

Applicazione dei laser scanner terrestri in campo agro-forestale e ambientale

Pierpaolo Duce, Roberto Ferrara, Bachisio Arca

Istituto di Biometeorologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR Ibimet), Traversa La Crucca 3
07100 Sassari, Tel. 079 2841501, Fax 079 2841599, e-mail (duce, ferrara, arca)@ibimet.cnr.it

Riassunto

Le tecniche di laser scanning terrestre suscitano un interesse sempre più crescente sia in campo ambientale sia in campo agro-forestale in quanto consentono un'acquisizione rapida e affidabile di nuvole di punti 3D in grado di rappresentare tridimensionalmente gli oggetti rilevati. In un lasso di tempo relativamente breve, tali tecniche hanno aperto la strada ad un ampio spettro di applicazioni in pieno campo. Al di là della misura interattiva di nuvole georeferenziate di punti, le tecniche per il rilevamento automatizzato di oggetti, la determinazione delle loro caratteristiche geometriche e l'analisi della risposta del segnale laser rappresentano temi di ricerca prioritari. L'elevata qualità delle nuvole di punti 3D generate dai sistemi di laser scanning insieme alla possibilità di automatizzare le successive post-elaborazioni dei dati hanno esteso il potenziale applicativo dei laser scanner terrestri anche ai settori ambientali e agro-forestali.

Questo contributo illustra innanzitutto lo stato dell'arte dei sistemi laser scanner terrestri dal punto di vista tecnologico e discute le diverse soluzioni tecnologiche e i diversi parametri di sistema in relazione alle possibili applicazioni in campo ambientale e forestale.

Nella seconda parte saranno invece presentati alcuni casi di studio esplicativi delle potenzialità e delle limitazioni operative della tecnica di laser scanning terrestre in campo ambientale e agro-forestale.

Abstract

Terrestrial laser scanning techniques find rapidly growing interest in both environmental and agro-forestry fields as efficient tools for fast and reliable 3D point data acquisition and 3D representation of the object viewed by the scanners. They have opened a wide range of application fields within a rather short period of time. Beyond interactive measurement in 3D point clouds, techniques for the automatic detection of objects, the determination of geometric parameters, and the analysis of the reflectance signal form high priority research issues. The high quality of 3D point clouds generated by laser scanners and the data process automation potential make terrestrial laser scanning also an interesting tool for environmental and agro-forestry applications.

The paper will first review current laser scanner systems from a technological point of view and discuss different scanner technologies and system parameters regarding their suitability for environmental and agro-forestry applications.

In the second part of the paper, results of case studies on potentials and limitations of terrestrial laser scanners in environmental and agro-forestry fields will be presented.

Introduzione

A partire dai primi anni 2000, le tecniche di laser scanning terrestre si sono trasformate da tematica di pura ricerca a tecnologia matura per la gestione, elaborazione e pubblicazione di geodati, disponibile commercialmente grazie all'offerta di una miriade di aziende che operano nel campo del monitoraggio ambientale. La tecnologia è utilizzata per l'acquisizione rapida di informazioni

tridimensionali (3D) di una varietà di oggetti. Edifici storici, siti archeologici, ponti, impianti industriali, automobili, falesie costiere, dune e spiagge sabbiose, ecc., tutto può essere accuratamente modellato e documentato attraverso la tecnologia laser

Da questo punto di vista il laser scanner (Lidar, *Light Detection and Ranging*) rappresenta senza dubbio la tecnica di acquisizione dati introdotta nello scorso decennio di maggior successo. Il laser scanner terrestre (TLS) ha suscitato interesse e ha trovato ampia applicazione in settori distanti da quelli originari con interessanti applicazioni in svariati campi (ambiente e rischio ambientale, settore forestale e agronomico, rischio incendi, studi ecologici, idrologici, sismici, ecc.).

In questo lavoro viene innanzitutto illustrato lo stato dell'arte dei TLS dal punto di vista tecnologico e vengono quindi discusse le diverse soluzioni tecnologiche e i diversi parametri di sistema in relazione alle possibili applicazioni in campo ambientale e agro-forestale.

Nella seconda parte saranno invece presentati alcuni casi di studio esplicativi delle potenzialità e delle limitazioni operative della tecnica TLS in campo ambientale e agro-forestale.

La tecnologia TLS

I TLS sono strumenti che consentono la digitalizzazione non distruttiva, rapida e precisa di oggetti e di porzioni di territorio di qualsiasi forma e dimensione sotto forma di nuvole di punti 3D. Da un punto di vista storico, la tecnologia TLS è stata a lungo utilizzata per applicazioni di ingegneria civile ed industriale, per ottenere, ad esempio, una rappresentazione tridimensionale di edifici storici o di siti archeologici. Il principio di funzionamento della tecnologia TLS si basa sull'emissione-ricezione di un raggio laser. In una possibile configurazione, il raggio laser, deflesso da uno specchio rotante montato su un supporto anch'esso rotante, illumina, con il variare dell'angolo azimutale e zenitale, la scena e gli oggetti in punti contigui (Fig. 1). La conoscenza della posizione angolare dello specchio deflettente, insieme all'intensità del raggio laser riflesso, consentono di misurare una distanza e di rappresentare ciascun punto riflettente con specifiche coordinate 3D e uno specifico valore di riflettanza. La rappresentazione 3D che ne deriva è la cosiddetta "nuvola di punti", composta, talvolta, da milioni di punti.

