

کارایی فن آوری مدت زمان پرواز گوشی های هوشمند در برآورد قطر برخی از درختان شاخص جنگل های هیرکانی

معصومه فتح الهی^۱، جواد سوسنی^{۲*}، علی محمدزاده^۳، Eetu Puttonen^۴، رامین حسین زاده^۵

^۱ دانشجوی دکتری علوم جنگل - گروه جنگل داری - دانشگاه لرستان
fathollahi.ma@fa.lu.ac.ir

^۲ دانشیار گروه جنگل داری - دانشگاه لرستان
soosani.j@lu.ac.ir

^۳ دانشیار گروه سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
a_mohammadzadeh@kntu.ac.ir

^۴ مدیر تحقیقات گروه سنجش از دور و فتوگرامتری - مؤسسه تحقیقات فضایی فنلاند
eetu.puttonen@nls.fi

^۵ دانش آموخته دکتری علوم جنگل - گروه جنگل داری - دانشگاه لرستان
hosseinzadeh.ra@fa.lu.ac.ir

(تاریخ دریافت اسفند ۱۴۰۰، تاریخ تصویب خرداد ۱۴۰۱)

چکیده

فقدان ابزارهای کارآمد برای اندازه گیری درختان، چالشی اساسی در آماربرداری جنگل است. فن آوری مدت زمان پرواز (TOF) با استفاده از تکنیک های فتوگرامتری و توانایی سنجش عمق، امکان سبب سازی و اندازه گیری اجسام مختلف از جمله تنه درختان را فراهم می کند. در تحقیق حاضر به بررسی دقت اندازه گیری قطر با استفاده از فن آوری TOF نسبت به کالیپر، برای شش گونه راش، بلندمازو، افرا پلت، ممرز، توسکا و انجیلی (که به لحاظ فرم تنه و ضخامت پوست متفاوت هستند) پرداخته شد. بدین منظور ابتدا ۲۰ اصله از هر گونه، در جنگل آموزشی-پژوهشی دارابکلا مازندران به صورت تصادفی انتخاب گردید. سپس قطر در ارتفاع ۱ و ۱/۳۰ متری تنه درختان با استفاده از کالیپر اندازه گیری شد. همچنین ابرنقاط تنه درختان توسط گوشی هوشمند Phab2Pro تولید و قطرهای هدف با استفاده از نرم افزار CloudCompare اندازه گیری شدند. نتایج RMSE حاکی از عدم وجود اختلاف معنی دار بین آماربرداری زمینی و اندازه گیری با ابزار TOF در گونه های مختلف است. با این وجود گونه های افرا، راش و بلندمازو خطای اندازه گیری کمتری نسبت به ممرز، توسکا و انجیلی داشته اند. همچنین مقدار RMSE کل برای قطر در ارتفاع ۱ و ۱/۳۰ متر به ترتیب ۱/۰۱ و ۰/۸۷ سانتی متر به دست آمد. شاخص Bias نشان داد، مقادیر اندازه گیری شده با فن آوری TOF برای اغلب گونه ها بیش از مقادیر کالیپر بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده و نظر به قابلیت های فراوان فن آوری TOF از جمله توان اندازه گیری قطر در ارتفاعات مختلف، تولید تصاویر سبب بعدی رنگی، سرعت و دقت اسکن بالا، پیچیدگی کم، سبکی ابزار و هزینه کمتر نسبت به سایر فن آوری های سبب بعدی سازی، گزینه مناسبی جهت جایگزینی با ابزارهای رایج در اندازه گیری جنگل می باشد.

واژگان کلیدی: آماربرداری جنگل، مدت زمان پرواز، RGB-D SLAM، ابر نقاط، کالیپر

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

جنگل‌ها یکی از بوم‌سازگان‌های بسیار مهم برای انسان‌ها و حیات‌وحش به شمار می‌آیند؛ زیرا علاوه بر حفظ تنوع زیستی، خدمات متعددی را ارائه و آشفته‌گی‌های آب و هوایی را کاهش می‌دهند [۱]. جنگل‌های هیرکانی با داشتن حدود ۸۰ گونه درختی و ۵۰ گونه‌ی درختچه‌ای با ویژگی‌های زیستی منحصر به فرد، یکی از غنی‌ترین و کهن‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی دنیا هستند [۲]. اهمیت این جنگل‌ها ایجاب می‌کند که گونه‌های ارزشمند این اکوسیستم کم‌نظیر مورد توجه علمی بیش‌تری قرار گیرند [۳]. راش، ممرز، بلندمازو، افرا، توسکا و انجیلی جز گونه‌های شاخص این جنگل‌ها هستند که از لحاظ ابعاد، ضریب شکل، ضخامت و نوع پوست و بسیاری از خصوصیات دیگر با هم تفاوت‌هایی دارند.

در حال حاضر، تقاضا برای اطلاعات دقیق تک درختان و توده‌های جنگلی افزایش یافته است [۴]. قطر در ارتفاع برابر سینه درختان به‌عنوان یکی از پارامترهای اساسی در برآورد موجودی جنگل به حساب می‌آید [۵]، چرا که با سایر مشخصه‌های ساختاری درخت مانند ارتفاع کل، ابعاد تاج [۴]، زیتوده و حجم ساقه ارتباط تنگاتنگی دارد [۶]. توانایی در برداشت سریع و دقیق قطر درختان برای نظارت بر اکوسیستم جنگل بسیار حائز اهمیت است [۷]. روش‌های میدانی برآورد موجودی جنگل بر اساس اندازه‌گیری‌های دستی قطر تنه در قطعات نمونه انجام می‌گیرد [۸]. فقدان ابزارهای کارآمد برای اندازه‌گیری درختان، یکی از چالش‌های قدیمی و بارز در آماربرداری میدانی است. با این وجود، داده‌های میدانی معمولاً به‌عنوان مقادیر مرجع برای ارزیابی کیفیت داده‌های برداشت شده با استفاده از سنسورهای اتوماتیک لحاظ می‌شوند [۵]. در روش‌های رایج آماربرداری، معمولاً یک قطر میانگین در ارتفاع ۱/۳۰ متر با استفاده از نوار قطر سنج و یا کالیپر برداشت می‌شود. این شیوه در مطالعات تخصصی از قبیل گاه‌شناسی درختی و آنالیز تنه که نیازمند مقادیر مختلف قطر در جهات و ارتفاعات مختلف تنه هستند؛ کارایی چندانی ندارد. آماربرداری جنگل به‌تدریج با پیشرفت فن‌آوری‌های مبتنی بر فتوگرامتری، قابلیت‌های محاسباتی و اینترنت

اشیا^۱ (IoT) بهبود یافته است. در سال‌های اخیر از فن‌آوری‌هایی مانند لیدار با توانایی‌ها و ویژگی‌های مختلف در حوزه جنگل‌داری استفاده شده است [۹].

