Casi di studio nell'applicazione del TLS e della fotogrammetria digitale per l'analisi delle caratteristiche strutturali di alberi isolati in contesti forestali

Cristian Pedaso[1], Adriano Voltolini[1], Maria Rizzo[1], Antonio Floris[1]

[1] Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'Analisi dell'Economia agraria (CREA) – Centro di ricerca Foreste e Legno, Trento (IT)
pedasoc7@gmail.com
adrianovoltolini@yahoo.it
maria.rizzo@crea.gov.it
antonio.floris@crea.gov.it

Riassunto. Negli ultimi anni, il Terrestrial Laser Scanning e la fotogrammetria digitale stereoscopica hanno mostrato un crescente potenziale per la caratterizzazione tridimensionale della vegetazione arborea. Il presente contributo confronta tali tecniche con le misurazioni tradizionali, analizzandone l'efficacia nella caratterizzazione morfologica delle chiome di alberi a chioma libera in ambiente forestale del Trentino-Alto Adige.

Parole chiave: Laser Scanner Terrestre, stereofotogrammetria digitale, struttura della chioma arborea, misure forestali.

Abstract. In recent years, Terrestrial Laser Scanning and digital stereoscopic photogrammetry have shown increasing potential for the three-dimensional characterization of tree vegetation. This study compares these techniques with traditional measurements, assessing their effectiveness in the morphological characterization of crowns of open-grown trees in a forest environment in Trentino-Alto Adige, Italy.

Keywords: Terrestrial Laser Scanner, digital stereo-photogrammetry, tree crown structure, forest measurements.

1. Introduzione

La struttura della chioma è fondamentale per la descrizione morfologica e funzionale degli alberi, influenzando processi quali intercettazione della luce, fotosintesi, traspirazione e competizione per le risorse. Parametri come estensione, forma e profondità della chioma sono ampiamente utilizzati in ecologia forestale, nella stima di biomassa e carbonio e nel monitoraggio vegetativo [1; 2].

Tradizionalmente, la caratterizzazione della chioma si basa su misure dirette in campo, semplici ma sottoposte a semplificazioni e alla soggettività dell'operatore. Il Terrestrial Laser Scanning (TLS) consente, invece, una ricostruzione tridimensionale dettagliata degli alberi mediante nuvole di punti ad alta densità [2; 3]. I sistemi mobili basati su algoritmi SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) ne hanno inoltre semplificato e velocizzato l'acquisizione [4].

Il presente lavoro confronta la geometria delle chiome di campioni di alberi isolati rilevati mediante sistema mobile TLS Lixel 2 Pro XGRIDS®, misure su immagini aeree stereoscopiche e misure tradizionali, analizzando la concordanza tra i diversi approcci e il potenziale informativo delle nuvole di punti.

2. Area di studio

Gli alberi campione sono stati selezionati in due località del Trentino-Alto Adige per le quali era stata preliminarmente verificata la disponibilità di immagini stereoscopiche. Dopo screening preliminare su ortofoto digitali sono state individuate la zona di Malga Cislon a Trodena (46°19'12" N; 11°19'17" E - BZ) e Malga Malosco in località Regole di Malosco (46°26'42" N; 11°11'59" E - TN). Entrambe le località sono caratterizzate dalla presenza di boschi radi e pascoli arborati, con alberi isolati cresciuti in condizioni di chioma libera. Con un successivo sopralluogo in campo sono stati individuati i singoli alberi idonei al rilievo, verificando in particolare la presenza di un unico fusto, condizione impossibile da valutare sulle immagini aeree. Sono stati quindi scelti 22 alberi campione le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1. Descrizione del campione.

