

Stima di volumi legnosi forestali con dati fotogrammetrici telerilevati da UAV su piccole superfici: un caso di studio in Trentino

Antonio Floris (*), Fabrizio Clementel (*), Giacomo Colle (*), Francesco Gubert (**),
Luca Bertoldi (**), Giorgio De Lorenzi (**)

(*) EFFETRESEIZERO s.r.l. spinoff del CRA, Piazza Nicolini 6, 38123 Trento, Tel. 0461 381119, info@f360.it

(**) CHARTAGENA s.r.l., Via Maccani 211, 38121 Trento, Tel. 329 6883866, info@chartagena.com

Riassunto

L'impiego di strumenti di remote sensing basati su piattaforme Unmanned Aerial Vehicle (UAV) per la stima dei parametri dendrometrici e delle caratteristiche tipologico-strutturali delle risorse forestali può rappresentare, in scenari di estensione contenuta, una promettente alternativa alle altre tecnologie aeree e satellitari.

Le piattaforme UAV presentano, ad oggi, limiti operativi e strumentali che è necessario saper gestire nel momento in cui si voglia utilizzarle per finalità operative di monitoraggio, tuttavia la loro costante e rapida evoluzione tecnologica lascia presupporre un loro sempre maggiore impiego su numerosi fronti, compreso quello forestale.

Il lavoro riporta gli esiti di un test svolto nella primavera del 2012 in Trentino, su un popolamento forestale esteso circa 8 ha. Sono stati messi a confronto due modelli digitali della superficie (DSM) derivanti il primo dal volo svolto con UAV dotato di fotocamera digitale ad alta risoluzione ed il secondo derivante da un volo LiDAR pre-esistente. Per ognuno dei DSM è stato costruito un modello digitale delle chiome (Canopy Height Model, CHM) con risoluzione geometrica di 1 m, ed elaborato un modello di stima regressiva del volume legnoso, calibrato con prove relascopiche al suolo. I risultati ottenuti sono stati comparati tra di loro e con le stime effettuate con soli rilievi al suolo nello stesso scenario.

Nel contributo vengono discusse le problematiche operative incontrate nel realizzare la missione di volo e di ripresa, le procedure di raccolta ed elaborazione dei dati, i risultati conseguiti e gli sviluppi futuri a breve-medio termine di questo tipo di applicazioni in ambito forestale.

Abstract

The use of remote sensing sensors based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platforms to estimate dendrometric parameters and typological-structural characteristics of forest stands can represent, in small area scenarios, a promising alternative to airborne and satellite based technologies.

Today the UAV based platforms have operative and instrumental limits that have to be managed with high expertise to carry out an operative monitoring survey, by the way their fast and constant technological evolution allows to assume a progressive wider application of UAV in various sectors, among which forest monitoring.

This work describes the results of a test carried out in Trentino, Italy, in the spring of 2012 on a forest scenario 7 ha wide about. The Digital Surface Model (DSM) derived from the UAV high resolution orto-photo dataset has been compared with a pre-existing LiDAR DSM. For each of them a Canopy Height Model (CHM) with a resolution of 1 m has been computed and a statistical model to estimate timber volume has been studied. The results obtained have been compared between them and with the estimates obtained by a ground survey on the same area.

The article discuss the operative issues observed during the UAV flight on the forest scenario, the data collection, processing and analysis, the results obtained with the different platforms and

technologies. Some considerations about the presumable future expansion of this kind of platform in remote sensing forest applications are finally reported.

Introduzione

Nella caratterizzazione quali-quantitativa delle risorse forestali, da alcuni anni si sta sempre più diffondendo l'utilizzo del CHM (Canopy Height Model, modello digitale delle chiome) come piano informativo digitale, in formato raster, per la produzione da un lato di carte tematiche su aspetti strutturali dei popolamenti forestali (densità, classi di altezza, diversificazione verticale e orizzontale ecc...), dall'altro per l'elaborazione di modelli di stima di parametri dendrometrici, in particolare il volume legnoso e la biomassa, riferiti a unità di superficie o a specifici comparti.

