



การพัฒนาาระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบแปรผันอัตราได้ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายแบบติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไร้คนขับสำหรับพื้นที่ปลูกอ้อยสมัยใหม่

Development of a variable-rate fertilizer sprayer with image processing technique by unmanned tractor mounting for modern sugarcane plantations

ไชยันต์ สิริกุล^{1*}, เกรียงไกร แซมสีม่วง¹

Chaiyan Sirikun^{1*}, Grianggai Samseemoung¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 12110

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110 Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-9-8145-6595, Fax: +66-25-493-581, E-mail: chaiyan_s@mail.rmUTT.ac.th

บทคัดย่อ

ระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบแปรผันอัตราได้ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไร้คนขับ มีวัตถุประสงค์หลักในการดำเนินงาน 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการพัฒนาต้นแบบระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำตามขนาดทรงพุ่มใบอ้อยซึ่งจะฉีดพ่นปุ๋ยน้ำในปริมาณมากขึ้นในบริเวณที่อ้อยมีทรงพุ่มขนาดเล็ก ส่วนบริเวณที่อ้อยมีทรงพุ่มขนาดใหญ่ให้ฉีดพ่นปุ๋ยน้ำในปริมาณที่น้อยลงเพราะถือว่ามิธาคูอาหารเพียงพอแล้ว โดยใช้เทคนิคประมวลผลภาพ และทำการศึกษาประสิทธิภาพในการประมวลผลภาพของระบบที่ระยะความสูงในการตรวจจับภาพ 0.6m, 0.8m และ 1.0m ซึ่งคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยการประมวลผลภาพค่าความหนาแน่นใบอ้อยเปรียบเทียบกับค่าพีเซลสีของใบอ้อยที่นับได้จริง ผลการทดลองพบว่าระยะความสูงที่ดีที่สุดในการตรวจจับภาพและประมวลผลเท่ากับ 0.6m และประสิทธิภาพในการประมวลผลของระบบจะลดลงที่ระยะความสูงในการตรวจจับภาพเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำที่ระยะความสูงการทำงานของหัวฉีด 0.3m, 0.5m และ 0.7m โดยพิจารณาจากระยะที่ทำให้สารเคมีกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ใบอ้อยและมีการสูญเสียที่น้อยที่สุด พบว่าระยะความสูงของหัวฉีดที่ดีที่สุดในการศึกษาเท่ากับ 0.3m และพบว่าการสูญเสียสารเคมีจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงการทำงานของหัวฉีดมากขึ้น ส่วนที่สองเป็นการพัฒนาต้นแบบรถแทรกเตอร์แบบไร้คนขับ โดยทำการศึกษาการควบคุมในส่วนของควบคุมทิศทางและกำหนดพิกัดตำแหน่งของตัวรถ จากการทดสอบการควบคุมทิศทางและการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ 1 m s^{-1} พบว่าสามารถควบคุมทิศทางได้ดีทั้งในแกน x และ แกน y โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในระหว่างการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.062 m และมีความคลาดเคลื่อนเมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.005 m และผลการทดสอบความสามารถในการทำงานของรถแทรกเตอร์พบว่า มีแรงฉุดลาก 15.17 kN ประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่เท่ากับ 85.30% ความสามารถในการทำงานเท่ากับ 3.57 Rai hr^{-1} และ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ $3.99 \text{ liter hr}^{-1}$

คำสำคัญ: การประมวลผลภาพ, เครื่องฉีดพ่นปุ๋ย, รถแทรกเตอร์ไร้คนขับ, ค่าความหนาแน่นใบ, เทคโนโลยีแปรผันอัตรา

Abstract

Fertilizer sprayer with image processing technique mounted on unmanned tractor was conducted to investigate 2 main purposes: the fertilizer spray application and the unmanned tractor travelling. For the fertilizer spray application, the sugarcane shrub size was determined in order to vary liquid fertilizer rate. Higher rate applied for a small shrub and lower rate for a large healthy shrub. The prototype of variable rate fertilizer sprayer with image processing technique was developed for study the altitudes of image processing system at 0.6m, 0.8m and 1.0m and the altitudes of fertilizer sprayer system at 0.3m, 0.5m and 0.7m which effect the fertilizer sprayer efficiency. The results shown that the altitudes of image processing system at 0.6m and the fertilizer sprayer system height at 0.3m were the best combination for the sprayer system to distribute liquid fertilizer. For the unmanned tractor travelling, the prototype was focused on direction controller and working performance. The direction travelling

Received: January 7, 2021

Revised: February 13, 2021

Accepted: February 14, 2021

Available online: July 12, 2021

controlled was considered at linear and curve trajectory path. At travelling speed 1 m s^{-1} , the direction travelling was controlled in both x and y directions with maximum error during operation at 0.62 m and 0.005 m at the end point. The result showed that working performance 15.17 kN of drawbar force, 85.30% of field efficiency and 3.57 Rai hr^{-1} of tractor field capacity and 3.99 liter hr^{-1} of fuel consumption.

