



Perbandingan Survei LiDAR Menggunakan Wahana Drone dan Handheld-SLAM Untuk Analisa *Tree Trunk* dan *Tree Crown*

Comparison of LiDAR Survey Using Drone and Handheld-SLAM for Tree Trunk and Tree Crown Analysis

Putri Rahmadani, Irvan Syahroni, Fauzan Ikhwanda, Karin Eva Mukaromah

PT. Zenit Era Utama Servizio, Indonesia

Penulis Korespondensi: Putri Rahmadani | **Email:** putrirhdmn@gmail.com

Diterima (*Received*): 04/Dec/2024 Direvisi (*Revised*): 09/Dec/2024 Diterima untuk Publikasi (*Accepted*): 28/Dec/2024

ABSTRAK

Rekonstruksi tiga dimensi pohon memiliki peran penting dalam berbagai bidang, seperti studi pengelolaan hutan, ekologi, perhitungan emisi karbon, serta aplikasi perencanaan perkotaan. Namun, metode tradisional yang telah digunakan selama bertahun-tahun umumnya membutuhkan tenaga kerja intensif, memakan waktu lama, dan rentan terhadap kesalahan pengukuran. Untuk mengatasi kendala ini, metode berbasis point cloud mulai digunakan sebagai solusi yang lebih efektif. Point cloud tersebut dapat dihasilkan melalui teknologi LiDAR maupun fotogrametri. Teknologi LiDAR biasanya diintegrasikan dengan drone sebagai wahana untuk pengambilan data. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan LiDAR berbasis handheld-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) telah menjadi alternatif metode survei modern. Handheld-SLAM LiDAR adalah perangkat LiDAR yang dilengkapi dengan teknologi SLAM, memungkinkan pemindaian tiga dimensi secara real-time. Penelitian ini akan membandingkan dua metode akuisisi data, yaitu menggunakan drone LiDAR dan handheld-SLAM LiDAR, yang akan diaplikasikan untuk analisis karakteristik pohon, seperti bentuk tajuk (*tree crown*) dan batang pohon (*tree trunk*). Hipotesis awal penelitian ini adalah bahwa sensor LiDAR pada drone memiliki keterbatasan dalam merekonstruksi bentuk tiga dimensi pohon, khususnya pada bagian batang, karena akuisisi data yang dilakukan dari atas. Dengan adanya teknologi handheld-SLAM LiDAR, diharapkan keterbatasan tersebut dapat diatasi, sehingga menghasilkan pemodelan pohon yang lebih akurat. Lokasi survei penelitian ini adalah sebagian kecil area Taman Hutan Raya di Bandung, dengan tutupan lahan yang terdiri dari pepohonan. Akuisisi data dilakukan menggunakan dua perangkat LiDAR: handheld LiDAR SATLAB Lixel X1 dan DJI Zenmuse L1 yang diterbangkan menggunakan DJI Matrice 300RTK. Data yang diperoleh dari kedua alat ini kemudian diolah menggunakan perangkat lunak pengolah point cloud untuk menghasilkan data bebas noise. Hasil pengolahan ini digunakan untuk menganalisis karakteristik pohon, termasuk *tree crown* dan *tree trunk*. Penelitian ini diharapkan dapat menyimpulkan perbandingan efektivitas kedua metode akuisisi LiDAR dalam merekonstruksi bentuk nyata pohon, serta menunjukkan sejauh mana data dari kedua metode tersebut dapat diintegrasikan untuk menghasilkan model pohon yang lebih akurat dan komprehensif.

