

Fotogrammetria aerea per mappatura ad altissima risoluzione: le ortofoto a 5 cm

Daniela Poli (*), Raimund Gasser (**), Klaus Legat (**)

(*) Terra Messflug GmbH, Eichenweg 42, 6460 Imst, Austria, d.poli@terra-messflug.at
(**) Vermessung AVT ZT-GmbH, Eichenweg 42, 6460 Imst, Austria, r.gasser@avt.at, k.legat@avt.at

Riassunto

Grazie ai recenti sviluppi tecnologici di *hardware* e *software*, sempre più spesso vengono richiesti voli aerei fotogrammetrici ad altissima risoluzione (fino a 3 cm) e la generazione di prodotti georeferenziati per mappatura a grande scala. Il presente articolo presenta le caratteristiche di ortofoto e modelli digitali della superficie ottenuti da riprese aeree ad altissima risoluzione (5 cm), portando ad esempio diversi progetti eseguiti in Italia e all'estero dalla società Terra Messflug GmbH con la camera digitale di grande formato *Vexcel UltraCam Xp* montata su velivolo *Cessna 303*.

Abstract

Thanks to recent technological developments, the request for high-resolution (up to 3 cm) aerial photogrammetric flights and the generation of geo-referenced products for large-scale mapping is increasing. This paper presents the characteristics of orthophotos and digital surface models obtained by airborne high-resolution flights, and examples of projects carried out in Italy and abroad by the company Terra Messflug GmbH, using the large format digital camera Vexcel UltraCam Xp mounted on Cessna 303.

Introduzione

Le camere aeree attualmente disponibili sul mercato, unite alle piattaforme e strumenti di posizionamento sempre più raffinati, permettono di acquisire immagini da aeroplano con una risoluzione al suolo di 3 cm – 5 cm, e fornire prodotti georeferenziati 2D e 3D di altissima precisione. I vantaggi di questi prodotti sono molteplici, ad es. per la mappatura di zone urbane a grande scala o il monitoraggio degli edifici. Inoltre se la ripresa è eseguita con ricoprimento elevato, tecniche avanzate di *dense image matching* permettono di ottenere nuvole di punti 3D equivalenti in densità e accuratezza a quelle ottenute da scanner Lidar aviotrasportato.

A queste scale di ripresa il *workflow* fotogrammetrico richiede accortezze già nella fase di pianificazione del volo, ed elevati requisiti di precisione nel posizionamento della camera e dei punti di controllo a terra, nonché nell'ortorettifica.

Il presente articolo affronta criticamente le problematiche sopra elencate e le caratteristiche di ortofoto e modelli digitali della superficie ottenuti da immagini aeree ad altissima risoluzione, portando ad esempio diversi progetti eseguiti in Italia e all'estero dalla società Terra Messflug GmbH con la camera digitale di grande formato *Vexcel UltraCam Xp* montata su velivolo *Cessna 303*.

Riprese aeree ad altissima risoluzione

Le riprese aeree riportate nell'articolo sono state eseguite dalla società Terra Messflug GmbH (Imst, Austria) tra il 2011 e il 2013 con la camera *UltraCam Xp* della Microsoft *Vexcel Imaging GmbH*. La camera ha un sensore pari a 67,860 mm x 103,860 mm (che fornisce immagini con dimensioni in pixel di 11310 x 17310 pixel), una dimensione del pixel di 6 micron ed è accoppiata ad un ottica con focale di 100,5 mm.

Il piano di volo è realizzato con il software TopoFlight (Topoflight, 2013) utilizzando un modello digitale del terreno. E' fondamentale che il modello digitale modelli adeguatamente la morfologia del territorio per garantire il ricoprimento e la risoluzione a terra desiderata. In Figura 1 è mostrato un confronto tra le mappe della risoluzione a terra estratte da due piani di volo simulati nei pressi di Rovereto (TN), in cui era stata impostata la risoluzione al suolo di 5 cm e ricoprimento longitudinale e trasversale pari a 80% e 60%. Mentre senza DTM tutta l'area risultata ripresa con risoluzione fino a 6 cm (Figura 1, sinistra), tenendo in considerazione la morfologia del terreno (Figura 1, destra) la risoluzione a terra compaiono zone con risoluzione maggiore di 7 cm.

