

Metodologia di calcolo delle distanze verticali su foto aeree oblique

Massimiliano Molinari (*), Stefano Medda (**), Samir Villani (***)

(*) Regione Autonoma della Sardegna, Direzione generale pianificazione urbanistica territoriale e vigilanza edilizia
Viale Trieste 186, 09121 Cagliari. e-mail mmolinari@regione.sardegna.it

(**) Azienda Regionale per l'Edilizia Abitativa. Via C. Battisti 6, 09123 Cagliari. e-mail stmedda@regione.sardegna.it

(***) Regione Autonoma della Sardegna, Direzione generale pianificazione urbanistica territoriale e vigilanza edilizia
Viale Trieste 186, 09121 Cagliari. e-mail svillani@regione.sardegna.it

Riassunto

In questo articolo vengono inizialmente presentati alcuni principi generali relativi alla fotografia aerea obliqua. Viene poi descritta una tecnica di calcolo delle distanze verticali, una volta che siano note le distanze in pixel tra due punti dell'immagine fotografica. Per lo svolgimento dei calcoli è necessario che siano disponibili sia i parametri di volo, sia i modelli digitali del terreno (DTM e DSM), i quali forniscono il piano di base da cui calcolare le quote verticali. L'algoritmo è stato implementato in un navigatore cartografico liberamente accessibile, che pubblica la cartografia obliqua per tutti i centri abitati della Sardegna.

Abstract

This article first introduces oblique aerial imagery, then describes how vertical distances can be measured once the pixel distances in the original pictures are known. The calculations require that not only all camera settings be known, but also that one relies on the availability of detailed digital terrain and surface models (DSM and DTM), in order to provide the necessary ground level for calculating vertical distances. The algorithm is finally implemented in a freely accessible online viewer, which displays the oblique imagery for all the city centres of Sardinia.

Introduzione

La fotografia aerea sta assumendo un ruolo sempre più importante nell'ambito della pianificazione del territorio e dello sviluppo sostenibile degli ambienti urbani. L'uso di foto aeree nadirali e oblique permette di analizzare il territorio in maniera spedita e al contempo approfondita, fornendo così uno strumento utile per identificare i dettagli architettonici degli edifici e, più in generale, per tracciare l'evoluzione del territorio.

In tal modo, la rappresentazione obliqua può essere usata come supporto per le attività di pianificazione, poiché fornisce una visione molto dettagliata e accurata dei centri urbani. In Grenzdörffer et al. (2007) viene mostrato come l'uso delle immagini oblique all'interno di un software commerciale quale *MultiVision* può fornire una visione interattiva e multi-prospettica di una data porzione di territorio o di una struttura. Poiché le immagini hanno un margine di sovrapposizione è anche possibile ottenere una visione stereografica.

Le foto oblique permettono, in particolare, di evidenziare gli elementi dello sviluppo urbano utilizzando il punto di vista tipico della rappresentazione 3D, rendendo così possibile visualizzare anche le facciate degli edifici, caratteristica tipicamente preclusa alla normale rappresentazione nadirale. I notevoli progressi fatti nella ricostruzione 3D tramite computer grafica, nella fotogrammetria e nel *remote sensing* consentono ora una rappresentazione sempre più fedele delle facciate degli edifici in tre dimensioni (Przemyslaw et al., 2013). Molto lavoro è stato fatto ad esempio nell'uso della fotografia aerea per la riproduzione di modelli 3D di ambienti costruiti (Pons et al. 2008) e nell'uso della rappresentazione 3D per la pianificazione sostenibile dell'ambiente

urbano (Przemyslaw et al., 2013). Queste applicazioni sono ora tanto realistiche quanto facilmente reperibili (Charalambos et al., 2011; Guo et al., 2011). Tuttavia, è anche vero che le rappresentazioni 3D, per quanto sofisticate, devono necessariamente fare ricorso ad una serie di semplificazioni ed approssimazioni che, in certi casi, ne limitano le possibilità di utilizzo per la valutazione e pianificazione dell'ambiente urbano. Ciò è ancora più vero per le amministrazioni pubbliche, per le quali diventa forse più appetibile avere a disposizione un'ampia collezione di foto aeree pubblicate all'interno di un portale cartografico online, piuttosto che software complessi finalizzati a produrre *rendering* 3D di un territorio.