Kata Kunci: Handheld LiDAR, Drone LiDAR, Efektif, Tree Crown, Tree Trunk

ABSTRACT

The three-dimensional reconstruction of trees plays a crucial role in various fields, such as forest management studies, ecology, carbon emission calculations, and urban planning applications. However, traditional methods that have been used for years are generally labor-intensive, time-consuming, and prone to measurement errors. To overcome these challenges, point cloud-based methods have begun to be used as a more effective solution. These point clouds can be generated through LiDAR or photogrammetry technology. LiDAR technology is usually integrated with drones as a platform for data acquisition. However, in recent years, the use of handheld-SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) based LiDAR has become an alternative modern survey method. Handheld-SLAM LiDAR is a LiDAR device equipped with SLAM technology, enabling real-time three-dimensional scanning. This study will compare two data acquisition methods, using drone LiDAR and handheld-SLAM LiDAR, which will be applied to analyze tree characteristics, such as tree crown and tree trunk. The initial hypothesis of this research is that LiDAR sensors on drones have limitations in reconstructing the three-dimensional shape of trees, especially the trunk, due to data acquisition from above. With the handheld-SLAM LiDAR technology, it is expected that these limitations can be overcome, resulting in more accurate tree modeling. The survey location for this study is a small part of Taman Hutan Raya in Bandung, with land cover consisting of trees. Data acquisition was carried out using two LiDAR devices: the handheld SATLAB Lixel X1 and the DJI Zenmuse L1 flown using the DJI Matrice 300RTK. The data obtained from both tools were then processed using point cloud processing software to produce noise-

free data. The processed results are used to analyze tree characteristics, including tree crown and tree trunk. This research is expected to conclude the comparative effectiveness of the two LiDAR acquisition methods in reconstructing the true shape of trees and demonstrate to what extent the data from both methods can be integrated to produce a more accurate and comprehensive tree model.

Keywords: Handheld LiDAR, Drone LiDAR, Effectiveness, Tree Crown, Tree Trunk

© Author(s) 2024. This is an open access article under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Pemodelan tiga dimensi pohon yang terdiri struktur kayu dan dedaunan sangat diperlukan dalam berbagai bidang, terutama untuk inventarisasi pohon dalam pengelolaan kehutanan, studi ekologi serta perencanaan perkotaan (Goel et al., 1991; Govaerts et al., 1998). Kemampuan untuk memodelkan bentuk tiga dimensi pohon secara akurat membantu peneliti maupun praktisi dalam banyak hal diantaranya; memahami pertumbuhan pohon, distribusi biomassa dan karbon, mengevaluasi perubahan hutan dari waktu ke waktu, serta merencanakan penggunaan lahan yang berkelanjutan di lingkungan perkotaan. Selama bertahun-tahun, inventarisasi pohon di hutan ataupun perkebunan dilakukan dengan metode tradisional, seperti pengukuran manual di lapangan. Proses ini melibatkan pengukuran tinggi pohon, diameter batang, dan estimasi biomassa secara langsung oleh petugas atau tenaga kerja di lokasi. Metode ini membutuhkan tenaga kerja dalam jumlah banyak, membutuhkan waktu yang lama, dan rentan terhadap kesalahan khususnya kesalahan sistematis (Kauffman et al., 2017; Kershaw et al., 2016; Köhl et al., 2006; Kramer et al., 1995). Keterbatasan ini menghambat efisiensi pengelolaan hutan, terutama di area yang luas, karena sulit mendapatkan data yang akurat dan tepat waktu untuk keperluan perencanaan dan konservasi yang memiliki batas waktu tertentu.

Sensor *Light Detection and Ranging* (LiDAR) berpotensi melampaui produktivitas inventarisasi hutan tradisional dengan mengumpulkan informasi dengan akurasi tinggi, resolusi tinggi, dan dalam jangka waktu yang singkat (Bouvier et al., 2015). Sistem LiDAR telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti analisis struktur vertikal hutan (Sumerling, 2011), karakterisasi pohon (Wulder et al., 2023), manajemen kebakaran hutan (Koetz et al., 2008), estimasi volume kayu (Naesset, 1997), bencana longsor (Andaru & Santosa, 2017b). Data yang diperoleh dari LiDAR memungkinkan estimasi atribut tegakan diantaranya; ketinggian pohon, diameter batang, kepadatan, biomassa, volume kayu, serta jenis dan kondisi pohon di area yang luas dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan metodologi lapangan tradisional. Platform yang paling umum digunakan untuk memperoleh data LiDAR adalah platform udara, baik pesawat berawak maupun pesawat udara nirwak (*Unmanned Aerial Vehicle/UAV*), yang memiliki potensi besar dalam menggantikan metode inventarisasi tradisional karena mampu mengumpulkan data dengan

cepat, akurat, dan beresolusi tinggi (Wulder et al., 2012; Bouvier et al., 2015; Andaru & Santosa, 2017a).

