

การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัส
ด้วยเทคนิคการสร้างพื้นผิวใหม่จากการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน

Estimating Above Ground Biomass of Eucalyptus
Using Surface Reconstruction Techniques from
Terrestrial Laser Scanning

กัญญา เชยโพธิ์* และชัยโชค ไวกาษา

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

พรเทพ เหมือนพงษ์

ภาควิชาวนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาเขตบางเขน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

กฤษฎาณ อินทร์ตัน

สาขาวิชาภูมิศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Sukanya Choeipo* and Chaichoke Vaipasa

Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phayathai Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330

Ponthep Meunpong

Department of Silviculture, Faculty of Forestry, Kasetsart University,

Bangkhen Campus, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900

Kritchayan Intarat

Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of Liberal Arts, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (AGB) เป็นตัวแปรทางนิเวศวิทยาที่สำคัญซึ่งควรได้รับตรวจวัดอย่างแม่นยำเพื่อ
ประมาณการกักเก็บคาร์บอนของต้นไม้ที่ถูกต้อง วิธีการดั้งเดิมสำหรับการประมาณค่า AGB ใช้การตัดต้นไม้ซึ่งไม่

*ผู้รับผิดชอบบทความ : sukunya.c@gmail.com

เหมาะสมกับพื้นที่แปลงปลูกขนาดใหญ่ เพราะต้องใช้แรงงานมากและก่อให้เกิดผลการคำนวณที่มีความแปรปรวนทางสถิติสูง การสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) ซึ่งเป็นเทคนิคใหม่ที่จะช่วยให้การเก็บข้อมูลทำได้ง่ายขึ้นและให้ความถูกต้องสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ การประมาณค่า AGB ของต้นไม้จากพอยท์คลาวด์ของการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน ใช้ต้นไม้ตัวอย่างจากแปลงปลูกยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส จำนวน 24 ต้น ประมาณค่า AGB โดยใช้วิธี qualitative surface model (QSM) และวิธี poisson surface reconstruction (PSR) เปรียบเทียบความถูกต้องของค่า AGB จากทั้ง 2 วิธี กับค่า AGB จริงที่ได้จากวิธีการแทนที่น้ำ ค่าความถูกต้องของผลการคำนวณ AGB แสดงด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ผลการทดสอบพบว่าค่า RMSE จากวิธี QSM เท่ากับ 3.08 กิโลกรัม และค่า RMSE วิธี PSR เท่ากับ 1.78 กิโลกรัม ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ช่วยยืนยันได้ว่าการใช้เทคนิค TLS นั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอ ซึ่งแนะนำให้ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมไม้โตเร็วนำไปใช้เพื่อช่วยในการบริหารจัดการแปลงปลูกเพื่อรองรับความต้องการไม้ภายในประเทศ

คำสำคัญ : การสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน; มวลชีวภาพเหนือพื้นดิน; การสร้างพื้นผิวใหม่

Abstract

Above-ground biomass (AGB) is an important ecological variable that should be correctly measured for tree carbon storage estimation. The traditional way of measuring the AGB was to use the destructive tree-cutting method that is not cost-effective for large study areas and may cause high standard variations. Many reports demonstrated that modern terrestrial laser scanning (TLS) techniques do not require tedious fieldwork and are more accurate than the traditional methods. This research aimed to estimate AGB from a point cloud of TLS for *Eucalyptus kamaldulensis* 24 plants using the Qualitative surface model (QSM) and the Poisson surface reconstruction (PSR) methods. The AGB of the two methods is compared with the actual AGB using the water displacement method. The accuracy of the results was calculated with the square root of mean square error (RMSE). The RMSE value from the QSM method was 3.08 kg, and the RMSE value of the PSR method was 1.78 kg. The outcome of this study confirmed the effectiveness of the TLS techniques for AGB estimation. It is anticipated the use of the proposed method in fast-growing timber industries in Thailand.

Keywords: terrestrial laser scanning; above-ground biomass; surface reconstruction

1. บทนำ

การวัดค่าพารามิเตอร์ของต้นไม้และเฝ้าติดตามการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์เหล่านั้นด้วยความถูกต้องเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างแบบจำลอง

การเติบโต การจัดการไฟป่า การสร้างแบบจำลองของวงจรคาร์บอนและระบบการจัดการป่าไม้ [1] วิธีการที่ยังคงใช้อยู่ซึ่งรวมถึงการวัดค่าพารามิเตอร์ทั้งทางตรงและทางอ้อม แต่ละเทคนิคมีขีดจำกัดในการได้มาของ

ข้อมูลที่มีความแม่นยำ การวัดพารามิเตอร์ของต้นไม้ในรูปแบบสามมิติสามารถปรับปรุงความแม่นยำของการวัดเหล่านี้โดยใช้ไลดาร์ (light detection and ranging, LIDAR) [2,3] การประยุกต์ใช้งานของไลดาร์ เช่น การวัดโครงสร้างของพืชพรรณ การประมาณความสูงของต้นไม้ ความกว้างของทรงพุ่ม พื้นที่ของลำต้น ปริมาตรลำต้นและมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (above-ground biomass, AGB) มีการอธิบายอย่างละเอียดในงานวิจัยที่ผ่านมา [4,5] การประมาณ AGB แบบไม่ตัดทำลายต้นไม้สามารถทำได้โดยใช้ไลดาร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน (airborne LIDAR) ซึ่งมีความแม่นยำที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การวัด AGB ที่ได้รับผ่านเทคนิคการสำรวจจากระยะไกลรูปแบบอื่น ๆ [5,6] อย่างไรก็ตาม การประมาณค่าความสูงของต้นไม้ที่มีขนาดเล็กการส่งกลับของสัญญาณไลดาร์ที่ไม่ต่อเนื่องและความเข้มของสัญญาณในระดับต่ำทำให้การรับข้อมูลในสนามเป็นการสะท้อนกลับที่มาจากส่วนบนของต้นไม้เท่านั้น ไม่ใช่การสะท้อนจากส่วนล่างของต้นไม้ตามที่ต้องการ [7]

เทคนิคการสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (terrestrial laser scanning, TLS) นำมาลดช่องว่างระหว่างการวัดพารามิเตอร์ของต้นไม้จากวิธีการดั้งเดิมและการใช้ไลดาร์สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ โดยบันทึกข้อมูลของป่าไม้ในรูปแบบดิจิทัลสามมิติในเวลาที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ได้มีความละเอียดและแม่นยำที่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ การใช้ไลดาร์และการวัดพารามิเตอร์แบบดั้งเดิม [8,9] TLS นำมาประยุกต์ในงานด้านป่าไม้เพิ่มมากขึ้นเพื่อช่วยกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญของต้นไม้ เช่น ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความสูงเพียงอกเพื่อการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ด้วยวิธีที่ไม่ทำลาย [10] การเก็บข้อมูลที่รวดเร็วมีความละเอียดสูงในรูปแบบพอยท์คลาวด์ที่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนจุดให้สอดคล้องกับลักษณะของ

