

Research Article

การประเมินแบบจำลองความสูงของต้นข้าวด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

Rice canopy height model assessment using unmanned aerial vehicle (UAV) images

ปริญัต จุนถาวร¹ และ กฤษณ อินทรรัตน์^{1*}

Parinchat Juntaworn¹ and Kritchayan Intarat^{1*}

¹คณะศิลปศาสตร์ สาขาวิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อำเภอกองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121 ประเทศไทย

¹Faculty of Liberal Arts, Department of Geography, Thammasat University, Khlong Luang, Pathumthani 12121 Thailand

*E-mail: intaratt@tu.ac.th

Received: 10/06/2021; Revised: 20/08/2021; Accepted: 23/09/2021

บทคัดย่อ

การเกษตรแม่นยำถูกนำมาใช้ด้านการเกษตรมากขึ้นในประเทศไทยโดยเฉพาะการปลูกข้าว ข้อมูลที่ต้องแม่นยำเป็นปัจจัยสำคัญในการจัดการนาข้าวอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากข้อมูลดัชนีพืชพรรณแล้ว ข้อมูลความสูงของพืชมีความสำคัญอย่างมากในการตรวจสอบการเจริญเติบโตและประเมินผลผลิต อย่างไรก็ตามการวัดความสูงในแปลงโดยตรงอาจส่งผลกระทบต่อพืชและใช้เวลานาน การทดลองนี้ได้ใช้ความสามารถของอากาศยานไร้คนขับเพื่อสร้างแบบจำลองความสูงเรือนยอด (CHM) ดำเนินการเก็บตัวอย่างจำนวน 108 ตัวอย่างในระยะข้าวแตกกอและระยะข้าวตั้งท้องซึ่งเป็นระยะที่แสดงการเจริญเติบโตทางกายภาพได้ชัดเจน เช่น การเจริญเติบโตทางลำต้นและการเจริญเติบโตด้านการสืบพันธุ์ตามลำดับ CHM ของแต่ละพื้นที่ตัวอย่างถูกกำหนดด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Pr) ที่ 91 ถึง 99 ผลการทดลองพบว่า CHM และความสูงจากแปลงตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นสูงที่สุดในทั้งสองระยะการเจริญเติบโตที่ Pr₉₉ ($r^2 = 0.87$ และ 0.86 ตามลำดับ) ค่า RMSE ของความสูงพืชมีค่า 1.83 และ 1.71 เซนติเมตรตามลำดับที่นัยสำคัญ $p < 0.01$ ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่า UAV สามารถสร้างความสูงได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องลงเก็บข้อมูลภาคสนาม ดังนั้นวิธีนี้จึงเป็นวิธีการที่ดีในการได้มาซึ่งข้อมูลทางกายภาพของต้นข้าวและช่วยป้องกันเรื่องความเสียหายของพืช

คำสำคัญ: แบบจำลองความสูง, อากาศยานไร้คนขับ, นาข้าว

Abstract

Precision agriculture implementation is currently increasing in Thailand, especially in rice cultivation. Accurate information is an essential factor in efficient rice field management. Apart from the vegetation indices, plant height (PH) is critical for crop monitoring and yield prediction. However, field height measurements could cause crop damage and take much time. This study utilizes the capability of an unmanned aerial vehicle (UAV) to construct the canopy height model (CHM) remotely. The samples are collected in the tillering and booting stage for 108 plots, representing the physical extension (e.g., rice elongation and reproduction, respectively). The CHM of each plot is determined at 91 to 99 percentiles. The result revealed that the best linear relationship between the CHM and field PH in both stages was found at the 99th percentile ($r^2 = 0.87$ and 0.86 , respectively). The RMS error of plant height was reported 1.83 and 1.71 cm from the prediction ($p < 0.01$). This experiment authenticates that the UAV could accurately obtain the PH without invading the field. Therefore, it is a good practice for achieving rice physical information and preventing crop destruction.

Keywords: canopy height model, UAV, paddy field

บทนำ

การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชทางด้านเกษตรกรรมเป็นเป้าหมายหลักเพื่อให้ได้มาซึ่งผลผลิตในปริมาณสูงภายใต้การจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ (De Souza et al., 2017) ปัญหาการทำการเกษตรกรรมส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการปลูก (รัฐพงษ์ ม่วงประโคน และคณะ, 2564) จึงจำเป็นต้องมีการจัดการและประเมินผลผลิตพืชตั้งแต่เริ่มระยะการเจริญเติบโต (Grenzdörffer, 2014; Suphan et al., 2019) เพื่อแก้ไขปัญหาให้ทันทั่วทั้งที่และถูกต้องแม่นยำ การติดตามการเจริญเติบโตของพืชทำได้จากการตรวจสอบลักษณะชีพลักษณะที่สามารถบ่งบอกลักษณะการเติบโตของพืชได้ดีที่สุด (Großkinsky et al., 2015) แต่ปัจจุบันยังขาดวิธีการติดตามข้อมูลชีพลักษณะในแปลงผลผลิตที่ดีและแม่นยำ ด้วยข้อจำกัดด้านต้นทุนและความสามารถในการเก็บข้อมูลที่ส่งผลให้การประเมินผลผลิตมีประสิทธิภาพน้อยลง (รัฐพงษ์ ม่วงประโคน และคณะ, 2564; พรหมชัย สุพรรณและคณะ, 2561)

การวัดความสูงของพืชเป็นตัวแปรหนึ่งที่สามารถสะท้อนถึงลักษณะชีพลักษณะและสามารถใช้ติดตามการเจริญเติบโต การประมาณค่าชีวมวลเหนือพื้นดิน และประเมินผลผลิตตามกระบวนการเกษตรแม่นยำ (Bendig et al., 2015) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย (Feng A. et al., 2019; Wang et al., 2018; Yang et al., 2020; Zhang et al., 2018) โดยทั่วไปการวัดความสูงจะสุ่มวัดด้วยไม้วัดโดยเลือกจากพืชบางต้นต่อแปลงที่วางแผนการเก็บอย่างเป็นรูปแบบสำหรับใช้เป็นตัวแทนความสูงของแปลง (Kawamura et al., 2020) การทำงานด้านเกษตรกรรมส่วนมากมัก

ใช้พื้นที่ดำเนินงานขนาดใหญ่ การเก็บข้อมูลโดยใช้แรงงานตามที่กล่าวไปอาจกระทบต่อประสิทธิภาพและก่อให้เกิดความเสียหายต่อพืชภายในแปลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพการประเมินผลผลิตลดน้อยลง (Yang et al., 2020; รัฐพงษ์ ม่วงประโคน และคณะ, 2564; พรหมชัย สุพรรณ และคณะ, 2561)