UAV yang dilengkapi dengan sensor LiDAR sangat efektif dalam melakukan survei untuk kebutuhan data di atas kanopi, namun untuk mendapatkan data di bawah kanopi masih diperlukan pengembangan teknologi baru, baik dari segi perangkat keras maupun perangkat lunak pengolahan data (Chisholm et al., 2013). Salah satu inovasi yang semakin populer adalah penggunaan *Handheld-SLAM* LiDAR yang telah diterapkan secara luas salah satunya di bidang kehutanan (Pierzchała et al., 2018). Teknologi ini memungkinkan pengumpulan data yang presisi untuk dimensi, volume, dan porositas pohon, dengan cara yang lebih cepat dan efisien dibandingkan metode pengukuran konvensional (Gollob et al., 2021; Marshall et al., 2023; Tatsumi et al., 2023). Sama dengan UAV LiDAR, keunggulan *Handheld-SLAM* LiDAR terletak pada kemampuannya untuk memindai area yang luas dalam waktu yang relatif singkat, utamanya untuk survei ekstensif di hutan atau wilayah vegetasi yang padat (Marshall et al., 2023).

Dengan ide dasar tersebut maka penelitian ini dilakukan bertujuan untuk membandingkan data dari UAV LiDAR dan *Handheld-SLAM* LiDAR dalam membentuk model tiga dimensi *tree crown* dan *tree trunk*. Kedua metode ini memiliki kelebihan masing-masing dimana UAV LiDAR bisa menjangkau area yang lebih luas, sementara *Handheld-SLAM* LiDAR memberikan detail lebih akurat di area yang lebih kecil. Melalui perbandingan ini, dapat dilihat efektifitas kedua metode tersebut untuk mengidentifikasi pohon dan bagian-bagiannya, sehingga bisa memberikan gambaran yang lebih baik untuk keperluan pemetaan hutan atau penelitian terkait vegetasi.

2. Data dan Metodologi

Bagian ini menjelaskan lokasi penelitian dan metodologi yang digunakan untuk mengumpulkan dan menganalisis data.

2.1. Lokasi

Lokasi pengambilan data untuk penelitian ini adalah Taman Hutan Raya Bandung adalah taman hutan yang terletak di daerah Dago Pakar, Bandung, Jawa Barat. Taman Hutan Raya Bandung (Tahura Bandung) memiliki keanekaragaman tanaman yang signifikan, termasuk berbagai jenis pohon besar seperti kayu putih (*Melaleuca leucadendra*), mahoni (*Swietenia macrophylla*), dan kalimantan (*Dipterocarpus spp.*), yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Taman ini juga menjadi habitat bagi berbagai spesies tanaman endemik yang langka, penting

untuk konservasi keanekaragaman hayati. Selain itu, terdapat banyak tanaman perdu dan herbal yang tumbuh di bawah kanopi pohon, memberikan habitat bagi satwa liar serta mendukung pengobatan tradisional. Vegetasi penutup tanah, seperti rumput, berfungsi untuk mencegah erosi dan mempertahankan kesuburan tanah.

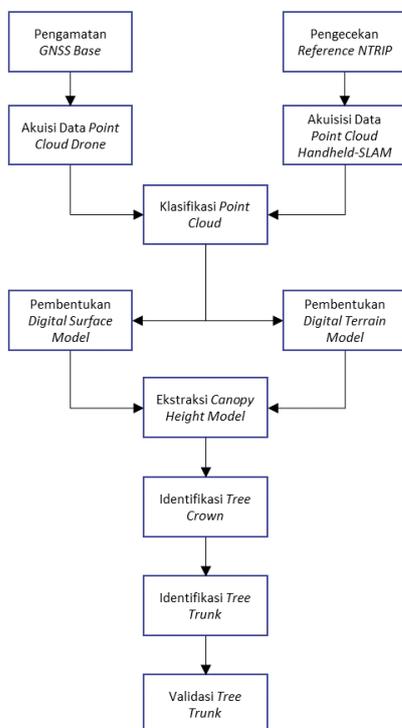


Gambar 1 Area of Interest

Dalam penelitian ini, data yang diambil adalah data *point cloud*. Data *point cloud* ini memungkinkan pengukuran yang akurat dan detail terhadap struktur vegetasi, termasuk tinggi, diameter, dan bentuk pohon. Namun pada penelitian ini, *point cloud* yang diakuisisi hanya akan diproses untuk penggambaran *tree crown* dan penentuan diameter *tree trunk* serta untuk kebutuhan analisa lain terhadap dua informasi tersebut.

