



## การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูง

### Design and Construction of Driving Robot for High Precision Spraying

ศุภชัย กุลมุติวัดน์<sup>1\*</sup>

Supachai Kulmutiwat<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140

<sup>1</sup>Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom, 73140

\*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, E-mail: fengsck@ku.ac.th,

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นพัฒนาหุ่นยนต์การเกษตรสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูง ตัวหุ่นยนต์ถูกออกแบบให้สามารถเข้าทำงานในพื้นที่จำกัดที่เครื่องจักรขนาดใหญ่เข้าไม่ถึง โดยหุ่นยนต์มีความยาว 62 cm กว้าง 63 cm และสูง 57.5 cm ระบบขับเคลื่อนประกอบด้วยล้อสายพานยาง 2 เส้นส่งกำลังจากมอเตอร์กระแสตรง 250 W ไปยังล้อสายพานแต่ละข้าง ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสื่อสารผ่านโมดูลไร้สายคลื่นความถี่ 2.4 GHz ควบคุมโดยผู้ใช้ผ่านแผงบังคับ จุดศูนย์ถ่วงมีระยะห่างจากแกนกลางล้อหน้า 21.49 cm และสูงจากพื้น 19.69 cm หุ่นยนต์ทำงานต่อเนื่องได้ 110 min ที่ความเร็วสูงสุด  $1.32 \text{ m s}^{-1}$  บนพื้นลาดยาง และมีแรงฉุดลากสูงสุดทดสอบบนถนนลาดยางได้ 392.4 N ในส่วนระบบฉีดพ่นได้ออกแบบกลไกทำงานเป็นเซอร์โวมอเตอร์หมุนหัวฉีดสำหรับการปรับอัตราการไหลและมุมฉีดพ่น ควบคุมการทำงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ จากการทดสอบพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับ servo pulse width เป็นไปตามสมการโพลีโนเมียล ในขณะที่มุมการพ่นของหัวฉีดสัมพันธ์กับ servo pulse width เป็นไปตามสมการเลขชี้กำลัง ซึ่งอัตราการไหลแต่ละหัวฉีดจะอยู่ในช่วง  $13.64 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  ถึง  $30.90 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  โดยจะครอบคลุมพื้นที่กว้างที่สุดที่ความสูงตั้งแต่ 58.14 cm ขึ้นไป

คำสำคัญ: หุ่นยนต์การเกษตร, เครื่องฉีดพ่นฝอย, เครื่องจักรกลงานพืชสวน, หุ่นยนต์ควบคุมระยะไกล

#### Abstract

This research was focused on the development of farming robot for high precision spraying. The robot was designed to work in confined spaces where large machines are inaccessible. Its dimension measured 62 cm long 63 cm wide and 57.5 cm high. The driving system consisted of two rubber tracks driven by 250W DC motor on each ones. A microcontroller was applied to control the robot by receiving the command via 2.4 GHz wireless module that was sent from the wireless control panel. The center of gravity is 21.49 cm from front wheel axis and 19.69 cm high from ground. The results showed that the robot can be continuously operated for 110 min at a maximum speed of  $1.32 \text{ m s}^{-1}$  on asphalt road and provided a maximum traction force tested on the asphalt road of 392.4 N. Regarding spraying system, servo motors were used to turn the nozzle tips for adjusting the flow rate and spraying angle as controlled via a microcontroller. Test results showed that relationship between the flow rate and servo pulse width was explained by a polynomial equation. The spraying angle was related to the servo pulse width by an exponential equation. The flow rate of each nozzle is in a range of  $13.64 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  to  $30.90 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  which covered the widest area at spraying height of 58.14 cm and above.