โครงสร้างพืชพรรณ ข้อมูลภาพของวัตถุถูกบันทึกเพื่อช่วยในการแสดงรูปร่างแบบสามมิติให้ผู้ใช้จำแนกข้อมูลง่ายและคำนวณพารามิเตอร์ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็วมากกว่าวิธีการแบบดั้งเดิม [11-14]

การประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้จากข้อมูล TLS ใช้วิธีการสร้างแบบจำลองพื้นผิวด้วยวิธีแบบจำลองโครงสร้างเชิงปริมาณ (quantitative structure models, QSM) ด้วยการสร้างรูปทรงกระบอกและปรับให้พอดีกับขนาดของลำต้นหรือกิ่งก้านเพื่อนำมาคำนวณปริมาตรของต้นไม้ ผลการประมาณปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรจริง ซึ่งวิธี QSM ให้ความสะดวกและได้ผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับได้ [15] นอกจากนี้การศึกษาของ Kazhdan [16] ที่ศึกษาการสร้างพื้นผิวสามมิติจากพอยท์คลาวด์ด้วยสมการ poisson เรียกวิธีนี้ว่า poisson surface reconstruction (PSR) จากแนวคิดที่ว่าพอยท์คลาวด์ที่นำเข้ามาเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีความแตกต่างของสนามเวกเตอร์ส่วนที่เป็นวัตถุกับไม่ใช่วัตถุ ดังนั้นการหาฟังก์ชันที่แยกส่วนวัตถุและไม่ใช่วัตถุออกจากกันจึงคำนวณขึ้น (indicator function) อีกทั้งยังพิจารณา ร่วมกับแนวโน้มของฟังก์ชันที่แยกส่วน (indicator gradient) แล้วจึงสร้างชายสามเหลี่ยมจากพอยท์คลาวด์เป็นพื้นผิวใหม่ที่ปรับให้คล้ายกับพื้นผิวเดิมมากที่สุด มีการทดสอบกับพอยท์คลาวด์ของประติมากรรมที่เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการทดสอบเพื่อสร้างพื้นผิว ได้แก่ รูปปั้นมังกร กระจต่าย พระพุทธรูป รูปปั้นเดวิด เป็นต้น ความละเอียด (resolution) ที่ปรากฏบนพื้นผิวถูกกำหนดจากระดับความลึกของ octree นั่นคือ วัตถุที่มีพื้นผิวซับซ้อน ตื้น-ลึก สลับกันไป มีรายละเอียดเล็ก ๆ น้อย ๆ จำนวนมากควรใช้ octree ที่มีค่าสูง เมื่อนำพื้นผิวที่สร้างจากวิธี poisson เปรียบเทียบกับวิธี volumetric range image processing (VRIP) พบว่ารอยย่นของวัตถุมีความคมชัดมากกว่า

และบางส่วนของพอยท์คลาวด์ที่มีความถี่สูงมีการปรับระดับความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างให้มีความราบเรียบต่อเนื่องกับพื้นที่ส่วนอื่นอีกด้วย

การศึกษาก่อนหน้าใช้วิธี QSM หรือรูปทรงเรขาคณิตที่คล้ายกัน [17,18] เพื่อจำลองชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของต้นไม้ที่เหมาะสม โดยคาดว่า การสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยวิธี PSR ที่ใช้การสร้างข่ายสามเหลี่ยมจากพอยท์คลาวด์ให้เป็นพื้นผิว เพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้ดีกว่าวิธี QSM โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโครงสร้างต้นไม้มีความซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี QSM และวิธี PSR เพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS และตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงจากการตัดต้นยูคาลิปตัสไปแทนที่น้ำ (water displacement)

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 พื้นที่ศึกษา

เลือกพื้นที่แปลงปลูกต้นยูคาลิปตัสคามาลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) ที่ตัดเพื่อหาความมวลชีวภาพเหนือพื้นดินได้อย่างสะดวกจากแปลง

ปลูกในพื้นที่บ้านบุ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ดังแสดงในรูปที่ 1 มีระยะปลูก 2x2 เมตร กลุ่มตัวอย่างเป็นไม้ที่เกิดจากการไถหน่อหลังจากตัดต้นหลัก มีอายุประมาณ 1 ปี 6 เดือน ลักษณะเป็นกอ แต่ละกอมีลำต้นประมาณ 2-5 ลำต้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5-12.0 เซนติเมตร ความสูง 6.0-10.0 เมตร

2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

เก็บข้อมูลต้นยูคาลิปตัสด้วยการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินของท็อปคอน รุ่นจีแอลแอส 2000 (Topcon GLS2000) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ท็อปคอนอินสทรูเมนต์ (ไทยแลนด์) จำกัด มีรายละเอียดเชิงเทคนิค เช่น ขอบเขตการมองเห็น (FOV) แนวราบ 360 องศา แนวตั้ง 270 องศา ระยะทางสูงสุดของการเก็บข้อมูล 210 เมตร ความละเอียดของการสแกนมีระยะห่างระหว่างจุด 3.1 มิลลิเมตร ที่ระยะทาง 10 เมตร อัตราการสแกน 120,000 จุดต่อวินาที ช่วงคลื่น near infrared (1,064 มิลลิเมตร) อุปกรณ์พิเศษ กล้องถ่ายภาพในตัว หน้าจอสัมผัส น้ำหนัก 10 กิโลกรัม ซึ่งผ่านสมบัติน้ำหนักพื้นฐานของเครื่องมือตามที่ Maas [19] ได้กำหนดไว้ ข้อมูลพอยท์