In tempi recenti, la Regione Sardegna si è dotata di un'infrastruttura di dati territoriali nella quale convergono tutti i dati cartografici, poi pubblicati nel portale istituzionale della Regione. Tutti i dati territoriali sono gratuitamente accessibili e scaricabili, e lo stesso materiale fotografico può essere liberamente visualizzato. Il portale cartografico, oltre a rappresentare lo stato dell'arte nel panorama nazionale, rispetta anche i principi *Inspire* a livello europeo. Al tradizionale repertorio cartografico pubblicato finora, si aggiungono ora anche le foto oblique. Uno dei limiti di queste foto è però connesso alla difficoltà di effettuare misurazioni geometriche accurate; il problema è reso complesso dal numero di variabili coinvolte e dalla necessità di tenere in conto gli effetti prospettici, dal momento che la camera è ruotata di circa 45° rispetto all'orizzonte. Le variabili sono quindi, in generale, correlate alla posizione dell'aereo durante la ripresa e alle caratteristiche morfologiche del terreno.

Se, da una parte, esistono diversi software commerciali che offrono strumenti di analisi fotografica avanzate, ciò non si applica al caso dei software online. Ad esempio, il software *Automated Information Mapping System* or *AIMS* (*AIMS* online, 2014) consente la visualizzazione online delle foto, ma le misurazioni possono essere effettuate solo se si detiene una licenza a pagamento. Il software *Oblivision* (Idan Computers Ltd online, 2014), disponibile sia in versione desktop che online, consente misurazioni sulle foto oblique, ma l'algoritmo di calcolo non contiene alcun controllo di congruenza sulle misurazioni effettuate, soprattutto nell'extraurbano. Anche *Google Maps* (*Google Maps* online, 2015) e *Bing* (*Bing Maps* online, 2015) offrono la visione online di foto oblique, ma su di esse non è possibile effettuare il calcolo delle distanze. Altre compagnie private, quali *Fugro* (*Fugro* online 2015) e *Blom* (*Blom* online, 2015), offrono sistemi di visualizzazione di foto oblique a 45° (rispettivamente *Panoramix* e *Pictometry*), sia su piattaforma desktop sia online, ma, anche in questo caso, dietro il pagamento di una licenza, di fatto limitandone l'utilizzo solo a pochi utenti, spesso di carattere istituzionale.

In questo lavoro si vuole mostrare come sia possibile effettuare accurate misurazioni delle distanze verticali tra due punti quando siano note le distanze in pixel calcolate direttamente sulla foto obliqua. Il calcolo necessita dei parametri di camera e di georeferenziazione e richiede la disponibilità di accurati modelli digitali del terreno (DTM) e delle superfici (DSM).

L'algoritmo è stato implementato all'interno di un'applicazione web che permette all'utente di visualizzare le immagini oblique in maniera continua e, al contempo, di effettuare misurazioni su di esse. Lo strumento consente, ad esempio, di verificare la compatibilità degli interventi edilizi con la normativa vigente, fornendo quindi un valido supporto per il contrasto dell'abusivismo edilizio.

Il software è basato su librerie *open-source* ed è riutilizzabile anche da altre pubbliche amministrazioni o da chiunque ne faccia richiesta.