A bordo del velivolo, durante le riprese fotogrammetriche, è utilizzata la piattaforma inerziale IGI IMU-Ild (256 Hz) per la misurazione diretta dell'orientamento della camera.

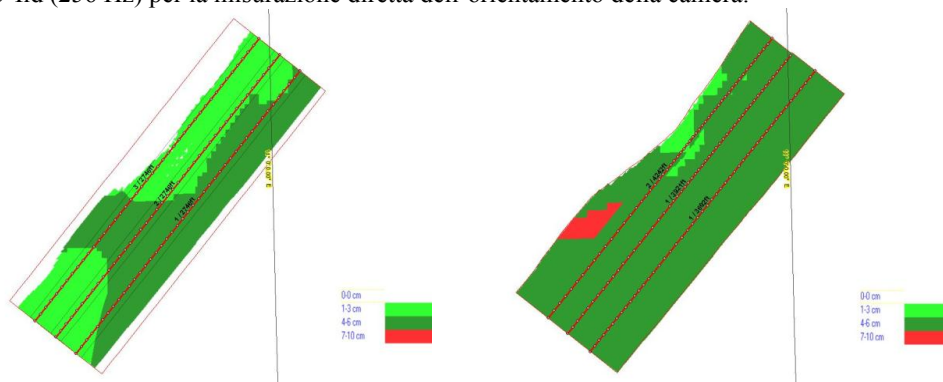


Figura 1. Confronto tra piani di volo con (sinistra) e senza DTM (destra) nei pressi di Rovereto (TN); risoluzione: 5 cm, ricoprimento: 70%-45%.

Orientamento delle immagini

In seguito alla ripresa, le immagini sono processate radiometricamente in modo automatico e la triangolazione aerea è eseguita con il software Match-AT della Inpho. Le traiettorie misurate dalla stazione inerziale a bordo sono processate con tecnica differenziale (DGPS) con 2 stazioni master poste in prossimità della zona sorvolata, ovvero ubicate in maniera tale che ciascun fotogramma non risulti più distante di 50 km dalla stazione master. Il post-processing delle traiettorie di ogni missione di volo è eseguito mediante il software GrafNav. I dati GNSS e INS sono integrati con il software AEROoffice della IGI GmbH. La georeferenziazione diretta è eseguita con i dati GNSS/INS con connessione alla rete di stazioni CORS (*Continuously Operating Reference Stations*, ad es. STPOS in Alto Adige, APOS in Austria). Per l'orientamento relativo, i punti di legame sono estratti semi-automaticamente. Punti di controllo a terra sono richiesti quando la griglia di riferimento finale differisce da quella realizzata dalle stazioni CORS. Peggiora l'accuratezza della griglia finale (distorsioni di rete), maggiore è il numero di punti a terra richiesti. I punti devono essere misurati sia nelle immagini sia a terra con accuratezza migliore di 0,5 volte la risoluzione delle immagini. La triangolazione aerea è accettabile se si ottiene sigma zero minore o uguale a 0,5 volte la risoluzione delle immagini, se gli errori residui dei punti di controllo sono distribuiti in modo non sistematico e se la deviazione standard a priori corrisponde a quella a priori.

Modelli digitali della superficie con *dense matching*

Un vantaggio evidente nell'utilizzo di riprese aeree ad altissima risoluzione è la possibilità di ottenere modelli digitali della superficie caratterizzati da elevato dettaglio e precisione. Grazie al progresso tecnologico nel campo dell'*image matching* cui abbiamo assistito negli ultimi anni, sia dal punto di vista degli algoritmi sia degli strumenti di calcolo, si possono estrarre in tempi ragionevoli nuvole di punti 3D con densità paragonabili a quelle da laser scanner aviotrasportato (LiDAR). Per *image matching* s'intende l'individuazione di corrispondenze tra primitive estratte in