Il Laser Scanning (o LiDAR), prevalentemente da piattaforma aerea, è la principale tecnologia usata per la produzione di CHM. Nelle applicazioni forestali si distingue solitamente fra modelli *area based*, nei quali i parametri derivati dai dati laser sono riferiti a collettivi forestali, e modelli *single tree based*, nei quali detti parametri o attributi sono riferiti a singoli alberi (Corona et al., 2011).

Il LiDAR per usi forestali presenta, oltre a una serie di indubbi vantaggi oggetto negli ultimi anni di numerosi studi (fra cui Naesset, 2004; Hollaus et al., 2007; Abramo et al., 2007; Corona e fattorini, 2008; Clementel et al., 2010; Floris et al., 2010; Torresan et al., 2012), alcuni limiti di uso che risiedono in particolare nella scarsa economicità in caso di missioni di volo su scenari di estensione contenuta e nel contrasto fra le epoche ideali di volo per la produzione di DTM (Digital Terrain Model) e di DSM (Digital Surface Model) nelle aree boscate, che sono rispettivamente l'inverno e l'estate (nel primo caso è bene che sia minima la copertura del manto vegetale, nel secondo caso è bene che sia massima).

Attualmente nel settore forestale si ovvia a tali limiti utilizzando il più possibile dati LiDAR rilevati per altri scopi (urbanistici, idro-geologici, di protezione civile ecc...), tollerando dei ragionevoli compromessi tra costi e requisiti qualitativi (risoluzione, accuratezza, epoca di rilievo).

Anche con queste strategie l'aggiornamento dei rilievi Laser Scanning è comunque, almeno finora, molto limitato, e dopo alcuni anni un modello digitale delle chiome si può ritenere non più al passo con le dinamiche della vegetazione.

Considerato che, al contrario, un DTM mantiene la propria validità per periodi di tempo molto più lunghi, la produzione di DSM da fotogrammetria con piattaforme Unmanned Aerial Vehicle (UAV) può rappresentare, in scenari di estensione contenuta, una promettente alternativa alle tecnologie LiDAR aeree e satellitari.

Fino a pochi anni fa, l'utilizzo di UAV, spesso definiti anche "droni", era ristretto al campo militare. Recentemente, grazie allo sviluppo e alla commercializzazione su ampia scala di piattaforme aeree a pilotaggio remoto e camere digitali DSRL, si sono aperte nuove frontiere nel campo delle applicazioni fotogrammetriche, quali Modelli Digitali della Superficie e Ortofotomosaici (Colomina et al., 2008; Eisenbeiss, 2009; Remondino et al., 2011).

L'attività svolta ha avuto l'obiettivo di verificare se opportune metodiche di utilizzo di dati telerilevati possano, anche su piccole estensioni sostituire o integrare le modalità tradizionali di rilevamento al suolo a supporto dell'inventariazione forestale su scala assestamentale. A tal fine sono state poste a confronto, in termini di accuratezza e su un'area studio di dimensioni ridotte, le stime di volume legnoso ottenibili con modelli di regressione costruiti su CHM prodotti con due metodi diversi: DSM fotogrammetrico rilevato da UAV e DSM da volo LiDAR invernale. In entrambi i casi è stato usato come riferimento altimetrico un DTM da LiDAR prodotto con il medesimo volo invernale. I modelli sono stati calibrati con uno stesso set di 30 aree relascopiche al suolo distribuite casualmente nell'area di studio.

Materiali e metodi

L'area prescelta per il test è situata nel comune di Fornace in località Pian del Gacc (5109723 N, 669750 E, UTM-WGS84), a pochi chilometri da Trento, a circa 1000 m di quota s.l.m.

Nell'area insiste la particella forestale n. 8 del Piano Economico Forestale del Comune di Fornace. La particella, che ha un'estensione di 7,82 ha, ospita un popolamento boscato a prevalenza di abete rosso, con presenza di pino silvestre e pino nero, larice e sporadiche latifoglie. Adiacente al bosco vi è una zona a prato idonea per il decollo e l'atterraggio del velivolo. Vi è inoltre dislocata una delle aree test del progetto TARGETSTARS per le analisi di performance di sistemi di radioposizionamento in foresta (Pompei et al., 2009), caratteristica che consente un'ulteriore verifica sull'accuratezza dei GCP (Ground Control Point) utilizzati per la georeferenziazione dei dati telerilevati.

