Applicazione in ambito urbano di metodologie per il censimento forestale da nuvole di punti

Pietro Lombardo[1][0009-0005-3810-9663], Reyhaneh Zeynali [1][0009-0000-0840-7073], Anna Forte [1][0009-0008-8300-9057], Gabriele Bitelli [1][0000-0002-6118-6000]

[1]Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM, (pietro.lombardo4, anna.forte3, reyhaneh.zeynali2, gabriele.bitelli)@unibo.it

Parole chiave: SLAM, Censimento forestale, ITD

ABSTRACT. Lo studio valuta una procedura semi-automatica per la stima di parametri geometrici impiegati in ambito forestale, a partire da nuvole di punti ottenute tramite rilievo SLAM. La metodologia è stata testata nel parco della Scuola di Ingegneria e Architettura dell'Università di Bologna. I risultati sono stati confrontati con un sottocampione rilevato mediante tecniche convenzionali, con un errore medio assoluto di 1.9 cm e un'elevata correlazione (r = 0.99), mostrando l'efficacia della procedura.

1. INTRODUZIONE

Gli inventari forestali tradizionali, basati su metodiche quali il cavallettamento dendrometrico e la misura dell'altezza tramite clinometro, garantiscono buona accuratezza ma comportano tempistiche elevate e una alta intensità di manodopera. In questo contesto, le tecnologie di Mobile Laser Scanning (MLS) basate su algoritmi SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) rappresentano un'opportunità promettente poiché consentono di acquisire dense nuvole di punti tridimensionali con un singolo operatore in pochi minuti, ma la loro utilità per l'inventario dipende dalla disponibilità di procedure affidabili per l'estrazione automatica o semi-automatica dei parametri caratteristici delle alberature [1]. In questo studio è stata valutata l'accuratezza nella stima del Diameter at Breast Height (DBH) di una procedura sviluppata in R a partire dal pacchetto TreeX [2], ottimizzato al fine di renderlo più facilmente adattabile alle caratteristiche dell'area di studio.

I dati rilevati mediante MLS ricoprono un ruolo innovativo nelle procedure di Individual Tree Detection (ITD) e rappresentano uno strumento fondamentale per il miglioramento della gestione del verde urbano e forestale, fornendo dati spaziali accurati a livello centimetrico, dettagliati e georeferenziati. Tale soluzione consente di superare la scarsità di copertura satellitare per il posizionamento GNSS (Global Navigation Satellite System) legata alla vegetazione fitta all'interno di foreste o in prossimità di elevate strutture urbane [3, 4], soprattutto se il rilievo dinamico è inquadrato in un sistema di riferimento assoluto mediante punti di controllo stabiliti al di fuori dell'area di scarsa copertura; inoltre, l'impiego di MLS potrebbe favorire l'ITD non solo all'interno di aree forestali ma anche in contesti urbani, dove sono presenti alberi di diversa età, forma e chiome con geometrie complesse che si sovrappongono tra di loro o con le infrastrutture adiacenti.

2. AREA DI STUDIO

Il rilievo è stato condotto nel parco della Scuola di Ingegneria e Architettura dell'Università di Bologna in Viale del Risorgimento, Bologna. L'area di studio, di estensione pari a circa 0.56 ha, ospita un popolamento arboreo caratterizzato da conifere di cui cedri, del libano, atlantico e deodara e da latifoglie quali ginkgo aceri e altre specie ornamentali. L'eterogeneità delle specie presenti comporta una marcata variazione delle dimensioni dei fusti da stimare con valori del DBH che risultano compresi tra 24 e 127 cm. Tale variabilità, unita alla presenza di

esemplari a portamento irregolare e di fusti talvolta inclinati, rende il sito un caso di studio rappresentativo delle condizioni tipiche sia nel contesto urbano sia in quello forestale.

Come riferimento per la validazione sono state considerate 34 alberature presenti nell'area di studio, inventariate tramite rilievo manuale. La fig. 1 riporta l'inquadramento del sito.