Keywords: image processing, fertilizer sprayer, unmanned tractor, leaf density, variable-rate technology

1 บทนำ

อ้อยเป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะไทยเป็นผู้ส่งออกน้ำตาลทรายรายใหญ่เป็นอันดับที่ 2 ของโลก รองจากประเทศบราซิล โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกมากกว่า 11 ล้านไร่ ในปีการผลิต 2560/61 ผลิ้อ้อยได้สูงกว่า 134 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่าจากการจำหน่ายน้ำตาลไม่น้อยกว่า 200,000 ล้านบาท โดยไม่รวมมูลค่าของผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่นๆ ที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้อีกนับแสนล้านบาทเช่นกัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าในปัจจุบันไทยจะเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลทรายรายใหญ่เป็นอันดับที่ 2 ของโลก แต่ผลผลิตของอ้อยและน้ำตาลเฉลี่ยต่อตันอ้อยของไทยก็นับว่ายังต่ำกว่าประเทศคู่แข่งทางการค้าที่สำคัญ โดยเฉพาะบราซิล และออสเตรเลีย จากข้อมูลพบว่า ผลผลิตเฉลี่ยของอ้อยที่ผลิตในประเทศไทยได้ประมาณ 10 ตันต่อ ไร่ ขณะที่ออสเตรเลียผลิตได้ 15 ตันต่อ ไร่ และบราซิลสูงกว่า 13 ตันต่อ ไร่ (เกษศดา, 2561) จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตของไทยสูงกว่าประเทศคู่แข่ง ซึ่งการที่ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ของอ้อยไทยที่มีค่าต่ำนั้น มีสาเหตุมาจากปัจจัยหลายประการ หนึ่งในนั้นคือ ขาดการใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจุบัน ได้มีการนำเทคโนโลยีและนวัตกรรมเข้าช่วยในการผลิตมากขึ้น นวัตกรรมเครื่องจักรกลเกษตร หุ่นยนต์ โดรน และระบบอัตโนมัติต่างๆ จึงมีบทบาทสำคัญที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากไม่เพียงแต่จะเป็นเครื่องทุ่นแรงให้กับเกษตรกร ช่วยให้เกษตรกรประหยัดเวลาประหยัดแรงงานแล้ว ยังมีการนำมาใช้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย นอกจากนี้ แนวทางเกษตรแม่นยำสูง (Precision agriculture) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่เป็นประเด็นสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพด้านการผลิตได้ ด้วยการจัดการทรัพยากร การใช้ปัจจัยการผลิตอย่างเหมาะสม โดยแนวทางดังกล่าวเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากพื้นที่ทำการเกษตร เช่น อุณหภูมิ อากาศ น้ำ ภาพถ่ายทางอากาศ หรือข้อมูลอื่นๆ ซึ่งต้องอาศัยเซนเซอร์รูปแบบต่างๆ ในการเก็บข้อมูล แล้วนำข้อมูลที่ได้อามาวิเคราะห์สำหรับช่วยในการตัดสินใจในการบริหารจัดการพื้นที่การเกษตรนั้นๆ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (พลังเกษตร, 2018) ตลอดจนสายการผลิต ตั้งแต่ การเตรียมดินเพาะปลูก การให้น้ำ ให้อ้อย การดูแลรักษา ไปถึงขั้นตอนการเก็บเกี่ยว

ในกระบวนการผลิตอ้อย การให้ปุ๋ยนับเป็นขั้นตอนการดูแลรักษาที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง ซึ่งหากสามารถบริหารจัดการเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพได้ก็ย่อมทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นตามมาด้วย ซึ่งจากข้อมูลที่สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายได้รายงาน

ไว้เกี่ยวกับการเพาะปลูกและการให้ปุ๋ยอ้อยไว้ว่า อ้อยเป็นพืชไร่ที่สามารถปลูกได้ในดินทั่วไปยกเว้นดินเหนียว แต่เนื่องจากในฤดูแล้งจะทำให้ดินแข็งมากการเดินทางของรากไม้ดีอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของอ้อยได้ นอกจากนี้ โดยธรรมชาติแล้วอ้อยเป็นพืชที่ต้องการน้ำมากในการเพาะปลูก ดังนั้น การให้ปุ๋ยและการบำรุงดินจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาไปควบคู่กัน นอกจากนี้ เนื่องจากอ้อยสามารถเพาะปลูกครั้งเดียวแล้วเก็บผลผลิตได้ 2-3 ครั้ง หรือที่เรียกว่าอ้อยต่อ 2 หรือต่อ 3 ในช่วงของการปลูกอ้อยจึงต้องคำนวณระยะเวลาในการให้ปุ๋ยและควรมีการให้ปุ๋ยบำรุงดินตลอดฤดูการเก็บเกี่ยวผลผลิต ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว การให้ปุ๋ยน้ำทางใบ เพื่อทดแทนปุ๋ยเคมีทางดิน จะช่วยในเรื่องของการดูแลอาการเสื่อมของดิน และเป็นการลดปริมาณต้นทุนการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นอย่างดี การใส่ปุ๋ยสำหรับอ้อยเพื่อให้ได้ปริมาณอ้อยต่อพื้นที่ปลูกสูงสุดและเพื่อลดอัตราการเสื่อมของสภาพดินควรจะใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ 70:30 และใช้ปุ๋ยน้ำทางใบเป็นฟังก์ชันทดแทนในส่วนของการขาดอาหารที่ลดการใช้ปุ๋ยเคมีลง โดยวิธีการให้ปุ๋ยน้ำทางใบกับอ้อยจะทำโดยการฉีดพ่นเพื่อเพิ่มผลผลิตและประหยัดต้นทุนด้วยธาตุอาหารที่สมบูรณ์ซึมซับเข้าโดยตรงและช่วยบำรุงดินโดยทางตรงและทางอ้อม