Caratteristica	Valore
n. totale alberi	22
Area studio Malosco	13 conifere
Area studio Trodena	9 latifoglie
Specie rappresentate	*Larix decidua* (12), *Betula pendula* (2), *Fraxinus angustifolia* (2), *Picea abies* (1), *Acer platanoides* (1), *Acer pseudoplatanus* (1), *Fraxinus excelsior* (1), *Fagus sylvatica* (1) e *Fraxinus ornus* (1)
DBH (cm)	min: 24.0; max: 82.0; media: 54.2; mediana: 55.8
h tot (m)	min: 7.5; max: 24.0; media: 16.1; mediana: 16.7
h inserzione chioma (m)	min: 1.7; max: 6.2; media: 2.9; mediana: 2.8

3. Raccolta dei dati

Per ciascun albero campione sono stati rilevati tramite misurazioni dendrometriche tradizionali: diametro a 1.30 m (DBH), altezza totale, ampiezza della chioma lungo otto

raggi disposti sulle direzioni cardinali a 45° di distanza, altezza della chioma dal terreno in corrispondenza delle quattro direzioni cardinali principali (N, E, S, W). Sono state inoltre rilevate le altezze di inserzione della chioma, non impiegate nelle analisi del presente studio, ma potenzialmente utili per futuri approfondimenti. Per queste misure sono stati usati: cavalletto dendrometrico e diametrometro, ipsometro Haglof Vertex III, clino-bussola Suunto Tandem, ipso-distanziometro Haglof Vertex Laser 360, asta telescopica graduata di 6 m.

Per ogni albero è stata inoltre acquisita una scansione tridimensionale ad alta densità mediante TLS. L'acquisizione è stata effettuata percorrendo un tragitto circolare attorno all'albero seguito da un secondo percorso sotto la chioma, al fine di garantire una copertura completa della struttura.

Per le due aree di studio, infine, sono stati utilizzati fotogrammi aerei acquisiti secondo criteri idonei alla ricostruzione stereoscopica e fotogrammetrica (campagne di volo AGEA 2023). Tali immagini sono state successivamente impiegate per la generazione dei modelli tridimensionali e per l'estrazione delle variabili dendrometriche descritte nei paragrafi successivi.

4. Elaborazione dei dati

Il flusso di lavoro ha previsto l'impiego di differenti ambienti software. Le scansioni TLS sono state inizialmente elaborate con il software LixelStudio 4.0.1.2 [5] per la generazione delle nuvole di punti e l'esportazione dei dati in formato *.las*.

Le successive elaborazioni sono state effettuate mediante il software CloudCompare v2.13.2 [6] su cui, per ciascun albero, è stato generato un modello digitale del terreno (DTM) tramite uno script Python basato sulla libreria *Dendromatics* [7; 8; 9]. Successivamente, la nuvola di punti è stata normalizzata rispetto al terreno e la proiezione al suolo della chioma è stata esportata in formato raster idoneo per le successive analisi su ImageJ 1.54g [10].

I blocchi stereoscopici per entrambe le aree di studio sono stati realizzati con il software proprietario ERDAS IMAGINE [11], inserendo nelle varie fasi della procedura di realizzazione tutti i parametri necessari alla corretta esecuzione della stessa (calibrazione interna della camera ed esterna del piano di volo, risoluzione, un adeguato numero di GCP, DTM ecc.).

Parallelamente, la *pipeline* di ricostruzione densa implementata nel software COLMAP 4.0.3 [12; 13; 14] è stata utilizzata per generare nuvole di punti tridimensionali a partire dalle coppie stereoscopiche. Le nuvole ottenute per le aree studio sono state successivamente importate in CloudCompare per la misura dei parametri dimensionali degli alberi.