Metodo di calcolo

La Regione Sardegna ha recentemente acquisito un vasto repertorio di immagini oblique, relative a tutti i centri abitati e storici della Sardegna. Durante le riprese aeree, cinque fotocamere scattano contemporaneamente nelle 4 direzioni cardinali e in quella nadirale, offrendo pertanto 4 diversi punti di vista del territorio in direzione obliqua (Garnero et al, 2012). Un sofisticato sistema di tracciamento delle coordinate consente poi di associare ad ogni immagine i metadati relativi alla posizione dell'aereo durante lo scatto. Infine, un software proprietario, parte della *suite* *Pictometry* (Blom online, 2015; Hohle, 2008), è stato utilizzato per la proiezione di ogni foto al suolo. Per

quanto non sia possibile mosaicare le foto in un'unica immagine, dal momento che esse hanno tutte una prospettiva diversa e non combaciano ai bordi, è stato comunque possibile pubblicare le foto sul geoportale regionale. La navigazione delle foto risulta sufficientemente fluida, anche se rimane necessariamente una transizione discreta da una foto alla successiva. Rimaneva il problema di effettuare misurazioni verticali sulle foto; tale problema è stato risolto come illustrato nel seguito.

Si indichi con F il punto focale della fotocamera, situate a h_f metri sopra il livello del terreno. Dato un generico punto A sul territorio (ad esempio lo spigolo di un edificio), si indichi con A' il suo corrispondente punto sulla foto. Per determinare la relazione tra A e A' è necessario prendere in considerazione la configurazione in tre dimensioni della fotocamera durante il volo (Figura 1).

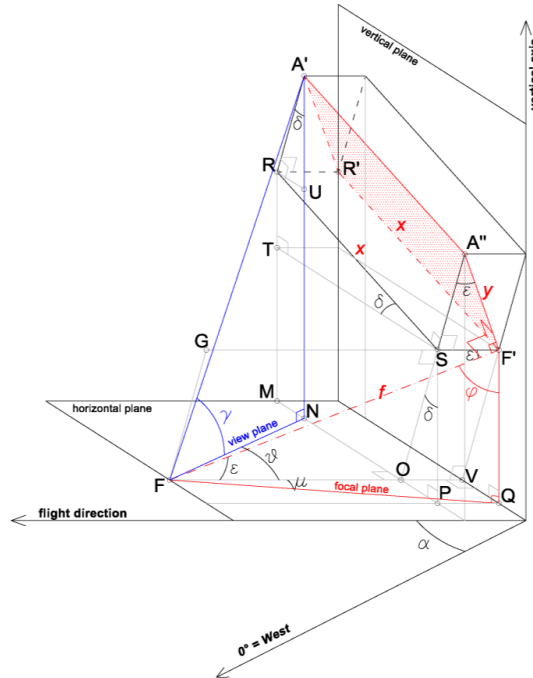


Figura 1 - L'immagine mostra il piano di vista $A'NF$, il piano focale $F'FQ$ e il quadrante $A'A''F'R'$ in alto a sinistra del piano fotografico (F' è la proiezione del punto focale su tale piano).

Il piano verticale $A'FN$ rappresenta il piano effettivo di osservazione dall'aereo; x e y sono noti, essendo le coordinate del punto selezionato dall'utente sulla foto. Indichiamo con:

- FQ la proiezione dell'asse focale f sul piano orizzontale;
- $\delta = \widehat{RST}$ l'angolo di declinazione ovvero l'angolo formato dalle rette RS e ST , positivo, come mostrato in Figura 1, e noto dai parametri di camera. Questo angolo misura lo scostamento dal piano orizzontale dell'aereo durante il volo;
- φ l'angolo di rollio, ossia l'angolo tra l'asse focale e la direzione verticale;
- α l'angolo azimutale tra l'asse della camera e l'Ovest;
- S l'intersezione tra il piano verticale contenente A' e A'' e la linea orizzontale passante tra F' e la retta parallela alla direzione del volo;
- O l'intersezione tra il piano orizzontale contenente F e la linea passante per A'' ed S ;
- T l'intersezione tra l'asse verticale per R e il piano orizzontale passante per S ;
- M, N, P e Q le intersezioni del piano orizzontale con gli assi verticali passanti per R, A', S e F' , rispettivamente.