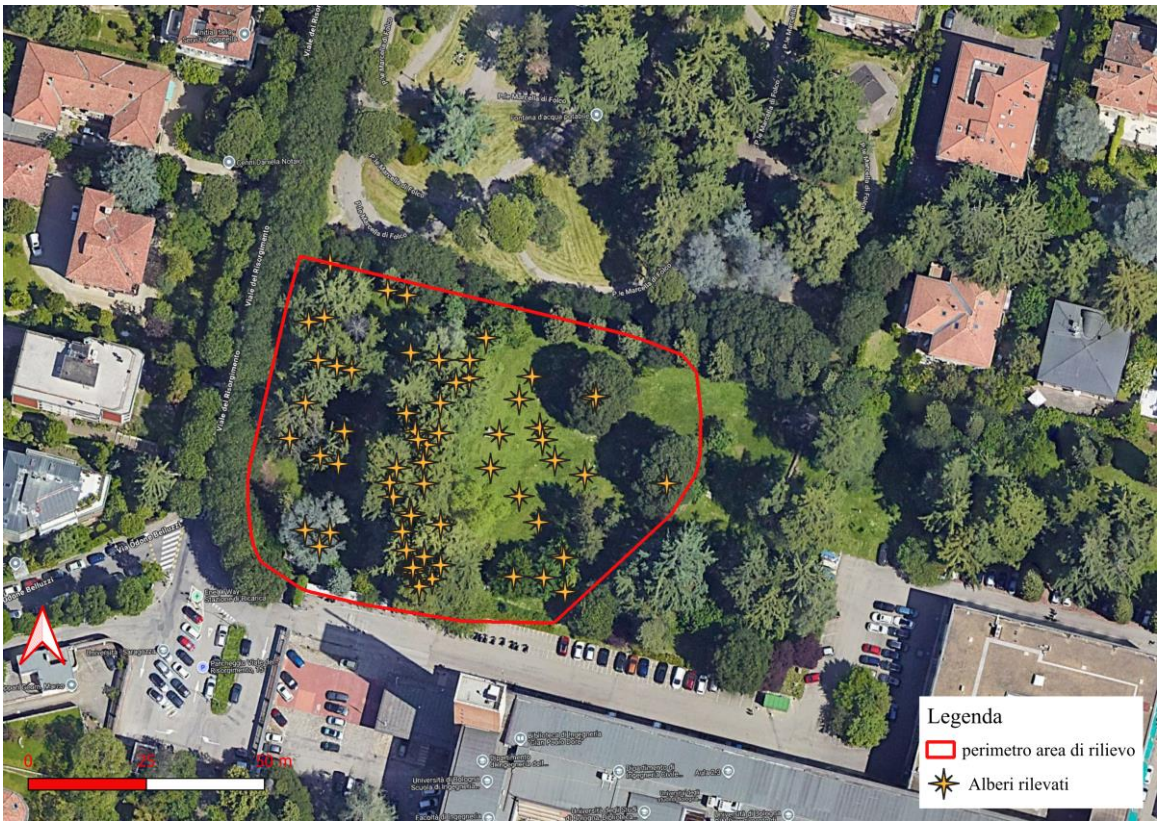

Fig. 1. L'immagine mostra l'area di studio e riporta la posizione degli alberi stimata con una metodologia automatizzata. Inquadramento geografico su base cartografica Google Hybrid (©Google)

3. METODOLOGIE DI ANALISI E VALIDAZIONE

La procedura adottata si articola in tre fasi: l'elaborazione della nuvola di punti per l'estrazione automatizzata del DBH, il rilievo manuale in campo degli alberi di maggiori dimensioni utilizzati come riferimento e il confronto statistico tra le due serie di misure. L'obiettivo è quantificare l'accuratezza della stima mediante procedimenti di calcolo semi-automatici rispetto al dato acquisito con tecniche convenzionali, assunto come ground truth. Le elaborazioni sono state condotte in ambiente R a partire dalla nuvola acquisita con uno scanner SLAM Stonex X120GO [5].