2.2. Metodologi

Bagan alur tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2 Alur Metodologi Penelitian

Proses dimulai dengan pengamatan titik yang akan digunakan sebagai *base station* dalam akuisisi data lidar menggunakan DJI Matrice 300 RTK. Titik *base station* ini diberi nama BMTHR yang diamati secara statik selama ± 2 jam dengan referensi titik *Continuously Operating Reference Stations* (CORS) terdekat yaitu CANG (Gambar 3).

		BADAN INFORMASI GEOSPASIAL (BIG) Jl. Jakarta – Bogor Km. 46 Cibinong 16911 Telepon (021) 8758061, PO. BOX 46 CBI Cibinong Bogor Web http://srgi.big.go.id email: srgi@big.go.id		
DESKRIPSI STASIUN CORS				
Kode Stasiun	CANG	Nama Stasiun	Soreang	
Desa/Kelurahan	Pamekaran	Kabupaten/Kota	Badung	
Kecamatan	Soreang	Provinsi	Jawa Barat	
Lintang	-7.021272	Bujur	107.524747	
Uraian lokasi	Pilar terletak di atas atap beton Pos Satpam STO Telkom Soreang, Jl Raya Soreang - Cipatik, belakang kantor pemda			
KOORDINAT DAN LAJU KECEPATAN STASIUN CORS				
Koordinat Kartesian (SRG/2013)		Koordinat Geodetik		
X	-1906485,404 meter	Lintang	7° 16,57850" S	
Y	6037505,243 meter	Bujur	107° 31' 29,08869" E	
Z	-774560,228 meter	Tinggi Elipsoid (h)	745,547 meter	
Kecepatan Pergeseran Kartesian		Kecepatan Pergeseran Toposentrik		
Vx	-0,025 meter/tahun	V utara	-0,009 meter/tahun	
Vy	-0,009 meter/tahun	V timur	0,026 meter/tahun	
Vz	-0,009 meter/tahun	V vertikal	-0,001 meter/tahun	
PERANGKAT				
Receiver	LEICA GR50	Redome	LEIM	
Antena	LEIAR20	Tinggi Antena	0,055	
Tahun Dibangun	2010	Ket. Tinggi Antena	Bottom of Antenna	
Komunikasi Data	ONLINE			
FOTO DAN SKETSA				
Foto Bangunan dan TKG		Sketsa Lokasi		
Tanggal Pembaruan : Kontrol Kualitas oleh Pusat Jaring Kontrol Geodesi dan Geodinamika				

Gambar 3 Deskripsi Titik Referensi Terdekat

Kemudian juga dilakukan pengecekan titik terdekat yang digunakan sebagai titik referensi perangkat *Handheld-SLAM* LiDAR disebabkan alat ini melakukan koreksi posisi data *point cloud* terhadap data posisi dari metode *Real Time Kinematic-Network Transport of via RTCM Internet Protocol* (RTK-NTRIP). Selanjutnya, dilakukan akuisisi data *point cloud* menggunakan UAV dan perangkat *handheld-SLAM* (*Simultaneous Localization and Mapping*) pada *area of interest* yang telah ditentukan dimana pohon-pohon yang dijadikan sample telah diberi tanda terlebih dahulu untuk kebutuhan validasi *tree trunk*. Setelah semua data terkumpul kemudian dilakukan pra-pengolahan data dari masing-masing sumber dengan perangkat lunak yang kompatibel untuk setiap jenis datanya, Masuk kedalam tahap pengolahan, klasifikasi *point cloud* dilakukan untuk memisahkan objek-objek yang terekam diantaranya *ground*, vegetasi, bangunan dan lainnya.

Data yang telah diklasifikasikan ini kemudian digunakan untuk membentuk *Digital Surface Model* (DSM) dan *Digital Terrain Model* (DTM). DSM menggambarkan permukaan atas tanah beserta vegetasi atau objek di atasnya, sementara DTM menampilkan keadaan tanah tanpa vegetasi atau objek lain di atasnya. Dari kedua model tersebut, selanjutnya dilakukan ekstraksi *Canopy Height Model*, yang menggambarkan tinggi vegetasi dari tanah hingga puncak pohon. Semua tahapan pengolahan ini dilakukan pada perangkat lunak MicroStation-Terra Solid.