Keywords: Farming robot, Spraying machine, Horticultural machinery, Remote-controlled robot

Received: September 2, 2019

Revised: November 13, 2019

Accepted: November 13, 2019

Available online: August 21, 2020

## 1 บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ แรงงานภาคเกษตรกรรมลดลง การทำเกษตรเป็นงานที่ยากลำบากและต้องใช้แรงงานจำนวนมาก เครื่องจักรส่วนใหญ่ผลิตสำหรับงานฟาร์ม เนื่องจากพืชไร่มีลักษณะรูปทรงเหมือนกัน สะดวกกับการใช้เครื่องจักรที่มีกำลังสูงทำงานซ้ำๆ ในปริมาณมากได้ ทำให้คืนทุนได้เร็ว แต่ไม่สะดวกที่จะนำมาใช้กับการเกษตรผสมผสาน หรืองานพืชสวน อีกทั้งแนวคิดการเกษตรแบบประณีตหรือเกษตรแม่นยำถูกนำมาใช้มากขึ้นเพื่อเพิ่มผลผลิต และลดปริมาณการใช้น้ำ ปุ๋ย โดยเฉพาะสารเคมีซึ่งสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทั้งจากการหายใจและซึมผ่านผิวหนัง ส่งผลต่อระบบประสาทจนถึงก่อให้เกิดมะเร็งได้ (Greenpeace Thailand, 2016)

มีงานวิจัยหลายงานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ภาคสนาม Phuripun (2004) ได้ออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยล้อและใช้ระบบช่วงล่างแบบ Rocker-bogie เพื่อให้ในขณะขับเคลื่อน ล้อทุกล้อจะสัมผัสกับพื้นผิวที่เคลื่อนที่ไปตลอดเวลา ทำให้เกิดการกระจายน้ำหนักของหุ่นยนต์อย่างสม่ำเสมอบนล้อทุกล้อ จากการทดสอบการเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวลักษณะต่างๆ พบว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ดีทั้งบนพื้นผิวขรุขระและอ่อนนุ่ม

Aishwarya et al. (2015) พัฒนาหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยล้อสำหรับการฉีดพ่นยาฆ่าแมลง โดยใช้ Stepper motor เป็นต้นกำลัง การพ่นยาควบคุมด้วย Joy stick การพ่นยาฆ่าแมลงทำงานโดยใช้มอเตอร์สปริงเกอร์ ควบคุมเป็นระบบป้อนกลับแบบ Proportional-integral-derivative (PID) หุ่นยนต์มีกล้องไร้สายสำหรับการตรวจสอบผลการทำงาน นอกจากนี้ มีงานวิจัยที่รวบรวมการพัฒนาหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานเกษตรที่แบ่งออกเป็น 4 ด้าน คือระบบนำทาง การตรวจวัดสภาพแวดล้อม การทำงาน และการทำแผนที่เกษตร (Fernando and Ricardo, 2013) และการพัฒนาหุ่นยนต์กำจัดวัชพืช (Slaughter et al., 2008)

สำหรับงานเกษตรกรรมความแม่นยำสูง Pongsiri et al. (2018) สร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ 2 ตัว ตัวที่หนึ่งทำหน้าที่ขุดเจาะสำรวจหน้าดิน เก็บตัวอย่างความสมบูรณ์ของดิน ตามตำแหน่งพิกัดที่ได้จาก GPS และตัวที่สองทำหน้าที่ให้ปุ๋ย น้ำและแก๊สสภาพความเป็นกรด-ด่างของดิน แก๊สความเค็มของดินเนื่องจากการใส่ปุ๋ยที่มากเกินไป ให้ดินกลับมาอุดมสมบูรณ์เหมาะกับการปลูกพืชที่ต้องการ

งานวิจัยนี้เป็นการคิดค้นและออกแบบหุ่นยนต์การเกษตรควบคุมระยะไกลสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูง โดยแนวคิดหลักคือเป็นหุ่นยนต์ที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปทรงและอุปกรณ์การทำงานได้ตามชนิดของงาน ซึ่งสามารถนำไปใช้การแปลงผักผสม เช่น ในหนึ่งแปลงปลูกผักหลายชนิดที่ปลูกในช่วงเวลาแตกต่างกันก็สามารถที่จะฉีดพ่นยาหรือสารอาหารให้เหมาะกับแต่ละแถวได้ ทำให้เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ต่อเนื่อง ซึ่งหุ่นยนต์ฉีดพ่น