Dal punto di vista del protocollo di misura, il TLS può essere utilizzato secondo due diverse modalità, la scansione singola e le scansioni multiple. Nel primo caso il sistema laser viene posizionato in un solo punto e viene effettuata un'unica scansione, rapida ma con lacune dovute all'inevitabile ombreggiamento di alcune porzioni della scena ripresa. Nel caso delle scansioni multiple, vengono effettuate diverse scansioni intorno alle superfici e agli oggetti che si intendono rilevare. La trasformazione geometrica che consente l'allineamento delle diverse scansioni in un'unica nuvola di punti è effettuata attraverso il posizionamento sulla scena ripresa di almeno tre target di riferimento. Questo metodo aumenta sia i tempi di misura (in funzione del numero di

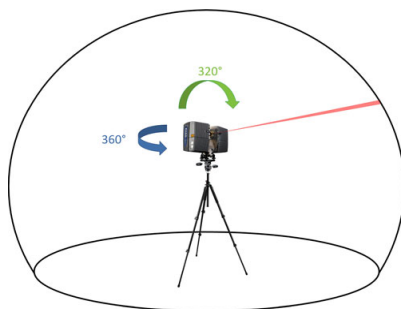


Figura 1 – Principio di funzionamento operativo di un TLS. Un raggio laser deflesso da uno specchio rotante effettua la scansione di un piano verticale, mentre la completa rotazione dell'intero strumento permette una scansione emisferica. Il tutto si risolve nella digitalizzazione e nella rappresentazione 3D degli oggetti circostanti sotto forma di una nuvola di punti (tratta da Dassot et al., 2011).

scansioni) sia i tempi di post-elaborazione (in funzione del numero di target di riferimento e del metodo utilizzato per rilevarli, automatico o manuale). Si tratta comunque del protocollo di misura che consente la più completa rappresentazione 3D delle superfici e degli oggetti ripresi.

I sistemi di scansione laser terrestri

I sistemi di scansione TLS sono di solito classificati in due categorie in base al principio di misura della distanza: sistemi a differenza di fase (*phase-shift*) e sistemi a tempo di volo (*pulsed time of flight*).

Nel caso dei TLS a differenza di fase, le distanze sono stimate attraverso la misura dello sfasamento tra i treni d'onda emessi e quelli ricevuti. Questi strumenti consentono sia di avere ampi campi di vista e tempi di acquisizione molto rapidi sia di acquisire un numero di punti molto elevato. Per la loro portata, i TLS a differenza di fase si prestano particolarmente per misure molto precise e dettagliate di scene a distanza ravvicinata (sino a 100 m). Generalmente lavorano nel visibile (600-800 nm) anche se sono disponibili prodotti commerciali che utilizzano l'infrarosso (Pfeifer and Briese, 2007; Lemmens, 2011).

La tecnologia a tempo di volo prevede la misura dei tempi trascorsi tra due impulsi o tra due treni d'onda. In questo caso è possibile riprendere superfici e oggetti a distanze molto maggiori ma con velocità di acquisizione relativamente bassa. Questo tipo di TLS utilizza generalmente lunghezze d'onda nell'infrarosso vicino (900-1500 nm) ed è particolarmente adatto per la ricostruzione 3D di scene poste a maggiore distanza (oltre i 100 m). Gli strumenti a tempo di volo sono di solito caratterizzati da un campo di vista verticale piuttosto ristretto. Tenendo conto del numero di segnali di ritorno calcolati per ciascuna direzione e delle capacità di rilevamento del sensore, per gli strumenti a tempo di volo si possono distinguere quattro metodi di registrazione del segnale di ritorno (Fig. 2): (1) registrazione di un solo segnale di ritorno (da parte del primo oggetto che riflette una frazione dell'impulso laser); (2) registrazione del primo e dell'ultimo segnale di ritorno (con la possibilità di selezionare il primo, l'ultimo o entrambi i segnali riflessi); (3) registrazione di diversi (sino a cinque) segnali multipli; (4) registrazione del profilo della forma d'onda (registrazione in continuo dell'eco retrodiffusa). Nel caso dei primi tre metodi, sulla base di specifici valori di soglia vengono registrati solo i segnali di picco. Sia il terzo che il quarto metodo (e in misura inferiore il secondo) forniscono informazioni con diversi livelli di profondità di campo. Infine, i TLS a forma d'onda analizzano l'intero segnale riflesso e consentono una migliore valutazione della struttura delle superfici e degli oggetti indagati (Pfeifer and Briese, 2007; Jupp et al., 2009; Lemmens, 2011).

La portata del sensore laser

Una delle più importanti caratteristiche operative dei TLS è la portata in quanto determina in larga misura le possibili applicazioni. Si possono distinguere strumenti a piccola portata (sino a 25 m), strumenti a media portata (sino a 250 m) e strumenti a lunga portata (oltre 250 m). Gli strumenti a differenza di fase, disponibili sul mercato dai primi anni '90, sono nati per applicazioni industriali che richiedono una piccola portata e un'elevata accuratezza. Caratterizzati da un'elevata precisione (da sub-millimetrica a sub-centimetrica) e da un'elevata velocità di scansione (sino a 500.000 punti al secondo), producono nuvole di punti a elevata densità. Queste caratteristiche così favorevoli determinano limitazioni nella portata, di solito inferiore a 100 m. I sistemi a tempo di volo possono invece misurare distanze sino a 1 km e anche più, ma la loro precisione è inferiore (da sub-centimetrica a centimetrica) mentre la velocità di scansione può arrivare intorno ai 50.000 punti al secondo.

Un'altra importante caratteristica dei TLS è la risoluzione spaziale. Il livello di dettaglio spaziale che può essere ottenuto da una nuvola di punti dipende dalla portata (o dalla distanza dell'oggetto),