ในปัจจุบันการวัดความสูงเรือนยอดของพืชได้รับการพัฒนาให้สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิคการสแกนด้วยเลเซอร์ ได้แก่ เทคโนโลยีไลดาร์หรือเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Bareth et al., 2016; Grenzdörffer, 2014; Zhang et al., 2018; Zhou et al., 2020) อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวใช้ต้นทุนค่อนข้างสูง การสำรวจระยะไกลด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในปัจจุบันถูกพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D model) ของพื้นที่วิธีการดังกล่าวสามารถนำไปใช้หาความสูงของพืช (Begashaw, 2018) และเป็นการวัดความสูงที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่พืชและมีประสิทธิภาพสำหรับการสำรวจพื้นที่ขนาดใหญ่ (Kawamura et al., 2020) ส่งผลให้การประเมินผลผลิตทางการเกษตรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและช่วยลดเวลาในการทำงานให้น้อยลง

ข้อมูลจาก UAV ถูกนำมาประยุกต์กับงานด้านเกษตรกรรมได้หลากหลายรูปแบบทั้งการประมาณค่าชีวมวลของข้าว การตรวจวัดความสูง การทำนายหรือประมาณค่าผลผลิต และการติดตามการเจริญเติบโตของข้าวทั้งในประเทศ (พลพจน์ เอี่ยมสอาด และคณะ, 2563; รัฐพงษ์ ม่วงประโคน และคณะ, 2564; Suphan et al., 2019) และต่างประเทศ (Araus & Cairns, 2014; Bareth et al., 2016; Bendig et al., 2014; Bendig et al., 2015; Feng A. et al., 2019; Grenzdörffer, 2014; Iersel et al., 2017; Iizuka et al., 2017; Jones et al., 2020; Kawamura et al., 2020; Lu et al., 2021; Matese et al., 2016; De Souza et al., 2017; Tirado et al., 2019; Wang et al., 2018; Xie & Yang, 2020; Yang et al., 2020; Zhang et al., 2018; Zhou et al., 2020) Iersel et al. (2017) ได้ทดลองตรวจสอบความสูงและความเขียวของพืชสัมฤทธิ์ด้วยอนุกรมเวลาโดยใช้ข้อมูลจาก UAV งานทดลองดังกล่าวได้ศึกษาความสูงและค่าความเขียวของพืช จากนั้นนำมาสร้างแผนที่การเปลี่ยนแปลงความสูงของพืชสัมฤทธิ์ให้มีความถี่ของการเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ผลการศึกษาพบว่าความสูงที่วัดได้แต่ละช่วงเวลามีความแม่นยำที่สุดในฤดูหนาวเนื่องจากสภาพแวดล้อมที่มีความผันแปรต่ำ Kawamura et al. (2020) ได้วิเคราะห์แบบจำลองความสูงของพืชโดยเปรียบเทียบความสูงพืชที่ได้จากภาพถ่าย UAV และความสูงที่ได้จากการวัดค่าในพื้นที่ งานดังกล่าวได้ข้อสรุปถึงประสิทธิภาพในการนำข้อมูลความสูงจาก UAV มาใช้ติดตามการเจริญเติบโตได้ จึงเป็นที่น่าสนใจในการสร้างข้อมูลความสูงจาก UAV เพื่อใช้ในการติดตามการเจริญเติบโตของข้าวแทนการลงสำรวจภาคสนาม

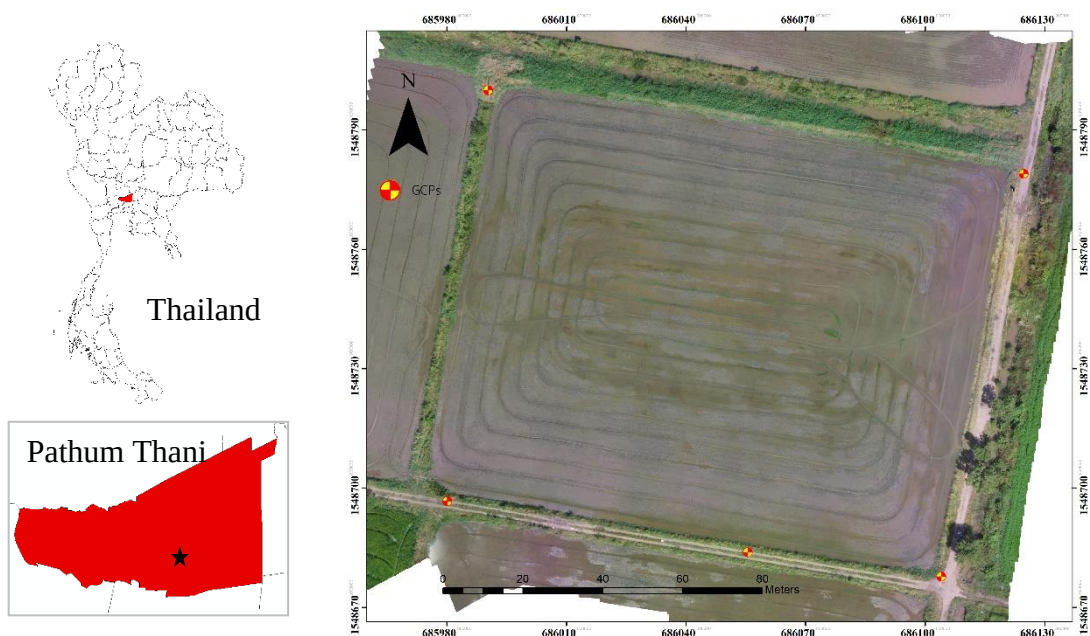
การทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินประสิทธิภาพของ UAV สำหรับการประมาณค่าความสูงต้นข้าวด้วยแบบจำลองความสูงเรือนยอด (CHM) บนสมมติฐานที่ว่า UAV เกรดตามท้องตลาด (commercial-grade UAV) สามารถนำมาใช้ตรวจสอบความสูงของต้นข้าวได้ การทดลองแบ่งการเก็บข้อมูลในแปลงปลูกข้าวออกเป็น 2 ระยะการเจริญเติบโต ได้แก่ ระยะแตกกอและระยะตั้งท้องเนื่องจากระยะการเจริญเติบโตทั้งสองระยะนี้เป็นช่วงที่สำคัญต่อปริมาณผลผลิตของข้าว (Kawamura et al., 2020) การวิเคราะห์ความสูงใช้ CHM โดยคาดหวังว่าการทดลองนี้จะสามารถให้ข้อสรุปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของข้าวที่ได้จาก UAV และการเก็บข้อมูลในแปลง นอกจากนี้

การทดลองยังช่วยให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของ UAV ในการเก็บข้อมูลความสูงของต้นข้าวเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการทำงานร่วมกับวิธีเกษตรแม่นยำ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