ทั่วไปจะไม่มีการควบคุมเฉพาะแต่ละหัวจึงเหมาะกับการปลูกพืชเชิงเดี่ยวมากกว่า (Innok robotics, 2019) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในส่วนของการออกแบบระบบขับเคลื่อนแบบล้อสายพานยางสำหรับใช้งานบนพื้นที่ดินอ่อน ซึ่งจะเป็นฐานในการพัฒนาส่วนต่างๆต่อไป และมีกลไกหัวฉีดพ่นที่สามารถเปิด-ปิดและปรับมุมฉีดพ่นแต่ละหัวได้อิสระเพื่อควบคุมปริมาณและการกระจายตัวเฉพาะจุดได้

## 2 อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 คุณสมบัติของหุ่นยนต์

แนวคิดการออกแบบ คือหุ่นยนต์ต้องสามารถทำงานแทนมนุษย์ได้ ขนาดความกว้างและความยาวจึงกำหนดไว้ 60 cm x 60 cm ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ  $1.39 \text{ m s}^{-1}$  ซึ่งเท่ากับความเร็วเฉลี่ยการเดินของมนุษย์ โดยมีน้ำหนักไม่เกิน 60 kg และกระจายน้ำหนักบนผิวดินโดยการใส่ล้อสายพานยางเพื่อให้วิ่งบนพื้นที่ดินอ่อนได้

หลังจากที่ได้อาศัยเงื่อนไขที่ตั้งขึ้นในการออกแบบซึ่งบางส่วนจำเป็นต้องปรับตามขนาดของอุปกรณ์ที่นำมาประกอบ ทำให้ขนาดจริงของหุ่นยนต์มีความยาว 62 cm กว้าง 63 cm สูง 57.50 cm และมีระยะจากกึ่งกลางตัวหุ่นถึงหัวฉีดแรก 60 cm โดยหัวฉีดที่ 2 ห่างจากหัวฉีดแรก 40 cm ดังแสดงใน Figure 1 โดยล้อสายพานยางทำมาจากล้อรถยนต์ที่มีขนาดขอบกระทะล้อ 14 in หน้ากว้างยาง 175 mm เเปอร์เซ็นต์ความสูงของแก้มยาง 65 โดยตัดแก้มยางออกเพื่อให้ยางมีความอ่อนตัว หุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาดกำลัง 250 W 24 VDC 2 ตัว อัตราทดของมอเตอร์เท่ากับ 9.78 และความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ได้เท่ากับ  $1.42 \text{ m s}^{-1}$  เป็นไปตามอัตราทดจากเฟืองโซ่ที่ใช้

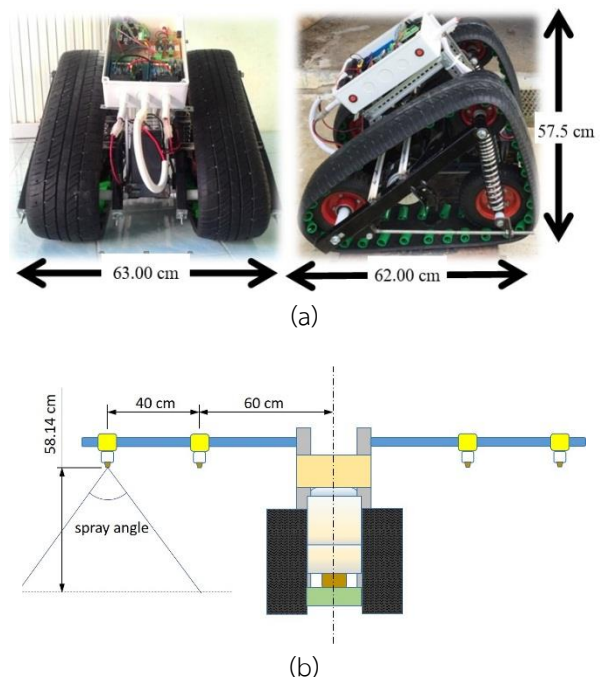


Figure 1 (a) Dimensions of robot and (b) robot with attached high precision spraying system.