3.1 ELABORAZIONE DATO LiDAR E STIMA DEL DBH

Il dato LiDAR ricavato dal rilievo SLAM, dopo l'elaborazione con il software proprietario GoPost, è stato processato in ambiente R per estrarre, in modalità semi-automatica, la posizione e le caratteristiche dendrometriche dei fusti. Tale metodologia integra il pacchetto di comandi TreeX con una fase di clustering implementata in modo esplicito ed interamente regolabile. In una prima fase, il pacchetto di comandi TreeX esegue una segmentazione preliminare della nuvola di punti, restituendo una clusterizzazione iniziale attorno ai

punti in cui sono presenti i fusti; il risultato di questo passaggio costituisce l'input per l'elaborazione successiva. Il raffinamento della segmentazione preliminare è affidato all'algoritmo di clustering a densità DBSCAN [6]. In tale fase, il raggio di ricerca non è imposto a priori con un valore fisso, ma viene stimato in modo adattivo a partire dalla distribuzione delle distanze tra punti vicini, così da adeguarsi automaticamente alla densità e alla spaziatura effettive della nuvola analizzata; ciò rende la procedura facilmente trasferibile a popolazioni e contesti differenti, evitando lunghi processi di ricalibrazione manuale, ma garantendo un controllo iniziale sui parametri considerati. Il clustering è articolato in due fasi: una prima individuazione dei soli nuclei densi, corrispondenti al corpo centrale dei fusti, seguita da una fase di espansione in cui i punti isolati vengono assegnati al nucleo più prossimo entro una distanza limite. Tale procedura consente di bilanciare la completezza del rilievo con il contenimento dei falsi positivi.

Ciascun cluster identificato viene valutato in funzione della forma della distribuzione planimetrica dei punti definendo un indice di anisotropia, derivato dagli autovalori della matrice di covarianza: i cluster marcatamente allungati, di conseguenza non riconducibili alla sezione di un fusto di albero, vengono scartati. Sui cluster restanti il diametro è stimato interpolando una circonferenza sui punti appartenenti alla sezione con il metodo di Pratt [7, 8], assumendo il DBH pari al doppio del raggio stimato a una quota da terra pari a 1.3 m. In conclusione, viene eseguito un ulteriore filtraggio in funzione del numero di punti e del valore del diametro risultato al fine di escludere eventuali output non compatibili con un fusto reale. Per ogni albero individuato vengono riportati la posizione, il DBH, il numero di punti e l'indice di anisotropia, grandezze utili come indicatori della qualità della stima.

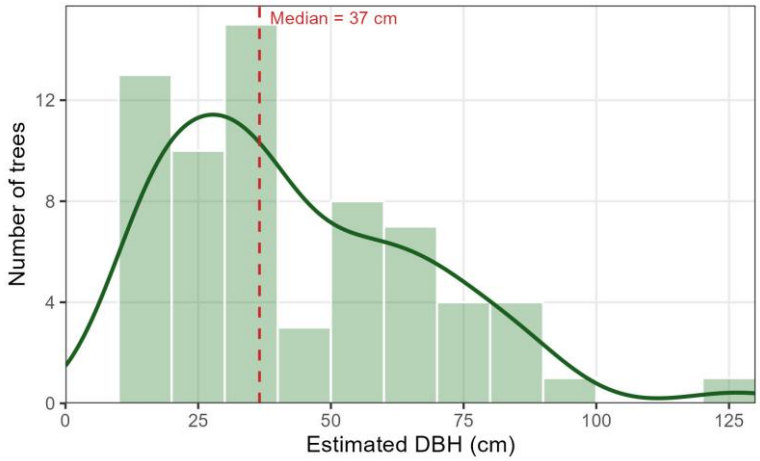

Fig. 2. Distribuzione dei DBH stimati per tutti gli alberi individuati (n = 66). Le barre indicano il numero di alberi per classe di 10 cm, la linea continua la densità di Kernel e la linea tratteggiata il valore mediano (37 cm). Si noti che, in questa circostanza, i fusti policormici sono stati considerati come singoli individui al fine di ottenere una statistica completa sui diametri stimati.