จากปัญหาเรื่องการเพิ่มผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพในการผลิตอ้อยประกอบกับความจำเป็นในการให้ปุ๋ยและการบำรุงดินในขั้นตอนการดูแลอ้อยนั้น งานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะประยุกต์ใช้นวัตกรรมเครื่องจักรอัตโนมัติร่วมกับเทคโนโลยีความแม่นยำทางการเกษตรมาช่วยจัดการการให้ปุ๋ยทางใบกับอ้อยให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการพัฒนาระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบแปรผันอัตราได้ ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายแบบติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไร้คนขับสำหรับพื้นที่ปลูกอ้อยสมัยใหม่และมุ่งหวังว่าองค์ความรู้และนวัตกรรมที่เกิดขึ้นจะเป็นประโยชน์ต่อการผลิตอ้อยในประเทศไทย ทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดแรงงาน ลดต้นทุน และเพิ่มผลผลิตให้กับประเทศในที่สุด ทั้งนี้ การวิจัยได้ดำเนินการ 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกทำการออกแบบและพัฒนาชุดคำสั่งประมวลผลความหนาแน่นของใบอ้อยจากภาพถ่ายและต้นแบบระบบการฉีดพ่นปุ๋ยน้ำแบบปรับปริมาณได้ เมื่อความหนาแน่นใบอ้อยน้อยจะฉีดพ่นปุ๋ยน้ำในปริมาณมากและฉีดพ่นปุ๋ยน้ำในปริมาณมากขึ้นเมื่อมีความหนาแน่นใบอ้อยมากในส่วนนี้จะทำการทดสอบความถูกต้องในการประมวลผลของชุดคำสั่งประมวลผลภาพถ่ายและการทำงานของต้นแบบระบบฉีดพ่นปุ๋ยน้ำ ส่วนที่สองเป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนแบบไร้คนขับ

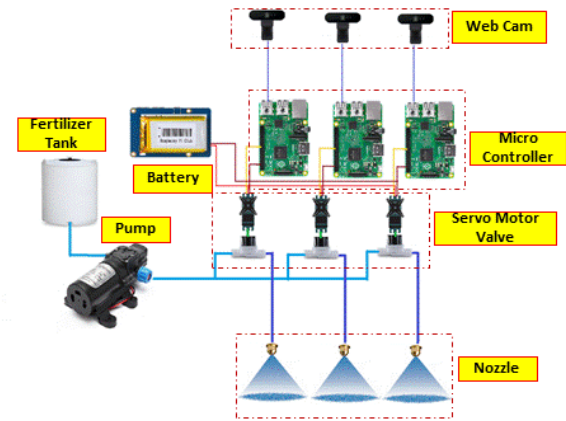
โดยมีการทดสอบความแม่นยำในการควบคุมทิศทางรถเคลื่อนที่ และสมรรถนะการทำงานของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ระบบประมวลผลภาพและระบบให้ปุ๋ยน้ำทางใบแบบอัตโนมัติ

การออกแบบและพัฒนาชุดคำสั่งการทำงานของระบบประมวลผลภาพและการสั่งจ่ายปุ๋ยน้ำ และต้นแบบระบบสั่งการให้ปุ๋ยน้ำแบบปรับปริมาณอัตโนมัติ โดยออกแบบให้ระบบมีการถ่ายภาพ ด้วยกล้อง WebCAM และส่งสัญญาณภาพไปยังกล่องประมวลผลภาพเพื่อทำการวิเคราะห์แยกค่าสีทรงพุ่ม และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของพื้นที่ใบอ้อยต่อพื้นที่รวมของภาพถ่าย หลังจากนั้นระบบควบคุมจะสั่งการให้เซอร์โวมอเตอร์วาล์วทำงาน เพื่อให้หัวฉีดฉีดพ่นปุ๋ยน้ำตามปริมาณที่ถูกต้องตามค่าความหนาแน่นของทรงพุ่มใบ