Tahapan berikutnya adalah identifikasi *tree crown* atau tajuk pohon berdasarkan ketinggian kanopi yang diperoleh, data yang digunakan adalah gabungan kedua data *point cloud*. Setelah itu, dilakukan identifikasi *tree trunk* atau batang pohon dengan data hanya dari *handheld-SLAM* LiDAR yang akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian Hasil dan Pembahasan. Terakhir, hasil identifikasi *tree trunk* ini divalidasi untuk memastikan akurasi data yang diperoleh dengan data pengukuran manual pada pohon yang sama.

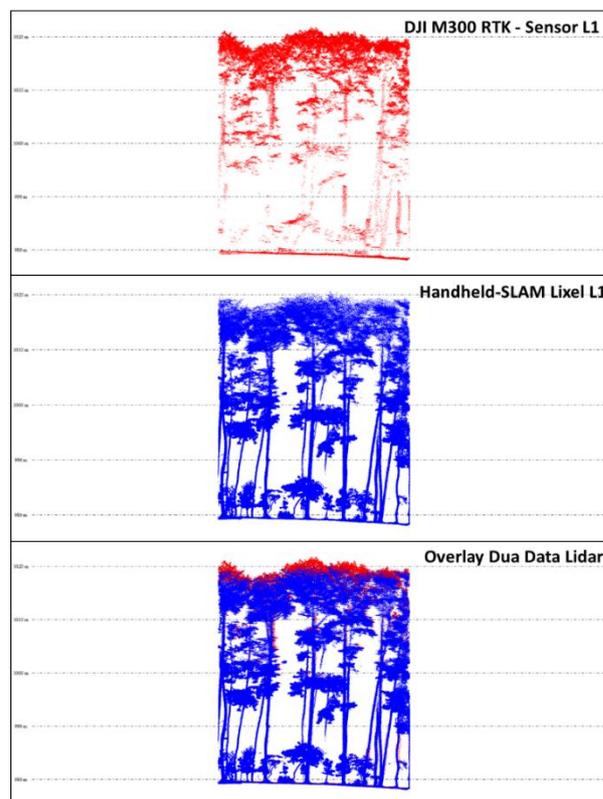
3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, akan disajikan hasil-hasil yang diperoleh dari penerapan metode yang telah diusulkan pada bagian sebelumnya. Selain itu, akan disajikan analisis mengenai hasil utama dari setiap pendekatan.

3.1. Data *Point Cloud*

Data *point cloud* diakuisisi dengan dua metoda yaitu menggunakan DJI Matrice 300 RTK dan Sensor L1 dilakukan pada ketinggian 75 m, *sidelap* 60%, *overlap* 70%, *point density* 505 point/m dan *Ground Sample Distance* (GSD) 2.05 cm/pixel dan menggunakan *Handheld-SLAM* LiDAR Lixel L1 dengan mode akuisisi adalah *outdoor mode*. Hasil akuisisi masing-masing wahana ditampilkan pada Gambar 3.

Dari gambar yang ditampilkan menunjukkan hasil pemetaan menggunakan dua jenis sensor LiDAR dengan visualisasi berupa *point clouds*. Pada bagian pertama, disajikan data yang direkam oleh sensor L1 pada drone DJI M300 RTK (berwarna merah) menunjukkan banyak detail pada bagian kanopi pohon dan *ground*, namun kurang mampu merekam data bagian bawah pohon utamanya batang pohon sehingga tidak dapat secara sempurna membentuk model tiga dimensi satu pohon yang utuh. Di bagian kedua, disajikan *point cloud* dari *handheld-SLAM* Lixel L1 (berwarna biru) dimana lebih mampu menangkap detail dari dasar pohon hingga ke kanopi sehingga model tiga dimensi dari bagian-bagian pohon dapat dilihat secara utuh. Kemudian, pada bagian ketiga, disajikan gambaran yang terbentuk jika kedua data di-*overlay*, dapat dilihat bahwa ternyata *Handheld-SLAM* LiDAR memberikan gambaran kanopi yang lebih rendah, hal ini disebabkan pengamatan yang dilakukan dari bawah. Selisih beda tinggi kanopi antara akuisi data *point cloud* dari atas (menggunakan UAV) dan dari bawah (menggunakan *Handheld-SLAM*) mencapai 50 cm.