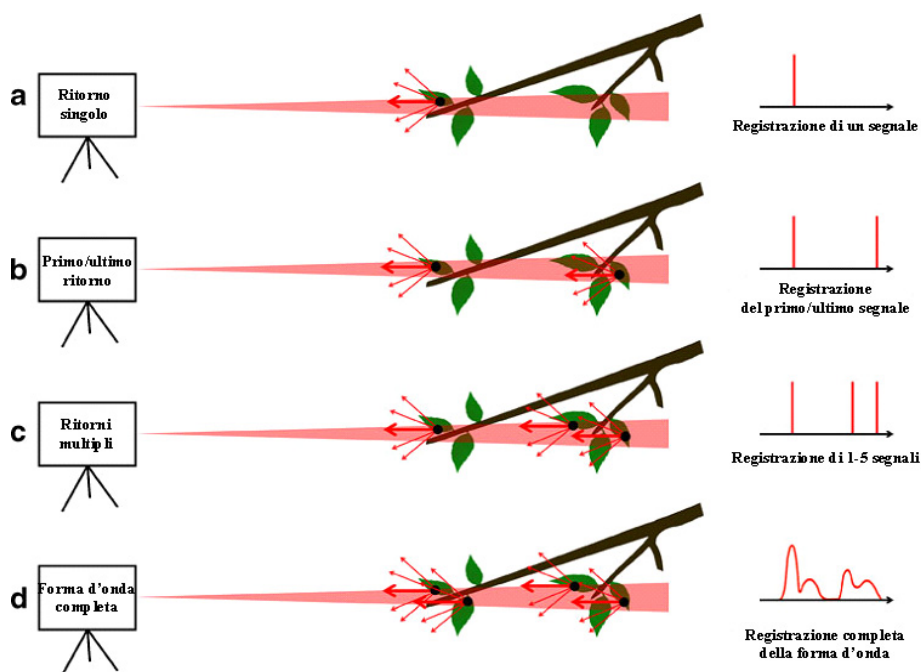


Figura 2 – Tipi di segnale di ritorno di un sistema TLS. Possono essere registrati uno o più segnali in base alla capacità di rilevamento del sensore. I sistemi di misura a differenza di fase possono registrare un solo segnale (a), mentre si possono trovare quattro diverse tipologie nei sistemi a tempo di volo. Nei casi (a), (b) e (c) sono registrati i soli segnali di picco (definiti da specifiche soglie). I TLS a forma d'onda (d) sono in grado di registrare il profilo della forma d'onda del segnale di ritorno (tratta e modificata da Dassot et al., 2011).

dall'intervallo di campionamento e dall'ampiezza del raggio laser. Di solito l'intervallo di campionamento è considerato l'indicatore della risoluzione spaziale, per quanto quest'ultima caratteristica dipenda anche dalla portata e dall'ampiezza del raggio laser (Lichti e Jamsho, 2006).

I programmi di elaborazione dei dati TLS

Le nuvole di punti generate dai TLS sono dati non strutturati che devono essere ricostruiti attraverso programmi di elaborazione dedicati per poter ricavare le informazioni di interesse. È quindi necessario procedere alla post-elaborazione dei dati, attraverso una serie di operazioni in cascata, che dipendono dal tipo di risultato che si intende ricercare. La prima operazione consiste nell'allineamento delle scansioni, in quanto ogni singola nuvola di punti è restituita dal dispositivo di acquisizione in uno spazio dipendente dal suo posizionamento rispetto all'oggetto, e risulta quindi disposta nello spazio in modo apparentemente casuale. In questa prima fase della post-elaborazione si allineano tutte le scansioni in un unico spazio. Si può poi operare una limitazione del campo di ripresa, estrapolando solo i punti di interesse. Le fasi successive dipendono fortemente dallo scopo dell'indagine e possono comprendere le seguenti operazioni:

- decimazione, si tratta di diminuire la densità spaziale dei punti (ricampionamento) per renderla omogenea e congruente rispetto alla scala nominale del rilievo
- georeferenziazione, ovvero una rototraslazione nello spazio tale da collocare la nuvola di punti in un sistema geodetico di riferimento
- riduzione del rumore, tramite l'analisi della riflettanza e con altre tecniche si riduce il numero di punti, eliminando quelli in eccesso e fuorvianti

- colorazione, assegnazione dell'informazione del colore ad ogni punto, realizzabile abbinando il rilievo TLS a riprese fotografiche
- creazione di mesh, con software dedicati è possibile creare mesh 3D tramite triangolazioni di punti
- analisi per ricavare informazioni su volumi, sezioni, profili, ecc
- analisi statistica delle scansioni per analizzare la variabilità della riflettanza, della densità, ecc.

Dal momento in cui i TLS sono giunti sul mercato, diverse aziende hanno prodotto specifici pacchetti software che consentono di realizzare diverse operazioni di base sui dati provenienti da scansioni laser. Questi prodotti software, spesso generici e comunque realizzati principalmente per applicazioni in campo industriale, architettonico o archeologico, possono trovare applicazione anche nel settore ambientale e in quello agro-forestale. Esistono comunque altri pacchetti software di post-elaborazione specificatamente dedicati ad applicazioni ambientali, con particolare riferimento al settore forestale.

Applicazione dei sistemi TLS nel settore forestale

A partire dai primi anni 2000, sono stati pubblicati numerosi studi finalizzati alla caratterizzazione della struttura delle piante forestali. Rimandando a Dassot et al. (2011) per maggiori dettagli, in questo paragrafo si riporta una rapida rassegna delle applicazioni in campo forestale (Fig. 3), con un cenno agli strumenti e ai metodi utilizzati.

I primi studi si sono focalizzati sulla valutazione della struttura degli alberi con particolare attenzione alla caratterizzazione dei principali parametri dendrometrici: diametri del tronco, altezza dell'albero, densità d'impianto, area basale e volumi legnosi commerciali. Queste indagini erano indirizzate a dimostrare le potenzialità dei TLS nell'ottenere misure più veloci e accurate rispetto ai tradizionali metodi inventariali. A questo proposito sono state sviluppate una serie di metodologie per estrarre dalle nuvole di punti le informazioni ricercate. La prima operazione consiste nel realizzare un modello digitale del terreno (DTM) a partire dalla nuvola di punti, punto di partenza per l'estrazione di ulteriori parametri (Simonse, 2003). Successivamente è possibile rilevare i tronchi degli alberi nella nuvola di punti e determinare i diametri a petto d'uomo (DBH), estraendo tutti i punti situati in uno strato compreso tra 1.25 e 1.35 m dal suolo. Entro questa "fetta" orizzontale, tutti i cluster circolari di punti sono individuati attraverso tecniche di riconoscimento delle forme, quali la trasformata di Hough e il *least square circle fitting* (Simonse et al., 2003; Maas et al., 2008). Da questi cluster circolari (considerati come sezioni di tronco) possono ottenersi degli anelli circolari, e quindi possono essere determinati con buona accuratezza sia la posizione dell'albero sia il DBH. Questi principi sono stati ampliamenti utilizzati e perfezionati per poter determinare i diametri del tronco a diverse altezze e quindi il profilo del tronco degli alberi (Aschoff e Spiecker, 2004). Queste stime hanno mostrato una buona accuratezza con un errore di circa 1 cm per le altezze comprese tra la base dell'albero e la parte più bassa della chioma. Infine, Bienert et al. (2007) hanno proposto un set completo di algoritmi che consentono la segmentazione del tronco e la ricostruzione del diametro del tronco sia per la porzione osservata sia per la porzione non osservabile a causa di ostruzioni e impedimenti.