Valutate le dimensioni dell'area test, si è stabilito di utilizzare come piattaforma un multirottore a 6 eliche e motori *brushless* (esacottero) e come sensore una fotocamera Canon 550D opportunamente calibrata. Il multirottore è un mezzo elettrico, ecologico, silenzioso, flessibile e personalizzabile, dotato di un sistema automatico di posizionamento e stabilizzazione (GNSS /INS) che lo rende a tutti gli effetti una piattaforma inerziale (Figura 1). La Canon 550D è una delle camere in commercio con il miglior rapporto qualità/peso. Essa è infatti una camera DSRL con un sensore CMOS di 18.0 megapixel effettivi (5184×3456 pixel) che pesa solamente 530 g.



Figura 1. L'esacottero a terra e in volo.

Il giorno 22 marzo 2012 sono stati eseguiti tre voli fotogrammetrici, acquisendo un totale di 355 immagini.

Per coprire l'intera area di volo (circa 16 ettari), con l'obiettivo di ottenere una GSD (*Ground Sampling Distance*) al Nadir di circa 4 cm, si è scelto di volare a quota 150 m agl con un obiettivo a lunghezza focale 18 mm. Ogni singola immagine risulta così coprire un'area a terra di 185×125 m. Orientando la camera ortogonalmente alla direzione di volo, per avere una sovrapposizione media del 70% tra le singole immagini adiacenti, le linee di volo devono essere distanziate di 60 metri e tra uno scatto e l'altro il mezzo deve spostarsi al massimo di 38 metri. Il percorso di scansione totale nei tre voli effettuati è stato di circa 4200 metri lineari, percorsi in un tempo complessivo netto di volo di circa 21 minuti.

Allo scopo di georeferenziare i layer prodotti e stimare i relativi residui, si sono posizionati all'interno dell'area di volo 9 GCP di cui si sono rilevate le coordinate con GPS differenziale. I GCP sono stati materializzati sul terreno con appositi target posizionati in aree aperte (radure del bosco e prati circostanti) in modo da risultare visibili nel rilievo fotografico. Le coordinate di ciascun GCP sono state rilevate con stazionamenti di circa 15 minuti, in modalità *carrier phase* preferenzialmente, talvolta in modalità *code*. La strumentazione usata è una configurazione Trimble

composta da GPS Pathfinder ProXH, palmare Recon e software Terrasync (Figura 2). Le coordinate sono state successivamente sottoposte a correzione differenziale con sw Trimble Pathfinder Office, utilizzando la base del Catasto di Trento (TREN) della rete TPOS provinciale.



Figura 2. La configurazione GPS usata per il rilevamento dei GCP.

Le immagini sono state opportunamente processate utilizzando algoritmi di *keypoint detection* (Lowe, 2004) e *bundle adjustment* (Triggs et al. 1999). Si sono così ottenuti un DSM ed un ortofotomosaico, che coprono un'area di 16 ettari, alla risoluzione di 5 cm/pixel (Figura 3). Confrontando la locazione dei target visibili nelle immagini del modello con le misurazioni a terra (GCP), l'errore totale (XYZ) medio sulla georeferenziazione è risultato essere di 0,201 m, nel dettaglio $RSME_x=0,064$, $RSME_y=0,108$ $RSME_z=0,155$ rispettivamente.

Il DSM è stato successivamente degradato alla stessa risoluzione spaziale (1 m/pixel) dell'analogo layer derivato da LiDAR con il quale sarebbe stato confrontato.