ข้าวเป็นพืชที่มีความสำคัญอันดับ 1 ใน 3 ของโลก (Yang et al., 2020) และเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอันดับ 2 ของประเทศไทย การทดลองนี้ทำในพื้นที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี (ละติจูดที่ $13^{\circ}59'50.2''$ เหนือ และลองจิจูดที่ $100^{\circ}40'00.2''$ ตะวันออก) ทำการทดลองในแปลงนาข้าวขนาด 8 ไร่ปลูกข้าวเจ้าพันธุ์ปทุมธานี 1 (Pathum Thani 1) ดำเนินการปลูกแบบนาหว่าน เริ่มปลูกวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 และเก็บเกี่ยววันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2564 ได้แสดงพื้นที่ศึกษาในรูปที่ 1

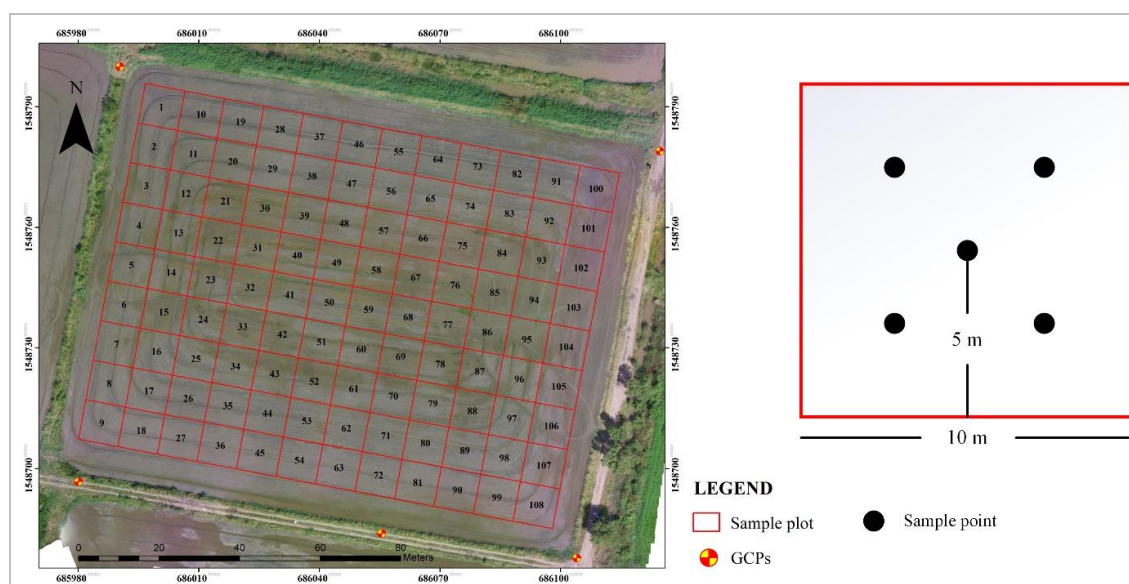


รูปที่ 1 แปลงนาทดลองประเมินความสูงต้นข้าวตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดปทุมธานี

2. การเก็บข้อมูลความสูงต้นข้าวในแปลงทดลอง

ดำเนินการเก็บข้อมูลตัวอย่างภาคสนามโดยเลือกเก็บความสูงของข้าวที่การเจริญเติบโตสองระยะ ได้แก่ ระยะแตกกอ เก็บข้อมูลวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2564 และระยะตั้งท้อง เก็บข้อมูลวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 ข้อมูลถูกเก็บทั้งหมด 108 ตัวอย่างด้วยไม้วัดเป็นอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลมีหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร ระยะห่างของแต่ละ

พื้นที่ตัวอย่างเป็นระยะทาง 10 เมตร (ทั้งด้านกว้างและด้านยาว) กำหนดตำแหน่งกลางพื้นที่ตัวอย่างด้วยเทปวัดระยะ และทำเครื่องหมายกำกับตำแหน่งไว้กับเชือกที่วางอยู่รอบขอบแปลง การเก็บข้อมูลจะเก็บภายในพื้นที่ตัวอย่างโดย วัดค่าความสูงบริเวณกึ่งกลางของพื้นที่ตัวอย่าง จากนั้นวัดค่าโดยการสุ่มตัวอย่างภายในพื้นที่จำนวนอีก 4 ตัวอย่าง รวมเป็น 5 ตัวอย่างต่อพื้นที่โดยสุ่มด้วยวิธี quadrat ซึ่งเป็นวิธีการสุ่มตัวอย่างข้อมูลในรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (รูปที่ 2) ช่วยให้การเก็บข้อมูลกระจายทั่วพื้นที่ตัวอย่างและมีรูปแบบในการเก็บง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับการศึกษา ความสูงและชีวมวลในพืช (Zhang et al., 2018)



รูปที่ 2 การออกแบบวิธีการเก็บข้อมูลตัวอย่างภายในแปลงทดลอง

3. การเก็บข้อมูลความสูงต้นข้าวด้วยภาพถ่ายจาก UAV

ข้อจำกัดด้านการเก็บข้อมูลด้วย UAV สำหรับการเกษตรในประเทศไทยส่วนใหญ่มาจากต้นทุนในการทำงานที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะทาง เครื่อง UAV ที่สามารถหาได้ตามท้องตลาดและราคาไม่สูงมาก มีกล้องที่ใช้เซนเซอร์ RGB ติดมากับตัวเครื่องจึงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาทดลองเพื่อเก็บข้อมูลค่าความสูงของต้นข้าว งานวิจัยนี้ใช้ UAV รุ่น Phantom 3 Professional พร้อมกล้องดิจิทัลบันทึกภาพเซนเซอร์ RGB มีความละเอียด 12 ล้านจุดภาพ ประกอบด้วย 4 โบพัด บินได้ประมาณ 15 ถึง 20 นาทีต่อแบตเตอรี่หนึ่งก้อน แผนการบินถูกกำหนดด้วยแอปพลิเคชัน Pix4D Capture บินในรูปแบบ double grid (รูปที่ 3) ระหว่างช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความเหมาะสมสำหรับการเก็บข้อมูล (Starý et al., 2020; Wan et al., 2020; รัฐพงษ์ ม่วงประโคน และคณะ, 2564) กำหนดความสูงของการบินที่ 20 เมตร ให้ความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ (GSD) 1 เซนติเมตร