Dobbiamo calcolare l'angolo zenitale $\gamma = A' \widehat{F}N$ e azimutale $\vartheta = N \widehat{F}O$. I calcoli indicati nel seguito fanno riferimento al caso in cui $\delta > 0$ e sono pertanto validi per il quadrante in alto a sinistra del piano fotografico (per questi punti, $x > 0$ e $y > 0$. Le equazioni relative agli altri quadranti si ricavano comunque banalmente partendo dal caso qui indicato). Per il triangolo $F'FQ$ si ha:

$$\overline{FQ} = f \cdot \sin \varphi \tag{1}$$

$$\overline{F'Q} = \overline{SP} = f \cdot \cos \varphi \tag{2}$$

Dal triangolo OSP :

$$\overline{OP} = \overline{SP} \cdot \tan \delta \tag{3}$$

Essendo $\overline{OP} = \overline{VQ}$, indicando con $\mu = V \widehat{F}Q$, dal triangolo FVQ si ha:

$$\overline{OP} = \overline{FQ} \cdot \sin \mu \tag{4}$$

Perciò:

$$\mu = \arcsin\left(\frac{\overline{SP} \cdot \tan \delta}{\overline{FQ}}\right) \tag{5}$$

Dal triangolo FVQ :

$$\overline{FV} = \overline{FQ} \cdot \cos \mu \tag{6}$$

Inoltre si ha che:

$$\overline{FA'} = \sqrt{f^2 + x^2 + y^2} \tag{7}$$

Dal triangolo $F'FV$ si ha (si veda anche Figura 2, che mostra la visione frontale del piano $GFVF'$, inclinato di un angolo δ rispetto al piano verticale):

$$\varepsilon = F' \widehat{F}V = \arccos \frac{\overline{FV}}{f} \tag{8}$$

$$\overline{SF'} = \overline{OV} = y \cdot \sin \varepsilon \tag{9}$$

$$\overline{A'R} = \overline{A'S} = y \cdot \sin \varepsilon \tag{10}$$

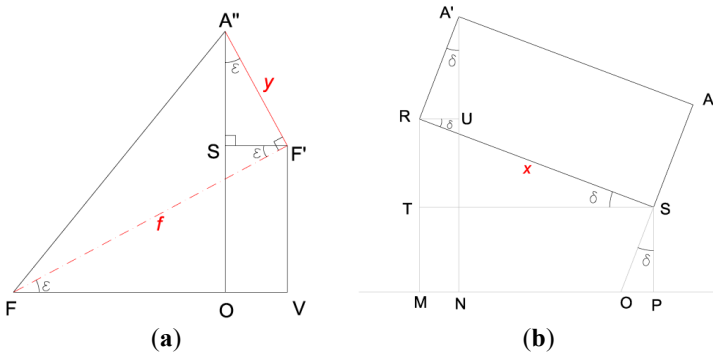


Figura 2 - (a) Vista frontale del piano obliquo $GFVF'$ e (b) del piano verticale $A'RMPA''$.

Dal triangolo TSR , situato su un piano verticale, si ha (si veda Figura 2):

$$\overline{MP} = \overline{TS} = x \cdot \cos \delta \tag{11}$$

$$\overline{RU} = \overline{MN} = \overline{A'R} \cdot \sin \delta \tag{12}$$

$$\overline{NO} = \overline{MP} - \overline{OP} - \overline{MN} \text{ (nota che, se } \delta < 0, \overline{NO} = \overline{MP} + \overline{OP} + \overline{MN}) \tag{13}$$

$$\overline{FO} = \overline{FV} - \overline{OV} \tag{14}$$

$$\overline{FN} = \sqrt{\overline{FO}^2 + \overline{NO}^2} \tag{15}$$

Possiamo ora calcolare l'angolo azimutale ϑ e zenitale γ , relative al punto A' :

$$g = \arctan\left(\frac{NO}{FO}\right) \quad (16)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{FN}{FA}\right) \quad (17)$$

È ora possibile calcolare le proiezioni dei punti a terra, a patto che siano disponibili i modelli DTM e DSM. La Figura 3 illustra schematicamente quali variabili siano coinvolte nel calcolo di una distanza verticale, ad esempio \overline{BC} , che rappresenta l'altezza di una finestra di un edificio. I calcoli possono essere effettuati lungo la direzione dell'osservatore, ovvero sul piano verticale contenente il punto focale F e A' . Si indichi con h_F l'elevazione del punto focale della foto obliqua dal datum.