3.2 RILIEVO DI VALIDAZIONE IN CAMPO

Come riferimento per la validazione è stato eseguito un rilievo dendrometrico manuale di 34 alberature presenti all'interno del parco, misurate ad una quota da terra pari a 1.30 m (corrispondente all'altezza indicata come riferimento per il DBH) con cavalletto dendrometrico e cordella metrica, con un'incertezza stimata di circa 2 cm. Il campione, pur non comprendendo l'intera popolazione, è stato selezionato in modo da risultare rappresentativo per dimensioni e specie. Sono stati privilegiati gli esemplari più agevolmente misurabili dagli operatori, ovvero

quelli privi di ostruzioni alla base, come arbusti e vegetazione bassa, che avrebbero ostacolato l'accesso al fusto e la corretta misurazione del diametro. Dal rilievo manuale sono stati esclusi gli esemplari policormici con più di due fusti, per i quali la misura tradizionale del DBH risulta ambigua. Sono stati tuttavia misurati due casi di alberi a doppio fusto policormico, così da disporre comunque di un campione di confronto anche per questa casistica; di conseguenza il confronto riguarda un totale di 36 individui.

Per quanto riguarda la validazione delle coordinate dei centri dei fusti, durante il rilievo SLAM è stato individuato, in corrispondenza di ciascun albero, un punto caratteristico in modo manuale, posto a circa 1 metro dal fusto. Questi punti forniscono, per ogni esemplare, un riscontro di posizione che consente di verificare visivamente che la metodologia di analisi automatizzata degli alberi riconosca correttamente gli alberi effettivamente rilevabili.

Per l'identificazione degli esemplari si è fatto riferimento ai numeri riportati sui cartellini identificativi apposti dal Comune di Bologna sulle alberature del parco. Tale numerazione, fotografata durante l'attività di rilievo nella fase di definizione dei punti caratteristici, è stata utilizzata come identificativo univoco per ciascun albero, al fine di facilitare l'accoppiamento e il confronto tra il dataset manuale e quello ottenuto in ambiente R.

3.3 METRICHE DI CONFRONTO

L'accuratezza della stima è stata valutata confrontando, albero per albero, il DBH stimato con quello misurato in campo. Sono stati calcolati l'errore medio assoluto (MAE), il bias medio – differenza media tra valore stimato e misurato – e il coefficiente di correlazione di Pearson (r). É stata inoltre verificata l'eventuale dipendenza dell'errore dalla dimensione del fusto, analizzando la distribuzione dei residui in funzione del diametro. Come indicato nel sottoparagrafo precedente, l'accoppiamento delle due serie si basa sul cartellino identificativo apposto su ciascun albero, limitando il confronto metrico agli esemplari misurati anche manualmente.

4. RISULTATI

Il confronto sui 36 fusti (32 alberi a fusto singolo e 2 esemplari policormici che si biforcano in due fusti ciascuno ad un'altezza dal terreno pari o inferiore a 1.30 m) ha evidenziato un accordo molto elevato tra i valori stimati in ambiente R e il rilievo manuale. Lo scatterplot tra DBH stimato e DBH di riferimento (Fig. 3), ossia i valori misurati in campo con metodologie tradizionali, mostra un ottimo accordo con un coefficiente di correlazione di Pearson di 0.99. L'errore medio assoluto si attesta pari a 1.9 cm, valore che rientra sia nel range di incertezza propria degli strumenti tradizionali sia nella precisione dichiarata dello scanner utilizzato per il rilievo SLAM. Dall'analisi della fig.3, si può comunque evidenziare una minima tendenza a sottostimare in modo sistematico, tendenza resa evidente dal grafico di Bland-Altman (Fig .4) con un bias medio di –1.7 cm. L'unico scarto rilevante (21.8 cm), ben visibile nelle Fig. 3 e 4, ha interessato un albero a singolo fusto caratterizzato da uno sviluppo marcatamente inclinato. Escludendo tale outlier l'errore medio assoluto scende a 1.4 cm (Fig. 5); inoltre, analizzando la regressione dei residui in funzione del DBH (Fig. 6), non si osserva alcuna dipendenza significativa (pendenza = -0.014, $p = 0.20$), a conferma dell'assenza di un bias legato alla dimensione del fusto sull'intero campione.