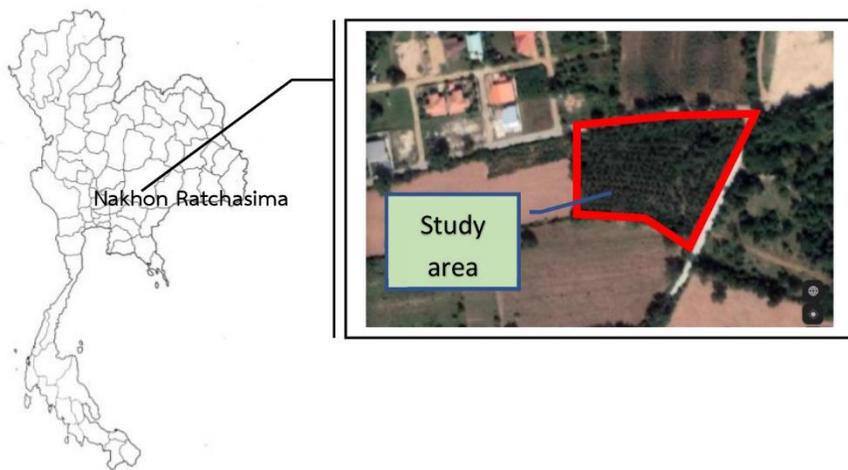


Figure 1 Study area

คลาวด์นำมาประมวลผลเพื่อสร้างเป็นพอยท์คลาวด์พหุ (multiple point cloud) ด้วยซอฟต์แวร์แม็กเนตคอลเลจ (MAGNET collage software) ที่ใช้ร่วมกับ TLS การรวมข้อมูลให้เป็นพอยท์คลาวด์เชิงเดี่ยว (single point cloud) และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของต้นไม้จากพอยท์คลาวด์เชิงเดี่ยวจาก 2 วิธี คือ (1) วิธี QSM ใช้ซอฟต์แวร์รหัสเปิดทรีควเอสเอ็ม (TreeQSM software) ที่ดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ <https://github.com/InverseTampere/TreeQSM2> วิธี PSR ใช้ซอฟต์แวร์รหัสเปิดคลาวด์คอมแพร์ (cloud compare software) จากเว็บไซต์ <https://www.Danielgm.net/cc> และยูคาลิปตัสที่ตัดเพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงโดยใช้วิธีการแทนที่น้ำ

2.3 การเก็บข้อมูลต้นยูคาลิปตัสด้วย TLS

การปลูกต้นยูคาลิปตัสในแปลงทดสอบมีการปลูกด้วยระยะห่างระหว่างแถวและกอที่สม่ำเสมอ เพื่อสะดวกในการบำรุงรักษา การกำจัดวัชพืชออกจากแปลงปลูกอย่างสม่ำเสมอทำให้สภาพพื้นที่ในแปลงทดสอบมีสภาพโล่ง มีการบดบังน้อย ตำแหน่งเป้าอ้างอิงเลือกตั้งเป้าที่มุมทั้ง 4 มุม ของกลุ่มตัวอย่าง ตำแหน่งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินตั้งระหว่างเป้าอ้างอิง 2 เป้า ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยในแต่ละครั้งของการสแกนต้องเก็บข้อมูลเป้าอ้างอิงได้อย่างน้อย 3 เป้า

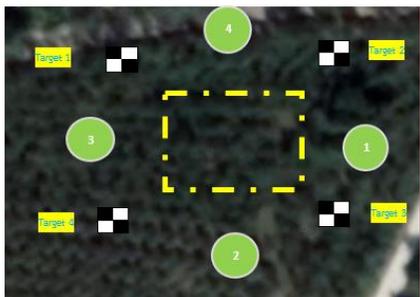


Figure 2 TLS and targets station in the study area



การเก็บข้อมูลในแปลงทดสอบนี้ตั้งเครื่องมือ 4 ครั้ง ใช้เป้าอ้างอิง 4 เป้า ขอบเขตของการสแกนแนวราบ 360 องศา แนวตั้ง 270 องศา ความละเอียดของการสแกนมีระยะห่างระหว่างจุด 3.1 มิลลิเมตร ที่ระยะทาง 10 เมตร ระยะห่างระหว่างจุดตั้ง TLS กับต้นไม้มีระยะ 6-10 เมตร พอยท์คลาวด์จาก TLS นำมา register เพื่อ merge และแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลพอยท์คลาวด์เชิงเดี่ยว

วิธีการ register จะใช้เป้าหมายอ้างอิงจากพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนในรูปที่ 2 เพื่อ merge พอยท์คลาวด์ และคำนวณค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) ของระยะทางในแกน x, y และ z ระหว่างเป้าอ้างอิงแต่ละเป้า โดยค่า RMSE ไม่ควรเกิน 0.08 เมตร [17] จากนั้น merge ข้อมูลพอยท์คลาวด์ทั้งหมดและแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลพอยท์คลาวด์เชิงเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 2 ตำแหน่งตั้ง TLS อยู่ระหว่างเป้าอ้างอิง 2 เป้า โดยในแต่ละครั้งของการสแกนต้องเก็บข้อมูลเป้าอ้างอิงอย่างน้อย 3 เป้า การเก็บข้อมูลในแปลงทดสอบนี้ตั้งเครื่องมือ 4 สถานี ใช้เป้าอ้างอิง 4 เป้า และรูปที่ 3 พอยท์คลาวด์พหุจาก TLS จำนวน 4 สถานี นำมา register และรวมข้อมูลเพื่อแปลงข้อมูลให้



Figure 3 The results of converting multiple point cloud to a single point cloud

เป็นพอยท์คลาวด์เชิงเดี่ยว ชุดข้อมูลจุดพิกัดทั้ง 4 ชุด จาก 4 สถานี จะ merge โดยใช้จุดอ้างอิงจากเป้าหมายวิจัยนี้การ register กำหนดให้มีค่า RMSE ของระยะทางในแกน x, y และ z ระหว่างคู่ของเป้าอ้างอิงต่ำกว่า 0.01 เมตร

2.4 การคำนวณปริมาตรของลำต้นและการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

ช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการใช้ TLS ที่สามารถรวบรวมพอยท์คลาวด์สามมิติความละเอียดสูง ซึ่งให้รายละเอียดโครงสร้างของพืชพรรณที่ชัดเจน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง มีประสิทธิภาพช่วยในการประมาณค่าปริมาตรและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินแบบไม่ทำลาย ซึ่งไม่สามารถทำได้ด้วยการแบบดั้งเดิม [8,12,13] การประยุกต์ใช้แบบจำลองทรงกระบอกเป็นตัวแทนลำต้น กิ่งก้านสำหรับคำนวณปริมาตรของลำต้นร่วมกับค่าความหนาแน่นของไม้ที่มาจาก การเจาะเนื้อไม้เพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน [20,21] เทคนิคการสร้างพื้นผิวใหม่ คือ กระบวนการสร้างผิวของวัตถุจากพอยท์คลาวด์สามมิติที่อนุমানหรือสร้างขึ้นใหม่ตามวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานในแต่ละสาขา เช่น การออกแบบวิศวกรรมยานยนต์ โทรคมนาคม ระบบสาธารณสุข โภค โบราณคดี และศิลปะ [22] Ower [23] ได้การทดสอบวิธีประมาณค่าปริมาตรและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นไม้ในพื้นที่ชุ่มน้ำชายฝั่งด้วยเทคนิคการสร้างพื้นผิวใหม่ ผลการศึกษาพบว่าการใช้ TLS ในพื้นที่ชุ่มน้ำชายฝั่งมีประสิทธิภาพในการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอย่างแม่นยำสำหรับพืชที่มีโครงสร้างซับซ้อน โดยไม่ทำลายต้นไม้