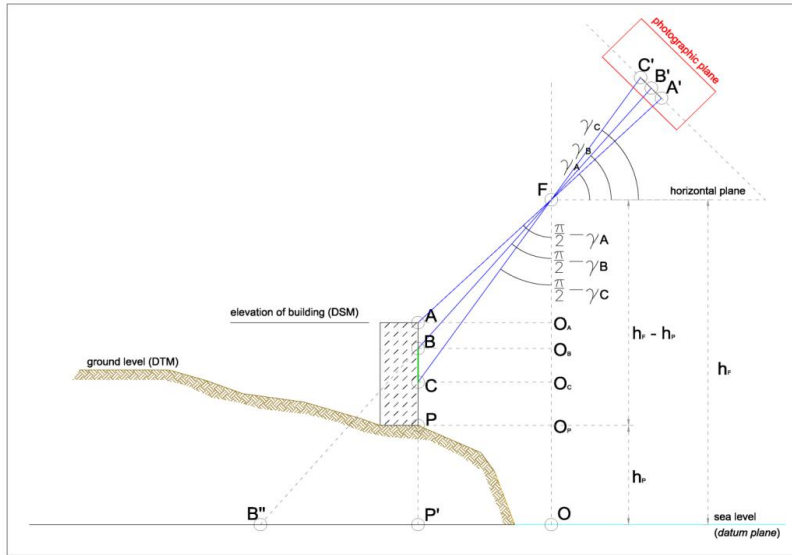


Figura 3 - Calcolo delle distanze verticali.

Per i calcoli è necessario conoscere anche la posizione del punto P , che è la proiezione al suolo dello spigolo superiore A dell'edificio. La posizione esatta di tale punto verrà calcolata nel paragrafo successivo. Gli angoli $\gamma_A, \gamma_B, \gamma_C$ possono essere calcolati mediante l'equazione [17], rispettivamente per i punti A, B and C dell'edificio. Possiamo così calcolare gli angoli tra le rette FA, FB, FC e la verticale passante per F . Si ha anche che:

$$\overline{FO_A} = \overline{AO_A} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_A\right) = \overline{AO_A} \cdot \tan \gamma_A \quad (18)$$

$$\overline{FO_B} = \overline{BO_B} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_B\right) = \overline{BO_B} \cdot \tan \gamma_B \quad (19)$$

$$\overline{FO_C} = \overline{CO_C} \cdot \cot\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_C\right) = \overline{CO_C} \cdot \tan \gamma_C \quad (20)$$

dove sono noti i seguenti valori:

$$\overline{AO_A} = \overline{BO_B} = \overline{CO_C} = \overline{PO_P} \quad (21)$$

essendo $\overline{PO_P}$ noto (si veda il paragrafo seguente). È infine possibile calcolare l'altezza dell'oggetto (ad esempio della finestra):

$$\overline{BC} = \overline{FO_C} - \overline{FO_B}, \quad (22)$$

e l'elevazione di ciascun punto dell'edificio:

$$h_A = h_F - \overline{FO_A}, \quad h_B = h_F - \overline{FO_B}, \quad h_C = h_F - \overline{FO_C} \quad (23)$$

Similarmente, possiamo determinare le proiezioni al suolo dei punti A, B e C , lungo le direzioni FA, FB e FC , rispettivamente.

Calcolo delle proiezioni al suolo

Per determinare la proiezione al suolo P dello spigolo A dell'edificio (Figura 3), è necessario avere a disposizione un modello DTM e DSM.

La Regione Sardegna ha a disposizione un DTM e un DSM di precisione su tutti i centri abitati della Regione, con passo di campionamento di 1 m. Il sistema di riferimento utilizzato per la rappresentazione del dato cartografico è quello nativo (WGS84/UTM32N - EPSG:32632). Per facilitare la gestione e la fruizione sono stati eseguiti dei tagli sulla base del quadro di unione 1:2.000 resi disponibili in formato ARC/INFO ASCII GRID (file *.asc*).