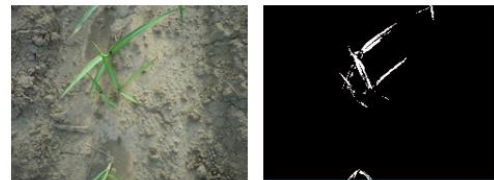
การออกแบบระบบสั่งจ่ายปุ๋ยน้ำประกอบไปด้วย ถังบรรจุปุ๋ยน้ำขนาด 60 ลิตรซึ่งมีสูตรปุ๋ยตามความต้องการของอ้อยในช่วงอายุต่างๆ ป้อนสารเคมี (Max. Pressures 0.48 Mpa. 12 VDC. 31W.) ทำการดูดและจ่ายสารเคมีเข้าระบบ ตัวควบคุมไฟฟ้าสั่งการทำงานจากระบบ และเซอร์โวมอเตอร์วาล์วเปิด-ปิดการทำงาน หัวฉีดพ่นปุ๋ยน้ำให้จ่ายปุ๋ยตามปริมาณความหนาแน่นของใบอ้อยที่ได้ตั้งค่าไว้ในระบบ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัวฉีด (nozzle) แบบกรวยกระจายสม่ำเสมอ (full cone) มีมุมมองการฉีดพ่น 65 องศา เลขรหัสหัวฉีด 486 มีระยะห่างระหว่างหัวฉีด 0.5 m ส่วนผสมของปุ๋ยน้ำเป็นปุ๋ยฉีดพ่นทางใบนาโนแคปซูล 1 แคปซูลผสมน้ำ 20 liter ทดสอบกับอ้อยอายุ 3 เดือน มีระยะห่างระหว่างต้น 0.5 m และระยะห่างระหว่างแถว 1.2 m



(a)



(b)



(c)

(d)

Figure 1 Specifications of the system. (a) Overall diagram of variable rate fertilizer sprayer; (b) Fertilizer storage and sprayer systems ; (c) digital image systems; (d) Image segmentation systems

2.2 รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ

การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับเป็น 2 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ ส่วนแรกพัฒนารถแทรกเตอร์ ขับเคลื่อนด้วย 2 ล้อหลังโดยมีมอเตอร์ไฮดรอลิก และเครื่องยนต์เซลขนาด 15 Hp เป็นต้นกำลัง โดยใช้วาล์วควบคุมอัตราไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์เพื่อควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ ด้านหลังรถแทรกเตอร์ออกแบบให้มีส่วนติดตั้งอุปกรณ์ภายนอก สามารถยกอุปกรณ์ภายนอกขึ้นหรือลงได้ด้วยกระบอกไฮดรอลิกส์ ส่วนที่สองพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติซึ่งออกแบบให้สามารถควบคุมส่วนต่างๆได้ในระยะไกล ได้แก่ระบบการเคลื่อนที่และระบบให้ปุ๋ยน้ำทางใบ

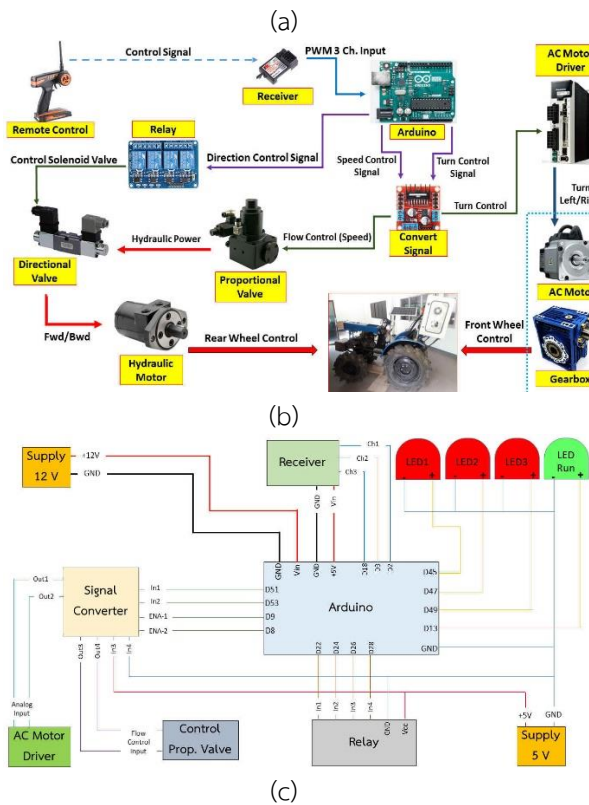


Figure 2 (a) Specifications of the unmanned remote control tractor parts system; (b) An autonomous tractor based on unmanned remote controlling system for modern farming; (c) Overall diagram configuration

2.3 วิธีการทดลองและประเมินผล

2.3.1 ประเมินผลค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องของของต้นแบบระบบประมวลผลภาพและระบบให้ปุ๋ยน้ำทางใบอัตโนมัติ

2.3.1.1 ศึกษาและทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงของภาพจากระบบกล้อง WebCam กับเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นของใบอ้อยที่ได้จากการตรวจจับของระบบถ่ายภาพ โดยเปรียบเทียบความถูกต้องในการประมวลผลภาพของระบบกับการนับจำนวนพิกเซลของค่าสีใบที่เกิดขึ้นจริง โดยทำการทดสอบที่ระดับความสูง 3 ระดับคือ 0.6m 0.8m และ 1.0m เพื่อหาระดับความสูงที่เหมาะสมและแม่นยำในการทำงานของระบบประมวลผลภาพในงานวิจัยนี้