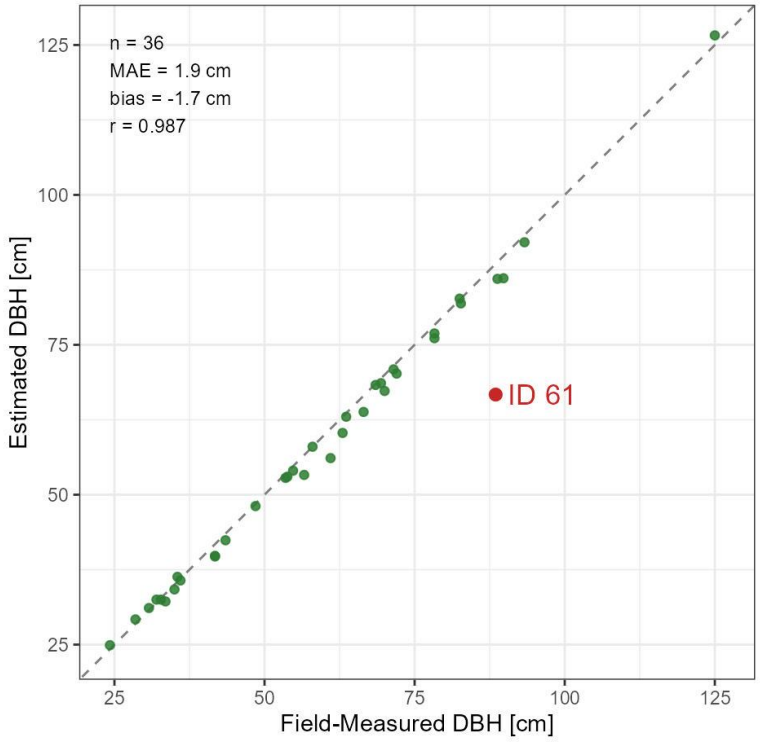

Fig. 3. Confronto tra i valori del DBH stimati con procedura automatizzata e i valori ottenuti dalle misure eseguite in campo con metodi tradizionali (numero individui campionati = 36). La linea tratteggiata rappresenta la retta 1:1 di massimo accordo; i punti si distribuiscono strettamente lungo di essa (r=0.99). In rosso viene evidenziato l'outlier corrispondente ad un fusto marcatamente inclinato

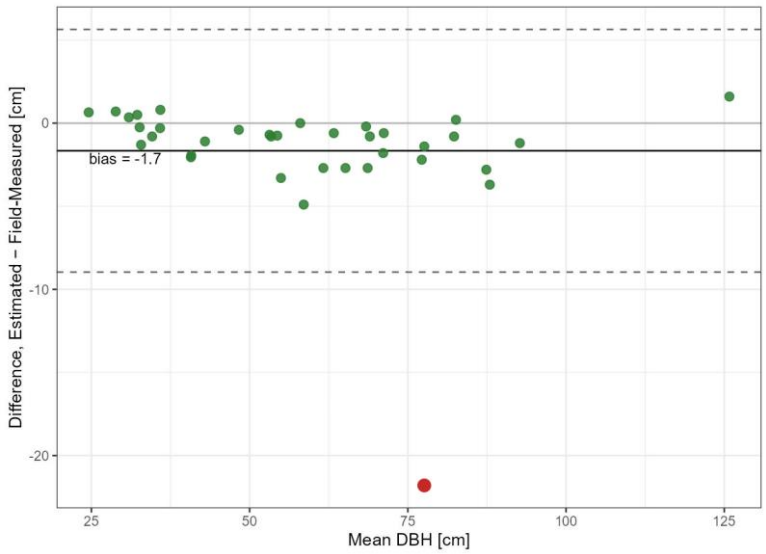

Fig. 4. Grafico di Bland-Altman: differenza tra DBH stimato e misurato in funzione del DBH medio tra i due metodi. La linea continua indica il bias medio (-1.7 cm), le linee tratteggiate i limiti di concordanza (±1.96 deviazioni standard). In rosso è riportato l'outlier.