due o più immagini e la stima delle corrispondenti coordinate 3D con modelli di collinearità o proiettivi. Questo processo genera una mappa di densità nello spazio immagine e una nuvola di punti 3D nello spazio oggetto. Esistono molti algoritmi per l'estrazione automatica delle primitive e l'assegnazione della loro corrispondenza (Gruen, 2012; Remondino et al., 2013). La scelta tra un algoritmo e un altro dipende dalla risoluzione delle immagini, dal tipo di sensore, dal ricoprimento tra le immagini e, soprattutto, dal tipo di superficie da modellare e dalla tessitura. In fotogrammetria aerea classica si utilizzano algoritmi basati su *area-based* e *feature-based matching* che identificano e riconoscono le primitive in modo sparso, cioè per singoli elementi (ad esempio punti), e valutano la loro corrispondenza con misure di correlazione delle intensità dei valori di pixel in un intorno, a cui si possono aggiungere vincoli geometrici e radiometrici. I recenti sviluppi nell'*image matching* sono indirizzati al perfezionamento di algoritmi basati su ricostruzioni dense, non più sparse, che meglio si adattano alla modellazione di superfici irregolari, come appunto il terreno e gli oggetti su di esso. Uno degli approcci principali è quello proposto da Hirschmüller (Hirschmüller, 2008) e detto *semi-global matching* (SGM), implementato oggi in molti software commerciali per l'estrazione di modelli digitali della superficie.

Ovviamente l'accuratezza del modello finale dipende non solo dalla densità e accuratezza dei punti omologhi identificati nelle immagini, ma soprattutto dall'accuratezza geometrica della stima delle coordinate tridimensionali dei punti omologhi, che dipende dall'orientamento interno (calibrazione della camera) ed esterno (misure dirette con GNSS/IMU, rilievo dei punti a terra e triangolazione aerea), dalla geometria del piano di volo (ricoprimento, direzione di volo) e da eventuali modelli disponibili come approssimazione iniziale. Terra Messflug ha confrontato vari algoritmi di *dense matching* disponibili in software commerciali o centri di ricerca, ed ha ottenuto risultati soddisfacenti per la modellazione del terreno e generazione di ortofoto di precisione. Poiché gli algoritmi di *dense matching* richiedono elevato sforzo computazionale, sono stati impiegati sistemi di calcolo in parallelo implementati a livello GPU/FPGA.

Ortofoto

Tra il 2011 e il 2013 Terra Messflug ha prodotto ortofoto a 5 cm di risoluzione in varie aree in Italia e all'estero (Figura 2). Per la qualità del prodotto finale, risulta cruciale la correttezza della triangolazione aerea e l'accuratezza del modello digitale del terreno usato per l'ortorettifica delle immagini (Figura 3). Dato l'elevato dettaglio e la scala di applicazione, in ambienti urbani è raccomandato generare ortofoto di precisione che rettificano le riprese aeree non solo rispetto al terreno, ma anche alla volumetria degli oggetti sul terreno.

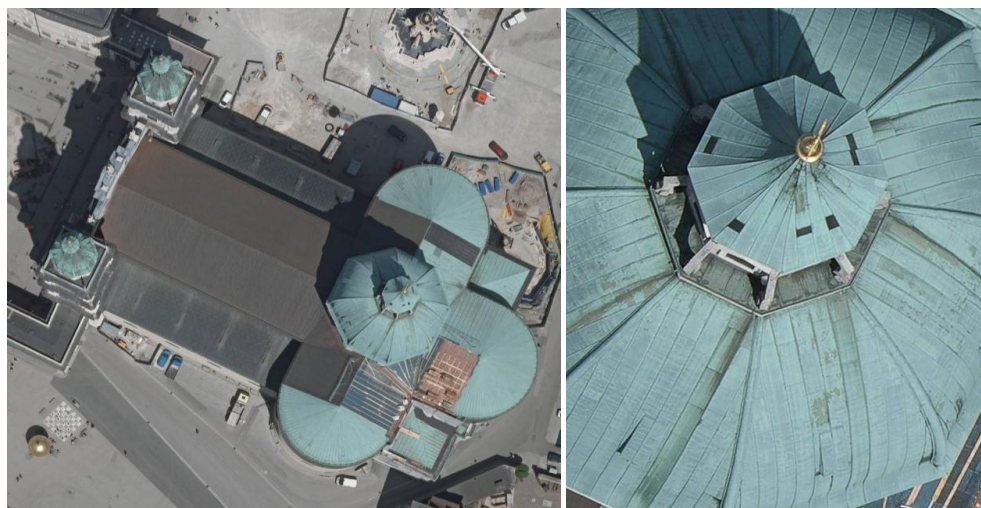


Figura 2. Dettaglio in ortofoto a 3 cm sulla Cattedrale di Salisburgo. Copyright Città di Salisburgo.