2.4.1 วิธี Qualitative surface model (QSM)

Åkerblom [24] นำเสนอหลักการของวิธี QSM ว่าวิธีการนี้ใช้รูปทรงพื้นฐานทางเรขาคณิต

เช่น ทรงกระบอก ซึ่งเลือกใช้งานทรงกระบอกเนื่องจากมีลักษณะคล้ายกับลำต้นของต้นไม้และเป็นตัวเลือกที่ให้ผลการประมาณปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรจริงมากที่สุด การคำนวณปริมาตรจากรูปทรงกระบอกที่แบ่งเป็นส่วน ๆ โดยใช้สมการที่ 1 และใช้ซอฟต์แวร์รหัสเปิดทรีคิวเอสเอ็ม (TreeQSM) เพื่อคำนวณปริมาตรจากพอยท์คลาวด์

$$V = \sum_{i=1}^N \pi h_i r_i^2 \cdot p(i) \text{ (m}^3\text{)} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรทรงกระบอก (ลูกบาศก์เมตร); N คือ จำนวนทรงกระบอก; h_i คือ ความสูงของทรงกระบอกแต่ละชิ้น (เมตร); r_i คือ รัศมีของทรงกระบอกแต่ละชิ้น (เมตร); $p(i)$ คือ ค่าคงที่เท่ากับ 1 เมื่อ (i) เป็นส่วนของลำต้นและมีค่าคงที่เท่ากับ 0 เมื่อ (i) เป็นส่วนอื่น ๆ

2.4.2 วิธี poisson surface reconstruction (PSR)

การสร้างพื้นผิว poisson คือ การปรับข้อมูลพื้นผิวใหม่ให้พอดีกับข้อมูลนำเข้าจากการสแกน การเติมข้อมูลให้กับพื้นผิวที่มีลักษณะเป็นหลุมและการสอดคล้องกันของแบบจำลองที่มีอยู่ โดยมีเป้าหมายที่จะสร้าง watertight สามมิติจากพอยท์คลาวด์ที่นำเข้า [16] โดยการนำฟังก์ชัน indicator สามมิติของ x ที่กำหนดในพื้นที่สามมิติ เพื่อให้ค่าภายในพื้นผิวเป็น 1 (พื้นผิวที่จะสร้างใหม่) และที่จุดนอกของพื้นผิวเป็น 0 ฟังก์ชัน indicator นี้มีการประมาณสำหรับการสร้างพื้นผิว watertight ดังแสดงในสมการที่ 2

$$x(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p \in M \\ 0 & \text{if } p \notin M \end{cases} \quad (2)$$

เมื่อ $x(p)$ คือ ฟังก์ชัน indicator สามมิติของ x ; p คือ พอยท์คลาวด์; M คือ พื้นผิวใหม่ และคำนวณปริมาตรจากพื้นผิวที่สร้างขึ้นใหม่โดยใช้ซอฟต์แวร์รหัสเปิดคลาวด์คอมแพร์ (cloud compare)

นำค่าปริมาตรจากพอยท์คลาวด์ของ TLS ไปคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน โดยใช้ค่าเฉลี่ย

ความหนาแน่นพื้นฐานของไม้แต่ละชนิด (basic density of wood, BDW) เป็นตัวคุณ มีงานวิจัยที่ผ่าน มาโดย Ribeiro [25] ได้ศึกษาการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินและคาร์บอนของต้นยูคาลิปตัสในพื้นที่ตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศบราซิล ต้นยูคาลิปตัส 24 ต้น นำมาประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากอัตราส่วนมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน (Biomass ratios , Br_i) ของกิ่งก้าน ใบและรากของ ต้นไม้คำนวณได้จากน้ำหนักตัวอย่างแบบแห้ง (dry weights, Dw_i) หารด้วยน้ำหนักตัวอย่างแบบสด (fresh weights, Fw_i) ของแต่ละตัวอย่าง (i^{th}) อัตราส่วนมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่นำมาคูณกับ ผลรวมของน้ำหนักสดของต้นไม้ตัวอย่างแต่ละต้นที่ถูก ชั่งในสนาม (F_i) หน่วยเป็นกิโลกรัม จะได้ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินในสนาม (B_i) และมวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมดของลำต้นและเปลือกไม้ (AGB_i) คำนวณโดยการคูณปริมาตรลำต้นและเปลือกไม้ด้วย ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นพื้นฐานของไม้ (basic density of wood, BDW) หรือเปลือกไม้ (basic density of bark, BDB) ดังแสดงในสมการที่ 3

$$AGB_i = V_i \cdot (BDW \text{ or } BDB) \text{ (Kg)} \quad (3)$$

เมื่อ คือ มวลชีวภาพเหนือพื้นดินทั้งหมดของ ลำต้น และเปลือกไม้ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (Kg); V_i คือ ปริมาตรของลำต้นหรือเปลือกไม้ หน่วยเป็นลูกบาศก์ เมตร (m^3); BDW, BDB คือ ความหนาแน่นพื้นฐานของไม้หรือเปลือกไม้ ตามลำดับ หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร ($Kg \cdot m^{-3}$)

Hackenberg [20] ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของต้นไม้ 3 ชนิด ด้วยวิธีมาตรฐาน โดยตัด ลำต้นเป็นแวนที่ระดับความสูงเพียงอก (1.30 เมตร) ชั่ง น้ำหนักสดรวมเปลือกไม้ แล้วนำไปอบแห้งในตู้อบ เป็น เวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 107 องศาเซลเซียส นำมา ชั่งน้ำหนักแห้ง วัดความหนาเฉลี่ย และเส้นผ่าน

ศูนย์กลางเฉลี่ยของแต่ละแวนด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ เพื่อคำนวณปริมาตร (วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละแวน 4 ครั้ง การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางครั้งที่ 1 ตั้งฉากกับการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางครั้งที่ 2 เช่นเดียวกับการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางครั้งที่ 3 ตั้งฉากกับการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางครั้งที่ 4 แล้วคำนวณค่าความหนาแน่นของไม้จากน้ำหนักแห้งหารด้วยปริมาตรแห้ง [20,26, 27] งานวิจัยนี้ได้หาค่าความหนาแน่นเช่นเดียวกับวิธีของ Hackenberg ในตัวอย่างต้นยูคาลิปตัส 24 ต้น ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 486.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ เมตร นำค่าความหนาแน่นนี้คูณกับค่าปริมาตรอ้างอิง และปริมาตรจากพอยคลาวด์ของ TLS เพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