Adottando la procedura di elaborazione descritta da Floris et al. (2009), eseguibile in ambiente ESRI ArcGIS 9, sono stati prodotti un CHM UAV e un CHM LiDAR, usando in entrambi i casi il DTM derivante da un volo LiDAR che la Provincia Autonoma di Trento ha realizzato nell'inverno 2006-2007 (per i metadati di tale missione si rimanda a Clementel et al., 2012). Il valore medio di altezza è di 20,34 m per il CHM LiDAR e di 20,29 m per il CHM fotogrammetrico UAV: la differenza è molto contenuta (0,05 m), però la deviazione standard delle differenze locali è piuttosto alta (6,73 m), e ciò indica che localmente fra i due layer possono verificarsi differenze consistenti, specialmente nelle aree a basso contrasto (presenza di ombre). Questa problematica, segnalata anche da altri autori (Breidenbach e Rasmus, 2012), sembra essere dovuta agli algoritmi di interpolazione che, in assenza del dato, lo interpolano con quelli vicini. Talora questo metodo conduce all'attribuzione di valori di altezza elevati anche in presenza di terreno nudo o vegetazione molto bassa. Nel caso specifico, inoltre, gioca sicuramente un ruolo la differenza temporale fra i due voli (2007 per il LiDAR, 2012 per il volo UAV), peraltro in parte compensata dalla presenza di schianti avvenuti nell'inverno 2008-2009 per cause meteorologiche.

Da entrambi i layer è stata elaborata la variabile *Hsum*, che consiste nella sommatoria delle altezze, attribuita a ciascun pixel e riferita a un determinato intorno di analisi individuato da una matrice di esplorazione.

Hsum è stata usata come variabile indipendente di un modello di regressione lineare avente formulazione generale

$$V = a + b \times Hsum$$

Dove V (variabile dipendente stimata dal modello) è il volume legnoso, in metri cubi, riferito ai fusti con diametro $\geq 17,5$ cm. Per mettere a punto il modello di regressione, la variabile V è stata calcolata su un campione di 30 punti individuati casualmente all'interno della particella forestale e rilevati tramite esecuzione di Prove di Numerazione Angolare (PNA) con relascopio elettronico Criterion Laser Technology. Come è noto, con le PNA si misura la variabile dendrometrica area basimetrica ad ettaro (G/ha) riferita al punto campione. Sia i rilievi in campo che le successive misurazioni per il passaggio da G/ha a V sono stati eseguiti secondo metodi e procedure previsti dalla Nuova Pianificazione Forestale Aziendale Trentina (NPFAT, Scrinzi et al., 2011) adottando i modelli dendrometrici MPF (Scrinzi et al., 2010).

Per ottenere la massima congruenza tra variabile indipendente $Hsum$ e variabile dipendente V , è necessario che esse siano spazialmente sincrone e osservate sulla stessa area. Per questo motivo i punti campione sono stati reperiti al suolo con navigazione da posizione media assistita da GPS, e per le matrici di esplorazione sulle quali calcolare $Hsum$ è stato adottato un raggio di 13 m, corrispondente a una dimensione di 531 m², assimilabile a quella esplorata generalmente da una PNA.

Per la validazione del modello è stato usato il test statistico *k-fold cross validation*, (Witten e Frank, 2005): in pratica la regressione è stata "addestrata" su 16 sotto-insiemi diversi dell'intero campione, di 15 osservazioni ciascuno, e validata sulle restanti 15 osservazioni non usate per l'addestramento. Applicando a ciascun pixel la funzione del modello di regressione prescelto è stata prodotta, con procedure GIS, la carta del volume ad ettaro dell'area di studio (Figura 3).