Figura 3. Esempio di errore nella fase di ortorettifica dovuto al modello digitale del terreno (sinistra) e successiva correzione manuale (destra).

Analisi della qualità di DSM e ortofoto: Graz 2011

La ripresa aerea sulla città di Graz è stata realizzata il 22 giugno 2011 con risoluzione media a terra di 6 cm. Il volo comprendeva 3707 immagini suddivise in 39 strisciate con ricoprimento longitudinale all'80% e ricoprimento trasversale al 60% (Figura 4). Per la generazione del DSM e delle ortofoto è stato testato il software UltraMap della Microsoft (Microsoft, 2013). Il DSM è stato generato con il modulo UltraMap DenseMatcher (*matching* ogni pixel), con griglia finale di 50 cm, pari a 10 pixels.

Per valutare la qualità dei prodotti derivati, sono stati considerati: a) completezza di DSM e ortofoto, che comprende la leggibilità dei dati di input, la copertura di tutta l'area e la distorsione grossolana dei singoli file; b) Attendibilità del DSM (analisi a campione): confronto con gli edifici esistenti disponibili dall'Ufficio Topografico di Graz, confronto con DSM da Lidar eseguito nel marzo 2009 e validazione con misure stereoscopiche; c) Attendibilità delle ortoimmagini di precisione (analisi a campione): analisi delle ortofoto nelle zone problematiche del DSM e controllo dopo la correzione del DSM.

Il passo successivo è l'identificazione di eventuali aree problematiche nel DSM, la misura stereoscopica di *seed points* nelle zone problematiche, la generazione di un nuovo DSM e la valutazione dell'impatto della correzione sulla successiva ortofoto.

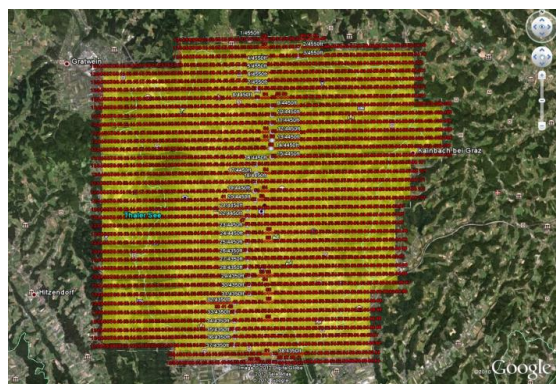


Figura 4. Piano di volo sulla città di Graz visualizzato in Google Earth.

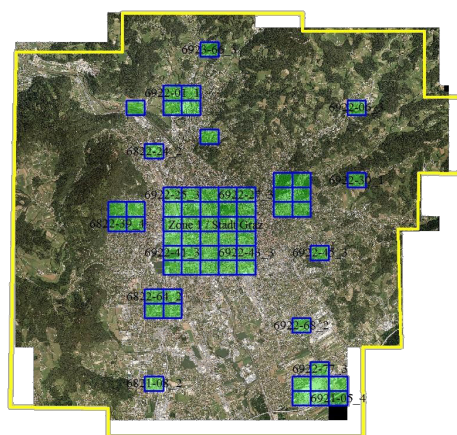


Figura 5. Localizzazione delle zone campione per l'analisi del DSM e delle ortofoto. Copyright Stadt Graz 2012.

Riguardo il primo punto, ovvero la completezza, è stata osservata una buona qualità sia del DSM sia dell'ortofoto in tutte l'area di progetto, poiché non erano presenti aree prive di nuvole di punti 3D. Per l'analisi di dettaglio, vista l'elevata estensione del prodotto, il DSM è stato analizzato in 64 campioni scelti in zone che rappresentassero diverse situazioni topografiche e geomorfologiche: centro storico, caratterizzato da elevata densità di edifici, zone verdi urbane, zone industriali, zone di circolazione, sobborghi (Figura 5). In queste aree il DSM è stato analizzato visivamente e confrontato con il DSM ottenuto dai dati vettoriali della città di Graz (DSM_vec), con il DSM ottenuto da riprese Lidar (DSM_Lidar) e verificato con misure manuali stereoscopiche (DSM_man). Nelle zone urbane il DSM era molto dettagliato e permetteva di individuare i dettagli sopra i tetti, come abbaini, comignoli, etc. (Figura 6). Intorno ai tetti si osserva un'ottima corrispondenza tra il DSM e il rilievo Lidar e le misure stereoscopiche (Figura 7, Figura 8).