ค่าความหนาแน่นของไม้เป็นที่มาของความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย เมื่อนำไปใช้กับส่วนของลำต้นเพื่อประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน หากเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง (ground truth) จะพบว่าข้อผิดพลาดในการคำนวณปริมาตรของลำต้นเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดิน [20]

อย่างไรก็ตาม เครื่อง TLS ยังมีข้อจำกัดในการวัดเรือนยอด (canopy measurement) มีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความสูงของต้นยูคาลิปตัสมีความสูงมากกว่ามุมของการสแกนในแนวตั้ง (มากกว่า 67.50 องศา วัดจากแนวราบของเครื่อง TLS ไปยังยอดไม้) และระยะเส้นสายตา (line of sight) ระหว่างเครื่อง TLS กับกิ่งก้านของเรือนยอดที่ถูกบดบังจากใบ การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดสามารถแก้ไขด้วยการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินของเรือนยอดที่มีค่าร้อยละ 10-30 ของมวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยรวม [17,28] ดังนั้น การปรับแก้ค่าประมาณเรือนยอด (canopy correction) จะประมาณค่าที่ร้อยละ 20 ± 10 ของมวลชีวภาพ

เหนือพื้นดิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำค่า 1.25 คูณเข้าไปในมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของเครื่อง TLS แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง [29]

2.5 การตรวจสอบความถูกต้องผลการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน

2.5.1 มวลชีวภาพจริงเหนือพื้นดิน

หลังจากการเก็บข้อมูลด้วย TLS ในหัวข้อ 2.4 เสร็จแล้ว ตัดต้นยูคาลิปตัส 24 ต้น จากโคนต้นเหนือพื้นดิน เก็บข้อมูลด้วยวิธีตัดลำต้นไปแทนที่น้ำ (water displacement, WD) โดยตัดลำต้นออกเป็นท่อน ความยาวท่อนละ 0.80 เมตร ซึ่งน้ำหนักท่อนไม้ด้วยความละเอียด 0.01 กิโลกรัม นำไปแทนที่น้ำในตู้ทดสอบขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 0.44 x 0.90 x 0.45 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4



Figure 4 The water level in the test cabinet after the stem or branches was replaced

รูปที่ 4 ระดับน้ำในตู้ทดสอบหลังการแทนที่ของไม้ในน้ำจะนำไปคำนวณปริมาตรจากสมการที่ 4

$$V = (\text{Last level} - \text{First level}) \times \text{wide} \times \text{long} \text{ (m}^3\text{)} \quad (4)$$

เมื่อ Last level คือ ระดับน้ำหลังการแทนที่ของไม้ในน้ำ; First level คือ ระดับน้ำก่อนการแทนที่ของไม้ในน้ำ

เมื่อได้ค่าปริมาตรแล้ว จึงคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของต้นยูคาลิปตัสแต่ละต้น เพื่อใช้เป็นมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณในหัวข้อที่ 2.5 แสดงผลความถูกต้องโดยใช้ค่า RMSE

2.5.2 การวัดความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์

ความคลาดเคลื่อนจากการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง TLS ในสนาม จะไม่นำมาคำนวณในส่วนของความคลาดเคลื่อนของปริมาตร เนื่องจากมีค่าต่ำมาก โดยกำหนดสมบัติของเครื่อง TLS ก่อนการเก็บข้อมูลให้ความละเอียดของการสแกนมีระยะห่างระหว่างจุด 3.1 มิลลิเมตร ที่ระยะทาง 10 เมตร ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่าร้อยละ 0.03

ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error, RMSE) เลือกเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS เปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง ค่า RMSE ที่ค่อนข้างต่ำบ่งบอกว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS ที่คำนวณได้มีความแม่นยำเพียงใด [30] โดยใช้สมการที่ 5

$$RMSE_{QSM,PSR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (AGB_{WD} - AGB_{QSM,PSR})^2}{n}} \text{ (Kg)} \quad (5)$$

เมื่อ AGB_{WD} คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงที่ได้จากการตัดต้นไม้แทนที่น้ำ (Kg); $AGB_{QSM,PSR}$ คือ ค่าประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS ด้วยวิธี QSM และ PSR (Kg)

สมการที่ 5 ใช้เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงและมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS

3. ผลการวิจัย

การคำนวณปริมาตรของวัตถุด้วยวิธีการแทนที่น้ำมีการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยในหลากหลายสาขา และเป็นที่ยอมรับจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เช่น Robert และคณะ [31] ทำงานวิจัยโดยใช้วิธีประยุกต์การแทนที่น้ำ (modified water displacement method, MWDM) สำหรับการหาปริมาตรทั้งก้อนของแข็งที่มีรูพรุน (porous solid) พบว่าวิธีการ MWDM มีความถูกต้องและความแม่นยำสูงมาก เป็นเทคนิคที่คุ้มค่าและง่ายต่อการใช้งาน สามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุที่มีลักษณะทางกายภาพหลายรูปแบบ โดยไม่ต้องใช้ต้นทุนสูง และอุปกรณ์ที่ซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำวิธีการแทนที่น้ำ เพื่อคำนวณปริมาตรอ้างอิงจากสมการที่ 4 และนำค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของต้นยูคาลิปตัสจากหัวข้อที่ 2.5 แทนค่าในสมการที่ 3 เพื่อคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินและใช้เป็นมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณจากพอยท์คลาวด์ของ TLS และใช้สมการที่ 5 เพื่อตรวจสอบค่าความถูกต้อง

ผลการคำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS โดยใช้วิธี QSM และวิธี PSR

($AGB_{QSM,PSR}$) ของต้นยูคาลิปตัส 24 ต้น โดยมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS คูณด้วย 1.25 สำหรับการปรับแก้ค่าประมาณเรือนยอดนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงด้วยวิธีแทนที่น้ำ (AGB_{WD}) มวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณจากวิธี QSM และวิธี PSR มีค่ามากกว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงโดยเฉลี่ย 1.48 และ 1.27 กิโลกรัม คิดเป็นร้อยละ 14.26 และ 13.79 ตามลำดับ ค่า $RMSE_{QSM}$ มีค่า 3.08 กิโลกรัม และ $RMSE_{PSR}$ มีค่า 1.78 กิโลกรัม ค่า $RMSE$ จากทั้ง 2 วิธีมีค่าต่ำกว่าบอกว่ามวลชีวภาพที่คำนวณจากพอยท์คลาวด์ของ TLS มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิง ผลการเปรียบเทียบแสดงด้วยแผนภูมิเปรียบเทียบมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงและมวลชีวภาพจากวิธี QSM และวิธี PSR ดังแสดงในรูปที่ 5