2.3.1.2 ศึกษาและทดสอบค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของหัวฉีดพ่นกับค่าความกว้างของการฉีดพ่นสารเคมี โดย

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าระดับความสูงที่เหมาะสมในการฉีดสารเคมีที่อัตราการการฉีดพ่นที่ต่างกันคือ 0.20 liter minute⁻¹, 0.60 liter minute⁻¹ และ 1.00 liter minute⁻¹ ตามลำดับ ไปยังบริเวณตำแหน่งใบอ้อยเพื่อวัดค่าความกว้างของการฉีดพ่นสารเคมีที่เกิดขึ้น

2.3.2 ทดสอบต้นแบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนแบบไร้คนขับ

2.3.2.1 ทดสอบและประเมินผลระบบควบคุมทิศทาง การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ซึ่งกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ขณะทดสอบเท่ากับ 1 m s⁻¹ โดยทำการเปรียบเทียบความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่เกิดขึ้นจริง(actual path) กับทิศทางและพิกัดอ้างอิงที่กำหนดขึ้น(reference path)

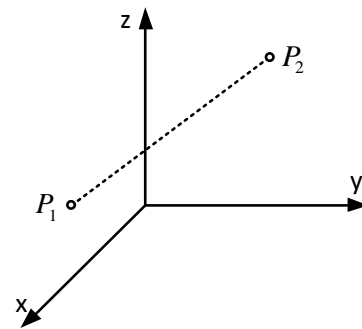


Figure 3 Linear trajectory.

การควบคุมให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงจำเป็นต้องมีการกำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่คือจุด P1 และจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่คือจุด P2 ส่วนจุดระหว่างการเคลื่อนที่จากจุด P1 จนถึงจุด P2 สามารถคำนวณหาได้จาก

$$P_s = P_1 + s(P_2 - P_1) \tag{1}$$

$$s = \frac{d}{l} \tag{2}$$

เมื่อ s คืออัตราส่วนของตำแหน่ง กับระยะทางที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่

l คือระยะทางที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง d คือตัวแปรซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ที่เป็นตัวกำหนดโปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile)

การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในการศึกษานี้กำหนดให้โปรไฟล์ความเร็วเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมูฐานกว้าง (Trapezoidal velocity profile) แสดงใน Figure 4

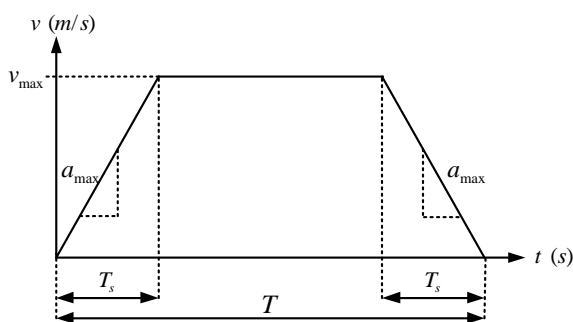


Figure 4 Speed profiles, rectangular, trapezoid.

สามารถคำนวณตัวแปร d ได้จาก 3 สมการในช่วงเวลาต่างๆใน (Figure 4) (Kayacan et al., 2015)

$$d = \begin{cases} a_{\max} \left(\frac{t^2}{2} \right) & ; t \in [0, T_s] \\ v_{\max} t - \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T_s, T - T_s] \\ -a_{\max} \left(\frac{(t-T)^2}{2} \right) + v_{\max} T - \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T - T_s, T] \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ t และ T คือ เวลาและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จาก จุด P1 จนถึงจุด P2 ตามลำดับ

v_{\max} และ a_{\max} คือ ความเร็วสูงสุด ($m s^{-1}$) และความเร่งสูงสุด ($m s^{-2}$) ของรถแทรกเตอร์ตามลำดับ

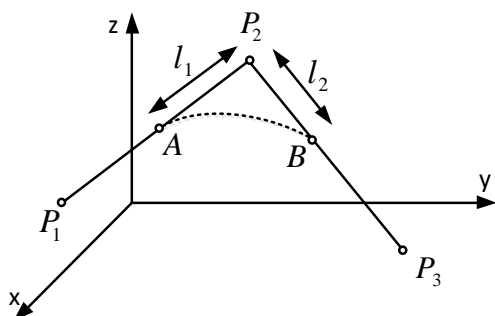


Figure 5 Curve caused by the straight line connecting the two lines.