LiDAR^۲ یک فن‌آوری سنجش از دور است که محدوده (فاصله یا عمق) را با تاباندن پرتو لیزر موازی به جسم و به دنبال آن تشخیص نور بازتابی با استفاده از آشکارساز نوری تخمین می‌زند [۱۰]. از جمله ابزارهای لیدار؛ اسکن لیزر زمینی (TLS^۳) و اسکن لیزر متحرک (MLS^۴) می‌باشند که متداول‌ترین ابزارها برای به‌دست آوردن داده‌های سه‌بعدی در زیراشکوب جنگل هستند [۸]. این فن‌آوری‌ها به‌دلیل هزینه زیاد، نیاز به امکانات ویژه، اپراتورهای ماهر [۱۱] و همچنین نیاز به سیگنال‌های GNSS^۵، به‌خصوص در جنگل‌های متراکم با مشکل جدی روبرو هستند. با توسعه فن‌آوری‌های مبتنی بر فتوگرامتری از جمله الگوریتم SLAM^۶ (که مکان‌یابی و نقشه‌برداری همزمان را به ارمغان می‌آورد) و بهبود قدرت محاسباتی تراشه‌ها، امکان قرار گرفتن سیستم SLAM بر روی یک تلفن هوشمند با حسگرهای ساده مانند دوربین‌ها و IMU^۷ ها فراهم شد. [۱۲]. دوربین‌های دارای قابلیت مدت زمان پرواز (TOF^۷) که ترکیبی از الگوریتم SLAM و سنسورهای RGB-D را در خود جای داده‌اند، جایگزینی مناسب برای لیدار هستند و مبنای اصلی آنها با لیدار سازگار است. با این تفاوت که دوربین‌های TOF جهت تشخیص اطلاعات مربوط به عمق تصاویر از منبع نور مادون قرمز نزدیک منبع نور استفاده می‌کنند [۱۳]. در این دوربین‌ها از اسکن نقطه به نقطه استفاده نمی‌شود، بلکه یک ماتریس یکپارچه از چندین حسگر TOF برای اندازه‌گیری فاصله‌های گوناگون به‌طور همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴]. این دوربین‌ها که نوعی از سنسورهای تصویربرداری سه‌بعدی هستند عمق و دامنه (طیفی) تصویر را با یک رنج بالا ارائه می‌دهند و در آینده نزدیک می‌تواند جایگزین اسکن لیزر TLS و MLS یا ابزارهای متداول مانند کالیپر و نوار قطر سنج شود [۱۲].

^۱ Internet of Things

^۲ Light Imaging Detection And Ranging

^۳ Terrestrial laser scanning

^۴ Mobile laser scanning

^۵ Global navigation satellite system

^۶ Simultaneous localization and mapping

^۷ Time of flight

جنگل در سطح وسیع پرداختند و بیان کردند که این فن-آوری قابلیت بالایی در این زمینه دارد [۱۶]. با توجه به مطالعات انجام شده، فن‌آوری TOF کارایی و دقت بالایی در آماربرداری جنگل داشته است.

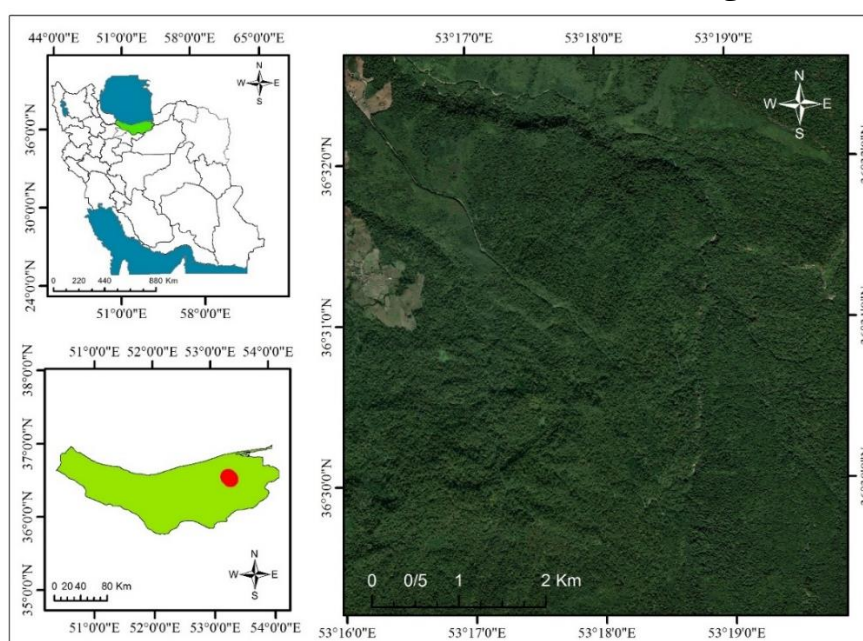
فن‌آوری مدت زمان پرواز (TOF) با استفاده از تکنیک-های فتوگرامتری و توانایی سنجش عمق، امکان سه‌بعدی-سازی و اندازه‌گیری اجسام مختلف از جمله تنه درختان را فراهم می‌کند. در تحقیق حاضر به بررسی دقت اندازه‌گیری قطر با استفاده از فن‌آوری TOF نسبت به کالیپر، برای شش گونه راش، بلندمازو، افرا پلت، ممرز، توسکا و انجیلی (که به لحاظ فرم تنه و ضخامت پوست متفاوت هستند) در جنگل آموزشی پژوهشی دارابکلا پرداخته شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه جنگل آموزشی پژوهشی دارابکلا واقع در ناحیه رویشی هیرکانی می‌باشد. این جنگل‌ها تحت عنوان سری یک دارابکلا در حدود ۱۵ کیلومتری شرق شهرستان ساری واقع شده‌اند. بر مبنای سیستم مختصات UTM این منطقه در زون ۳۹ شمالی با طول جغرافیایی ۲۱' ۵۳" تا ۱۹' ۳۴" ۵۳° شرقی و عرض جغرافیایی ۴۶' ۳۶" تا ۵۷' ۵۵" ۳۶° شمالی، قرار دارد (شکل ۱). مساحت این جنگل در حدود ۲۶۱۲ هکتار است.