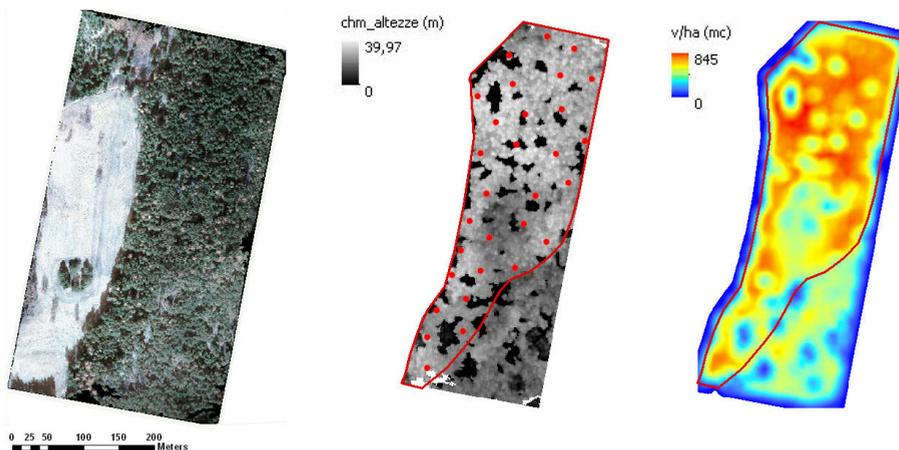


Figura 3. Layer prodotti con le elaborazioni: ortofotomosaico, CHM con i confini di particella e i punti di campionamento, carta del volume legnoso.

Risultati

I grafici in figura 4 illustrano la correlazione fra le due variabili e i parametri dei rispettivi modelli di regressione. La tabella 5 riporta invece gli esiti della *cross-validation*.

Pur con una performance statistica non brillante del modello di regressione ($r^2 = 0,375$), su un volume medio del popolamento forestale pari a 599 m³/ha (dato stimato con i soli rilievi al suolo e preso a riferimento), le differenze con segno fra valori stimati con il modello di regressione da CHM fotogrammetrico e valori misurati al suolo sono molto contenute: 2,3%, -0,1% e 7,0% rispettivamente media, minima e massima; vi è in pratica una lieve sovrastima. L'RMSE è pari a 21,4 m³/ha.

Per quanto riguarda invece l'analogo modello costruito su CHM LiDAR, la differenza media con segno fra valori misurati al suolo e valori stimati è pari al 3,7% (minima 0,04%, massima 8,9%).

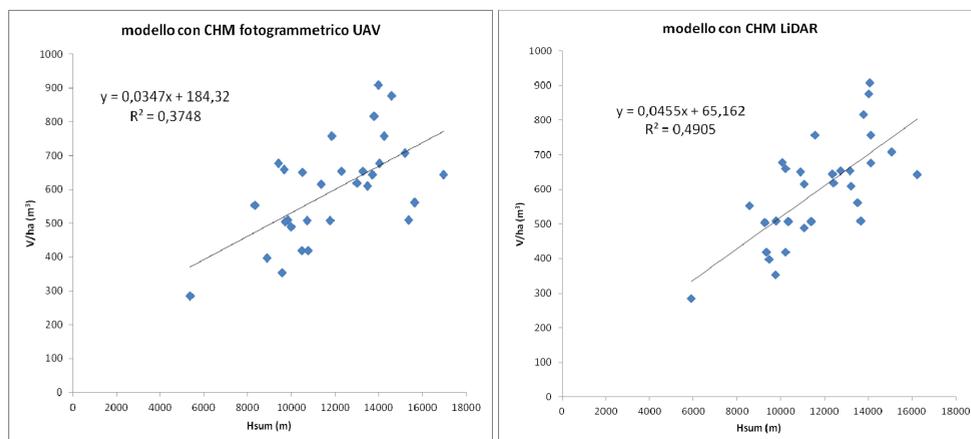


Figura 4. Modelli di regressione per la stima del volume legnoso con i due tipi di CHM.

Tabella 5. Dati utilizzati per la k-fold cross-validation.