4. อภิปรายและสรุป

TLS เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยไม่ตัดต้นไม้ และให้พอยท์คลาวด์ที่มีจำนวนมากพอสำหรับการแยกพารามิเตอร์ที่สำคัญของต้นไม้แต่ละต้นได้โดยตรง เช่น DBH และความสูง งานวิจัยนี้ทดสอบวิธี

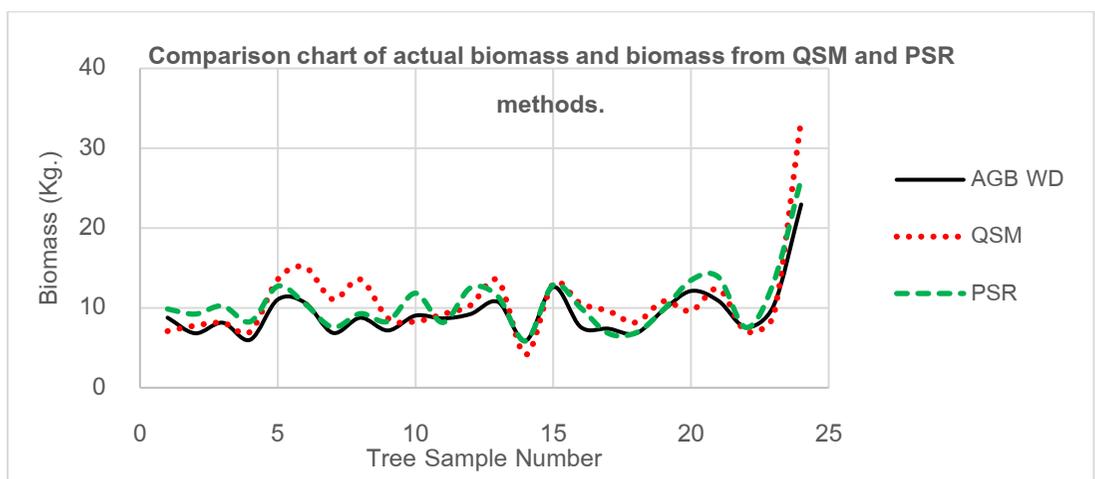


Figure 5 The comparison of actual biomass with biomass from the QSM and PSR methods

คำนวณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินจากพอยท์คลาวด์ของ TLS จาก 2 วิธี ที่ต่างกัน

ผลการประมาณมวลชีวภาพเหนือพื้นดินของ ต้นยูคาลิปตัสที่ใช้พอยท์คลาวด์จาก TLS วิธี QSM และ PSR มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินมากกว่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงร้อยละ 14.25 และ 13.79 ตามลำดับ วิธี PSR มีมวลชีวภาพเหนือพื้นดินใกล้เคียงกับมวลชีวภาพเหนือพื้นดินอ้างอิงมากกว่าวิธี QSM คล้ายกับผลลัพธ์ที่พบในงานวิจัยอื่น ๆ [23] ซึ่งวิธี PSR สร้างพื้นผิวสามมิติจากพอยท์คลาวด์ด้วยสมการ poisson พอยท์คลาวด์สามมิติที่นำเข้ามาเป็นปริมาณเวกเตอร์ที่มีความแตกต่างของสนามเวกเตอร์ส่วนที่เป็นวัตถุกับไม่ใช่วัตถุ แล้วจึงใช้ฟังก์ชันแยกส่วนวัตถุและไม่ใช่วัตถุออกจากกัน แล้วจึงสร้างชายสามเหลี่ยมจากพอยท์คลาวด์เป็นพื้นผิวใหม่ที่ถูกรับให้คล้ายกับพื้นผิวเดิมมากที่สุด [32] และคำนวณปริมาตรจากพื้นผิวใหม่ที่สร้างขึ้น ส่วนวิธี QSM ที่ใช้ทรงกระบอกเป็นตัวแทนของลำต้นเพื่อคำนวณปริมาตรงานวิจัยนี้พบว่าพอยท์คลาวด์ของลำต้นบางส่วนไม่สมบูรณ์ ทรงกระบอกที่จำลองขึ้นมาจึงมีความคลาดเคลื่อนจากขนาดลำต้นจริง เช่น รูปที่ 5 ต้นยูคาลิปตัสตัวอย่างที่ 6, 7, 8 และ 24 มีค่ามวลชีวภาพจากวิธี QSM มีค่าต่างจากมวลชีวภาพจริงมากกว่าตัวอย่างอื่น ๆ เมื่อพิจารณาส่วนของลำต้นพบว่าบางช่วงของลำต้นมีพอยท์คลาวด์ขาดหายไป ไม่ต่อเนื่องเป็นแนวเส้นรอบวงที่เกิดจากในขณะเก็บข้อมูลด้วย TLS แบบ multi-scan มีการบดบังจากลำต้นที่เกิดจากกอดเดียวกันที่ส่งผลให้ค่ามวลชีวภาพมีความคลาดเคลื่อนสูง ตัวอย่างพอยท์คลาวด์ของตัวอย่างที่ 6 ที่มีเส้นรอบวงไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 พอยท์คลาวด์ของตัวอย่างที่ 6 แนวเส้นรอบวงที่ขาดหายไปบางส่วน (ไม่มีพอยท์คลาวด์ในวงกลมเส้นประ) ทำให้การสร้างแบบจำลองรูป

ทรงกระบอกของวิธี QSM มีความคลาดเคลื่อนสูงขณะที่ตัวอย่างที่ 11, 15 และ 22 มีค่ามวลชีวภาพใกล้เคียงกับมวลชีวภาพจริงมากที่สุด เมื่อพิจารณาในส่วนของลำต้นพบว่าพอยท์คลาวด์ของแนวเส้นรอบวงมีความต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับค่าประมาณมวลชีวภาพที่มีค่าใกล้เคียงกับมวลชีวภาพจริง พอยท์คลาวด์ส่วนลำต้นของตัวอย่างที่ 22 แสดงในรูปที่ 7 โดยพอยท์คลาวด์ของลำต้นที่ต่อเนื่องกันทำให้การสร้างแบบจำลองทรงกระบอกด้วยวิธี QSM ถูกปรับให้พอดีมากที่สุด ทำให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำ

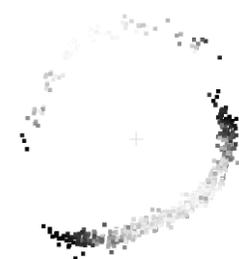


Figure 6 The points cloud of sample No. 6 – discrete circumference.