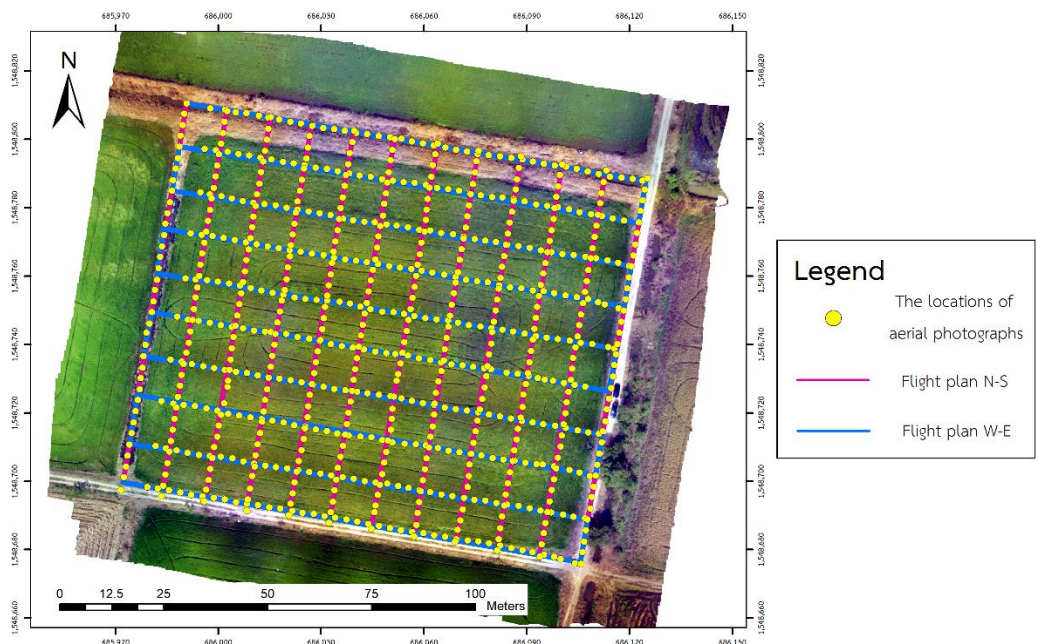
ต่อจุดภาพ กำหนดส่วนซ้อนทับด้านหน้า (over-lap) ร้อยละ 90 และด้านข้าง (side-lap) ร้อยละ 70 ทำมุมกล้อง 80 องศาขณะบินถ่าย ใช้เวลาในการบินประมาณ 63 นาทีต่อการเก็บข้อมูลหนึ่งครั้ง กำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน จำนวน 5 จุด (รูปที่ 1) วางอยู่รอบตำแหน่งแปลงทดลอง ใช้ชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i80 และเครื่องควบคุมรุ่น LT500 ตรวจจับด้วยวิธีการตรวจจับด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK-GNSS) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับ ตรึงค่าพิกัดของแปลงทดลอง

ตารางที่ 1 การเก็บข้อมูลของระยะการเจริญเติบโตของข้าว

ระยะ	ระยะเวลา (นับตั้งแต่เริ่มปลูก)	วันถ่ายภาพ	รูปภาพแปลงในแต่ละระยะการเจริญเติบโต
ก่อนปลูก	-	24 พ.ย. 2563	
ระยะ แตกกอ	43 วัน	6 ม.ค. 2564	
ระยะ ตั้งท้อง	72 วัน	4 ก.พ. 2564	

เก็บข้อมูลความสูงในระยะการเจริญเติบโตของข้าวทั้งหมด 3 ระยะ ได้แก่ ระยะก่อนปลูก เก็บข้อมูลวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ. 2563 ระยะแตกกอ เก็บข้อมูลวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2564 (ข้าวมีอายุ 52 วันนับจากวันปลูก) และระยะตั้งท้อง เก็บข้อมูลวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2564 (ข้าวมีอายุ 81 วันนับจากวันปลูก) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยงานวิจัยของ Kawamura et al. (2020) ได้เสนอช่วงเวลาการเก็บข้อมูลความสูงต้นข้าวที่สองระยะนี้เนื่องจากการวัดความสูงของต้นข้าวจะมีความแม่นยำบางช่วงของระยะการเจริญเติบโต โดยระยะแรกที่ต้นข้าวมีความสูงไม่มากอาจเกิดข้อผิดพลาดในเรื่องความสูงของพืชกับพื้นดินปะปนกัน นอกจากนี้ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นซึ่งแบ่งได้ 4

ระยะย่อยมีความแตกต่างของความสูงเพียง 1 ถึง 2 เซนติเมตรเท่านั้น (Prathumchai et al., 2018) เช่นเดียวกับการจัดการเจริญเติบโตทางสืบพันธุ์ ซึ่ง UAV สามารถถ่ายภาพที่มีข้อผิดพลาดระดับเซนติเมตร เป็นเหตุผลให้งานทดลองนี้เลือกข้าวระยะแตกกอซึ่งอยู่ในการเจริญเติบโตทางลำต้นและระยะตั้งท้องอยู่ในการเจริญเติบโตทางสืบพันธุ์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดข้อผิดพลาดดังกล่าว



รูปที่ 3 แนวบินถ่ายภาพแปลงข้าว จุดสีเหลืองในภาพแสดงตำแหน่งจุดกึ่งกลางภาพแต่ละภาพ เส้นสีชมพูและสีฟ้าแสดงแนวบินของ UAV



(a)



(b)

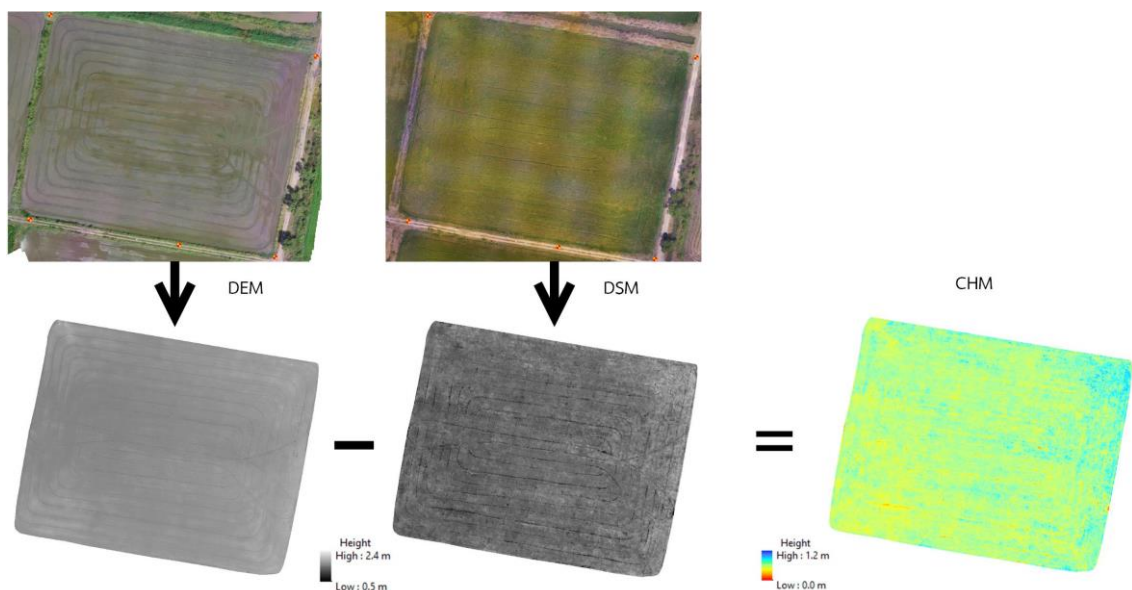
รูปที่ 4 (a) การเก็บข้อมูลจุดอ้างอิงสำหรับตรึงพิกัดภาพถ่ายจาก UAV (b) การติดตั้งเป้าอ้างอิงก่อนการบินเก็บข้อมูล