Tomaščík و همکاران (۲۰۱۷) ضمن طراحی دو الگوی اسکن "مارپیچ" و "خورشیدی" به ارزیابی دقت فن‌آوری Google Tango (ترکیب حسگرهای RGB-D، اینرسی و SLAM) در برآورد قطر برابر سینه و موقعیت مکانی درختان پرداختند. نتایج نشان داد مقدار RMSE برای مشخصه DBH بین ۱/۶۱-۲/۱۰ سانتی‌متر متغیر بوده است. همچنین مشخص شد که دقت تعیین موقعیت درختان به شدت به روش‌های اسکن وابسته است [۱۵]. Hyypä و همکاران (۲۰۱۷) امکان به‌کارگیری سنسورهای تشخیص عمق در دو فن‌آوری Microsoft Kinect و Google Tango را برای اندازه‌گیری قطر و شبیه‌سازی ساقه درختان به منظور آماربرداری جنگل مورد مقایسه قرار دادند. براساس نتایج مقدار RMSE برای کینکت ۱/۹۰ سانتی‌متر و برای تانگو ۰/۷۳ سانتی‌متر و مقدار شاخص Bias برای کینکت ۰/۵۴ سانتی‌متر و تانگو ۰/۳۳ سانتی‌متر به دست آمد [۱۲]. Fan و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از گوشی هوشمند مجهز به RGB-D SLAM و فن‌آوری واقعیت افزوده (AR) به برآورد ویژگی‌های مختلف درختان شامل: DBH، ارتفاع و موقعیت مکانی پرداختند و مقدار RMSE و Bias را برای DBH به ترتیب ۱/۲۶ و ۰/۳۳ سانتی‌متر گزارش نمودند. همچنین بیان کردند که گوشی هوشمند مجهز به RGB-D SLAM ابزار مناسبی برای اندازه‌گیری دقیق موقعیت مکانی، DBH و ارتفاع درخت است [۹]. Fan و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی قابلیت SLAM گوشی‌های هوشمند در آماربرداری



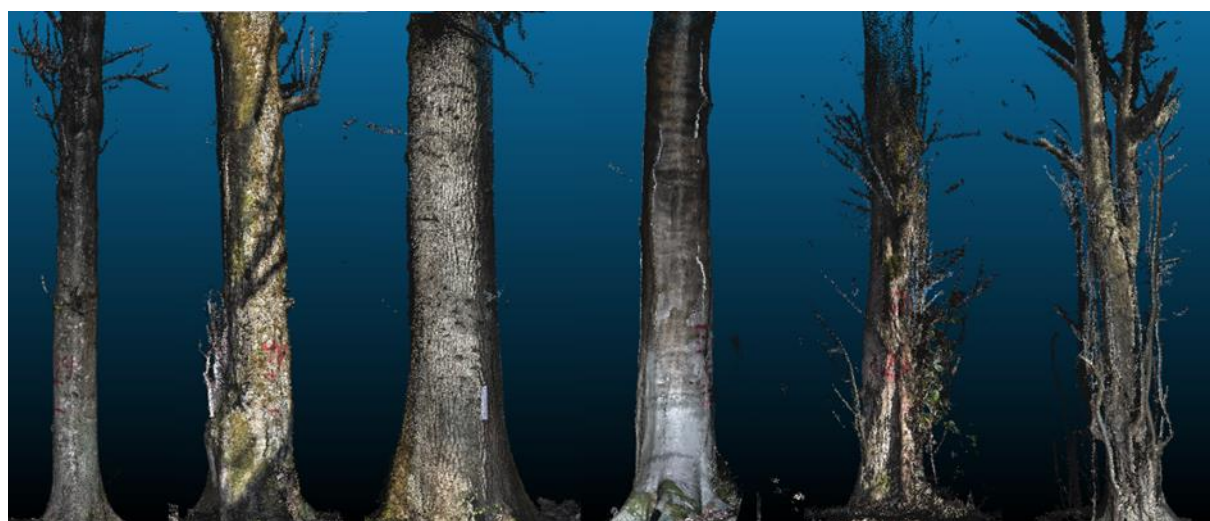
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در استان مازندران- شهرستان ساری

۲-۲- شرح روش تحقیق

۲-۲-۱- انتخاب درختان هدف

با توجه به هدف تحقیق پس از جنگل گردشی، تعداد ۱۲۰ اصله درخت، به صورت تصادفی، از بین شش گونه شاخص درختی (۲۰ اصله از هر گونه) شامل: راش (*Fagus orientalis* Lipsky)، بلندمازو (*Quercus castanaefolia*)،

افرا پلت (*Acer velutinum* Boiss)، C.A.M. subsp، توسکا (*Alnus subcordata*)، *Carpinus betulus* L.)، و انجیلی (*Parrotia persica* C.A.Mey.) که به لحاظ فرم تنه و ضخامت پوست (از حالت سیلندریک با پوست صاف و نازک تا تنه‌های نامتقارن دارای پوست زمخت و پرشاخه) متفاوت بودند (شکل ۲).



شکل ۲- ابر نقاط تولید شده از تنه درختان هدف با استفاده از فن آوری TOF

۲-۲-۲- اندازه‌گیری مستقیم قطر

پس از مشخص کردن درختان هدف، قطر در ارتفاع ۱ و ۱/۳۰ متری ($D_{1.3}$ و D_1) تنه درختان در یک جهت مشخص با استفاده از خط‌کش دوبازو یا کالیپر تا دقت ۰/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. محل دقیق اندازه‌گیری قطر بر روی هر درخت با استفاده از رنگ نشانه‌گذاری شد. از آنجایی که مجموعه TOF از نور مادون قرمز به عنوان منبع نور استفاده کرده و نسبت به بازتاب نور شدید حساس است، اسکن تنه درختان در فصل خزان و در شرایط نیمه سایه صورت گرفت.