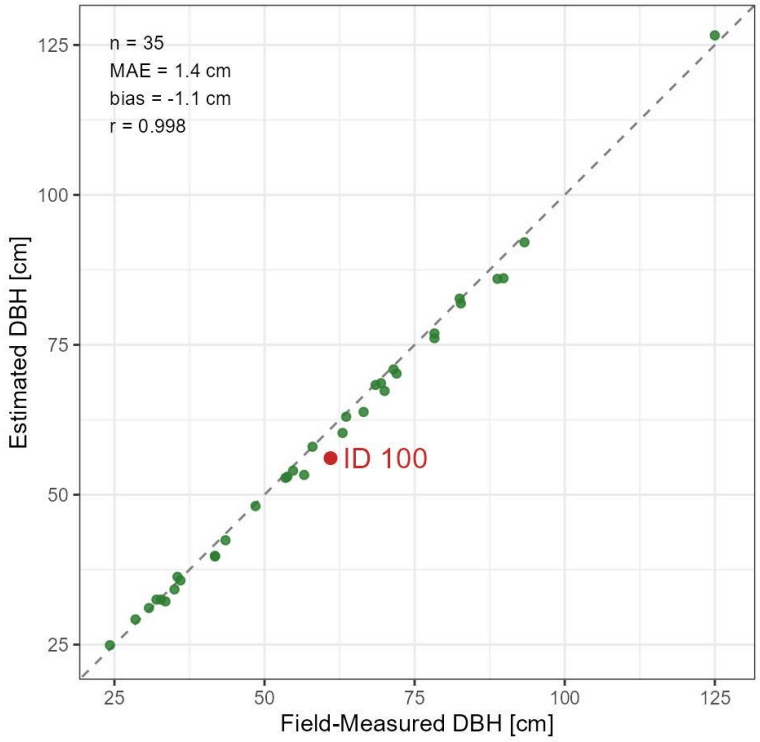

Fig. 5. Confronto tra i valori del DBH stimati con procedura automatizzata e i valori ottenuti dalle misure eseguite in campo con metodi tradizionali (numero individui campionati = 36), escludendo l'outlier (ID=61). La linea tratteggiata rappresenta la retta 1:1 di massimo accordo; i punti si distribuiscono strettamente lungo di essa (r=0.99). In rosso viene evidenziato l'individuo con il massimo scostamento una volta escluso l'ID 61.

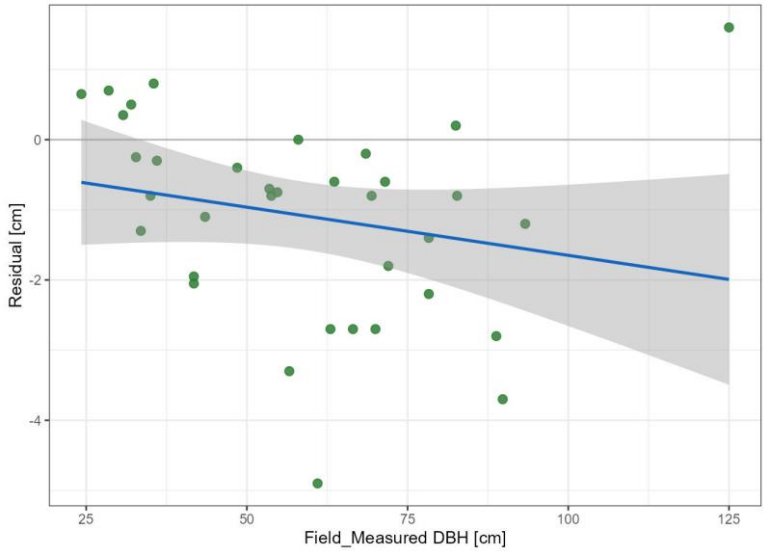

Fig. 6. Il grafico mostra l'andamento dei residui in funzione del DBH misurato in campo preso come riferimento, con esclusione dell'outlier ID 61. La retta blu rappresenta la regressione lineare dei residui e la fascia a contorno il relativo intervallo di confidenza al 95%. L'andamento (pendenza = -0.014, p = 0.20) conferma l'assenza di una distorsione in funzione del fusto.