4. การประมวลผลจุดพิกัดสามมิติและแบบจำลองความสูงเรื่อนยอด

ภาพถ่ายจาก UAV ถูกนำมาสร้างแบบจำลองสามมิติ (3D model) เพื่อวิเคราะห์แบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลข (DSM) และแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (DEM) ของแปลงทดลอง ค่าความสูงที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกจัดเก็บร่วมกับค่าพิกัดทำให้มีความถูกต้อง (Brocks & Bareth, 2018) และมีความต่อเนื่องครอบคลุมทั้งพื้นที่ทดลอง (Kawamura et al., 2020) จากนั้นหาค่าความสูงของต้นข้าวด้วย CHM จากค่าความต่างของ DEM และ DSM ดังรูปที่ 5 ได้แสดงรายละเอียดการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณ CHM ในตารางที่ 2

5. การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์เชิงเส้นของความสูงจาก UAV และจากแปลงปลูกข้าว

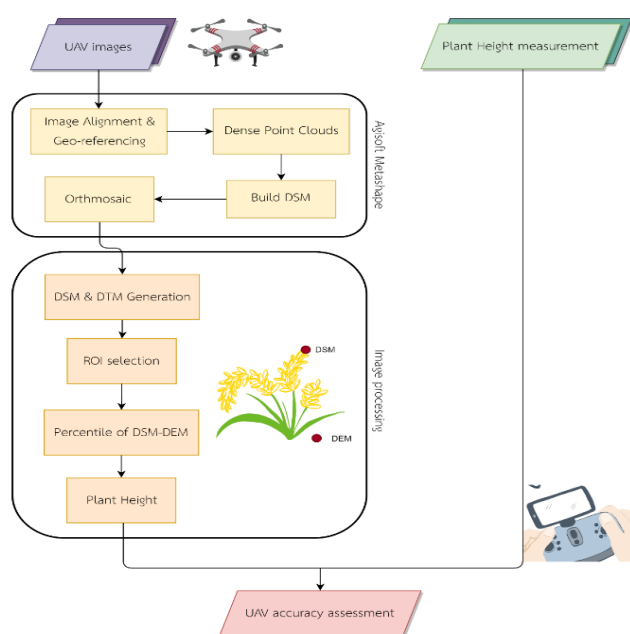
ข้อมูลความสูงที่วัดจากแปลงปลูกข้าวและจาก UAV (Pr_1 ถึง Pr_{99}) ถูกนำมาสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression model) เพื่อทดลองข้อมูลความสูงในแต่ละ Pr ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) สูงที่สุด จากนั้นคำนวณค่ารากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square error; RMSE) เพื่อตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนจาก CHM เปรียบเทียบกับค่าความสูงที่วัดจากแปลงปลูกข้าว รูปที่ 6 แสดงกระบวนการทดลองเพื่อหาความสูงของต้นข้าวด้วยข้อมูลจาก UAV



รูปที่ 5 ตัวอย่างการสร้าง CHM จากข้อมูล DEM และ DSM ที่ได้จากภาพถ่ายจาก UAV

ตารางที่ 2 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV

ขั้นตอน	ตัวแปร	การตั้งค่า
Align Photos	Accuracy	Highest
	Adaptive camera model fitting	Yes
Build Dense Cloud	Quality	Ultra-high
	Depth filtering	Mild
Build texture	Mapping mode	Adaptive ortho-photo
	Blending mode	Mosaic
Build Tiled Model	Source data	Dense cloud
	Tile size	2048
Build DEM	Source data	Dense cloud
	Interpolation	Enabled
Build Orthomosaic	Blending mode	Mosaic
	Surface	DSM



รูปที่ 6 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองประมาณค่าความสูงต้นข้าวด้วย UAV

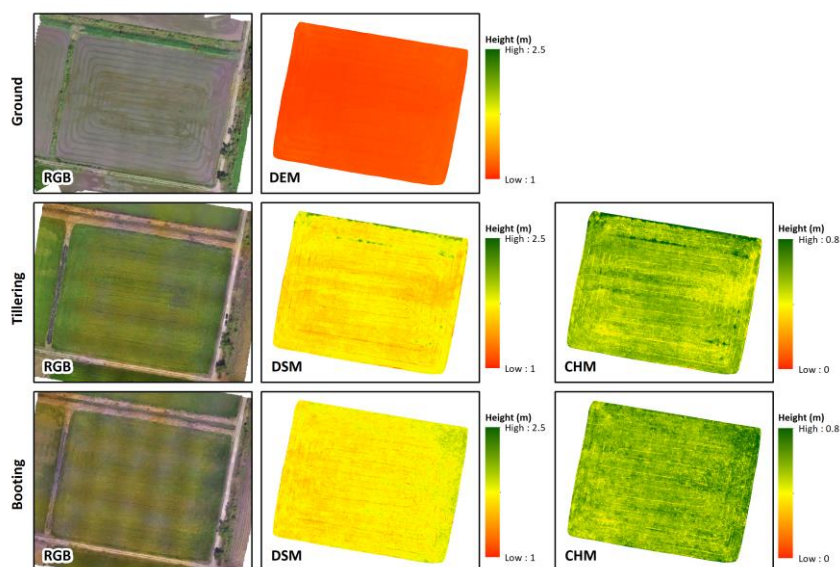
ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการเก็บข้อมูลความสูงจากแปลงทดลองจำนวน 108 ตัวอย่าง โดยสุ่มตัวอย่างละ 5 ค่า (ตามรูปที่ 2) ได้ค่าต่ำสุด (min) ค่าสูงสุด (max) ค่ามัธยฐาน (median) ค่าเฉลี่ยความสูง (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยว (covariance) ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่ามัธยฐาน ค่าเฉลี่ยความสูง และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงต้นข้าวในแปลง