Caso	V/ha PNA (m³)	V/ha UAV (m³)	V/ha LiDAR (m³)	diff % UAV-PNA	diff % LiDAR-PNA
1	599	604	610	0,80%	1,73%
2	612	622	634	1,50%	3,47%
3	609	628	640	2,97%	4,93%
4	608	651	662	7,03%	8,85%
5	618	600	615	-2,89%	-0,47%
6	617	609	617	-1,32%	-0,04%
7	597	631	638	5,61%	6,81%
8	607	615	622	1,36%	2,45%
9	597	593	598	-0,63%	0,19%
10	594	613	622	3,09%	4,65%
11	590	614	623	4,01%	5,54%
12	589	616	629	4,66%	6,79%
13	596	595	604	-0,18%	1,23%
14	572	608	606	6,25%	5,99%
15	584	607	614	4,08%	5,20%
16	597	596	606	-0,10%	1,58%
Medie	599	613	621	2,26%	3,68%

Conclusioni

Il caso di studio presentato in questo lavoro ha permesso di valutare l'efficacia di un rilievo fotogrammetrico basato su UAV per la stima dei volumi legnosi forestali in scenari di piccole superfici e, contestualmente, di considerare il potenziale supporto delle piattaforme basate su UAV per l'inventariazione forestale su scala assestamentale.

Il DSM rilevato attraverso la piattaforma UAV ed i modelli costruiti per le stime dendrometriche delle masse legnose sono risultati comparabili con quelli derivanti da piattaforma LiDAR ottenuti attraverso analoghi modelli di stima; la lieve sovrastima del dato, legata probabilmente anche alla difficoltà insita nel rilievo fotogrammetrico di gestire le zone in ombra o a scarso contrasto, rimane comunque un aspetto da approfondire nell'ottica di un impiego operativo del dato UAV. La necessità di un DTM a buona risoluzione per la costruzione del CHM da UAV, costituisce inoltre una limitazione all'impiego di tali modelli, anche se è opportuno rilevare come sia ormai sempre più diffusa la presenza di DTM LiDAR pubblici, almeno nel contesto italiano.

Ulteriori approfondimenti sono di certo da sviluppare nella direzione di impiegare il DSM prodotto dal volo UAV alla sua effettiva risoluzione, di gran lunga superiore rispetto a quella degradata a 1 m impiegata in questi primi modelli, e nell'affinamento dei protocolli di calibrazione per contenere ed ottimizzare i rilievi da eseguire al suolo.

La restituzione di un DSM e, contestualmente, di un ortofotomosaico ad altissima risoluzione dell'area interessata dal volo UAV ha di certo interessanti prospettive per finalità legate alla pianificazione forestale quali la stratificazione tematica o strutturale, ma anche per la progettazione di lavori forestali o la valutazione di zone soggette ad operazioni di taglio o investite da eventi naturali quali schianti o incendi; prospettive che sono legate anche alla flessibilità di impiego del mezzo, alla rapidità di approntamento del volo e soprattutto alla possibilità di impiego dell'UAV su aree di intervento di dimensioni anche piccole.

I voli con Copter, come quello qui analizzato, hanno estensione ottimale in alcune decine di ettari, ma sono già realizzabili, e sono in pianificazione da parte del gruppo di lavoro, nuovi test con velivoli ad ala fissa in grado di coprire efficientemente estensioni più ampie, nell'ordine delle centinaia di ettari.

In termini di prospettiva è, quindi, da considerare come la rapidissima evoluzione delle piattaforme UAV permetterà probabilmente di allargare gli scenari nei quali il loro impiego potrà essere una valida soluzione per qualità e tipologia del dato restituito in rapporto al costo, soprattutto laddove vi sarà esigenza di operatività immediata e di tempistiche di rilievo brevi.

Bibliografia

- Abramo E., Barilotti A., Sepic F. (2007). Dalla dendrometria diametrica alla dendrometria ipsometrica: stima del volume degli alberi da rilievi laser-scanning. *Foresta@* 4 (4), pp. 373-385.
- Breidenbach J., Rasmus A. (2012). Small area estimation of forest attributes in the Norwegian National Forest Inventory. *Eur J Forest Res*(2012) 131:1255-1267. doi 10.1007/s10342-012-0596-7
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C. (2010). Stima operativa di parametri dendrometrici forestali con riprese LiDAR invernali a bassa risoluzione. *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA - Brescia 9-12 novembre 2010*, pp. 625-630.
- Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Scrinzi G., Torresan C. (2012). Estimating forest timber volume by means of "low-cost" LiDAR data. *Italian Journal of Remote Sensing - 2012*, 44 (1): doi: 10.5721/ItJRS201244110. pp. 125-140.
- Colomina, I., Aigner, E., Agea, A., Pereira, M., Vitoria, T., Jarauta, R., Pascual, J., Ventura, J., Sastre, J., Brechbühler de Pinho, G., Derani, A., Hasegawa, J. (2007). The uVISION project for helicopter-UAV photogrammetry and remote-sensing. *Proceedings of the 7th International Geomatic Week, Barcelona, Spain*.