I sistemi TLS vennero quindi utilizzati con scopi inventariali e confrontati con i metodi tradizionali. Questi confronti, effettuati su boschi di conifere e su foreste decidue e miste, dimostrarono l'accuratezza dei TLS, come riportato da diversi autori (Hopkinson et al., 2004; Strahler et al., 2008; Tansey et al., 2009).

I sistemi TLS hanno trovato applicazione anche nell'identificazione delle specie attraverso l'analisi della struttura della corteccia. Haala et al. (2004) e Reulke e Haala (2004) hanno utilizzato rilievi TLS associati a immagini fotografiche ad alta risoluzione dimostrando le capacità di questa tecnica di individuare e riconoscere le specie forestali. Altri autori (Schütt et al., 2004) hanno invece sviluppato una metodologia per determinare la qualità commerciale degli alberi individuando

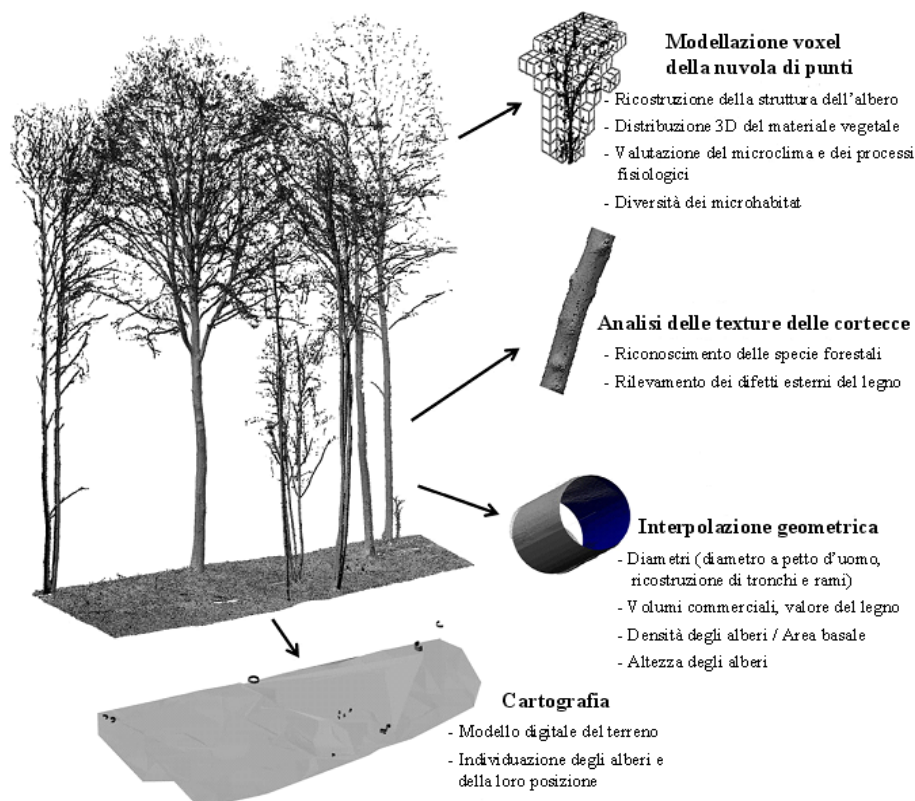


Figura 3 – Metodi per la ricostruzione dell'architettura delle piante forestali e per la misura dei relativi parametri strutturali a partire da dati TLS (tratta e modificata da Dassot et al., 2011).

caratteristiche o difetti di interesse commerciale. La portata dei sistemi TLS e la loro velocità di acquisizione, rendono questi strumenti particolarmente utili per descrivere la geometria complessa delle coperture forestali.

La determinazione della copertura vegetale è di solito effettuata determinando la proiezione orizzontale della chioma. Fleck et al. (2007) utilizzarono un TLS a differenza di fase per digitalizzare un'area di una foresta decidua. Il confronto tra le proiezioni virtuali e i metodi tradizionali mostrò buoni risultati ($r^2 = 0.90$) con una maggiore capacità di rilevare le zone di contatto tra le chiome degli alberi.

Un uso massiccio della tecnologia TLS ha riguardato la stima della frazione delle aperture della vegetazione (*forest canopy gap fraction*). Danson et al. (2007, 2008) utilizzarono a questo scopo un TLS a tempo di volo in modalità emisferica. La frazione delle aperture venne stimata tramite il rapporto tra il numero di raggi laser emessi e il numero di raggi laser ricevuti per ciascuna fascia di angolo zenitale pari a 5° . La misura della frazione delle aperture della vegetazione ottenute con il TLS risultarono confrontabili con quelle ottenute con fotografie emisferiche, con il vantaggio di avere anche informazioni sulla distribuzione 3D della chioma. Conclusioni analoghe sono state successivamente riportate da altri autori (Strahler et al., 2008; Jupp et al., 2009).

L'indice di area fogliare (LAI, *Leaf Area Index*) è un parametro strutturale chiave delle coperture forestali, rappresentando la superficie fogliare totale che insiste sull'unità di superficie del suolo. Numerosi sono i metodi diretti e indiretti messi a punto per la stima del LAI: dai campionamenti distruttivi alle relazioni allometriche, dalle tecniche fotografiche a quelle radiometriche. Tutti i

metodi convenzionali presentano un livello di accuratezza che può essere accettabile solo tramite campionamenti dispendiosi in termini di tempo e di mezzi. L'utilizzo del TLS rappresenta una nuova possibilità per stimare questo parametro strutturale.

Da un punto di vista tecnico, il primo aspetto riguarda il riconoscimento e la separazione del materiale legnoso e del materiale verde nella nuvola di punti. Come mostrato da Clawges et al. (2007) su alberi di conifere, il materiale legnoso e verde può essere discriminato attraverso i valori di intensità di ciascun punto. Le frazioni di materiale verde e di materiale legnoso sul totale vennero calcolate a partire dal numero di segnali di ritorno e il tutto venne confrontato con misure dirette, ottenendo una forte correlazione ($r^2 = 0.82$).