Gambar 3 Hasil Akuisisi Data LiDAR

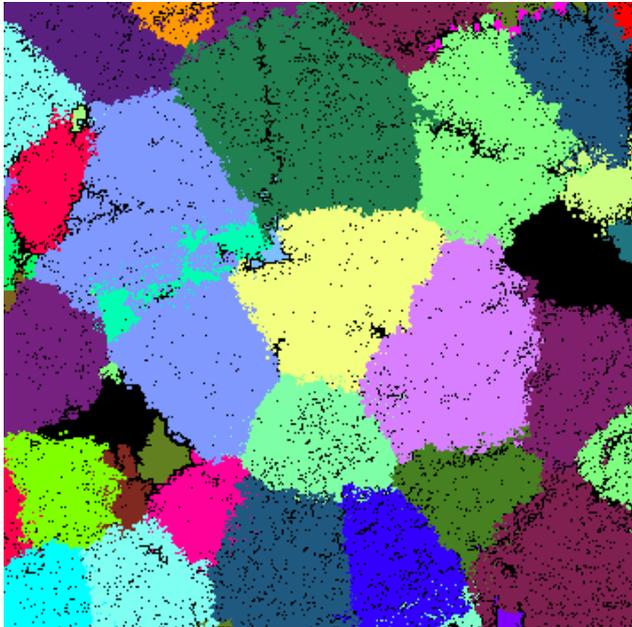
Gabungan kedua data LiDAR memperlihatkan bahwa *point cloud* dari UAV dan *handheld-SLAM* saling melengkapi; data dari drone lebih unggul dalam menangkap detail pada kanopi, sementara *handheld-SLAM* lebih baik dalam merekam batang dan bagian bawah vegetasi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua teknologi LiDAR ini dapat memberikan pemetaan yang lebih komprehensif dan akurat untuk lingkungan vegetasi.

3.2. Identifikasi *Tree Crown* dan *Tree Trunk*

Penentuan *tree crown* dilakukan pada perangkat lunak MicroStation-TerraSolid untuk melakukan filtrasi data LiDAR, identifikasi *ground point*, dan pengelompokan titik vegetasi menggunakan metode *nearest point* seperti pada Gambar 4. Metode ini membentuk model pohon berdasarkan kedekatan satu sama lain dalam menyusun bentuk batang dan kanopi sehingga menggambarkan satu pohon utuh yang disimbolisasi dengan warna yang berbeda untuk menggambarkan kuantitas pohon pada area penelitian. Data yang digunakan adalah hasil integrasi kedua data *point cloud* disebabkan gabungan kedua data ini mampu menggambarkan kanopi pohon secara optimal. Kuantitas *point cloud* menjadi yang lebih banyak dan lebih rapat karena pengambilan data dari atas dan dari bawah.

Setelah semua *point cloud* dikelompokkan membentuk pohon-pohon utuh kemudian dilakukan identifikasi *tree trunk* pada beberapa pohon yang sebelumnya telah ditandai saat melakukan akuisisi data seperti pada Gambar 5. Terdapat lima pohon yang diberi tanda untuk

diidentifikasi pada data *point cloud* dan yang telah dilakukan pengukuran manual pada pohon tersebut. Setiap pohon ditandai pada tiga titik ketinggian yang berbeda-beda. Data yang digunakan adalah *point cloud* dari *Handheld-SLAM* LiDAR karena seperti pada Gambar 3 data *point cloud* dari UAV tidak mampu menggambarkan batang pohon secara utuh.



Gambar 4. Pengelompokan *Point Cloud* yang Membentuk *Tree Crown*



Gambar 5. Pohon yang Diberi Tanda untuk Validasi *Tree Trunk*

3.2. Validasi *Tree Trunk*

Validasi *tree trunk* menggunakan data diameter pohon yang diukur secara manual disetiap pohon pada posisi yang telah diberi tanda. Kemudian pada data diameter dari *point cloud* dilakukan juga pada posisi yang diberi tanda. Berikut adalah hasil perbandingan ukuran diameter pohon yang disajikan pada Tabel 1.