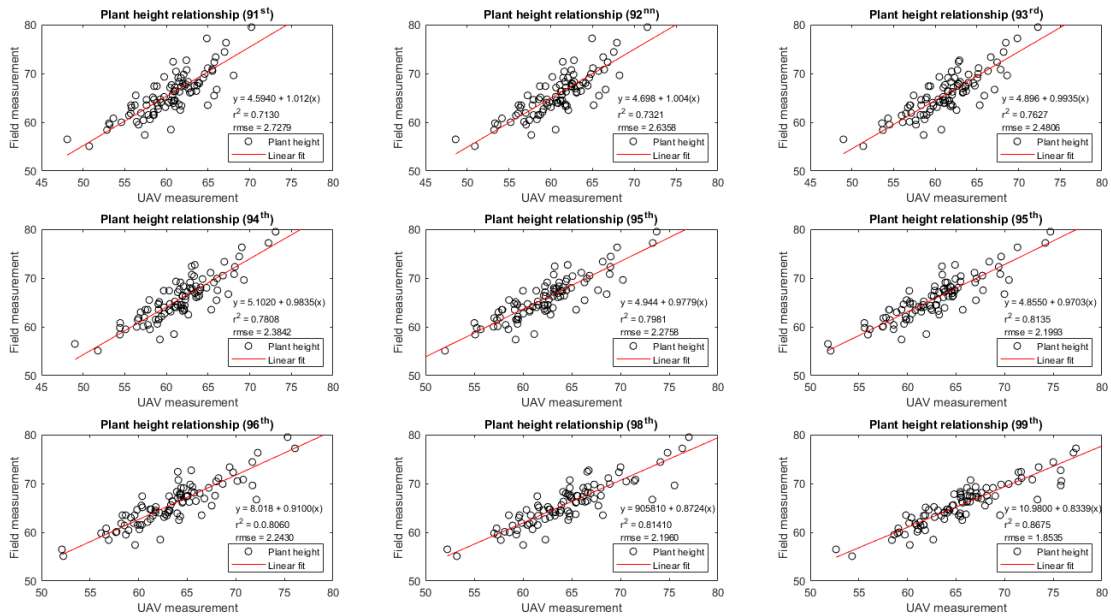
ชุดข้อมูล	จำนวน (จุด)	ค่าต่ำสุด (ซม.)	ค่าสูงสุด (ซม.)	ค่ามัธยฐาน (ซม.)	ค่าเฉลี่ย (ซม.)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ความ แปรปรวน ร่วมเกี่ยว
ระยะข้าว แตกกอ	108	45.55	102.58	67.03	67.93	5.93	8.73
ระยะข้าว ตั้งท้อง	108	47.58	124.14	82.90	83.54	7.19	8.61

จากตารางที่ 3 ค่าความสูงของข้าวระยะแตกกอและระยะตั้งท้องที่ได้จากการวัดในแปลงทดลองมีช่วงกว้าง (ระหว่าง 45.5 – 102.5 เซนติเมตร และ 47.5 – 124.1 เซนติเมตร) มีค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 67.9 ± 5.9 และ 83.5 ± 7.2 เซนติเมตร โดยค่าความแปรปรวนร่วมเกี่ยวอยู่ที่ 8.7 และ 8.6 ตามลำดับ ความสูงต้นข้าวที่ได้จากข้อมูล UAV ถูกนำมาสร้าง CHM ของข้าวระยะแตกกอและระยะตั้งท้องดังแสดงในรูปที่ 7

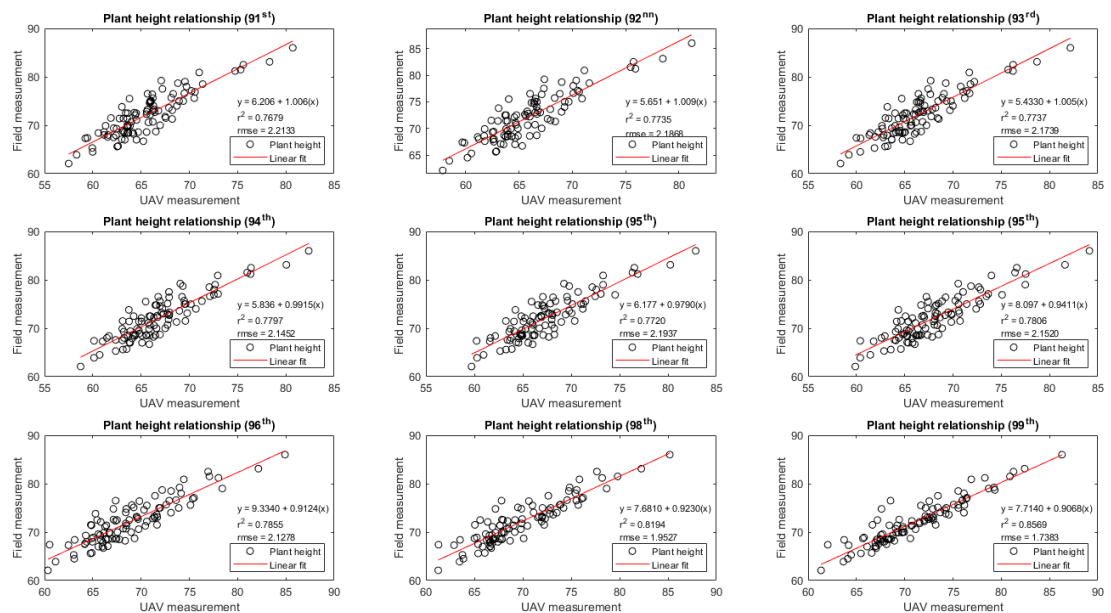


รูปที่ 7 CHM ของต้นข้าวในระยะแตกกอ (tillering) และระยะตั้งท้อง (booting)

นำความสูงต้นข้าวจาก UAV ในแต่ละระยะการเจริญเติบโตลำดับที่ Pr_{91} ถึง Pr_{99} ไปเปรียบเทียบกับความสูงต้นข้าวที่วัดจากแปลงทดลองพบว่าเฉลี่ยของความสูงให้ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดในการนำมาหาความสัมพันธ์กับความสูงที่ได้จาก UAV แสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 8 และ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลความสูงจาก UAV และแปลงข้าวทดลองในระยะข้าวแตกกอ



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลความสูงจาก UAV และแปลงข้าวทดลองในระยะข้าวตั้งท้อง