Un modo molto efficiente per stimare il LAI consiste nell'elaborazione delle nuvole di punti in una griglia 3D (voxel). Le potenzialità dei metodi basati sui voxel sono particolarmente elevate quando si applicano algoritmi di *ray-tracing*, calcolando i raggi intercettati da ciascun voxel. Questa tecnica è stata diffusamente sperimentata con successo per calcolare sia il LAI sia la densità di area fogliare (LAD, *Leaf Area Density*), altro parametro strutturale che misura la superficie fogliare presente nell'unità di volume (Hosoi e Omasa, 2006, 2009b; Henning e Radtke, 2006). Particolare attenzione è stata prestata a identificare i fattori che influenzano l'accuratezza di queste misure. Un fattore importante è l'inclinazione delle foglie, che riduce la loro illuminazione. Ciò richiede una risoluzione molto elevata e l'inclinazione può essere valutata approssimando una foglia a un piano e calcolando la normale al piano. La distribuzione dell'angolo di inclinazione delle foglie può quindi essere ricavata dall'angolo di queste normali. Anche la presenza di tessuti non fotosintetici determina una distorsione nella stima di LAI e LAD. Questa distorsione può essere evitata rimuovendo i punti corrispondenti al materiale legnoso basandosi sui valori di riflettanza oppure, quando possibile, programmando due scansioni, una in assenza e una in presenza di foglie e sottraendo i segnali di ritorno della prima scansione dai segnali di ritorno della seconda basandosi sulle coordinate dei voxel. Infine, la stessa presenza delle foglie può rappresentare un ostacolo nella stima accurata del LAD.

Altre applicazioni del TLS in campo forestale hanno tentato e tentano di rappresentare la complessa struttura tridimensionale degli alberi. Diversi sono i metodi che possono essere utilizzati per la ricostruzione dell'architettura di un albero. Sequenze di cilindri possono essere interpolati alla nuvola di punti per determinare volume e geometria di tronchi e rami (Cheng et al., 2007). Un altro metodo per determinare l'architettura di un albero consiste nel proiettare la nuvola di punti in uno spazio di voxel (Lefsky e McHale, 2008). Queste metodologie si basano su scansioni di qualità molto elevata. Altri autori hanno focalizzato la propria attenzione sulla possibilità di ricostruire l'architettura di una pianta forestale a partire da dati TLS incompleti. Ad esempio Xu et al. (2007) utilizzarono la nuvola di punti corrispondente alla struttura legnosa principale dell'albero come punto di partenza per generare sia le ramificazioni sia la chioma. Una complessa metodologia per la ricostruzione di una pianta forestale è stata illustrata da Côté et al. (2009), che accoppiarono il modello strutturale a un modello di trasferimento radiativo per simulare riflettanza e trasmittanza della chioma, ottenendo risultati in buon accordo con le misure convenzionali (fotografie emisferiche).

Tecniche di rilievo e di elaborazione analoghe a quelle sinora menzionate sono state inoltre utilizzate per analizzare le caratteristiche strutturali e la distribuzione spaziale del combustibile forestale, informazioni cruciali per quantificare il rischio di incendio e per simulare il comportamento del fuoco. Per maggiori dettagli, si vedano a questo proposito i recenti articoli di Erdody e Moskal (2010) e di Garcia et al. (2011).

Un ultimo gruppo di applicazioni in campo forestale riguarda gli studi più propriamente ecologici, come ad esempio quelli riguardanti le interazioni tra le piante forestali e la luce. Van Der Zande et al. (2009) hanno utilizzato un TLS a tempo di volo per scalare il tasso traspirativo di *Quercus ilex* dal livello fogliare al livello di singola pianta. La nuvola di punti che rappresentava l'albero venne inserita in uno spazio di voxel e analizzata attraverso un programma *ray-tracing* per simulare l'ambiente luminoso della chioma. Per ogni singolo voxel, classificato in base a classi di

illuminazione, vennero quindi stimate le caratteristiche fisiologiche (conduttanza stomatica, traspirazione) in base alla quantità di luce intercettata. Il tasso di traspirazione totale dell'albero venne infine calcolato integrando i valori di traspirazione di ciascun voxel, ottenendo una stima fortemente correlata con le misure dirette (metodo *sap.flow*).

Un'altra specifica applicazione del TLS riguarda l'interazione tra la struttura degli alberi e le esondazioni nelle zone ripariali. Uno studio è stato condotto da Antonarakis et al. (2009) con lo scopo di migliorare la simulazione della resistenza dei boschi ripariali nei modelli di esondazione. Dopo aver ricostruito con diversi metodi l'architettura delle piante, vennero determinati i parametri di resistenza al flusso degli alberi con risultati in buon accordo con metodi diretti di valutazione.

Un ultimo esempio di applicazioni in campo ecologico riguarda l'analisi degli habitat degli animali nel bosco. Un primo esempio è rappresentato da Michel et al. (2008) che, utilizzando un TLS a tempo di volo, misero in relazione le caratteristiche strutturali di un bosco di conifere in Nuova Zelanda con i criteri di scelta dei siti di nidificazione di due specie di uccelli. Un secondo esempio, simile nell'approccio, è fornito da Aschoff et al. (2007), i quali analizzarono l'attività di caccia di diverse specie di pipistrello in relazione alla variazione verticale della densità della vegetazione.

Applicazioni dei sistemi TLS nel settore agrario

Le approfondite sperimentazioni effettuate con il TLS in campo forestale hanno avuto come logica conseguenza il suo utilizzo anche in campo agrario con alcune applicazioni del tutto analoghe a quelle illustrate per il settore forestale e altre più specifiche delle tematiche agricole.

Sistemi TLS sono stati utilizzati per misurare i dettagli strutturali della vegetazione in vigneti, oliveti e frutteti (Fig. 4) con risultati apprezzabili nella ricostruzione della struttura della vegetazione e nella determinazione di diversi parametri strutturali e funzionali: altezza delle piante, ampiezza e volume della chioma, LAI, LAD, indice di aggregazione delle foglie, ecc. (Rosell et al., 2009; Moorthy et al., 2011).