I problemi nel DSM sono ben noti in fotogrammetria aerea ed alcuni di questi si riflettono sull'ortorettifica: presenza di veicoli o mezzi in movimento, tetti in vetro o ricoperti da materiali uniformi o riflettenti (Figura 9), in corrispondenza di corsi d'acqua, a causa della presenza di onde, modellazione di tralicci della corrente elettrica (discontinuità nelle ortofoto, Figura 9), modellazione delle zone d'ombra, ad es. il livello stradale nel caso di vicoli stretti. Gli errori elencati sono corretti manualmente nel DSM con la misurazione manuale di *seed points*, con conseguente correzione nell'ortofoto di precisione. Alcuni errori nel DSM non sono visibili nell'ortofoto.

In generale i risultati sono molto soddisfacenti, soprattutto se si considera che il procedimento è completamente automatizzato.

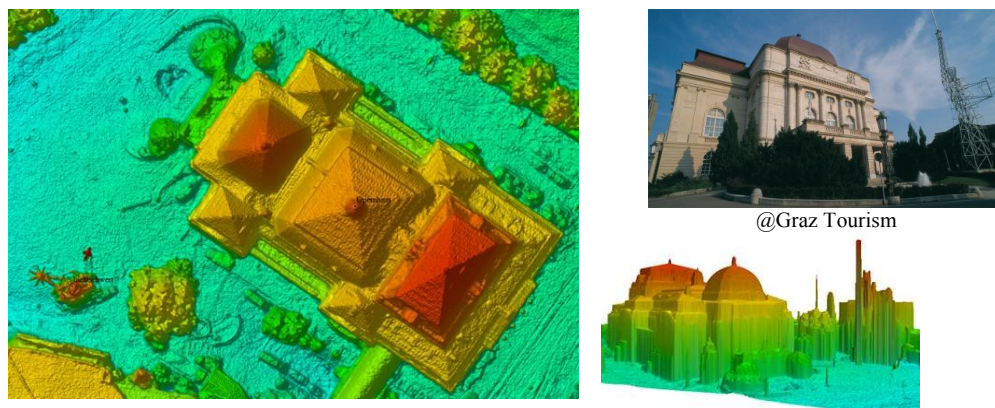


Figura 6. DSM di Graz, dettaglio sul Teatro "Wiener Staatsoper" e statua "Lichtschwert". Fotografia e visualizzazione in 3D. Copyright Stadt Graz 2011/2012.

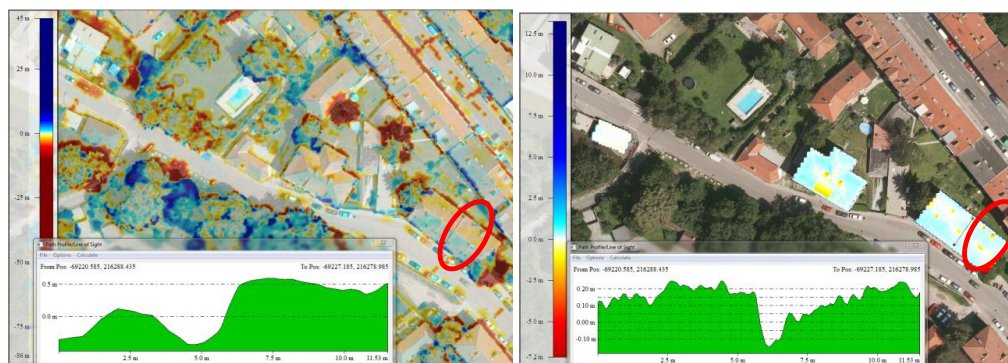


Figura 7. Confronto tra DSM fotogrammetrico e DSM_Lidar (sinistra) e DSM_man (destra) e profilo delle altezze in corrispondenza del segmento evidenziato. Copyright Stadt Graz.