ระบบการขับเคลื่อนไร้สาย (Figure 2) ประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino UNO R3) โมดูลสื่อสารไร้สาย 2.4 GHz (NRF24L01+PA+LNA module) ของบริษัท Nordic semiconductor วงจร Step down LM2596HV 2 ชุด สำหรับไฟเลี้ยง 5V และ 3.3V และ motor driver ของ S.A.N. electronics รุ่น SE-HB-100 ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์

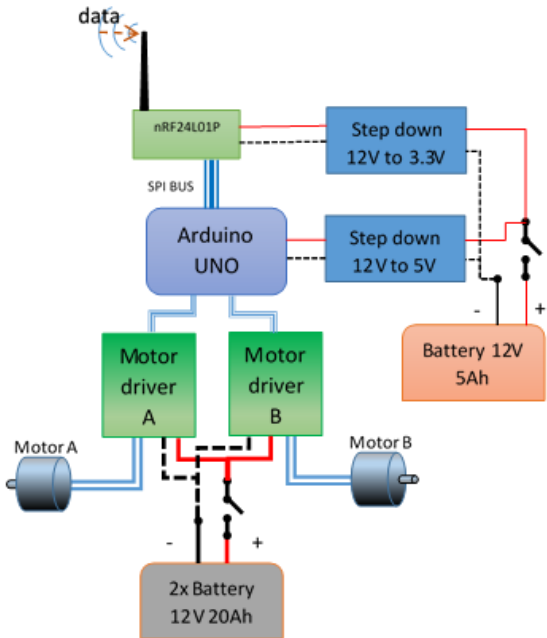


Figure 2 Control schematic for robot control.

ระบบส่งสัญญาณควบคุมหุ่นยนต์ประกอบด้วย คันโยก Joystick ที่ประกอบด้วย Potentiometer 2 ตัว ซึ่งจะสร้างสัญญาณแอนาล็อกสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของคันโยกในแนวแกน x และแกน y ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino UNO R3) และโมดูลสื่อสารไร้สาย (NRF24L01+PA+LNA module) โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ประมวลผลตำแหน่งคันโยก และส่งข้อมูลผ่านโมดูลสื่อสารไร้สายไปยัง โมดูลสื่อสารไร้สายที่ตัวหุ่นยนต์ (Figure 3)

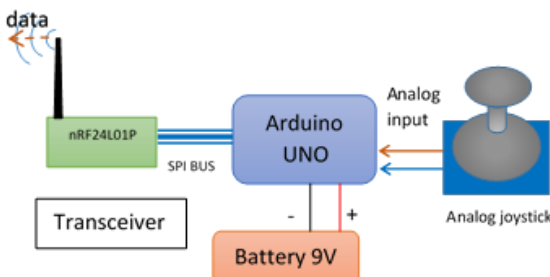


Figure 3 Signal transmission system for controlling robot by joystick.

ผู้บังคับหุ่นยนต์สามารถควบคุมผ่านแผงคันโยกควบคุม โดยส่งสัญญาณผ่านคลื่นความถี่ 2.4 GHz ไปยังภาครับที่ตัวหุ่น ซึ่งสามารถควบคุมได้ไกลสุดในที่โล่งถึง 700 m ที่อัตราการส่งข้อมูล

250 kbps หรือเขียนโปรแกรมให้ทำงานด้วยตนเองตามรูปแบบง่ายๆได้ แหล่งพลังงานที่ใช้เป็นแบตเตอรี่ Deep cycle แบบเจล ซึ่งเหมาะกับการจ่ายกระแสต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยใช้ขนาด 12V 20Ah 1 ลูกต่ออนุกรม สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ และ 12V 5Ah 1 ลูกสำหรับเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์ควบคุม

## 2.2 ระบบการฉีดพ่นความแม่นยำสูง

ประกอบด้วยถังน้ำ 20 ลิตร ปัมพ์ไดอะแฟรม (Flowrate 6-9 L min<sup>-1</sup>, Maximum pressure 0.85 MPa) ก้านพุ่มฉีดพ่น วาล์วโซลินอยด์ ชุดหัวฉีดติดตั้งบนก้านฉีดพ่น และระบบควบคุมการฉีดพ่นอัตโนมัติ

ส่วนประกอบสำคัญของระบบฉีดพ่น คือชุดที่ควบคุมอัตราการพ่นและมุมการพ่นด้วยระบบเฟืองทดหัวฉีด (Figure 4) ขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ (แรงบิด 0.78 N m หมุน 0-180 องศา) การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์จะถูกควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยหัวฉีดติดตั้งห่างกันเป็นระยะ 40 cm