La chioma della vegetazione svolge un importante ruolo nei cicli della materia e dell'energia attraverso la fotosintesi e la respirazione, determinando l'ambiente microclimatico. Determinare la struttura verticale della chioma è essenziale, poiché la sua composizione tridimensionale ne influenza fortemente le funzionalità. Hosoi e Omasa (2009a) hanno mostrato che sistemi TLS ad alta risoluzione possono fornire una stima accurata della struttura verticale delle colture agrarie. In particolare, è stato stimato il profilo verticale della densità di area delle piante (PAD, simile al LAD, ma utilizzato laddove non è possibile discriminare le foglie dalle altre parti verdi) su frumento tenero in diverse fasi di sviluppo utilizzando un TLS ad alta risoluzione e un metodo di analisi basato sui voxel. Inoltre, hanno dimostrato la possibilità di utilizzare i valori di PAD stimati con il TLS per ottenere informazioni sul peso secco e sull'accumulo di carbonio dei vari organi verdi della pianta.

Eitel et al. (2011) hanno sperimentato in pieno campo l'utilizzo del TLS su frumento tenero per valutarne le potenzialità nel diagnosticare il contenuto di azoto fogliare durante le prime fasi di estensione dello stelo. I risultati hanno evidenziato una maggiore accuratezza del TLS rispetto ai metodi di stima convenzionali (misuratori di clorofilla, sensori ottici), dimostrando la possibilità di un suo utilizzo per il monitoraggio del contenuto di azoto fogliare e per la gestione degli interventi di fertilizzazione durante le fasi più critiche della coltura.

La possibilità di valutare la biomassa delle colture e diversi parametri strutturali (altezza, volume, ecc.) è stata indagata da vari autori con risultati apprezzabili. Recentemente, Hoffmeister et al. (2011) hanno utilizzato un TLS a tempo di volo per ricostruire un modello 3D ad alta risoluzione della coltura. L'indagine, effettuata su diverse colture (barbabietola da zucchero, frumento e orzo),

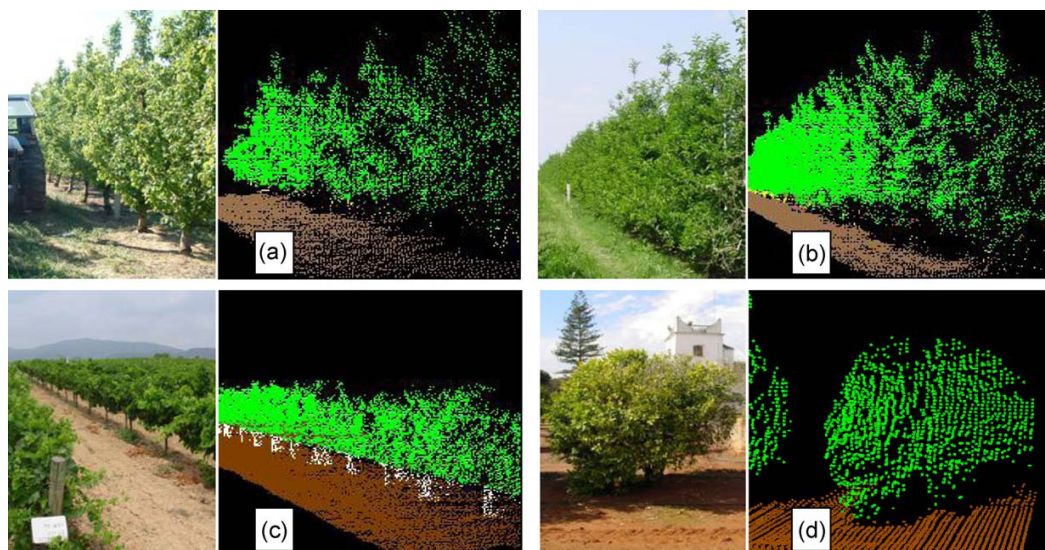


Figura 4 – Immagini fotografiche e 3D di alberi di pero (a), melo (b), vite (c) e arancio (d) (tratta da Rosell et al., 2009).

ha dimostrato la possibilità di ottenere mappe ad alta risoluzione dei campi coltivati e delle relative colture, con il rilevamento anche degli effetti degli interventi agronomici.

Infine, Radtke et al. (2010) hanno dimostrato le possibilità applicative dei TLS per misure affidabili e non invasive della quantità di foraggio rimosso dal pascolamento del bestiame in parcelle sperimentali di erba medica e festuca.

Applicazioni dei sistemi TLS in altri settori ambientali

Rimandando ai testi specialistici per un'approfondita rassegna sulle applicazioni del TLS in altri settori ambientali (Heritage e Large, 2009), in questo paragrafo conclusivo sulle applicazioni ci si limita a una rapida rassegna, sicuramente non esaustiva, sulle esperienze più rilevanti reperibili in letteratura.

Il TLS ha trovato negli anni più recenti un'ampia applicazione nelle indagini sulle frane, siano esse di crollo, di scivolamento o di colamento (Jaboyedoff et al., 2010). Specifiche applicazioni hanno riguardato il rilevamento e la caratterizzazione dei movimenti franosi, la valutazione del rischio e la mappatura della suscettibilità da frana, la modellazione dei movimenti franosi e tutti gli aspetti concernenti il monitoraggio delle frane.

L'elevata precisione e completezza di informazioni generate dai TLS ha trovato applicazione anche nella caratterizzazione e nello studio morfologico e vegetazionale dei corsi d'acqua, anche con scopi di modellazione idrodinamica (Heritage et al., 2005; Milan et al., 2009).

I processi di erosione del suolo sono fortemente influenzati dalla rugosità superficiale del terreno. Peraltro, quantificare la rugosità superficiale in pieno campo e a una scala appropriata è piuttosto laborioso così come è difficile individuare la scala spaziale a cui effettuare le misure per ottenere dati significativi. Le caratteristiche dei sistemi TLS consentono di ottenere accurate misure di rugosità superficiale alla scala sub-centimetrica, come dimostrato da Eitel et al. (2011) in una recente indagine effettuata in un'area a pascolo dell'Idaho, USA. Gli autori concludono che il TLS è uno strumento in grado di migliorare la comprensione degli effetti della rugosità superficiale sui processi di erosione e di parametrizzare accuratamente i modelli di simulazione dei processi idrologici ed erosivi.

