogrammetry for close range applications," . XXth Congress of ISPRS, Istanbul 12-23 July 2004. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Technology and Spatial Information Sciences XXXV, part B5, 6 pp, CD-ROM..

Kadobayashi, R., Kochi, N., Otani, H., Furukawa, R, 2004. Comparison and evaluation of Laser scanning and photogrammetry and their combined use for digital recording of cultural heritage. XXth Congress of ISPRS, Istanbul 12-23 July 2004. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXV, part B5, pp.401-406.

Lindeberg T. (2001) . "Edge detection", in M. Hazewinkel (editor), Encyclopedia of Mathematics, Kluwer/Springer, ISBN 1402006098

Nex F., Rinaudo F. (2010). "Photogrammetric and LiDAR integration for the cultural heritage metric surveys". International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010.

Nex, F., Remondino, F., Rinaudo, F., (2011). Integration of range and image data for building extraction. In: SPIE Optical Metrology conference, CD-ROM, Munich 2011.