۲-۲-۳- اندازه‌گیری غیرمستقیم قطر

۲-۲-۳-۱- عملکرد فن آوری TOF:

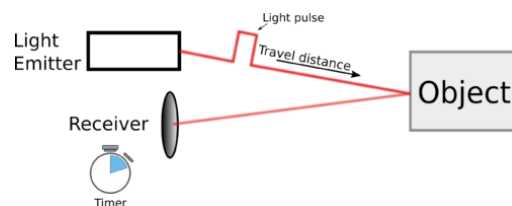
فن آوری TOF یک اصطلاح عمومی برای تعیین فاصله به وسیله اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت نور بین سنسورها و سطح اشیا هدف است. سیستم‌های مبتنی بر روشنایی فعال، معمولاً یک منبع نور را به کار می‌اندازند، که فوتون‌ها را به سمت شیء می‌فرستند، با اندازه‌گیری

مدت زمان پرواز بین انتشار نور و سیگنال برگشتی، می‌توان فاصله بین یک شی و دوربین را از طریق سرعت نور محاسبه کرد. در واقع با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت نور امکان نقشه‌برداری عمق اشیا فراهم می‌شود [۱۷]. سرعت نور در خلأ برابر با $c_0 = 299.792 \times 10^6 \text{ m/s}$ است، در نتیجه فاصله (d) به طور خطی برابر با نصف زمان رفت و برگشت ΔT نور می‌باشد (رابطه ۱) [۱۸].

$$d = \frac{1}{2} c_0 \Delta T \quad (1)$$

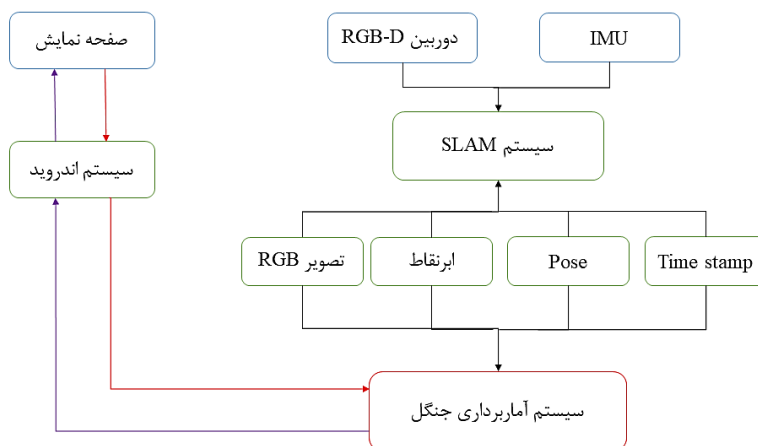
هنگامی که نور مادون قرمز پرتاب می‌شود، پس از برخورد با هر شیء که در جلوی آن قرار دارد، بازتاب پیدا کرده و به سنسور برمی‌گردد. پرتوهای مادون قرمز که از اجسام مجاور باز می‌گردند سریعتر از پرتوهای منعکس شده از اجسام دور به حسگر باز می‌گردند. بنابراین، زمان پرواز به اجسام نزدیک کمتر از زمان پرواز به اجسام دورتر خواهد بود. به دلیل ثابت بودن سرعت نور، دوربین TOF از این اطلاعات برای محاسبه فاصله و ترسیم نقشه عمق سه بعدی استفاده می‌کند (شکل ۳).

و یک واحد اندازه‌گیری اینرسی (IMU) به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند و تصاویر RGB، ابر نقاط، Pose ها و Time stamp ها را تولید می‌کند. سیستم آماربرداری جنگل از این داده‌ها استفاده می‌کند و سپس در تعامل با سیستم عامل نتایج را روی صفحه نمایش می‌دهد و یا فرمان‌های کاربر را می‌پذیرد [۹].



شکل ۳- نحوه عملکرد فن‌آوری TOF

شکل ۴ گردش کار سیستم سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را نشان می‌دهد. سیستم SLAM از یک دوربین RGB-D



شکل ۴- گردش کار سیستم SLAM

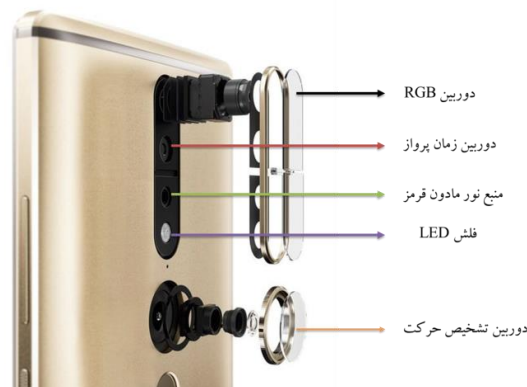
فن‌آوری سرکوب نور پس زمینه^۱ در دوربین تشخیص عمق TOF باعث ایجاد عملکرد مناسب در تاریکی و نور شدید خورشید می‌شود که از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (عملیات در فضای باز). علاوه بر این، شامل سنسورهای دیگر از جمله قطب‌نما، سنسور مجاورتی، شتاب‌سنج، سنسور تشخیص نور محیط، ژيروسکوپ و فشارسنج نیز می‌باشد [۱۹].

۴-۲-۲- اندازه‌گیری و پردازش داده‌ها با TOF

به‌منظور تولید ابر نقاط تنه درختان با استفاده از گوشی هوشمند Phab 2 Pro، ضمن حرکت دوار گرد هر درخت، اسکن سه‌بعدی انجام و در محیط اپلیکیشن Matterport Scenes (که قادر به سه‌بعدی سازی اشیا تا محدوده ۴ متر است) ابر نقاط ایجاد شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Context Capture تراکم ابر نقاط بهبود یافت و در ادامه با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری نرم افزار CloudCompare (v.2.8.1) قطر درختان در محل

۲-۳-۲- فلیت Lenovo Phab 2 Pro

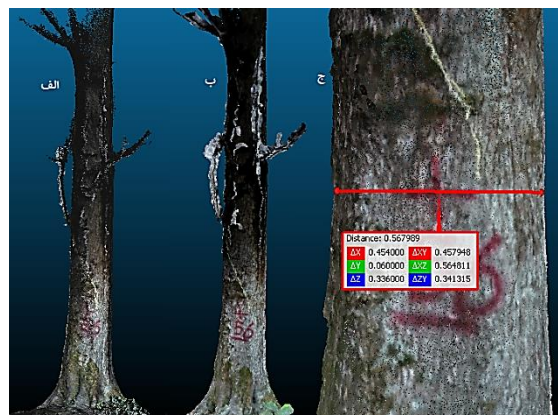
Lenovo Phab 2 Pro مجهز به پردازنده‌ی هشت هسته‌ای Qualcomm Snapdragon 652، یک پردازنده گرافیکی Adreno 510 و CPU ۶۴ بیتی و همچنین مجهز به سه دوربین شامل دوربین تشخیص عمق TOF با وضوح ۱۷۲*۲۲۴ پیکسل، دوربین تشخیص و ردیابی حرکت Fish-eye با وضوح ۴۸۰*۶۴۰ پیکسل و یک دوربین رنگی با وضوح ۱۰۸۰*۱۹۲۰ پیکسل می‌باشد (شکل ۵).