5. CONCLUSIONE

I risultati confermano che la procedura automatizzata implementata in ambiente R consente di stimare il DBH con un'accuratezza paragonabile a quella dei metodi di analisi tradizionali. L'errore medio assoluto è dello stesso

ordine dell'incertezza tipica legata al cavallettamento manuale e l'elevata correlazione (r = 0.99) indica che la stima è affidabile sull'intero intervallo di diametri della popolazione oggetto di studio: dai fusti più piccoli a quelli di oltre un metro. La minima sottostima sistematica, resa più evidente nel grafico di Bland-Altman (bias di –1.7 cm) è coerente con quanto atteso per metodi basati sull'interpolazione di una circonferenza su una sezione della nuvola: la copertura parziale del fusto e il rumore del dato tendono a produrre un raggio stimato leggermente inferiore. Inoltre, la presenza di un individuo caratterizzato da un portamento obliquo, come nel caso dell'outlier evidenziato nel paragrafo precedente, amplifica la tendenza alla sottostima da parte dell'algoritmo impiegato: quando l'asse del tronco è marcatamente inclinato, la sezione orizzontale interseca il fusto secondo una forma non circolare, di conseguenza il circle fitting restituisce un diametro non rappresentativo con errori superiori alla media. Ciò rappresenta un'evidente direzione di miglioramento di tale metodologia automatizzata al fine di ottenere risultati maggiormente accurati.

Dal punto di vista operativo, la procedura si conferma quindi uno strumento valido per la stima automatizzata del DBH, in grado di ridurre le tempistiche delle attività in campo. Nel caso specifico, il rilievo SLAM ha richiesto circa 20 minuti ed un singolo operatore, mentre le misure manuali circa 2 ore e due operatori. A questi tempi vanno naturalmente sommati quelli di elaborazione dei dati acquisiti che variano in funzione della conoscenza dell'area: è su tale base che si impostano i valori più opportuni dei parametri, così da ottenere il miglior risultato contenendo al contempo i tempi di calcolo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dr. Paolo Ferronato che ha svolto la sua tesi di Laurea Magistrale su questa tematica.

BIBLIOGRAFIA

[1] Fan, Y., Feng, Z., Mannan, A., Khan, T.U., Shen, C., Saeed, S.: Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile phone with RGB-D SLAM. Remote Sensing 10(11), 1845 (2018).

[2] Tockner, A., Gollob, C., Kraßnitzer, R., Ritter, T., Nothdurft, A.: Automatic tree crown segmentation using dense forest point clouds from Personal Laser Scanning (PLS). International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 114, 103025 (2022).

[3] Vandendaele, B., Martin-Ducup, O., Fournier, R.A., Pelletier, G., Lejeune, P.: Mobile laser scanning for estimating tree structural attributes in a temperate hardwood forest. Remote Sensing 14(18), 4522 (2022).

[4] Su, J., Fan, Y., Mannan, A., Wang, S., Long, L., Feng, Z.: Real-time estimation of tree position, tree height, and tree diameter at breast height point, using smartphones based on monocular SLAM. Forests 15(6), 939 (2024).

[5] Stonex S.r.l., «Laser Scanner X120GO – Laser Scanner Portatile 3D», brochure, set. 2022. [Online].

[6] Hahsler, M., Piekenbrock, M., Doran, D.: dbscan: Fast density-based clustering with R. Journal of Statistical Software 91(1), 1–30 (2019).

[7] Gama, J., Chernov, N.: conicfit: Algorithms for fitting circles, ellipses and conics based on the work by Prof. Nikolai Chernov, version 1.0.4. R package (2015).

[8] Chernov, N.: Circular and linear regression: Fitting circles and lines by least squares. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton (2010).