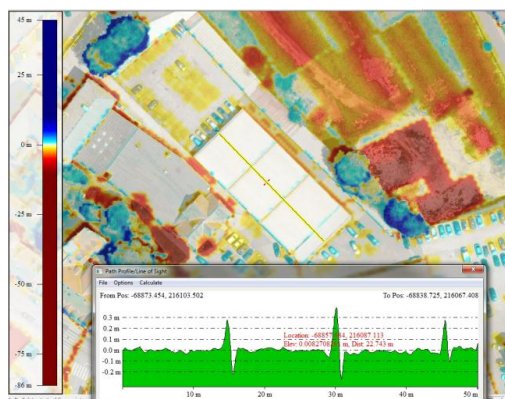


Figura 8. Confronto tra DSM_fotogrammetrico e DSM_Lidar e profilo delle altezze lungo un edificio. Copyright Stadt Graz

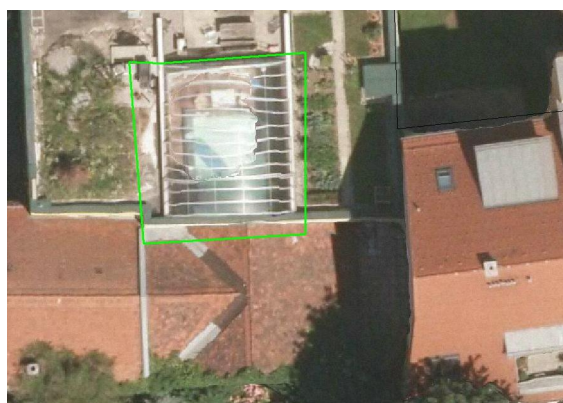


Figura 9. Errori delle ortofoto di precisione dovuti a errori nel matching. Sinistra: tetti in vetro; destra: tralicci della corrente elettrica. Copyright Stadt Graz.

Applicazioni

Grazie all'elevato dettaglio visibile nelle immagini, le ortoimmagini a 5 cm di risoluzione sono utilizzate in innumerevoli campi (Figura 10). Innanzitutto sono la base per cartografia 2D e 3D a grande e grandissima scala, da 1:1000 a 1:50, riducendo onerosi rilievi terrestri. Numerosi elementi di arredo urbano, infatti, sono rintracciabili e mappabili nelle immagini. Diverse amministrazioni pubbliche, tra cui il Comune di Merano (Figura 12) o il Comune di Brunico (Figura 13) in Italia, rendono disponibili le ortofoto a 5cm nei loro WebGIS, insieme alla cartografia e varie informazioni tematiche o servizi per il cittadino, creando delle vere e proprie WebCities, dove l'utente può effettuare ricerche e visualizzare le informazioni su ortofoto ad alta risoluzione.

La possibilità di riconoscere dettagli sulle falde dei tetti, sia nelle ortofoto sia nel DSM, favorisce l'impiego di tali dati per le applicazioni in cui è richiesta la conoscenza dettagliata dei tetti. Ad es. nella Città di Klagenfurt (Austria) tali dati sono utilizzati per migliorare lo studio del potenziale fotovoltaico di ogni tetto, in quanto fonte di informazione per sovrastrutture (es. camini) e vegetazione.

Spesso le ortofoto ad alta risoluzione sono impiegate per mappare e aggiornare sistemi di tubazioni, come le reti idrauliche, e cavi (sistemi elettrici, teleferiche, impianti di risalita, etc.). Le applicazioni di immagini a 5cm si sovrappone in parte anche alle riprese da elicottero. L'estensione e la forma dell'area di progetto sono i fattori di decisione per l'una o l'altra tecnologia.



Figura 10. Dettaglio in ortofoto a 5cm della Città di Brunico (BZ), a scala 1:50. Copyright Città di Brunico.



Figura 11. Aggiornamento cartografico della città di Imst (Austria) con ortofoto a 5cm. Copyright Stadt Imst.

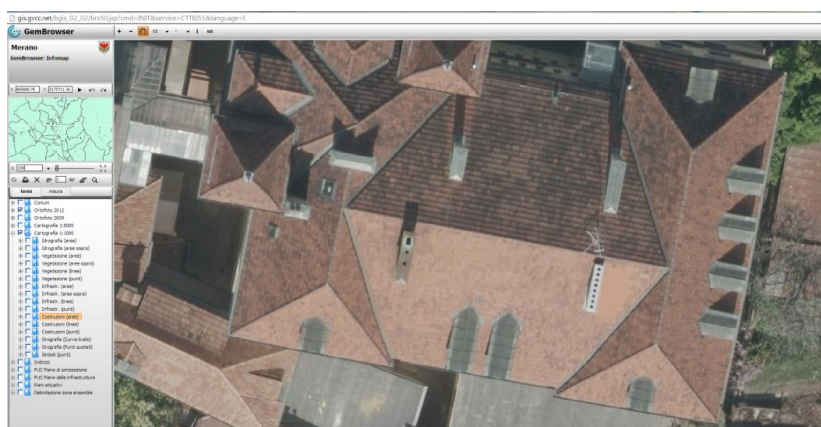


Figura 12. Visualizzazione di ortofoto a 5cm nel browser Infomap della Città di Merano (scala 1:100). Copyright Città di Merano.