I numerosi studi e campi di indagine geomorfologici in cui ha trovato applicazione il TLS

(caratterizzazione e monitoraggio di falesie, formazioni dunali interne e costiere, spiagge, ecc.) hanno mostrato le enormi potenzialità nel monitoraggio dei processi erosivi e delle dinamiche costiere. Per una breve ma puntuale rassegna di questo settore di indagine si rimanda a Nield et al. (2011). Per tentare di completare il quadro sui campi di applicazione dei sistemi TLS in campo ambientale, un brevissimo cenno a due recenti indagini. La prima riguarda lo studio delle deformazioni post-sismiche associate al terremoto dell'Aquila del 2009 (Wilkinson et al., 2010) e la seconda la mappatura e il monitoraggio dei biotopi fluviali e torrentizi, attraverso l'analisi delle proprietà riflettenti della superficie dell'acqua e la determinazione della rugosità superficiale dell'acqua (Milan et al., 2010).

Conclusioni

In questo articolo si è cercato di rappresentare lo stato dell'arte delle applicazioni della tecnologia TLS in campo forestale e agrario, con alcuni cenni alle applicazioni nel più ampio campo ambientale. Sembra evidente che i sistemi TLS hanno un elevato potenziale di utilizzo sia in campo agro-forestale sia in campo ambientale e, a fronte delle difficoltà che derivano dall'enorme mole di dati che generano, consentono rilievi rapidi e più dettagliati rispetto ai metodi di monitoraggio convenzionali. Da questo punto di vista, la diffusione dei TLS e più in generale dei LIDAR ha rappresentato una vera e propria "rivoluzione", analoga a quella cui abbiamo assistito in ambito fotografico con l'avvento del digitale. L'analisi della letteratura e le caratteristiche intrinseche dei TLS fanno intuire che le possibili applicazioni in campo agro-forestale e ambientale sono innumerevoli. Si devono comunque evidenziare alcuni aspetti che richiedono un miglioramento della tecnologia e dei metodi di analisi che ne derivano affinché questa tecnologia possa esprimere appieno le proprie potenzialità. Un primo aspetto riguarda le caratteristiche dell'apparecchiatura che in futuro dovrà essere ancora più piccola, maneggevole e modulare per renderne più agevole l'utilizzo. Dovranno inoltre essere definiti degli standard tecnici che consentano di confrontare senza complicanze i sistemi di scansione laser in commercio. Un'ulteriore urgente esigenza è il miglioramento dei software dedicati alla modellazione, all'estrazione delle proprietà, all'analisi delle texture e alla presentazione dei modelli. Così come estrema attenzione dovrà essere dedicata all'ottimizzazione dei software per la manipolazione dell'enorme volume di dati prodotti, al contempo punto di forza e vera limitazione per una completa espressione delle potenzialità dei sistemi TLS. Infine, ma non per importanza, un cenno deve essere fatto all'esigenza di formazione e di addestramento dei ricercatori e, più in generale, degli utilizzatori. In sostanza, per quanto si tratti di una tecnologia matura, rimane un ampio margine per ulteriori importanti progressi nel miglioramento della tecnologia in tutti i suoi aspetti. Non c'è comunque alcun dubbio che la futura evoluzione della tecnologia e i progressi nelle capacità di calcolo consolideranno in futuro il ruolo dei TLS in campo ambientale come essenziale fonte di informazioni e strumento di analisi.

Riferimenti bibliografici

- Antonarakis A.S., Richards K.S., Brasington J., Bithell M. (2009), "Leafless roughness of complex tree morphology using terrestrial lidar", *Water Resour Res*, 45: W10401
- Aschoff T., Spiecker H. (2004), "Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data", *ISPRS*, 36: 66–70
- Aschoff T., Spiecker H., Holderied M.W. (2007), "Terrestrische Laserscanner und akustische Ortungssysteme: Jagdlebensraume von Fledermaeusen in Waeldern", *AFZ Der Wald*, 62: 172–175
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mohan F., Nugent C. (2007), "Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laser scanner point clouds", *Proc. Laser scanning 2007 and Silvilaser 2007*, ISPRS Commission III Workshop 36, Part 3, Espoo, Finland
- Clawges R., Vierling L., Calhoon M., Toomey M. (2007), "Use of a ground-based LIDAR for estimation of biophysical properties of western larch", *Int J Remote Sens*, 28: 1–14
- Cheng Z.L., Zhang X.P., Chen B.Q. (2007), "Simple reconstruction of tree branches from a single range image", *J Comput Sci Technol*, 22: 846–858