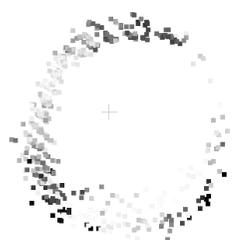


Figure 7 The points cloud of sample No. 22 – continuous circumference

ดังนั้นขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วย TLS ควรเลือกต้นไม้ตัวอย่างแบบต้นเดี่ยวและใช้การสแกนแบบรายต้น เพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณข้อมูลให้ครบถ้วน แต่เวลาและค่าใช้จ่ายจะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ความต่อเนื่องของแนวเส้นรอบวงจากพอยท์คลาวด์ที่

ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่ามวลชีวภาพแล้ว การกำจัดจุดจำนวนมากที่ไม่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณปริมาตรควรดำเนินการด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนเรือนยอดที่มีใบหนาแน่น การเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลด้วย TLS เช่น ต้นไม้บางชนิดจะมีช่วงเวลาใบร่วง การเก็บข้อมูลในช่วงเวลานี้จะได้ข้อมูลส่วนที่จำเป็นเพื่อการประมาณค่ามวลชีวภาพที่ดีขึ้น การเลือกต้นไม้ตัวอย่างการปรับปรุงขั้นตอนการเก็บข้อมูลด้วย TLS หรือการประมวลผลพอยท์คลาวด์ในส่วนเรือนยอดให้มีความแม่นยำควรนำไปพัฒนาต่อไป อย่างไรก็ตาม ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่คำนวณจากพอยท์คลาวด์ของ TLS ทั้ง 2 วิธี นั้นเป็นวิธีการไม่ทำลายต้นไม้ที่เชื่อถือได้

5. ข้อเสนอแนะ

5.1 ปัจจัยที่สำคัญในการจำแนกโครงสร้างต้นไม้แต่ละต้นจากพอยท์คลาวด์ของ TLS ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น คือ ความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ ซึ่งระยะห่างระหว่างต้นไม้และตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนที่เหมาะสมเป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะโครงสร้างกิ่งก้านของต้นไม้ สำหรับต้นไม้แต่ละต้นการเพิ่มจำนวนการสแกนที่มากขึ้นจะเพิ่มความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ที่มีความสมบูรณ์ ซึ่งช่วยแก้ไขโครงสร้างทรงพุ่มได้ โดยเฉพาะที่ด้านบนของทรงพุ่ม การศึกษาของ Wilkes และคณะ [33] ที่ทดสอบสแกนต้นไม้แบบตารางกริด โดยใช้ระยะห่างกริด 10, 20 และ 30 เมตร ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของพอยท์คลาวด์ด้วยการสุ่มตัวอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ด้านบนของทรงพุ่มซึ่งความหนาแน่นของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นจากระยะสแกนกริด 10 เมตร จะเพิ่มความถูกต้องของโครงสร้างการแตกแขนงของกิ่งก้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แน่นอน หากเปรียบเทียบกับ การสแกนต้นไม้ทีละต้นด้วยตำแหน่งการสแกน 8

ตำแหน่งรอบ ๆ ต้นไม้เป้าหมาย โดยสแกนแบบเอียงด้วยความละเอียดเชิงมุมเพิ่มขึ้นเป็น 0.01 องศา ทำให้ได้พอยท์คลาวด์ในแนวตั้งมีจำนวนมากขึ้น และใช้เวลามากกว่าการสแกนแบบกริด เช่น เวลาที่ใช้ในการสแกนตำแหน่งเดียวสำหรับการจำแนกต้นไม้เดี่ยว ๆ คือ ประมาณ 45 นาที [10 นาที สำหรับการสแกนแนวตั้งด้วยสนามมุมมอง (field of view, FoV) 360 องศา ในแนวราบ และ 100 องศา ในส่วนยอด ที่ความละเอียดเชิงมุม 0.04 องศา บวก 35 นาที สำหรับการสแกนแบบเอียง โดยมี FoV 100 องศา ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ที่ความละเอียดเชิงมุม 0.01 องศา] ขณะที่ตำแหน่งการสแกนแบบกริด 1 ครั้ง ทั้งการสแกนแนวตั้งและแนวเอียง มีความละเอียดเชิงมุม 0.04 องศา ใช้เวลาประมาณ 20 นาที [34,35] วิธีการแบบกริดจะให้รายละเอียดที่เพียงพอในการระบุลักษณะโครงสร้างต้นไม้และปริมาตรสำหรับตัวอย่างต้นไม้ขนาดใหญ่ที่อยู่ในพื้นที่ที่ครอบคลุมมากขึ้น ข้อเสนอแนะสำหรับตำแหน่งการสแกนแบบ single-tree ควรอยู่ห่างจากต้นไม้ (รวมถึงเรือนยอด) น้อยกว่า 10 เมตร [33] เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องสูงขึ้น

5.2 การประมาณค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินโดยใช้พอยท์คลาวด์ด้วยการใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ เช่น ฟังก์ชัน compact support radial basis (compact support radial basis function, CSRBF) เพื่อจัดการความหลากหลายของจุดที่มีความหนาแน่นในพื้นที่ที่มองไม่เห็นหรือถูกบดบัง เพื่อเปลี่ยนแบบจำลองพื้นผิวใหม่ให้สามารถเติมหลุมได้ดีขึ้น มีการจัดการหน่วยความจำและการคำนวณที่เร็วขึ้น [36] ซึ่งคาดว่าจะให้ค่ามวลชีวภาพเหนือพื้นดินที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนส่งเสริมการวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณ

บริษัท ทีโอพีคอนอินสทรูเมนต์ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่อง TLS ในการเก็บข้อมูล คุณวาริน ชุบขุนทด และนิสิตปริญญาเอก ภาควิชา วิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่าน ในการเก็บข้อมูลสนามและประมวลผลพอยท์คลาวด์