شکل ۵- مشخصات حسگرهای Lenovo Phab 2 Pro

^۱ Suppression of Background Illumination technology

مشخص شده، اندازه‌گیری شد. برای این منظور از ابزارهای اندازه‌گیری خود نرم افزار استفاده گردید تا تأثیر مواردی مانند روش‌های تقریبی (تناسب دایره، اجماع نمونه تصادفی (RANSAC)، پوش محدب و غیره)، نویز باقی مانده در اطراف تنه پس از فیلتر اولیه و نقص ابر نقاط (دوتایی شدن ساقه، بازتاب ساقه) جلوگیری شده و محل اندازه‌گیری دقیق منطبق با محل مشخص شده در روی تنه درختان باشد (شکل ۶).



شکل ۶- الف- ابر نقاط حاصل از اپلیکیشن Matterport Scenes ب- ابر نقاط بهبود یافته توسط نرم‌افزار Context Capture ج- اندازه‌گیری قطر در نرم‌افزار CloudCompare

۲-۳- تجزیه و تحلیل آماری

به‌منظور مقایسه مقادیر قطر اندازه‌گیری شده توسط کالیپر و گویی هوشمند با فن‌آوری TOF در ارتفاعات D_1 و $D_{1.3}$ از شاخص‌های اعتبارسنجی: مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) (رابطه ۲)، $RMSE\%$ (رابطه ۳)، آماره اریبی (Bias) (رابطه ۴) و $Bias\%$ (رابطه ۵) استفاده شد. در این روابط، n تعداد درختان و x_i و x_{ir} به ترتیب مقدار قطر برآوردی، قطر واقعیت زمینی و متوسط مقدار قطر واقعیت زمینی می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ir})}{n} \quad (4)$$

$$Bias\% = \frac{Bias}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

همچنین برای بررسی همبستگی بین دو روش اندازه‌گیری، از رگرسیون خطی و ضریب تبیین استفاده شد.

۳- نتایج

همانطور که گفته شد در این پژوهش شش گونه هدف مورد بررسی قرار گرفت. در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات آماری قطرهای D_1 و $D_{1.3}$ این درختان بر اساس اندازه‌گیری مستقیم نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات آماری قطر (به سانتیمتر) در ارتفاع ۱ متر گونه‌های مختلف

گونه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
افرا	۲۷	۶۴	۴۲/۱۳	۸/۴۸
راش	۱۹	۸۳	۴۵/۴۳	۲۱/۳۳
بلندمازو	۴۴	۱۳۱	۷۳/۰۸	۱۹/۸
ممرز	۳۲	۶۶/۵	۵۱/۲۴	۱۱/۲۲
توسکا	۲۱/۵	۷۰	۴۴/۸۴	۱۴/۷۸
انجیلی	۱۵/۵	۵۰	۳۱/۱۵	۱۰/۸۷

جدول ۲- مشخصات آماری قطر (به سانتیمتر) در ارتفاع ۱/۳۰ متر گونه‌های مختلف

گونه	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
افرا	۲۷	۶۳/۵	۴۰/۵۸	۸/۶۴
راش	۱۸	۸۱	۴۴/۰۹	۲۰/۶۷
بلندمازو	۴۳	۱۲۶	۶۹/۲۳	۱۸/۴۱
ممرز	۳۰	۶۸	۴۹/۰۸	۱۱/۰۳
توسکا	۲۱	۶۴	۴۲/۵۴	۱۳/۴۷
انجیلی	۱۵	۵۵/۵	۳۱/۹۱	۱۰/۸۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود از لحاظ قطری تفاوت آشکاری بین گونه‌های مختلف وجود دارد. به این‌صورت که دامنه قطری درختان از ۱۵ سانتی‌متر (انجیلی) تا ۱۳۱ سانتی‌متر (بلندمازو) متغیر بوده است. در مجموع به‌طور میانگین بیشترین قطر در D_1 و $D_{1.3}$ متعلق به گونه بلندمازو کمترین قطر مربوط به گونه انجیلی است.

همانطور که گفته شد به‌منظور مقایسه روش TOF با اندازه‌گیری زمینی از شاخص‌های $RMSE$ ، $RMSE\%$ ، $Bias$ و $Bias\%$ استفاده شد. که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است.

۱ Random sample consenes

جدول ۳- اعتبارسنجی قطر برآورد شده به روش TOF بر مبنای اندازه‌گیری مستقیم به وسیله کالیپر