Un DTM (o DSM) è in definitiva una semplice matrice numerica, in cui un numero situato in corrispondenza della riga r e colonna c rappresenta la quota di un punto reale situato a $r \cdot \text{cellsize}$ metri a nord di Y_{LL} , e a $c \cdot \text{cellsize}$ metri a est di X_{LL} , dove cellsize è la dimensione della cella (in questo caso 1m) e (X_{LL}, Y_{LL}) è la coppia di coordinate geografiche, nel sistema di riferimento WGS84/UTM32N, corrispondente all'ultimo numero in basso a sinistra della matrice.

La matrice del DSM viene interpretata dai software GIS desktop come un'immagine in toni di grigio. In Figura 4 viene mostrata la sovrapposizione tra il DSM e una foto obliqua, poggiata sul suo corrispondente ingombro a terra (i cui vertici sono di coordinate note). Essenzialmente il DSM fornisce la quota dei singoli spigoli degli edifici al di sopra del livello del terreno (a sua volta fornito dal DTM), come schematicamente illustrato in Figura 4.

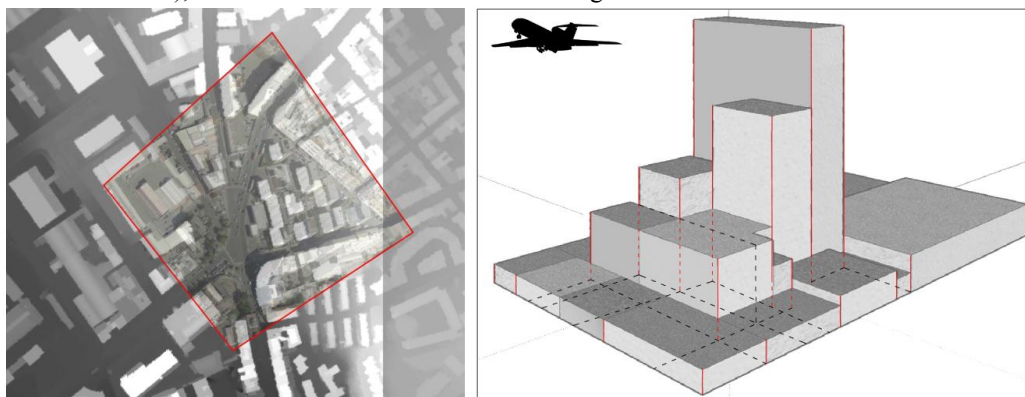


Figura 4 - Sovrapposizione tra DSM e ortofoto e rappresentazione schematica del DSM.

Si supponga ora di voler misurare la distanza verticale tra due punti B e C di un edificio. Il piano di vista verticale passa per i punti F , B e C , e la sua proiezione $P'-O$ "attraversa" la matrice del DSM (di cui in Figura 5 viene rappresentato solo un sottinsieme, avendo il DSM densità 1m) con un angolo pari a ϑ , come determinato nelle formule del paragrafo precedente.

La proiezione a terra P del punto B può essere determinata semplicemente come il primo punto in corrispondenza del quale la quota sul livello del mare (ovvero la distanza $\overline{AP'}$ è uguale o maggiore dell'altezza del raggio visivo FB nel punto di coordinate a terra $(x_{P'}, y_{P'})$. Dal punto di vista computazionale è sufficiente "scorrere" la matrice del DSM nella direzione ϑ fino a individuare il punto $(x_{P'}, y_{P'})$ nel quale il valore della matrice (ovvero la quota del DSM) è pari o superiore alla quota del raggio FB in quel punto.

Poiché il raggio visivo FB è inclinato dell'angolo $\frac{\pi}{2} - \gamma_B$, noto dai precedenti calcoli, con riferimento alla Figura 3 la condizione è verificata se:

$$\overline{AP'} \geq \overline{BP'} \quad (24)$$

dove $\overline{AP'}$ è il valore del DSM in P' e:

$$\overline{BP'} = \overline{B''P'} \cdot \tan \gamma_B \quad (25)$$

in cui:

$$\overline{B''P'} = \overline{B''O} - \overline{P'O} = h_f \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_B\right) - \overline{PO_P} \quad (26)$$

Si noti che $\overline{P'O} = \overline{PO_P}$ è noto in quanto rappresenta la distanza del punto P da O_P durante lo scorrimento della matrice del DSM.