- Corona P., Fattorini L., (2008). Area-based lidar-assisted estimation of forest standing volume. *Canadian Journal of Forest Research*. 38, pp. 2911-2916
- Corona, P., Marchetti, M., Scrinzi, G., Torresan, C. (2011). Stato dell'arte delle applicazioni laser scanning aereo a supporto della gestione delle risorse forestali in Italia. *Atti 15ª Conferenza Nazionale ASITA – Reggio di Colorno*, 15-18 novembre 2011. pp. 1627-1632.
- Eisenbeiss, H., (2009). *UAV photogrammetry*. Diss. ETH No. 18515, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen Nr.105, pp. 235.
- Floris, A., Clementel, F., Farruggia, C., Scrinzi, G. (2009). Il LiDAR nella stratificazione tematica dei soprassuoli forestali: applicazioni in Trentino. *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA – Bari*, 1-4 dicembre 2009, pp. 1063-1070.
- Floris A., Clementel F., Farruggia C., Scrinzi G. (2010). Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio. *Rivista Italiana di Telerilevamento - 2010*, 42 (3). pp. 15-32.
- Grenzdörffer, G.J., Engel, A. and Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. *IAPRS&SIS, Vol. 37(B1), Beijing, China*, pp. 1207-1213.
- Hollaus M., Wagner W., Maier B., Schadauer K. (2007). Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. *Sensor-MDPI*, 7, pp. 1559-1577.
- Lowe D.G. (2004), Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60, 2 pp. 1-28.
- Naeset, E. (2004). Practical large-scale forest stand inventory using small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, pp. 164–179.
- Pompei E., Clementel F., Colle G., Floris A., Galvagni D., Librandi I., Marzullo L., Piccoli D., Scrinzi G. (2009). Sistema di valutazione e certificazione delle performance di precisione delle tecnologie di rilievo satellitare in dotazione al Corpo Forestale dello Stato in presenza di copertura forestale. *Atti 13ª Conferenza Nazionale ASITA – Bari*, 1-4 dicembre 2009. 9p. 1627-1632.
- Remondino F., Barazzetti L., Nex F., Scaioni M., Sarazzi D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22 UAV-g 2011*
- Scrinzi G., Galvagni D., Marzullo L. (2010). *I nuovi modelli dendrometrici per la stima delle masse assestamentali in Provincia di Trento*. Provincia Autonoma di Trento – Servizio Foreste e Fauna, Trento, 95 pp. ISBN 978-88-7702-271-4
- Scrinzi G., Clementel F., Colle G., Farruggia C., Floris A., Torresan C. (2011). *L'inventario dendrometrico dei complessi assestamentali nella nuova pianificazione forestale aziendale trentina (NPFAT)*. Provincia Autonoma di Trento – Servizio Foreste e Fauna, Trento. 105 pp. ISBN 978-88-7702-322-3
- Torresan C., Clementel F., Floris A., Scrinzi G. (2012). LiDAR e stima del volume legnoso: un confronto con il cavallettamento totale a livello particellare. *Sherwood - Foreste ed alberi oggi* 2 (18) n 181, pp. 25-29.
- Triggs B., McLauchlan P. and Hartley R. and Fitzgibbon A. (1999). "Bundle Adjustment — A Modern Synthesis". *ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms*. Springer-Verlag. pp. 298–372. doi:10.1007/3-540-44480-7_21. ISBN 3-540-67973-1.
- Witten I.H., Frank E. (2005). Data mining: practical machine learning tools and techniques. *Morgan Kaufmann, San Francisco (CA)*. XXXI: 525. ISBN 0-12-088407-0.