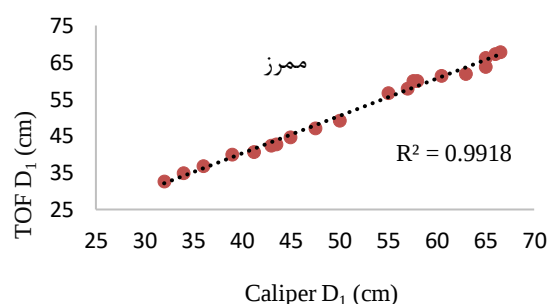
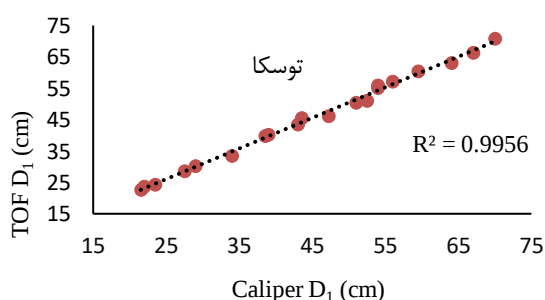
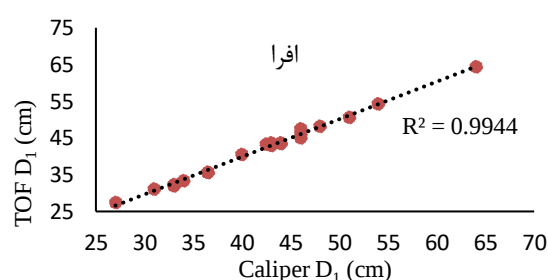
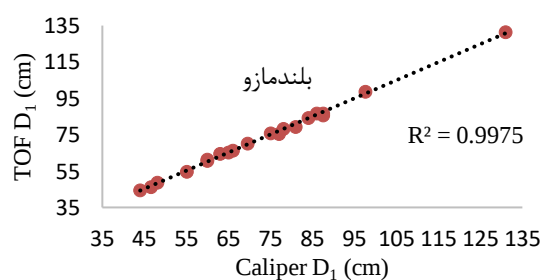
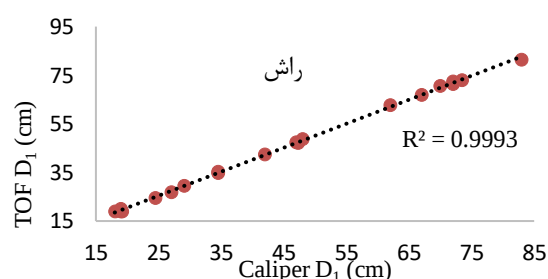
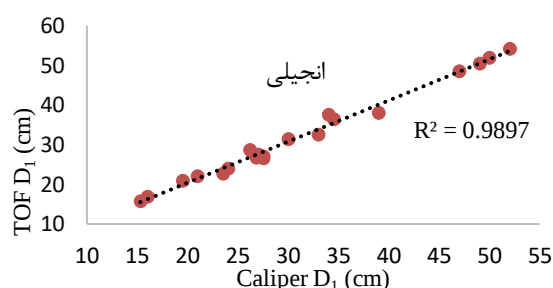
گونه	BIAS%		BIAS		RMSE%		RMSE	
	D _{1.3}	D ₁	D _{1.3}	D ₁	D _{1.3}	D ₁	D _{1.3}	D ₁
افرا	-۰/۰۲	-۰/۱۶	-۰/۰۱	-۰/۰۷	۱/۳۸	۱/۶۱	۰/۵۶	۰/۶۸
راش	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۲	۰/۱۶	۱/۴۷	۱/۳۸	۰/۶۵	۰/۶۳
بلندمازو	۰/۳	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۱۲	۱/۰۴	۱/۳۶	۰/۷۲	۰/۹۹
ممرز	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۴	۰/۴۴	۲/۰۴	۲/۲۳	۱	۱/۱۴
توسکا	۰/۷	۱/۲۷	۰/۳	۰/۵۷	۲/۶۴	۲/۶۱	۱/۱۲	۱/۱۷
انجیلی	۲/۰۷	۲/۵۶	۰/۶۶	۰/۸	۳/۶۷	۴/۶۶	۱/۱۷	۱/۴۵
کل	۰/۷۲	۰/۸۴	۰/۲۹	۰/۳۴	۲/۰۴	۲/۳۱	۰/۸۷	۱/۰۱

ترین و بیش‌ترین مقدار D₁ و D_{1.3} به‌ترتیب مربوط به گونه های افرا و انجیلی می‌باشد.

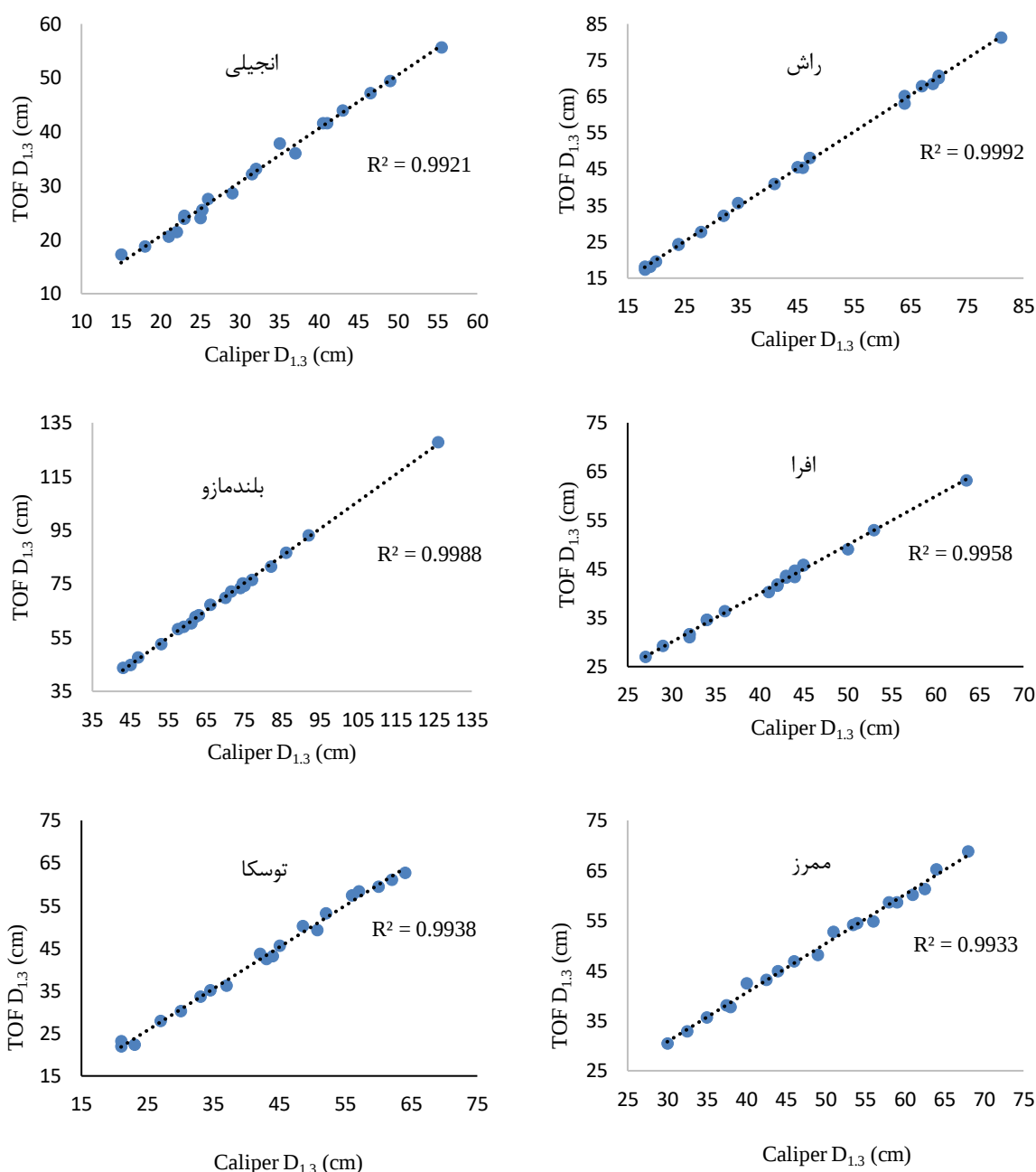
در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار همبستگی و ضریب تبیین بین دو روش اندازه‌گیری به تفکیک گونه‌های مختلف برای D₁ و D_{1.3} نشان داده شده است.