จากรูปที่ 8 และ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของต้นข้าวในแปลงทดลองและ CHM ที่ระดับ Pr_{91} ถึง Pr_{99} แสดงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$) CHM ให้ความสัมพันธ์มากที่สุดอยู่ใน Pr_{99} โดยในระยะต้นข้าวแตกกอให้ค่า r^2 ที่ 0.87 และในต้นข้าวระยะตั้งท้องให้ r^2 ที่ 0.86 ค่า RMSE ของความสูงต้นข้าวมีค่า 1.83 และ 1.71 เซนติเมตรตามลำดับ ความสัมพันธ์มีค่าลดน้อยลงตามค่าระดับ Pr การประเมินค่าความสูงด้วย UAV อาจให้ค่าความสูงของต้นข้าวต่ำกว่าความเป็นจริง ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการเลือกข้อมูลตัวแทนความสูงจาก UAV (Holman et al., 2016) การเลือกข้อมูลโดยใช้ลำดับของ Pr จากชุดข้อมูลทั้งหมดช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวได้ Lu et al. (2021) นำความสูงที่ Pr_{10} และ Pr_{95} ถึง Pr_{99} เป็นตัวแทนค่า DEM และ DSM ที่ได้จาก UAV สำหรับวิเคราะห์ CHM เช่นเดียวกับ Iersel et al. (2017) ได้เปรียบเทียบความสูงจาก UAV โดยใช้ค่าความสูงที่ Pr_{95} เพียงค่าเดียวส่งผลให้ข้อมูลที่ไว้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความสูงอาจเกิดอคติ งานวิจัยนี้ใช้ค่า Pr_{91} ถึง Pr_{99} จากข้อมูล UAV เพื่อทดสอบค่าตัวอย่างที่ให้แบบจำลองความสัมพันธ์ความสูงของต้นข้าวมีค่าถูกต้องมากที่สุด พื้นที่สุ่มแต่ละพื้นที่มีขนาด 100 ตารางเมตรส่งผลให้มีจุดภาพในแต่ละพื้นที่สุ่มจำนวน 1,000,000 จุดภาพ การใช้ค่าความสูงที่เลือกจาก Pr จึงเป็นค่าที่ช่วยให้การสร้าง CHM มีประสิทธิภาพเนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการคำนวณข้อมูลความสูงที่มีจำนวนจุดภาพมากกว่า 20,000 จุดภาพขึ้นไป อีกทั้งยังให้ค่าความสูงที่โดดเด่นคล้ายกับค่าความสูงที่วัดได้จากแปลงทดลองมากที่สุดและช่วยลดค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสะท้อนของวัสดุอื่นที่ไม่ใช่ต้นข้าว (Holman et al., 2016) ในงานของ Kawamura et al. (2020) ได้ใช้ค่า Pr_{90} ถึง Pr_{99} ในการแสดงค่าความสูงที่ได้จาก UAV เพื่อหลีกเลี่ยงค่าจุดภาพที่มีค่าความสูงมากเกินไปหรือความสูงของพืชที่มีความผิดปกติ สอดคล้องกับ Malambo et al. (2018) ที่ได้สรุปว่า Pr_{90} , Pr_{95} และ Pr_{99} ของแบบจำลองสามมิติมีความสัมพันธ์กับความสูงจากภาคสนามมากกว่าค่าสูงสุด แต่ไม่พบนัยสำคัญทางสถิติจากความแตกต่างของค่า Pr ดังกล่าว

ในการทดลองมีโอกาสดพบค่าคลาดเคลื่อนระหว่างจุดพิกัดสามมิติซึ่งเป็นผลมาจากความสูงบิน Iersel et al. (2017) ใช้ความสูงบินที่ 150 เมตรในการเก็บข้อมูลทำให้ค่าที่ได้จากการประมาณความสูงมีความผิดพลาด นอกจากนี้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและช่วงข้อมูลมีผลต่อความถูกต้องของแบบจำลองเชิงเส้น (Grenzdörffer, 2014; Iersel et al., 2017) ส่งผลต่อค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการประมาณค่าความสูงของต้นข้าวด้วย UAV เช่นกัน (Feng A. et al., 2019; Holman et al., 2016; Kawamura et al., 2020; Wang et al., 2018) งานวิจัยนี้ได้ใช้ความสูงบินต่ำ (20 เมตร) เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนดังกล่าวที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างจุดพิกัดสามมิติ (Kawamura, et al., 2020) และทดสอบความสัมพันธ์ของความสูงโดยเลือกจากค่า Pr เพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองเชิงเส้นที่มีค่าความสัมพันธ์ดีที่สุดเพื่อแก้ปัญหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นจากการเก็บข้อมูล

อย่างไรก็ตาม การวัดข้อมูลความสูงดังกล่าวยังไม่สามารถแยกชนิดของพืชได้ทำให้ข้อมูลความสูงอาจได้รับการปะปนจากพืชชนิดอื่นที่ไม่ใช่ข้าว เช่น วัชพืช และอาจส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์จุดพิกัดสามมิติซึ่งเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ยิ่งไปกว่านั้นรูปแบบของต้นข้าวมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามปัจจัยผลิต เช่น พันธุ์ข้าว การดูแล และการบริหารจัดการน้ำรวมทั้งการเกิดโรคในพืชอาจส่งผลให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน หากเป็นไปได้ควร

มีการทดสอบความสูงของข้าวในทุกระยะการเจริญเติบโต (Bareth et al., 2016; Kawamura et al., 2020) เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความสูงในการเจริญเติบโตของข้าวได้ละเอียดและแม่นยำมากขึ้น

สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้ได้นำภาพถ่ายจาก UAV ช่วงคลื่น RGB มาใช้เพื่อสร้างจุดพิกัดสามมิติสำหรับวิเคราะห์ความสูงของต้นข้าวโดยสร้าง CHM ของข้าวในระยะแตกกอและตั้งท้องซึ่งเป็นช่วงที่มีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว ค่าความสูงที่ระดับ $Pr_{0.1}$ ถึง $Pr_{0.9}$ ถูกนำมาทดสอบเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กับข้อมูลความสูงต้นข้าวที่วัดได้จากแปลงทดลองด้วยแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น เมื่อพิจารณา r^2 และ RMSE พบว่าความสูงที่ $Pr_{0.9}$ แสดงความสัมพันธ์กับค่าความสูงที่วัดจากแปลงทดลองได้สูงที่สุด ค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก UAV และข้อมูลที่ได้จากแปลงทดลองจะลดลงตามระดับ Pr การใช้ UAV เพื่อประมาณค่าความสูงของต้นข้าวสามารถดำเนินการได้รวดเร็ว สะดวก และมีต้นทุนต่ำ สามารถนำไปประยุกต์กับงานด้านการติดตามการเจริญเติบโตของต้นข้าวและเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยข้าวจังหวัดปทุมธานีที่อนุญาตให้ดำเนินการทดลองงานวิจัยในพื้นที่ปลูกข้าวของศูนย์วิจัยฯ และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ GNSS สำหรับบันทึกพิกัดอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in plant science*, 19(1), 52-61.
- Bareth, G., Bendig, J., Tilly, N., Hoffmeister, D., Aasen, H., & Bolten, A. (2016). A comparison of UAV-and TLS-derived plant height for crop monitoring: using polygon grids for the analysis of crop surface models (CSMs). *Photogramm. Fernerkund. Geoinf*, 2016, 85-94.
- Berhanu, S. B. (2018). *Accuracy of DTM derived from UAV imagery and its effect on canopy height model compared to Airborne LiDAR in part of tropical rain forests of Berklah, Malaysia* [Unpublished Master's thesis]. University of Twente.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote sensing*, 6(11), 10395-10412.