- Côté J.F., Widlowski J.L., Fournier R.A., Verstraete M.M. (2009), "The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstruction from terrestrial LIDAR", *Remote Sens Environ*, 113: 1067–1081
- Danson F.M., Giacosa C., Armitage R.P. (2007), "Two-dimensional forest canopy architecture from terrestrial laser scanning", *ISPRS*, 36: 1682–1777
- Danson F.M. et al. (2008), "Terrestrial laser scanners to measure forest canopy gap fraction", *Proc. SilviLaser 2008*, Edinburgh, UK.
- Dassot M., Constant T., Fournier M. (2011), "The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: application fields, benefits and challenges", *Annals of Forest Science*, 68: 225-244
- Eitel J.U.H., Vierling L.A., Long D.S., Hunt E.R. (2011) "Early season remote sensing of wheat nitrogen status using a green scanning laser", *Agric For Meteorol*, 151: 1338– 1345
- Eitel J.U.H., Williams C.J., Vierling L.A., Al-Hamdan O.Z., Pierson F.B. (2011) "Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands", *Catena* (in corso di stampa)
- Erdody T.L., Moskal L.M. (2010), "Fusion of LiDAR and imagery for estimating forest canopy fuels", *Remote Sens Env*, 114: 725–737
- Fleck S. et al. (2007), "Terrestrial LIDAR measurements for analysis canopy structure in an old-growth forest", *ISPRS*, 36: Part 3 / W52
- García M., Danson F.M., Riaño D., Chuvieco E., Ramirez F.A., Bandugula V. (2011), "Terrestrial laser scanning to estimate plot-level forest canopy fuel properties", *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 13: 636–645
- Haala N., Reulke R., Thies M., Aschoff T. (2004), "Combination of terrestrial laser scanning with high resolution panoramic images for investigations in forest applications and tree species recognition", *ISPRS*, 34: Part 5/W16
- Henning J.G., Radtke P.J. (2006), "Ground-based laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure", *Photogramm Eng Remote Sens*, 72: 1349–1358
- Heritage G.L., Hetherington D. (2005), *Notes on the performance of side scanning LiDAR across varied terrain*, IAHS Red Book Publication, 291: 269–277
- Heritage G.L., Large A.R.G. (2009), *Laser scanning for the environmental sciences*, Blackwell Publishing Ltd, Chichester, UK
- Hoffmeister D., Curdt C., Tilly N., Bendig J. (2011), "3d terrestrial laser scanning for field crop modelling", *Proc. Workshop on Remote Sensing Methods for Change Detection and Process Modelling*, 18-19/11/2010, Cologne, pp. 17-22
- Hopkinson C., Chasmer L., Young-Pow C., Treitz P. (2004), "Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar", *Can J For Res*, 34: 573–583
- Hosoi F., Omasa K. (2006), "Voxel-based 3-D modelling of individual trees for estimating leaf area density using high resolution portable scanning lidar", *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 44: 3610–3618
- Hosoi F., Omasa K. (2009a), "Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable LiDAR imaging", *ISPRS*, 64: 151–158
- Hosoi F., Omasa K. (2009b), "Detecting seasonal change of broadleaved woody canopy leaf area density profile using 3D portable LiDAR imaging", *Funct Plant Biol*, 36: 998–1005
- Jupp D.L.B., Culvenor D.S., Lovell J.L., Newnham G.J., Strahler A.H., Woodcock C.E. (2009), "Estimating forest LAI profiles and structural parameters using a ground-based laser called Echidna®", *Tree Physiol*, 29:171–181
- Lefsky M., McHale M. (2008), "Volumes estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning", *J Appl Remote Sens*, 2: 023521
- Lemmens M. (2011), *Geo-information: Technologies, Applications and the Environment*, Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht, 101-121
- Lichti D.D., Jamtsho S. (2006), "Angular resolution of terrestrial laser scanners", *Photogramm Rec*, 21: 141–160

- Maas H.G., Bienert A., Scheller S., Keane E. (2008), "Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *Int J Remote Sens*, 29: 1579–1593
- Michel P., Jenkins J., Mason N., Dickinson K.J.M., Jamieson I.G. (2008), "Assessing the ecological application of lasergrammetric techniques to measure fine-scale vegetation structure", *Ecol Inform*, 3: 309–320
- Milan D.J. (2009), *Terrestrial Laser Scan-derived Topographic and Roughness Data for Hydraulic Modelling of Gravel-bed Rivers*, in: Laser scanning for the environmental sciences, Blackwell Publishing Ltd, Chichester, UK
- Milan D.J., Heritage G.L., Large A.R.G., Entwistle N.S. (2010), "Mapping hydraulic biotopes using terrestrial laser scan data of water surface properties", *Earth Surf Process Landforms*, 35: 918–931
- Moorthy I., Miller J.R., Jimenez Berni J.A., Zarco-Tejada P., Hu B., Chen J. (2011), "Field characterization of olive (*Olea europaea* L.) tree crown architecture using terrestrial laser scanning data", *Agric For Meteorol*, 151: 204–214
- Nield J.M., Wiggs G.F.S., Squirrell R.S. (2011) "Aeolian sand strip mobility and protodune development on a drying beach: examining surface moisture and surface roughness patterns measured by terrestrial laser scanning", *Earth Surf Process Landforms*, 36: 513–522
- Pfeifer N., Briese C. (2007), "Laser scanning - Principles and applications", Publication database of the Vienna University of Technology, Austria
- Radtke P.J., Boland H.T., Scaglia G. (2010), "An evaluation of overhead laser scanning to estimate herbage removals in pasture quadrats", *Agric For Meteorol*, 150: 1523–1528
- Reulke R., Haala N. (2004), "Tree species recognition with fuzzy texture parameters", *IWCIA 2004 - Lecture Notes Comput Sci*, 3322: 607–620
- Rosell J.A., Llorens J., Sanz R., Arnó J., Ribes-Dasi M., Masip J., Escolà A., Camp F., Solanelles F., Gràcia F., Gil E., Val L., Planas S., Palacin J. (2009), "Obtaining the three-dimensional structure of tree orchards from remote 2D terrestrial LIDAR scanning", *Agric For Meteorol*, 149: 1505–1515
- Schütt C., Aschoff T., Winterhalder D., Thies M., Kretschmer U., Spiecker H. (2004), "Approaches for recognition of wood quality of standing trees based on terrestrial laser scanner data", *ISPRS*, 36: 8/W2.
- Simonse M., Aschoff T., Spiecker H., Thies M. (2003), "Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laserscanning". In: *Proc. of the ScandLaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests*, Umea, Sweden, pp. 251–257
- Strahler A.H., Jupp D.L.B., Woodcock C.E., Schaaf C.B., Yao T., Zhao F., Yang X., Lovell J., Culvenor D., Newnham G., Ni-Miester W., Bozkin-Morris W. (2008), "Retrieval of forest structure parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®)", *Can J Remote Sens*, 34: 426–440
- Tansey K., Selmes N., Anstee A., Tate N.J., Denniss A. (2009), "Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data", *Int J Remote Sens*, 30: 5195–5209
- Van Der Zande D., Mereu S., Nadezhdina N., Cermak J., Muys B., Coppin P., Manes F. (2009), "3D upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LIDAR: application on a Mediterranean Holm oak (*Quercus ilex*) tree", *Agric For Meteorol*, 149: 1573–1583
- Wilkinson M. et al. (2010), "Partitioned postseismic deformation associated with the 2009 Mw 6.3 L'Aquila earthquake surface rupture measured using a terrestrial laser scanner", *Geophys Res Lett*, 37: L10309
- Xu H., Gosset N., Chen B. (2007), "Knowledge and Heuristic Based Modeling of Laser-Scanned Trees", *Proc. of the 2007 ACM Transactions on Graphics*