براساس شکل‌های ۷ و ۸ به‌طور کلی همبستگی بالایی بین دو روش اندازه‌گیری قطر درختان وجود دارد. که در این بین برای قطر D₁ و D_{1.3} گونه راش بیش‌ترین و گونه انجیلی کم‌ترین مقدار ضریب تبیین را به خود اختصاص دادند.

براساس جدول ۳، به‌طور کلی مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی در D_{1.3} کمتر از D₁ است. در بین گونه‌های مختلف؛ افرا، راش و بلندمازو خطا و اریبی کم‌تری نسبت به سایر گونه‌ها داشته‌اند. در این میان کم‌ترین مقدار RMSE D₁ مربوط به گونه راش بوده و کم‌ترین مقدار RMSE D_{1.3} مربوط به گونه افرا می‌باشد. در صورتی که کم‌ترین مقدار RMSE% برای دو قطر D₁ و D_{1.3} متعلق به گونه بلندمازو است. از طرفی بیش‌ترین مقادیر RMSE و RMSE% برای هر دو قطر D₁ و D_{1.3} مربوط به گونه انجیلی است. در مورد شاخص‌های BIAS و BIAS% کم



شکل ۷- ضریب تبیین و برازش قطر در ارتفاع یک متر برای گونه‌های مورد مطالعه



شکل ۸- ضریب تبیین و برازش D_{1.3} برای گونه‌های مورد مطالعه

۵- بحث و نتیجه‌گیری

قطر درخت مهم‌ترین پارامتر برای دستیابی به اطلاعات موجودی جنگل است که به‌طور مستقیم با سطح مقطع و حجم درختان در ارتباط است. مطالعات زیادی در مورد ارزیابی دقت اندازه‌گیری قطر (به‌خصوص قطر در ارتفاع برابر سینه) با استفاده از ابر نقاط مبتنی بر فتوگرامتری و لیدار انجام شده است [۲۰]، [۸]، [۷]، [۴]، با این وجود در معدود مطالعاتی از جمله Fan و همکاران، ۲۰۱۸ [۹] Fan، و همکاران، ۲۰۲۰ [۱۶]، Hyypä و

همکاران، ۲۰۱۷ [۱۲] و Tomaščík و همکاران، ۲۰۱۷ [۱۵] از حسگرهای RGB-D استفاده نموده‌اند. این فن آوری قابل حمل، ارزان و روشی آسان برای اندازه‌گیری قطر تنه درختان را فراهم می‌کند [۱۵]. از آنجایی که درختان جنگلی به لحاظ فرم و پوست تنه بسیار متفاوتند، در این پژوهش برای بررسی عملکرد فن آوری TOF در اندازه‌گیری قطر درختان، شش گونه بومی جنگل‌های هیرکانی با ساختار متفاوت، انتخاب و نتایج عملکرد سنسور RGB-D SLAM نسبت به کالیپر مقایسه شد.

مقدار خطای بیشتری نسبت به پژوهش حاضر داشته است. علت این موضوع تفاوت در روش برداشت بوده است که در تحقیق مذکور اسکن تمام درختان به صورت پیوسته انجام شده ولی در تحقیق حاضر هر درخت جداگانه اسکن شده است. Hyypä و همکاران (۲۰۱۷) نیز بیان کردند در برداشت پیوسته مجموعه درختان، خطای بیشتری نسبت به حالت منفرد ایجاد می شود [۱۲]. در اسکن پیوسته اگرچه خطای بیشتری حاصل می شود اما سرعت برداشت که عامل مهمی در آمابرداری جنگل محسوب می شود نسبت به روش اسکن تک درخت کاهش می یابد که در بسیاری از کارهای اجرایی گزینه کاربردی تری محسوب می شود. در مقابل برای مطالعات دقیق روش اسکن تک درخت گزینه مناسب تری است.

با توجه به نتایج به دست آمده و نظر به قابلیت های فراوان فن آوری TOF از جمله توان اندازه گیری قطر در ارتفاعات مختلف، عدم نیاز به پس پردازش (امکان تخمین در جنگل) برخلاف داده های لیدار، پیچیدگی کم، سبکی ابزار و هزینه کمتر نسبت به سایر فن آوری های سه بعدی سازی، عدم نیاز به GNSS، تولید تصاویر سه بعدی رنگی، امکان استفاده از فن آوری AR برای اندازه گیری ارتفاع، سرعت و دقت اسکن بالا قابل مقایسه با اسکن لیزر، عدم نیاز به اپراتور آموزش دیده و هزینه کمتر نسبت به سایر فن آوری های سه بعدی سازی گزینه مناسبی برای بررسی موجودی جنگل ها و جایگزینی با ابزارهای رایج در اندازه گیری جنگل می باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از جناب آقای دکتر اصغر فلاح استاد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری که زمینه برداشت اطلاعات در جنگل آموزشی-پژوهشی دارابکلا را فراهم نمودند قدردانی می نمایم.