5. Misure e calcoli

5.1 Determinazione dell'altezza degli alberi

Per ciascun albero sono state ottenute cinque misure dell'altezza mediante rilievi diretti, restituzione stereoscopica e analisi di nuvole di punti. Le diverse altezze sono state successivamente confrontate utilizzando come riferimento quella misurata in campo. Le misure considerate sono state:

- altezza totale degli alberi rilevata in campo mediante strumentazione dendrometrica tradizionale (Vertex in Fig. 1);
- altezza misurata sui blocchi stereoscopici realizzati mediante ERDAS IMAGINE, ottenuta come differenza tra la quota del terreno alla base del fusto e quella corrispondente all'apice della chioma (ERDAS in Fig. 1);
- altezza derivata dalle nuvole di punti generate con COLMAP e successivamente elaborate in CloudCompare, determinata calcolando la differenza tra la quota dell'apice della chioma e quella del terreno sottostante (COLMAP in Fig. 1);
- altezza massima derivata sulle nuvole di punti TLS normalizzate rispetto al terreno, definita come la quota del punto più elevato appartenente alla chioma (Hmax) (Hmax in Fig. 1);
- altezza corrispondente al percentile 99.9 (P99.9) della distribuzione delle quote dei punti appartenenti a ciascun albero, adottata come stima robusta dell'altezza massima al fine di limitare l'effetto di punti anomali (outlier) presenti nella nuvola TLS o errori di ricostruzione (P99.9 in Fig. 1).

5.2 Determinazione dell'area della chioma

L'area della chioma è stata calcolata mediante differenti approcci basati sia sui rilievi effettuati direttamente in campo sia sulle proiezioni al suolo ottenute dall'elaborazione delle scansioni TLS. Gli approcci adottati sono stati i seguenti:

- raggio quadratico medio (RQM): calcolato a partire dagli otto raggi della chioma misurati nelle direzioni cardinali e intercardinali. L'area della chioma è stata stimata assumendo una forma circolare equivalente, avente come raggio il valore ottenuto. Questo approccio consente di sintetizzare in un unico parametro le diverse dimensioni della chioma, attribuendo un peso maggiore ai raggi di maggiore ampiezza e riducendo l'influenza di eventuali valori particolarmente piccoli.
- somma di triangoli (STRI): la proiezione della chioma è stata assimilata a un poligono definito dagli otto raggi misurati nelle direzioni cardinali e intercardinali. L'area è stata calcolata suddividendo il poligono in otto triangoli individuati da coppie di raggi consecutivi e sommando successivamente le superfici dei singoli triangoli. Il procedimento è stato applicato sia ai raggi rilevati direttamente in campo sia ai raggi misurati sulle proiezioni della chioma elaborate mediante ImageJ.
- interpolazione PCHIP: per ottenere una rappresentazione continua e realistica del profilo della chioma è stato utilizzato il metodo Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (PCHIP), meno sensibile alle asimmetrie e privo delle oscillazioni tipiche di altri metodi di interpolazione [15]. La curva è stata campionata

ogni grado azimutale e utilizzata per il calcolo dell'area mediante integrazione numerica in coordinate polari. Il metodo è stato applicato sia ai raggi misurati in campo sia a quelli ricavati dalle proiezioni della chioma elaborate con ImageJ.

- elaborazione automatica in ImageJ (AUIJ): le proiezioni della chioma esportate da CloudCompare in formato .png sono state elaborate mediante il software ImageJ. Poiché le immagini raster prodotte presentavano una risoluzione spaziale di 1 cm, l'area della chioma è stata determinata automaticamente attraverso il conteggio dei pixel appartenenti alla proiezione. Prima dell'elaborazione è stata applicata la funzione *Fill Holes* per eliminare eventuali vuoti presenti all'interno della proiezione e ottenere una rappresentazione continua della chioma.

Le suddette metodologie sono state successivamente confrontate adottando come riferimento, in quanto il più utilizzato nella letteratura consultata, l'area derivata con alpha shape della nuvola TLS (AS). L'area di alpha shape della proiezione della chioma è stata calcolata tramite l'uso di uno script Python che sfrutta le librerie *Shapely* [16] e *Alpha_Shapes* [17]. L'alpha shape è una generalizzazione del *convex hull* in cui il parametro α determina quanto concavo sia il poligono che racchiude i punti della nuvola. Per ogni albero è stato utilizzato un alpha diverso, pari al valore più alto possibile senza dividere i punti della proiezione in più poligoni. Gli eventuali buchi interni della chioma sono stati riempiti prima di calcolare l'area totale della figura.