Inoltre, poiché $\overline{PP'}$ è il valore del DTM in P , è possibile ricavare la quota di B dal terreno:

$$\overline{BP} = \overline{BP'} - \overline{PP'} \quad (27)$$

È bene precisare che il valore del DSM è definito in un qualunque punto del territorio. Il modello DSM è discreto per definizione, con una risoluzione di 1m, pertanto tutti i punti all'interno di un quadrato di lato 1m hanno assegnata la stessa quota.

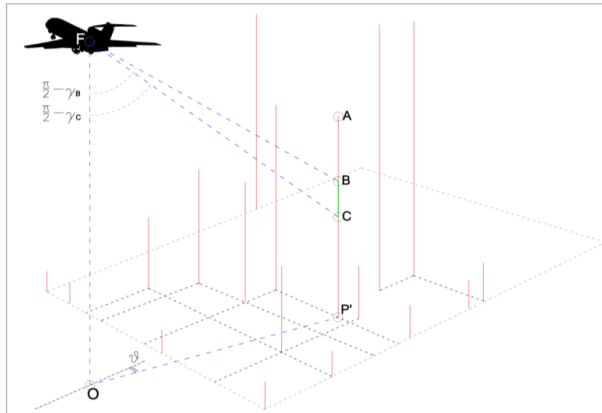


Figura 5 - Rappresentazione schematica del DSM e del piano di vista dall'aereo.

Implementazione dell'algoritmo e accuratezza

All'interno del geoportale della Regione Sardegna, raggiungibile all'url www.sardegnegeoportale.it, sono pubblicate tutte le foto oblique disponibili. La navigazione delle foto è continua, per quanto sia comunque presente necessariamente una transizione "discreta" da una foto alla successiva. All'interno del navigatore online è stato implementato l'algoritmo di calcolo delle distanze sopra descritto (Figura 6). Esso restituisce l'elevazione di un qualunque punto di un edificio dal suolo, nonché latitudine e longitudine della sua proiezione a terra. La precisione dell'algoritmo dipende strettamente da quella del DSM e DTM; nel caso di risoluzione pari a 1 m, non è quindi possibile individuare variazioni di quota tra due punti la cui distanza sia inferiore a 1 m.

Il navigatore cartografico, grazie l'algoritmo su di esso implementato, ha differenti utilità per un'amministrazione pubblica, in quanto consente un'analisi immediata delle trasformazioni del territorio e di verificare nel contempo il rispetto degli indici di edificabilità e altri elementi di trasformazione del territorio, quali altezza delle facciate, inclinazione dei tetti, locazione di pannelli solari e antenne satellitari, opere di ampliamento degli edifici, altezza di porte e finestre. Ciò rende l'applicazione particolarmente appetibile per le amministrazioni locali, più direttamente coinvolte nell'applicazione e controllo dei parametri di trasformazione edilizia. Ciò è particolarmente importante per una regione come la Sardegna che possiede vasti territori costieri ad alta vulnerabilità, oltre che un ricco patrimonio edilizio di carattere storico.

L'applicazione è inoltre completamente gratuita, il che sopperisce alla necessità di dotarsi di software proprietari per la visualizzazione delle foto oblique o per poter effettuare misurazioni su di esse. Ciò rappresenta pertanto un risparmio per tutte le amministrazioni coinvolte, che possono quindi utilizzare liberamente l'applicazione per una maggiore tutela del territorio e per un suo sviluppo sostenibile.