Pada tingkat kepercayaan 95%, hasil perhitungan menunjukkan bahwa interval kepercayaan berada di antara 0.352 cm dan 0.782 cm. Hal ini berarti bahwa jika pengukuran atau pengujian yang sama dilakukan berulang kali pada sampel-sampel berbeda dari populasi yang sama, maka sekitar 95% dari semua interval kepercayaan yang

dihasilkan akan mencakup nilai sebenarnya dari parameter populasi tersebut. Interval ini memberikan informasi tentang ketidakpastian estimasi, di mana batas bawah 0,352 cm menunjukkan perkiraan terendah, dan batas atas 0,782 cm menunjukkan perkiraan tertinggi dari nilai yang sebenarnya. Interval ini didasarkan pada data sampel dan metode statistik yang digunakan, dan karena itu memberikan gambaran yang cukup meyakinkan tentang sejauh mana hasil yang diperoleh dari sampel dapat mencerminkan keadaan populasi yang lebih luas. Dalam uji statistik yang dilakukan, diperoleh p-value sebesar 0,718, yang menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara ukuran yang diukur secara manual dan data yang diperoleh dari metode *handheld-SLAM* LiDAR. Nilai p-value yang tinggi ini mengindikasikan bahwa hipotesis nol, yang menyatakan tidak ada perbedaan yang signifikan antara kedua kelompok data, tidak dapat ditolak. Dengan kata lain, perbedaan yang teramati antara kedua metode pengukuran ini kemungkinan besar disebabkan oleh variasi acak dalam data. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kedua metode pengukuran tersebut memberikan hasil yang cukup sebanding, dan tidak ada alasan untuk beranggapan bahwa salah satu metode lebih baik daripada yang lain berdasarkan analisis ini.

Tabel 1 Tabel Perbandingan Ukuran *Tree Trunk*

Kode	Diameter (cm)		
	Data Ukuran	Data LiDAR	Selisih
Pohon-1A	54.5	54.9	0.4
Pohon-1B	55	55.6	0.6
Pohon-1C	62.5	63.2	0.5
Pohon-2A	87.2	86.6	0.6
Pohon-2B	85	85.2	0.2
Pohon-2C	85.5	85.9	0.4
Pohon-3A	70.9	71.3	0.4
Pohon-3B	69.3	67.7	1.6
Pohon-3C	72	71.6	0.4
Pohon-4A	92.5	93.1	0.6
Pohon-4B	91.5	90.9	0.6
Pohon-4C	91	90.9	0.1
Pohon-5A	128.4	129.7	1.3
Pohon-5B	132.5	132.3	0.2
Pohon-5C	130.5	129.9	0.6

4. Kesimpulan

Setelah menganalisis data *point cloud* yang diakuisisi menggunakan dua metode berbeda yaitu DJI Matrice 300 RTK dengan Sensor L1 dan *Handheld-SLAM* LiDAR Lixel L1 dapat disimpulkan bahwa kedua teknologi ini saling melengkapi dalam pemetaan lingkungan vegetasi. Data dari UAV mampu menangkap detail yang lebih baik pada kanopi pohon, sedangkan *handheld-SLAM* lebih efektif dalam merekam batang dan bagian bawah vegetasi. Kombinasi data *point cloud* dari kedua sumber meningkatkan kuantitas dan kepadatan titik, yang penting dalam identifikasi pohon menyeluruh dan pembentukan individu pohon terutama bagian *tree crown*. Validasi *tree trunk*

dengan pengukuran manual menunjukkan interval kepercayaan antara 0,352 cm dan 0,782 cm, serta p-value sebesar 0,718, yang menegaskan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara data dari pengukuran manual dan data *point cloud* dari *handheld-SLAM*. Untuk beberapa kebutuhan yang kompleks dalam studi pemetaan vegetasi disarankan untuk menggunakan kombinasi kedua metode ini digunakan di masa depan, serta terus mengeksplorasi pengembangan teknik akuisisi data dan analisis untuk meningkatkan akurasi dan efektivitas pemetaan salah satunya pada ukuran *tree crown* yang belum divalidasi pada penelitian ini.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis dengan ini menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam proses penelitian, penulisan, atau penyusunan artikel ini. Semua keputusan yang diambil dalam pengumpulan data, analisis hasil, dan kesimpulan penelitian didasarkan sepenuhnya pada pertimbangan ilmiah yang objektif, tanpa adanya pengaruh dari pihak eksternal, baik itu lembaga, organisasi, maupun individu, yang memiliki kepentingan finansial, politik, atau pribadi. Penulis juga menegaskan bahwa tidak ada keterlibatan sponsor atau pihak lain yang dapat mempengaruhi integritas dan kejujuran akademis dari artikel ini. Dengan demikian, segala informasi yang disajikan di dalam artikel ini adalah independen, transparan, dan bertujuan untuk kemajuan ilmu pengetahuan semata.