6. Risultati

Assumendo come metodo di riferimento la misura di campo con Vertex, non perché più accurata ma in quanto attualmente più diffusa nei rilievi forestali, il confronto tra le diverse stime di altezza evidenzia una maggiore concordanza dei valori ottenuti mediante TLS rispetto agli altri approcci. Le altezze ottenute mediante restituzione stereoscopica nel software ERDAS IMAGINE e quelle derivate dalle nuvole di punti ottenute tramite COLMAP hanno mostrato prestazioni inferiori presentando una variabilità significativamente maggiore e una corrispondenza sensibilmente inferiore rispetto agli altri metodi (vedi Fig. 1).

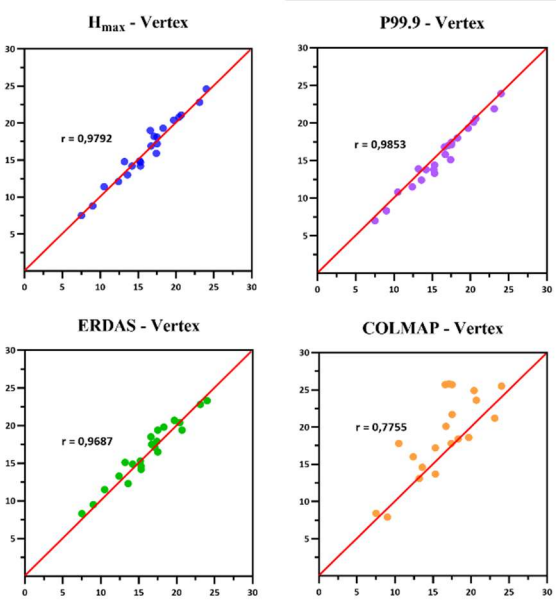

Fig. 1. Confronto fra i diversi metodi di misura dell'altezza totale (asse delle ordinate), rispetto a quella misurata in campo con Vertex (asse delle ascisse).

Tra le metriche estratte dalle nuvole di punti TLS, sia l'altezza massima (Hmax) sia il percentile 99.9 (P99.9) hanno evidenziato una maggiore concordanza con i valori misurati in campo. Tuttavia, il P99.9 ha fornito risultati generalmente più robusti, risultando meno influenzato dalla presenza di punti isolati nella porzione apicale della chioma. Tale comportamento è coerente con quanto riportato in letteratura, dove l'impiego di percentili elevati viene indicato come una soluzione efficace per ridurre l'effetto di outlier e anomalie presenti nelle nuvole di punti [18; 19].

Relativamente alle misure dell'altezza totale su immagini stereoscopiche, nonostante siano state effettuate dallo stesso operatore allo scopo di ridurre la variabilità associata a differenti criteri interpretativi, la determinazione dell'altezza degli alberi si è rivelata complessa. Diversi studi hanno evidenziato come l'individuazione dell'apice della chioma e della base del fusto rappresentino una delle principali fonti di incertezza nelle misure fotogrammetriche delle altezze arboree; piccole differenze nell'interpretazione della struttura tridimensionale della chioma possono quindi tradursi in errori dell'ordine di alcuni decimetri o, nei casi più complessi, superiori al metro [20; 21].

Le altezze derivate dalle nuvole di punti ottenute mediante COLMAP hanno mostrato una maggiore dispersione rispetto a quelle ricavate dal TLS. Una possibile spiegazione è che alle difficoltà nell'individuazione dell'apice della chioma e della base del fusto si aggiungano eventuali incertezze in fase di generazione della nuvola di punti.

Per quanto riguarda la determinazione dell'area di proiezione della chioma, i diversi approcci adottati hanno mostrato differenze talvolta non trascurabili rispetto ai valori di riferimento (AS), legate alle modalità con cui viene rappresentato il contorno della chioma (vedi Tab. 2).