สำหรับการเคลื่อนที่เป็นแนวโค้งของรถแทรกเตอร์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของเส้นตรง 2 เส้น แสดงใน Figure 5 โดยเส้นตรงแรกระหว่างพิกัด P1 กับ P2 และเส้นตรงที่ 2 ระหว่างพิกัด P2 กับ P3 ทำให้เกิดเส้นโค้ง AB ขึ้น ดังปรากฏเป็นเส้นประใน Figure 5 โดยจุดที่อยู่บนเส้นโค้ง AB สามารถคำนวณได้จากสมการ (4)

$$P(t) = A + V_1 n_{12} t + \frac{t^2}{2\Delta t} (V_2 n_{23} - V_1 n_{12}) \quad (4)$$

เมื่อ V_1 และ V_2 คือความเร็วของรถแทรกเตอร์ขณะวิ่งตามแนวเส้นตรง P1,P2 และเส้นตรง P2,P3 ตามลำดับ

n_{12} และ n_{23} คือเวกเตอร์ทิศทาง และ Δt คือผลต่างของเวลา ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ 5-7

$$n_{12} = \frac{P_2 - P_1}{\|P_2 - P_1\|} \quad (5)$$

$$n_{23} = \frac{P_3 - P_2}{\|P_3 - P_2\|} \quad (6)$$

$$\Delta t = \frac{2l_1}{V_1} \quad (7)$$

2.3.2.2 ทดสอบสมรรถนะการทำงานของต้นแบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนแบบไร้คนขับ โดยสภาพพื้นที่แปลงทดสอบมีลักษณะเป็นสนามหญ้า ซึ่งได้ทำการศึกษาดังแปรต่างๆได้แก่ กำลังฉุดลาก (Drawbar Power) อัตราการลื่นไถล (slip) ขณะเคลื่อนที่ ความสามารถในการทำงาน อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

กำลังฉุดลาก(kW)

$$= \text{แรงฉุดลากแนวระดับ(kN)} \times \text{ความเร็วรถแทรกเตอร์}(m s^{-1}) \quad (8)$$

เมื่อ แรงฉุดลากแนวระดับ วัดค่าโดยเครื่อง Strain Indicator

$$\text{การลื่นไถล(Slip)} = \frac{\text{ระยะเคลื่อนที่ไม่มีภาระ} - \text{ระยะเคลื่อนที่มีภาระ}}{\text{ระยะเคลื่อนที่ไม่มีภาระ}} \quad (9)$$

$$\text{ความสามารถในการทำงาน} = \frac{\text{พื้นที่ในการทำงาน (Rai)}}{\text{เวลาในการทำงาน (hr)}} \quad (10)$$

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Liter)}}{\text{เวลาที่ใช้ (hr)}} \quad (11)$$

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้า (KWhr)} = \frac{IVt}{1000} \quad (12)$$

เมื่อ I คือกระแสไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 1 kW.(A)

Vt คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 1 kW.(V)

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ระบบประมวลผลภาพและระบบให้ปุ๋ยน้ำทางใบแบบอัตโนมัติ

3.1.1 ระบบประมวลผลภาพ

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำในการประมวลผลของภาพถ่ายกับความสูงของการจับภาพของกล้อง WebCam โดยกำหนดความสูงในการทดสอบตรวจจับภาพที่ระยะ 0.6m, 0.8m และ 1.0m ซึ่งเป็นช่วงระยะความสูงของที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งกับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็กและระยะการเติบโตของอ้อยอายุ 3 เดือน โดยระยะการตรวจจับภาพที่ระบบประมวลผลได้ดีที่สุดคือระยะความสูง 0.6m และความแม่นยำในการประมวลผลจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้นเมื่อเพิ่มระยะความสูงในการตรวจจับภาพ

Table 1 Correlation between the difference of image data acquisition and height levels (m) with green sample density.

Green samples density	Image acquisition processes	Altitude levels (m)		
		0.6	0.8	1.0
5 %	Observed	5	5	5
	Web-Cam	4.333 ^c	3.990 ^{bc}	3.756 ^{ab}
10%	Observed	10	10	10
	Web-Cam	8.363 ^c	7.813 ^c	6.604 ^b
15%	Observed	15	15	15
	Web-Cam	12.400 ^b	11.284 ^b	9.015 ^a
20%	Observed	20	20	20
	Web-Cam	16.084 ^c	14.869 ^c	12.178 ^b

Means of a, b, c, ab and bc in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels according to Duncan’s Multiple Range Test.

3.1.2 ระบบการฉีดพ่นปุ๋ยน้ำทางใบ

จากผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างระยะความสูงของหัวฉีดพ่นปุ๋ยกับระยะการกระจายตัวของปุ๋ยน้ำโดยกำหนดความสูงในการทดสอบของหัวฉีดที่ระยะ 0.3m, 0.5m และ 0.7m ซึ่งเป็นช่วงระยะความสูงที่เหมาะสมในการติดตั้งของอุปกรณ์และความสูงของใบอ้อยในช่วงอายุ 3 เดือนที่ทำการศึกษ จากการศึกษา ทดสอบพบว่า การวางตำแหน่งหัวฉีดพ่นที่ระยะความสูง 0.3m มีความแม่นยำมากที่สุดและทำให้เกิดการสูญเสียสารเคมีน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงมากขึ้นอัตราการสูญเสียสารเคมีจะเพิ่มมากขึ้นด้วย

Table 2 Correlation between height levels (m) and chemicals and pesticides spraying width (m).