بر اساس نتایج به دست آمده، به طور کلی اختلاف معنی داری بین داده های RGB-D SLAM و آمابرداری زمینی مشاهده نشد. مقدار ضریب تبیین نیز نتایج مشابه با خطای اندازه گیری نشان داد. Hyypä و همکاران (۲۰۱۷) و Fan و همکاران (۲۰۱۸) نیز نتایج مشابهی به دست آوردند [۹]، [۱۲]. با این وجود در بین گونه های مختلف تفاوت هایی از نظر دقت اندازه گیری وجود داشت. از این قرار که گونه های افرا، راش و بلندمازو خطای اندازه گیری کمتری نسبت به گونه های ممرز، توسکا و انجیلی داشته اند. علاوه بر فرم و پوست تنه که جز معیارهای اصلی انتخاب این گونه ها بوده اند، اندازه قطر نیز یکی از عوامل تاثیرگذار بر دقت اندازه گیری بوده است. به این صورت که در هر گونه، درختان قطور معمولاً خطای اندازه گیری رقم بیشتری را نشان می دهد، Holmgren و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی نشان دادند که مقدار خطای اندازه گیری درختان قطور بیشتر از درختان کم قطر است [۸]. شکل پراکنش ابرنقاط بین دو روش اندازه گیری در گونه های مختلف تایید کننده این موضوع می باشد (شکل ۷ و ۸). با این وجود نتیجه نهایی برآیندی از مجموع عوامل تاثیرگذار است. به عنوان مثال گونه ی بلندمازو که بیشترین میانگین قطر را در بین گونه های مورد بررسی دارد، به دلیل داشتن تنه صاف و متقارن RMSE% کمتری نسبت به سایر گونه ها دارد. از طرفی گونه انجیلی که کمترین میانگین قطر را دارد به دلیل داشتن تنه نامتقارن، درهم تنیده و منشعب بیشترین مقدار RMSE% را داشته است. همچنین بر اساس شاخص های Bias و Bias% مشخص شد که مقادیر اندازه گیری شده با فن آوری TOF برای اغلب گونه ها بیشتر از مقادیر اندازه گیری شده با کالیپر بوده و در این بین بیشترین مقدار اریبی مربوط به گونه انجیلی بوده است. در مجموع بر اساس نتایج خطای اندازه گیری قطر در $D_{1.3}$ (۰/۸۷ سانتی متر) کمتر از D_1 (۱/۰۱ سانتی متر) بوده است که دلیل آن تقارن بیشتر تنه در ارتفاع ۱/۳۰ متر و همچنین وجود گورچه در ارتفاع ۱ متر است. Mokroš و همکاران (۲۰۱۸) نیز بیان کردند مقدار خطای اندازه گیری در ارتفاع ۱/۳۰ متر کمتر از ارتفاع ۰/۸ متر بوده است [۴]. Tomaščík و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی ضمن مقایسه دو روش برداشت موسوم به اسکن مارپیچ و خورشیدی مقدار RMSE را به ترتیب ۱/۸۳ و ۱/۹۱ سانتی متر برای قطر برابر سینه به دست آوردند [۱۵] که در هر دو حالت

مراجع

- [1] R. Neuville, J. S. Bates, and F. Jonard, "Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 3, p. 352, Jan. 2021, doi: 10.3390/rs13030352.
- [2] M.R. Marvie Mohadjer, *Silviculture*, 2nd ed. University of Tehran Press, 2006. (In Persian).
- [3] R. Hosseinzadeh, J. Soosani, and H. Naghavi, "Investigation of competition and structural characteristics of *Fagus orientalis*, *Carpinus betulus* and *Quercus castanaefolia* in different stratus (Case Study: Asalem Forests, North of Iran)," *J. Plant Res. is Iran. J. Biol.*, vol. 35, 2022. (In Persian).
- [4] M. Mokroš et al., "High Precision Individual Tree Diameter and Perimeter Estimation from Close-Range Photogrammetry," *Forests*, vol. 9, no. 11, p. 696, Nov. 2018, doi: 10.3390/f9110696.
- [5] C. Gollob, T. Ritter, and A. Nothdurft, "Forest Inventory with Long Range and High-Speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Technology," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 9, p. 1509, May 2020, doi: 10.3390/rs12091509.
- [6] E. Hyypä et al., "Accurate derivation of stem curve and volume using backpack mobile laser scanning," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 161, no. January, pp. 246–262, 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.01.018.
- [7] L. Liu et al., "Single Tree Segmentation and Diameter at Breast Height Estimation with Mobile LiDAR," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 24314–24325, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056877.
- [8] J. Holmgren, M. Tulldahl, J. Nordlöf, E. Willén, and H. Olsson, "Mobile laser scanning for estimating tree stem diameter using segmentation and tree spine calibration," *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, pp. 1–18, 2019, doi: 10.3390/rs11232781.
- [9] Y. Fan, Z. Feng, A. Mannan, T. U. Khan, C. Shen, and S. Saeed, "Estimating tree position, diameter at breast height, and tree height in real-time using a mobile phone with RGB-D SLAM," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 11, 2018, doi: 10.3390/rs10111845.
- [10] R. Horaud, M. Hansard, G. Evangelidis, and C. Ménéier, "An overview of depth cameras and range scanners based on time-of-flight technologies," *Mach. Vis. Appl.*, vol. 27, no. 7, pp. 1005–1020, 2016, doi: 10.1007/s00138-016-0784-4.
- [11] G. Luetzenburg, A. Kroon, and A. A. Bjørk, "Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–10, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-01763-9.
- [12] J. Hyypä, J. P. Virtanen, A. Jaakkola, X. Yu, H. Hyypä, and X. Liang, "Feasibility of Google Tango and kinect for crowdsourcing forestry information," *Forests*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, 2017, doi: 10.3390/f9010006.
- [13] M. Aijaz and A. Sharma, "No Title," in *Google Project Tango*, 2016, pp. 22–23.
- [14] S. Foix, G. Alenyà, and C. Torras, "Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey," *IEEE Sens. J.*, vol. 11, no. 3, 2011.
- [15] J. Tomaščík, Š. Saloň, D. Tunák, F. Chudý, and M. Kardoš, "Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 141, pp. 109–117, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.07.015.
- [16] Y. Fan et al., "A trunk-based SLAM backend for smartphones with online SLAM in large-scale forest inventories," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 162, no. February, pp. 41–49, 2020, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2020.02.006.
- [17] S. Bellisai, D. Bronzi, F. A. Villa, S. Tisa, A. Tosi, and F. Zappa, "Single-photon pulsed-light indirect time-of-flight 3D ranging," *Opt. Express*, vol. 21, no. 4, p. 5086, 2013, doi: 10.1364/oe.21.005086.
- [18] P. Based and T. R. Sensing, "Pulse Based Time-of-Flight Range Sensing," 2018, doi: 10.3390/s18061679.
- [19] N. Druml et al., "Virtual white cane featuring time-of-flight 3D imaging supporting visually impaired users," *Proc. - 21st Euromicro Conf. Digit. Syst. Des. DSD 2018*, no. July, pp. 450–457, 2018, doi: 10.1109/DSD.2018.00081.
- [20] D. Panagiotidis and A. Abdollahnejad, "Accuracy Assessment of Total Stem Volume Using Close-Range Sensing: Advances in Precision Forestry," *Forests*, vol. 12, no. 6, p. 717, 2021, doi: 10.3390/f12060717.