Tabella 2. Misure dell'area della chioma (m^2) ottenute con i diversi metodi a confronto.

		Misure di campo			Misure da nuvola di punti		
ID albero	AS	RQM	STRI	PCHIP	STRI	PCHIP	AUIJ
LA1	83.4	79.1	70.3	79.2	74.7	83.5	76.3
LA 2	36.4	32.2	27.5	31.9	34.4	39.5	35.4
LA3	71.1	66.3	57.8	66.7	61.7	71.4	66.5
LA4	59.4	52.4	44.2	50.5	54.8	61.7	56.5
LA5	50.5	36.6	31.5	35.4	45.5	50.9	48.2
LA6	65.7	64.6	57.9	64.7	65.6	72.9	62.5
LA7	77.9	71.6	62.2	69.2	73.6	81.4	74.4
LA8	38.3	29.2	25.5	29.1	31.7	36.0	36.9
LA9	54.4	55.5	47.0	56.5	49.3	58.2	51.9
LA10	65.8	53.4	47.4	52.4	59.3	65.9	62.5
LA11	45.8	38.1	33.5	37.8	36.9	41.6	42.2
LA12	61.5	42.2	36.4	40.3	54.7	60.6	58.4
AR13	41.7	28.9	24.9	28.6	34.7	38.3	40.4
ACR1	78.2	71.4	63.4	71.5	69.0	78.3	77.8
ACM2	159.6	160.5	142.2	159.5	139.2	158.3	157.7
BE3	46.2	43.9	39.1	44.5	42.8	47.9	44.9
FR4	96.5	96.4	85.8	96.8	84.0	95.1	95.0
FR5	64.5	55.8	49.6	56.4	53.4	61.1	62.8
FR6	107.3	103.8	92.1	104.1	97.3	110.1	106.3
BR8	28.5	29.1	25.9	28.9	22.8	25.4	27.7
FA14	79.6	83.9	75.1	84.4	74.0	83.4	77.7
OR15	26.9	22.7	20.4	22.5	24.9	27.6	26.8

Il metodo basato sul raggio quadratico medio è risultato il più vicino ad alpha shape tra quelli che utilizzano le misure manuali dei raggi in campo. Questo comportamento è legato al maggiore peso attribuito ai raggi di ampiezza più elevata, che tendono a compensare eventuali irregolarità locali della chioma.

La procedura basata sulla somma dei triangoli, applicata sia ai raggi misurati in campo che sulla nuvola di punti, oltre a fornire i valori più distanti dal metodo di riferimento, tende sistematicamente a fornire valori inferiori rispetto agli altri approcci, poiché approssima il perimetro della chioma mediante segmenti rettilinei che semplificano la reale forma della proiezione.

L'impiego dell'interpolazione PCHIP ha consentito di ottenere una rappresentazione più continua e realistica del contorno, e di conseguenza valori di area più vicini a quelli calcolati con alpha shape.

I comportamenti degli ultimi due metodi citati sono coerenti con quanto riportato in letteratura [15], dove si evidenziano i vantaggi degli approcci interpolativi nella

rappresentazione di chiome asimmetriche e irregolari rispetto alle tradizionali approssimazioni geometriche.

Le aree ottenute dalle proiezioni TLS elaborate in CloudCompare e ImageJ mostrano nel complesso una buona concordanza con i valori derivati da alpha shape. In particolare, l'elaborazione automatica mediante ImageJ fornisce i risultati più vicini a quelli ottenuti con alpha shape (vedi Fig. 2), suggerendo che anche procedure relativamente semplici possano restituire valori affidabili quando sono disponibili proiezioni della chioma di buona qualità.