- Bendig, J., Willkomm, M., Tilly, N., Gnyp, M. L., Bennertz, S., Lenz-Wiedemann, V. I., Qiang, C., Miao, Y., & Bareth, G. (2015). Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 45-50.
- Brocks, S., & Bareth, G. (2018). Estimating Barley Biomass with Crop Surface Models from Oblique RGB Imagery. *Remote Sensing* 2018, 10(2). <https://doi.org/10.3390/rs10020268>
- Feng, A., Zhang, M., Sudduth, K. A., Vories, E. D., & Zhou, J. (2019). Cotton Yield Estimation from UAV-Based Plant Height. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 62(2). <https://doi.org/10.13031/trans.13067>
- Grenzdörffer, G. J. (2014). Crop height determination with UAS point clouds. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(1), 135.
- Großkinsky, D. K., Svendsgaard, J., Christensen, S., & Roitsch, T. (2015). Plant phenomics and the need for physiological phenotyping across scales to narrow the genotype-to-phenotype knowledge gap. *Journal of Experimental Botany*, 66(18). <https://doi.org/10.1093/jxb/erv345>
- Holman, F. H., Riche, A. B., Michalski, A., Castle, M., Wooster, M. J., & Hawkesford, M. J. (2016). High throughput field phenotyping of wheat plant height and growth rate in field plot trials using UAV based remote sensing. *Remote Sensing*, 8(12), 1031.
- Iersel, W. V., Straatsma, M., Addink, E., & Middelkoop, H. (2018). Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 141, 112-123.
- Iizuka, K., Yonehara, T., Itoh, M., & Kosugi, Y. (2018). Estimating tree height and diameter at breast height (DBH) from digital surface models and orthophotos obtained with an unmanned aerial system for a Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) forest. *Remote Sensing*, 10(1), 13.
- Jones, A. R., Raja Segaran, R., Clarke, K. D., Waycott, M., Goh, W. S., & Gillanders, B. M. (2020). Estimating Mangrove Tree Biomass and Carbon Content: A Comparison of Forest Inventory Techniques and Drone Imagery. *Frontiers in Marine Science*, 6, 784.
- Kawamura, K., Asai, H., Yasuda, T., Khanthavong, P., Soisouvanh, P., & Phongchanmixay, S. (2020). Field phenotyping of plant height in an upland rice field in Laos using low-cost small unmanned aerial vehicles (UAVs). *Plant Production Science*, 23(4), 452-465.

- Lu, J., Cheng, D., Geng, C., Zhang, Z., Xiang, Y., & Hu, T. (2021). Combining plant height, canopy coverage and vegetation index from UAV-based RGB images to estimate leaf nitrogen concentration of summer maize. *Biosystems Engineering*, 202, 42-54.
- Matese, A., Di Gennaro, S. F., & Berton, A. (2017). Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 2150-2160.
- Prathumchai, K., Nagai, M., Tripathi, N. K., & Sasaki, N. (2018). Forecasting transplanted rice yield at the farm scale using moderate-resolution satellite imagery and the AquaCrop model: A case study of a rice seed production community in thailand. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(2), 73.
- De Souza, C. H. W., Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., & Magalhães, P. S. G. (2017). Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International journal of remote sensing*, 38(8-10), 2218-2230.
- Starý, K., Jelínek, Z., Kumhálová, J., Chyba, J., & Balážová, K. (2020). Comparing RGB-based vegetation indices from UAV imageries to estimate hops canopy area. *Agronomy Research*, 18(4), 2592-2601.
- Suphan, P., Kaewplang, S., & Sa-Ngiamvibool, W. (2019). Monitoring of Rice Growth with UAV-derived aerial imagery. *Maharakham International Journal of Engineering Technology*, 5(1), 28-32.
- Tirado, S. B., Hirsch, C. N., & Springer, N. M. (2020). UAV-based imaging platform for monitoring maize growth throughout development. *Plant Direct*, 4(6), e00230.
- Wan, L., Cen, H., Zhu, J., Zhang, J., Zhu, Y., Sun, D., & He, Y. (2020). Grain yield prediction of rice using multi-temporal UAV-based RGB and multispectral images and model transfer—a case study of small farmlands in the South of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108096.
- Wang, X., Zhang, R., Song, W., Han, L., Liu, X., Sun, X., & Zhao, J. (2019). Dynamic plant height QTL revealed in maize through remote sensing phenotyping using a high-throughput unmanned aerial vehicle (UAV). *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- Xie, C., & Yang, C. (2020). A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105731.
- Yang, C. Y., Yang, M. D., Tseng, W. C., Hsu, Y. C., Li, G. S., Lai, M. H., & Lu, H. Y. (2020). Assessment of Rice Developmental Stage Using Time Series UAV Imagery for Variable Irrigation Management. *Sensors*, 20(18), 5354.

- Zhang, H., Sun, Y., Chang, L., Qin, Y., Chen, J., Qin, Y., & Wang, Y. (2018). Estimation of grassland canopy height and aboveground biomass at the quadrat scale using unmanned aerial vehicle. *Remote sensing*, 10(6), 851.
- Zhou, L., Gu, X., Cheng, S., Yang, G., Shu, M., & Sun, Q. (2020). Analysis of plant height changes of lodged maize using UAV-LiDAR data. *Agriculture*, 10(5), 146.
- Suphan, P., Aekkuerkul, T., & Srihanu, N. (2018). Monitoring of rice growth with UAV-derived aerial imagery. In Proceedings of 56th Kasetsart University Annual Conference: Science and Genetic Engineering, Architecture and Engineering, Agro-Industry, Natural Resources and Environment (pp. 548-554). Kasetsart University, Bangkok. (in thai)
- Iamsaard, P., Apiyarat, V., Chaengchen, S., Chulert, P., & Aobpaet, A. (2020). Creating 3D models to estimate the volume of trees using UAV, a case study of Foxtail palm. In *The 25th National Convention on Civil Engineering*. SGI07-SGI07. (in thai)
- Muangprakhon, R., Khaengkhan, P., & Kaewpland, S. (2021). An evaluation of UAV-derived aerial imagery for estimating the yield of rice. *Khon kaen agriculture*, 1, 314-322. (in thai)