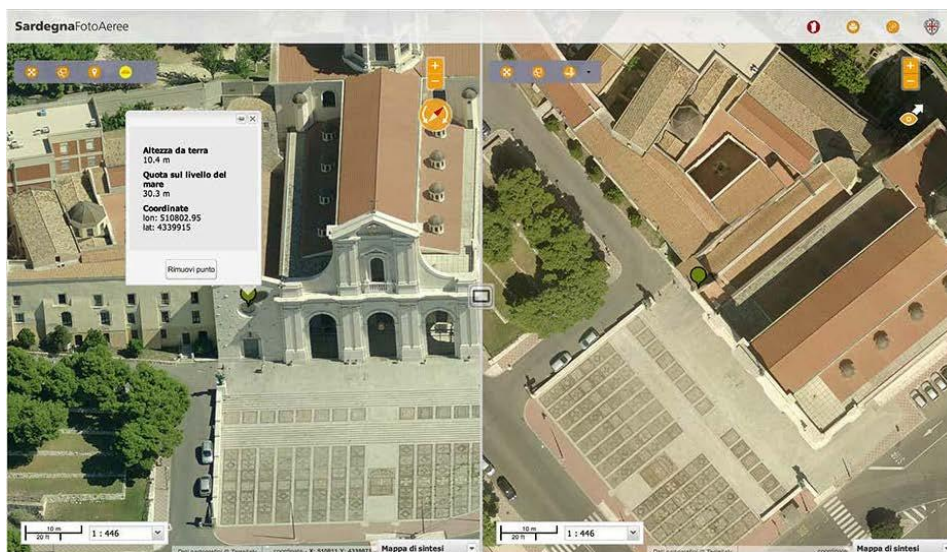


Figura 6 - Implementazione dell'algoritmo sull'interfaccia web "SardegnaMappe". Con la funzionalità di mappa doppia è possibile navigare parallelamente foto oblique ed ortofoto.

Riferimenti bibliografici

- AIMS. <http://aims.jocogov.org/AIMSDData/Oblique.aspx> (acceduto il 17-07-2015).
- Bing Maps. <http://www.bing.com/maps> (acceduto il 22-07-2015).
- Blom. <http://www.pictometry.com> (acceduto il 3-07-2015).
- Charalambos, P.; You, S. 3D reconstruction of urban areas. In *3D Imaging, Modeling, Processing of the 2011 International Conference on Visualization and Transmission (3DIMPVT)*, Hangzhou, China, 16–19 May 2011; pp. 33–40.
- Fugro. http://www.fugrogeospatial.com/expertise/aerial-mapping/panoramix_oblique_imagery (acceduto il 22-07-2015).
- Garnero, G.; Cogoni, A. Activity at low altitude photography in urban agglomerations of Sardinia and its architectural context. In *Planning Support Tools: Policy Analysis, Implementation and Evaluation*, Proceedings of the 2012 International Conference on Informatics and Urban and Regional Planning, Cagliari, Italy, 10–12 May 2012.
- Grenzdörffer, G.J.; Guretzki, M.; Friedlander, I. Photogrammetric image acquisition and image analysis of oblique imagery—A new challenge for the digital airborne system PFIFF. In *High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, Proceedings of 2007 ISPRS Hannover Workshop: Hannover, Germany, 29 May–1 June 2007.
- Google Maps. <https://maps.google.it> (acceduto il 22-07-2015).
- Guo, R.; Li, L.; Ying, S.; Luo, P.; He, B.; Jiang, R. Developing a 3D cadastre for the administration of urban land use: A case study of Shenzhen, China. *Comput. Environ. Urban Syst.* 2013, *40*, 46–55.
- Hohle, J. Photogrammetric measurements in oblique aerial images. *Photogramm. Fernerkund. Geoinform.* 2008, *1*, 7–14.
- Idan Computers Ltd. <http://www.idan.com> (acceduto il 17-07-2015).
- Pons, J.P.; Soubra, S. 3D reconstruction of large scale city models as a support to Sustainable Development. In *Cooperative Design, Visualization, and Engineering*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008; pp. 172–175.
- Przemyslaw, M.; Wonka, P.; Aliaga, D.G.; Wimmer, M.; Gool, L.; Purgathofer, W. A survey of urban reconstruction. In *Computer Graphics Forum*; John Wiley & Sons Ltd.: New York, NY, USA, 2013; Volume 32, pp. 146–177.