Nel complesso, i risultati suggeriscono che le metodologie basate su nuvole di punti tridimensionali consentono una rappresentazione più realistica della geometria delle chiome rispetto alle tradizionali approssimazioni geometriche basate sui raggi. La possibilità di descrivere direttamente la complessità e l'irregolarità della struttura arborea costituisce infatti uno dei principali vantaggi delle tecniche TLS nella caratterizzazione morfologica delle chiome [1; 2].

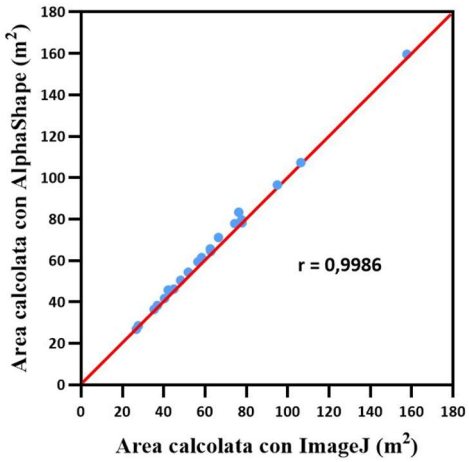

Fig. 2. Confronto fra AlphaShape e ImageJ nel calcolo dell'area di proiezione della chioma.

7. Discussione e conclusioni

Le finalità di questo test preliminare sono state: verificare l'idoneità e l'efficacia del TLS (Terrestrial Laser Scanning) per la ricostruzione tridimensionale di alberi forestali cresciuti a chioma libera; valutare l'affidabilità delle misure ottenute mediante tecniche tradizionali, nelle situazioni in cui il TLS risulti difficilmente utilizzabile; esplorare il potenziale informativo derivante dall'integrazione tra rilievi terrestri e dati ottenuti da immagini stereoscopiche aeree.

I risultati ottenuti, sia per l'altezza totale che per l'area di insidenza della chioma, confermano che il TLS rappresenta la tecnica più completa tra quelle considerate. La possibilità di acquisire nuvole di punti tridimensionali ad elevata densità consente infatti una descrizione dettagliata dell'architettura dell'albero e la stima di numerosi parametri strutturali difficilmente misurabili con i metodi convenzionali confermando che il TLS rappresenta uno degli strumenti più promettenti per lo studio della struttura arborea forestale [22; 23].

Le misure eseguite manualmente con ERDAS IMAGINE sulle restituzioni stereoscopiche di immagini aeree, sebbene possano fornire utili informazioni sull'altezza di singoli alberi, richiedono operatori particolarmente addestrati e possono comportare importante stanchezza visiva con conseguenti limitazioni alla durata delle sessioni di lavoro.

I valori di altezza ottenuti mediante COLMAP sono stati invece meno soddisfacenti. Sebbene il software consenta di generare nuvole di punti tridimensionali attraverso procedure open source ampiamente automatizzabili, le ricostruzioni ottenute hanno evidenziato errori sistematici e una minore accuratezza delle stime.

Le misure tradizionali effettuate in campo, in particolare se abbinate al corretto metodo di calcolo dell'area di chioma, hanno mostrato un buon livello di affidabilità e rimangono uno strumento fondamentale nelle attività operative e inventariali. Pur fornendo una rappresentazione semplificata della struttura della chioma, esse richiedono strumentazione relativamente economica, metodologie consolidate e tempi di elaborazione contenuti. In contesti caratterizzati da elevata pendenza, vegetazione fitta, difficoltà logistiche o limitata accessibilità, tali approcci possono pertanto rappresentare una soluzione alternativa all'uso del TLS efficiente e facilmente applicabile.