No.	Nozzle Height (m)	Spraying width(m)		
		at 0.2liter/min	at 0.6liter/min	at 1.0liter/min
1	0.3	0.245 ^a	0.370 ^b	0.647 ^b
2	0.5	0.265 ^b	0.387 ^b	0.752 ^c
3	0.7	0.285 ^c	0.478 ^c	0.838 ^d

Means of a, b, c and d in a column followed by the same character are not significantly different at 0.05 significant levels according to Duncan’s Multiple Range Test.

3.2 ทดลองสมรรถนะต้นแบบระบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ

3.2.1 ผลทดสอบการควบคุมทิศทางของรถแทรกเตอร์

การจำลองรถแทรกเตอร์กำหนดให้ระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง L มีค่า 1m การทดสอบจะแสดงผลเป็น 2 ลักษณะคือ การควบคุมทิศทางของรถแทรกเตอร์ให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ แนวแกน y เปรียบเทียบกับเส้นทางอ้างอิงที่กำหนดไว้ และแสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดรถแทรกเตอร์ขณะทำการเคลื่อนที่

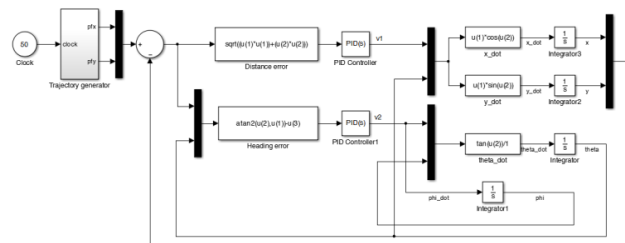


Figure 6 Kinematic model simulation and tractor controller with MATLAB/Simulink program.

ในกรณีการทดสอบการเคลื่อนที่แบบแนวเส้นตรง กำหนดให้เริ่มต้นอยู่ที่พิกัด $(x_1, y_1) = (0,0)m$ และมีจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่พิกัด $(x_2, y_2) = (10,10)m$ มีความเร็วสูงสุดเท่ากับ $1 m/s$ และมีความเร่งสูงสุดเท่ากับ $1 m/s^2$ และรถแทรกเตอร์มีมุมหักเลี้ยวเริ่มต้น $\theta = 0$ degree (อ้างอิงตามแนวแกน x) ในส่วนของค่าเกรนของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (PID) ในรูปควบคุมตำแหน่งมีค่าเป็น $K_p = 12, K_i = 0$ และ $K_D = 0$ และค่าเกรนของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (PID) ในรูปควบคุมมุมหักเลี้ยวมีค่าเป็น $K_p = 20, K_i = 2$ and $K_D = 10$ โดยผลการทดสอบแสดงใน Figure 7 และ Figure 8

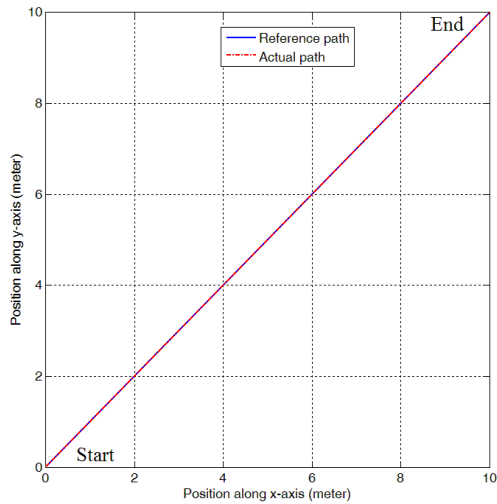


Figure 7 The result of the trial, the position of the tractor driver to follow a straight line motion path.

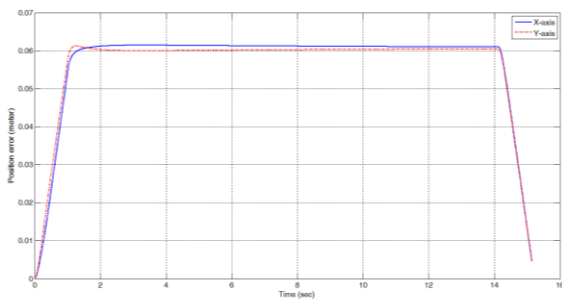


Figure 8 The error in the movement of the tractor along the axis x and y .

ผลการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ความเร็ว 1 m s^{-1} ใน Figure 7 แสดงการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์(actual path) กับตำแหน่งการเคลื่อนที่อ้างอิงที่กำหนด(reference path) พบว่าการควบคุมทิศทางมีความแม่นยำค่อนข้างดีทั้งในแกน x และแกน y ขณะที่ความคลาดเคลื่อนของพิกัดที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่แสดงใน Figure 8 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในระหว่างเคลื่อนที่เท่ากับ 0.062 m และมีความคลาดเคลื่อนในพิกัดสุดท้ายเท่ากับ 0.005 m เมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่

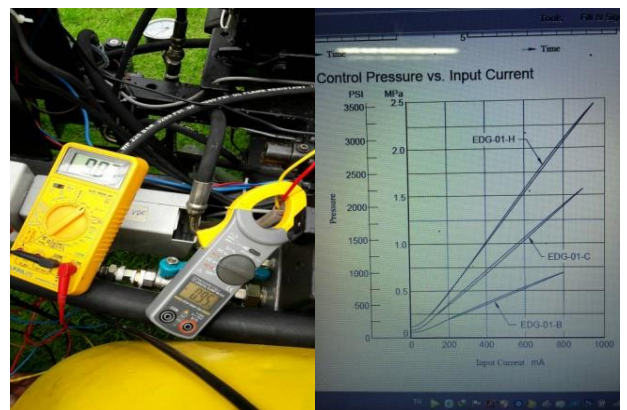
3.2.2 ผลทดสอบค่าความสามารถในการทำงานของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนแบบไร้คนขับ

Table 3 Test data of the unmanned tractor-driven.