6. Referensi

- Andaru, R., & Santosa, P. B. (2017a). Analisis Spasial Bencana Longsor Bukit Telogolele Kabupaten Banjarnegara Menggunakan Data Foto Udara UAV. *Jurnal Nasional Teknologi Terapan (JNTT)*, 1(1), 77. <https://doi.org/10.22146/jntt.34089>
- Andaru, R & Santosa, P. B. (2017b). Analisis Spasial Bencana Longsor Menggunakan Data Foto Udara UAV. *Jurnal Dialog dan Penanggulangan Bencana*, 8(2), 142-150. <https://jdpb.bnpb.go.id/index.php/jurnal/article/view/124/124>
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R.A., & Renaud, J.-P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sens, Environ*, 156, 322-334.
- Chisholm, Ryan ., Cui, Jinqiang, Lum, Shawn K. Y., & Chen, Ben M. (2013). UAV LiDAR for below-canopy forest surveys. *NRC Research Press. J. Unmanned Veh, Cyst* 1, 61-68.
- Goel, N. S., Rozehnal, I., & Thompson, R. L. (1991). A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 36, No. 2, PP. 73-104.
- Gollob, C., Ritter, T., Kraßnitzer, R., Tockner, A., & Nothdurft, A. (2021). Measurement of Forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, 13(16), 3129. <https://doi.org/10.3390/rs13163129>
- Govaerts, Y. M., & Verstraete, M. M. (1998). Raytran: A Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 36, no. 2, pp. 493-505, 1998.
- Kauffman, J.B., Arifanti, V.B., Basuki, I., Kurnianto, S., Novita, N., Murdiyarsa, D., Donato, D.C., & Warren, M.W. (2017). Protocols for the Measurement, Monitoring, and Reporting of Structure, Biomass, Carbon Stocks and Greenhouse Gas Emissions in Tropical Peat Swamp Forests; Center for International Forestry Research (CIFOR): Bogor, Indonesia, 2017.
- Kershaw, J.A., Ducey, M.J., Beers, T.W., & Husch, B. (2016) *Forest Mensuration*. John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK. ISBN 9781118902028.
- Koetz, B., Morsdorf, F., Van der Linden, S., Curt, T. & Allgöwer, B. (2008) *Forest Ecol. Manag*, 256 263
- Köhl, M., Magnussen, S., & Marchetti, M. (2006). *Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multiresource Forest Inventory; Tropical Forestry*. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2006; ISBN 978-3-540-32571-0.
- Kramer, H., & Akça, A. (1995). *Leitfaden zur Waldmesslehre; 5 ed.* Sauerländer, J D: Frankfurt/Main, Germany. ISBN 3793908305.
- Marshall, A., Morrison, R., Jones, B., Triantafillou, S., & Wohl, E. (2023). Handheld Lidar as A Tool for Characterizing Wood-rich River Corridor. *River Research and Applications*. 40:353-364.
- Naesset, E. (1997) *Remote Sens. Environ*. Vol. 61, p. 246.
- Pierzchała, M., Giguère, P., & Astrup, R., (2018). Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, pp. 217-225.
- Sumerling G. (2011). *Lidar analysis in ArcGIS 10 for forestry applications*, vol 1, Adelaide: ESRI Inc, p. 53
- Tatsumi, S., Yamaguchi, K., & Furuya, N. (2023). ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(7), 1603-1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- Wulder, M.A.; White, J.C.; Nelson, R.F.; Næsset, E.; Ørka, H.O.; Coops, N.C.; Hilker, T.; Bater, C.W.; Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sens. Environ*, 121, 196-209.
- Wulder, M. A., Bater, C. W., Coops, N. C., Hilker, T. & White, J. C. (2008). *For. Chron*. Vol. 84, p 807.
- Zimble, D. A., Evans, D. L., Carlson, G. C., Parker, R. C., Grado, S. C. & Gerard, P. D. (2003). *Remote Sens. Environ*, Vol. 87, p. 17