Riferimenti bibliografici

1. Pretzsch H., Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands. Forest Ecology and Management, 327, 251-264 (2014)
2. Disney M., Terrestrial LiDAR: a three-dimensional revolution in how we look at trees. New Phytologist, 222, 1736-1741 (2019)
3. Åkerblom M., Kaitaniemi P., Terrestrial laser scanning: a new standard of forest measuring and modelling? Annals of Botany, 128(6), 653-662 (2021)
4. Gollob C., Ritter T., Nothdurft A., Forest inventory with long range and high-speed personal laser scanning (PLS) and SLAM technology. Remote Sensing 12(9), Article 1509 (2020). https://doi.org/10.3390/rs12091509
5. XGRIDS, 2026 – LixelStudio (versione 4.0.1.2) [proprietary software]. Shenzhen, China. https://xgrids.com/
6. CloudCompare (versione 2.13.2) [GPL software]. (2024). http://www.cloudcompare.org/
7. Carlos C., Ordóñez C., López-Sánchez C. A., Armesto J., Automatic dendrometry: Tree detection, tree height and diameter estimation using terrestrial laser scanning, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 69, 2018, 164-174, ISSN 1569-8432 (2018)

8. Prendes C., Cabo C., Ordoñez C., Majada J., & Canga, E. An algorithm for the automatic parametrization of wood volume equations from Terrestrial Laser Scanning point clouds: application in Pinus pinaster. GIScience & Remote Sensing, 58(7), 1130–1150 (2021).
9. Zhang et al., An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation, Remote Sensing, 8(6), 501 (2016)
10. Schneider C., Rasband W. & Eliceiri K. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods 9, 671–675 (2012). https://doi.org/10.1038/nmeth.2089
11. Hexagon AB, 2023 – ERDAS IMAGINE (versione 16.8.0 Build 2100) [proprietary software]. Stockholm, Sweden.
12. Schönberger J. L. and Frahm J.M., "Structure-from-Motion Revisited," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 4104-4113, (2016). https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.445.
13. Schönberger J.L., Zheng E., Frahm J.M., Pollefeys, M. Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. In: Leibe, B., Matas, J., Sebe, N., Welling, M. (eds) Computer Vision – ECCV 2016 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 9907, pp. 501-518). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46487-9_31
14. Pan L., Baráth D., Pollefeys M., Schönberger J.L. Global Structure-from-Motion Revisited. In: Leonardis, A., Ricci, E., Roth, S., Russakovsky, O., Sattler, T., Varol, G. (eds) Computer Vision – ECCV 2024. ECCV 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 15098. Springer, Cham. (2025). https://doi.org/10.1007/978-3-031-73661-2_4
15. Zhang M., Bi H., Jin X., McLean M. A new method of calculating crown projection area and its comparative accuracy with conventional calculations for asymmetric tree crowns. Journal of Forestry Research, 35, 79-92, (2024).
16. Gillies S., van der Wel C., Van den Bossche J., Taves M. W., Arnott J., Ward, B. C., & others. Shapely (Version 2.1.1). (2025).
17. Panagiotis Zestanakis, GitHub - panosz/alpha_shapes: A Python library for working with alpha shapes (2023). https://github.com/panosz/alpha_shapes
18. St-Onge B., Jumelet J., Cobello M., Véga C. (2004). Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. Canadian Journal of Forest Research, 34, 2122-2130, (2023).
19. Krause S., Sanders T.G.M., Mund J.P., Greve K. UAV-Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring. Remote Sensing, 11, Article 758, (2019).
20. Wasser L., Day R., Chasmer L., Taylor A. Influence of Vegetation Structure on Lidar-derived Canopy Height and Fractional Cover in Forested Riparian Buffers During Leaf-Off and Leaf-On Conditions. PLoS ONE, 8(1), Article e54776, (2013).
21. Olofsson K., Holmgren J., Olsson H. Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm. Remote Sensing, 6, 4323-4344, (2014).
22. Arrizza S., Marras S., Ferrara R., Pellizzaro G. Terrestrial Laser Scanning (TLS) for tree structure studies: a review of methods for wood-leaf classifications from 3D point clouds. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 36, Article 101364, (2024).
23. Wardius Y., Hein S. Terrestrial laser scanning vs. manual methods for assessing complex forest stand structure: a comparative analysis on planter forests. Eur J Forest Res 143, 635-649, (2024).