Operating data	An autonomous tractor based on unmanned remote controlling system
Drawbar force(kN)	15.17
Working speed(m s^{-1})	0.25
Performance (%)	85.30
Fuel consumption rate (Liter hr^{-1})	3.99
% Slip	247
Drawbar power(kW)	3.79
Working performance (Rai hr^{-1})	3.57
Electricity consumption (kWhr)	0.00937

Table 4 Relationship between the input voltage value, input current and control pressure of the unmanned tractor-driven automatic install equipment

Input Voltage (Vt)	Input Current (mA)	Control Pressure (MPa)
1.26	20	0.125
3.42	270	0.625
5.93	550	1.25
9.87	950	2.42



(a)

(b)

Figure 9 Specifications of the input voltage value, input current and control pressure. (a) Comparison between Voltmeter and Ampere meter; (b) Graph show about EDG-01-H in terms of control pressure vs. input current.

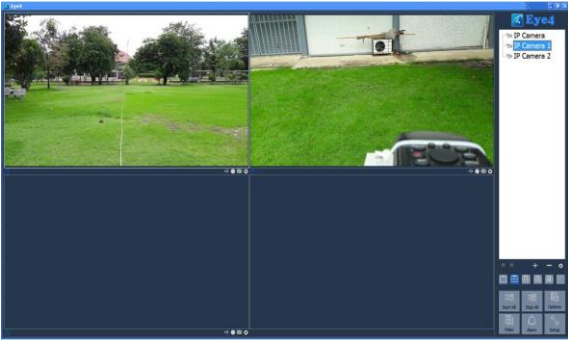


Figure 10 Vision cameras (front view and rear view).

4 สรุป

จากผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้ พบว่าระบบให้ปุ๋ยทางใบอัตโนมัติ สามารถตรวจจับภาพและประมวลผลได้มีประสิทธิภาพ และมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเมื่อทำงานที่ระยะความสูง 0.6m และมีความคลาดเคลื่อนของระบบประมวลผลมากขึ้นเมื่อระยะตรวจจับภาพเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากตัวแปรต่างๆ เช่น แสงแดดซึ่งมีผลต่อความคมชัดของภาพที่ตรวจจับ และการสั่นสะเทือนขณะรถทำการเคลื่อนที่ ในส่วนของระบบหัวฉีดพบว่าที่ระยะความสูงหัวฉีดพ่น 0.3m ทำให้ได้ค่าการกระจายตัวของสารเคมีที่มีประสิทธิภาพที่สุด มีความแม่นยำ และมีค่าการสูญเสียสารเคมีน้อยที่สุด และเมื่อเพิ่มระยะความสูงการทำงานของหัวฉีดพ่นสารเคมีมากขึ้นพบว่าทำให้ ประสิทธิภาพในการกระจายตัวและความแม่นยำมีน้อยขึ้นตามลำดับ

ระบบการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ 1 m s^{-1} พบว่าสามารถควบคุมทิศทางได้ค่อนข้างดีทั้งในแกน x และ แกน y โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในระหว่างการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.062 m และมีความคลาดเคลื่อนในพิกัดสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0.005 m สำหรับค่าความสามารถในการทำงานจริงของต้นแบบรถแทรกเตอร์พบว่า มีแรงฉุดลาก 15.17 kN ประสิทธิภาพการทำงานเท่ากับ 85.30% ความสามารถในการทำงานเท่ากับ 3.57 Rai hr^{-1} อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ 24.7% อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเท่ากับ $3.99 \text{ liter hr}^{-1}$ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.00937 kWhr .

5 เอกสารอ้างอิง

Hunt, D. 1995. Farm Power and Machinery. (9th ed.). Iowa, State University Press. Ames: Iowa.

Kayacan, E., Kayacan, E., Ramon, H., Kaynak, O. 2015. Towards Agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using Type-2 fuzzy logic controllers. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 20(1), 287-298.

เกษตรสภา เดชภิมล และ คณะ. 2561. โครงการสร้างองค์ความรู้และพัฒนาได้อ้อย. มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

บทความพลังเกษตร.2018.เกษตรแม่นยำสูง. แหล่งข้อมูล <https://www.palangkasad.com>. เข้าถึงเมื่อ 15 ตุลาคม 2563.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2561. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2561. แหล่งข้อมูล: <http://www.oae.go.th>. เข้าถึงเมื่อ 15 ตุลาคม 2563.