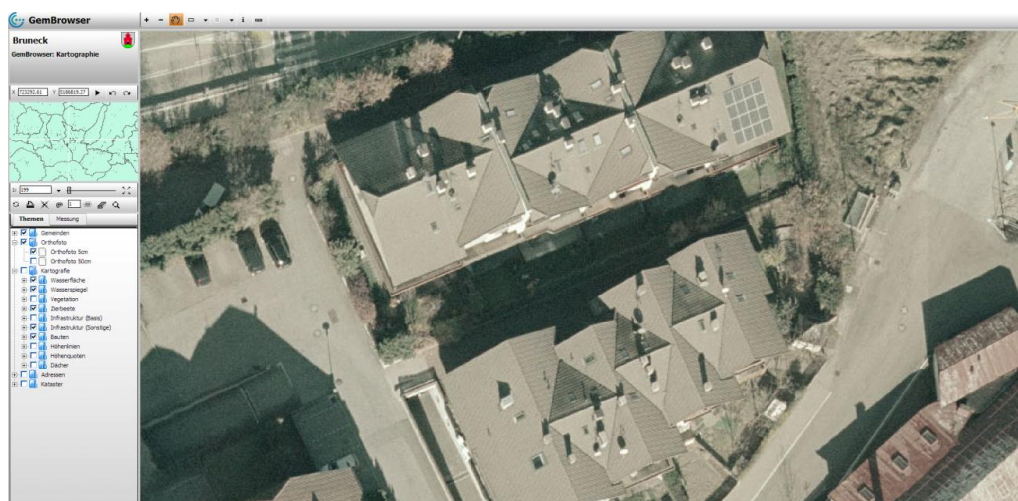


Figura 13. Visualizzazione di ortofoto a 5 cm nel webGIS della Città di Brunico (scala 1:200).
Copyright Città di Brunico.

Conclusioni

Il presente articolo ha riportato diversi esempi di rilievi aerei ad altissima risoluzione realizzati dalla società fotogrammetrica Terra Messflug GmbH in Italia e all'estero. Le riprese aeree fotogrammetriche ad altissima risoluzione (5 cm) hanno il vantaggio di fornire informazione per mappatura a grandissima scala (fino a 1:100) e varie applicazioni, tra cui monitoraggio urbano (case e strade), valutazioni del potenziale fotovoltaico dei tetti, monitoraggio di sistemi di approvvigionamento. A queste scale di ripresa il *workflow* fotogrammetrico richiede accortezze già nella fase di pianificazione del volo, ed elevati requisiti di precisione nel posizionamento della camera e dei punti di controllo a terra, nonché nell'ortorettifica. Grazie alle tecniche di *dense image matching* possono essere estratte in modo automatico nuvole di punti dense, che, soprattutto in ambiente urbano, sono equivalenti in densità e precisione a quelle ottenute da scansioni LiDAR.

Riferimenti bibliografici

- Gruen A. (2012). "Development and Status of Image Matching in Photogrammetry". *The Photogrammetric Record*, Special Issue: Ian Dowman retirement symposium, 27(137): 36–57.
- Hirschmüller H. (2008). Stereo processing by semi-global matching and mutual information. *IEEE Trans. PAMI*, Vol. 30.
- Microsoft, 2013. <http://www.microsoft.com/ultracam/en-us/UltraMapModules.aspx> (ultimo accesso Settembre 2013).
- Remondino, F., Spera, M.G., Nocerino, E., Menna, F., Nex, F., Gonizzi, S. (2013). "Dense Image Matching: comparisons and analyses". *IEEE Proc. Digital Heritage Conference*, Marseille, France. In press.
- Topoflight, 2013. <http://www.topoflight.com/> (ultimo accesso Settembre 2013).