7. References

- [1] Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. and Söderman, U., 2004, Laser scanning of forest resources: The nordic experience, *Scand. J. Forest Res.* 19: 482-499.
- [2] Küßner, R. and Mosandl, R., 2000, Comparison of direct and indirect estimation of leaf area index in mature Norway spruce stands of eastern Germany, *Can. J. Forest Res.* 30: 440-447.
- [3] Henning, J.G. and Radtke, P.J., 2006, Ground-based laser imaging for assessing three-dimensional forest canopy structure, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 72: 1349-1358.
- [4] Falkowski, M.J., Evans, J.S., Martinuzzi, S., Gessler, P.E. and Hudak, A.T., 2009, Characterizing forest succession with lidar data: An evaluation for the Inland Northwest, USA, *Remote Sens. Environ.* 113: 946-956.
- [5] Popescu, S.C., 2007, Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar, *Biomass Bioenergy* 31: 646-655.
- [6] Hudak, A.T., Evans, J.S. and Smith, A.M.S., 2009, LiDAR utility for natural resource managers, *Remote Sens.* 1: 934-951.
- [7] Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M., 2003, LiDAR remote sensing of forest structure, *Prog. Phys. Geogr.* 27: 88-106.
- [8] Dassot, M., Constant, T. and Fournier, M., 2011, The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges, *Ann. Forest Sci.* 68: 959-974.
- [9] Loudermilk, E.L., Hiers, J.K., O'Brien, J.J., Mitchell, R.J., Singhania, A., Fernandez, J.C., Cropper, W.P.Jr. and Slatton, K.C., 2009, Ground-based LIDAR: A novel approach to quantify fine-scale fuelbed characteristics, *Int. J. Wildland Fire* 18: 676-685.
- [10] Holopainen, M., Vastaranta, M., Kankare, V., Rätty, M., Vaaja, M., Liang, X., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Viitala R. and Kaasalainen, S., 2011, Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter TLS measurements, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.* 38-5W12: 91-95.
- [11] Mengesha, T., Hawkins, M. and Nieuwenhuis, M., 2015, Validation of terrestrial laser scanning data using conventional forest inventory methods, *Eur. J. For. Res.* 134: 211-222.
- [12] Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggren, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., Holopainen, M.

- and Vastaranta, M., 2016, Terrestrial laser scanning in forest inventories, *J. Photogramm. Remote Sens.* 115: 63-77.
- [13] Newnham, G.J., Armston, J.D., Calders, K., Disney, M.I., Lovell, J.L., Schaaf, C.B., Strahler, A.H. and Danson, F.M., 2015, Terrestrial laser scanning for plot-scale forest measurement, *Curr. Forestry Rep.* 1: 239-251.
- [14] Olsoy, P.J., Glenn, N.F., Clark, P.E. and Derryberry, D.R., 2014, Aboveground total and green biomass of dryland shrub derived from terrestrial laser scanning, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 88: 166-173.
- [15] Raunonen, P., Kaasalainen, M., Markku, A., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney M. and Lewis, P., 2013, Fast automatic precision tree models from terrestrial laser scanner data, *Remote Sens.* 5: 491-520.
- [16] Kazhdan, M., Bolitho, M. and Hoppe, H., 2006, Poisson surface reconstruction, in *Proceedings of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing* 7: 21-30.
- [17] Feliciano, E.A., Wdowinski, S. and Potts, M.D., 2014, Assessing mangrove above-ground biomass and structure using terrestrial laser scanning: A case study in the everglades national park, *Wetlands* 34: 955-968.
- [18] Ishak, N.I., Abu Bakar, M.A., Abdul Rahman, M.Z.A., Rasib, A.W., Kanniah, K.D., Meng Shin, A.L. and Razak, K.A., 2015, Estimating single tree stem and branch biomass using terrestrial laser scanning, *J. Teknol.* 77: 59-67.
- [19] Maas, H.G., Bienert, A., Scheller, S. and Keane, E., 2008, Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data, *Int. J. Remote Sens.* 29: 1579-1593.
- [20] Hackenberg, J., Wassenberg, M., Spiecker, H. and Sun, D., 2015, Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density, *Forests* 6: 1274-1300.
- [21] Stovall, A.E.L., Vorster, A.G., Anderson, R.S., Evangelista, P.H. and Shugart, H.H., 2017, Non-destructive aboveground biomass estimation of coniferous trees using terrestrial LiDAR, *Remote Sens. Environ.* 200: 31-42.
- [22] Berger, M., Tagliasacchi, A., Seversky, L.M., Alliez, P., Guennebaud, G., Levine, J.A., Sharf, A. and Silva, C.T., 2017, A survey of surface reconstruction from point clouds, *Comput. Graph. Forum* 36: 301-329.
- [23] Owers, C.J., Rogers, K. and Woodroffe, C.D., 2018, Terrestrial laser scanning to quantify above-ground biomass of structurally complex coastal wetland vegetation, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.* 204: 164-176.
- [24] Åkerblom, M., 2012, Quantitative Tree Modeling from Laser Scanning Data,

- Master Thesis, Tampere University of Technology, Tampere.
- [25] Ribeiro, S.C., Soares, C.P.B., Fehrmann, L., Jacovine, L.A.G. and von Gadow, K., 2015, Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal eucalyptus trees in Southeast Brazil, *Revista Arvore* 39: 353-363.
- [26] Wassenberg, M., Montwé, D., Kahle, H.P., and Spiecker, H., 2014, Exploring high frequency densitometry calibration functions for different tree species, *Dendrochronologia* 32: 273-281.
- [27] Wassenberg, M., Chiu, H.S., Guo, W. and Spiecker, H., 2015, Analysis of wood density profiles of tree stems: Incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations, *Trees Struct. Funct.* 29: 551-561.
- [28] Komiyama, A., Ong, J.E. and Pongpam, S., 2008, Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review, *Aquat. Bot.* 89: 128-137.
- [29] Intharat, T. and Vaipasa, C., 2018, Modeling mangrove above-ground biomass using terrestrial laser scanning technique: A case study of the *Avicennia marina* species in the Bang Pu district, Thailand, *Thai J. Sci. Technol.* 7(3): 307-318. (in Thai)
- [30] Olagoke, A., Proisy, C., Féret, J.B., Blanchard, E., Fromard, F., Mehlig, U., de Menezes, M.M., Dos Santos, V.F. and Berger, U., 2016, Extended biomass allometric equations for large mangrove trees from terrestrial LiDAR data, *Trees* 30: 935-947.
- [31] Robert, U.W., Etuk, S.E. and Agbasi, O.E., 2019, Bulk volume determination by modified water displacement method, *Iraqi J. Sci.* 60: 1704-1710.
- [32] Kazhdan, M. and Hoppe, H., 2013, Screened poisson surface reconstruction, *ACM Transact. Graph.* 32(3): 29.
- [33] Wilkes, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., de Tanago, J.G., Bartholomeus, H., Brede, B. and Herold, M., 2017, Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots, *Remote Sens. Environ.* 196: 140-153.
- [34] Clark, D.B. and Kellner, J.R., 2012, Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness, *J. Veg. Sci.* 23: 1191-1196.
- [35] Danson, F.M., Gaulton, R., Armitage, R.P., Disney, M., Gunawan, O., Lewis, P., Pearson, G. and Ramirez, A.F., 2014, Developing a dual-wavelength full-waveform terrestrial laser scanner to characterize forest canopy structure, *Agric. Forest Meteorol.* 198-199: 7-14.
- [36] Morel, J., Bac, A. and Véga, C., 2018, Surface reconstruction of incomplete datasets: A novel poisson surface approach based on CSRBF, *Comput. Graph.* 74: 44-55.