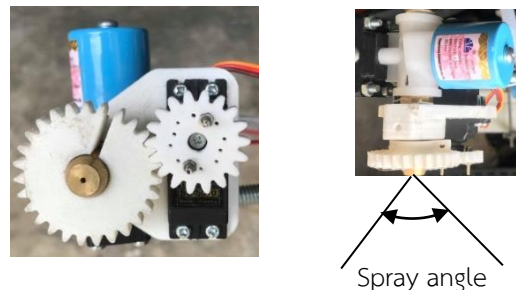


Figure 4 Sprayer nozzle controlled by servo motor.

ระบบควบคุมอัตโนมัติประกอบด้วย Arduino relay module 4 channel 5V relay แบบ Isolation control Relay module shield 250V/10A แบบ Active low ควบคุมการทำงานวาล์วโซลินอยด์ Relay 5V 1 channel isolation สำหรับเปิด-ปิดปั๊ม และ 16 channel 12-bit PWM servo shield I2C interface PCA9685 ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (Figure 5) ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino nano) ดัง Figure 6

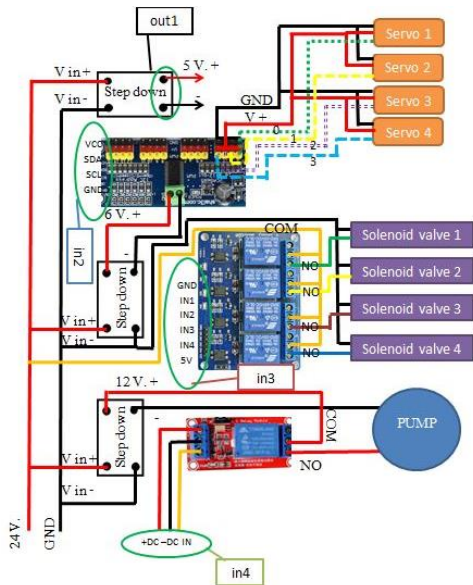


Figure 5 Automatic controlling system for high precision spraying.

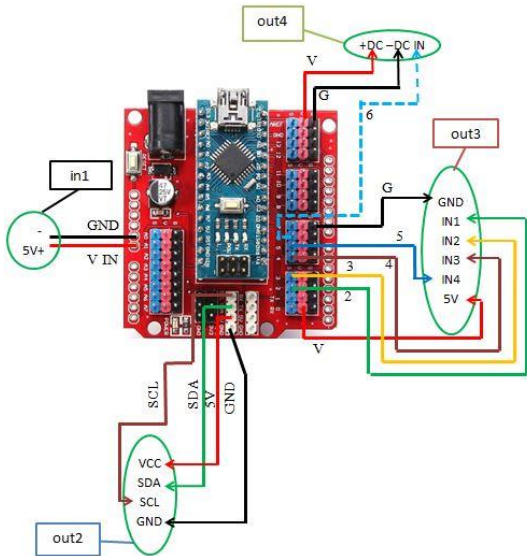


Figure 6 Microcontroller and connection circuit to spraying controlling system.

### 2.3 วิธีการทดลอง

#### 2.3.1 การหาจุดศูนย์ถ่วงและสมรรถนะด้านการเคลื่อนที่

ในการทดลองหาจุดศูนย์ถ่วง จะเริ่มต้นโดยการชั่งน้ำหนักและหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์โดยการวัดน้ำหนักรวมและน้ำหนักที่ตกลงบนจุดสัมผัสพื้นโดยอยู่บนสมมติฐานว่า การกระจายน้ำหนักด้านซ้ายกับขวาเท่าหรือใกล้เคียงกันมาก ตัวหุ่นยนต์จะถูกตาชั่งแขวนตั้งให้เอียงขึ้นที่มุมเอียงหนึ่งๆ น้ำหนักที่อ่านได้จากตาชั่งที่มุมเอียงนี้ จะทำให้สามารถคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงด้วยวิธีทางกลศาสตร์ทั่วไปได้

ลำดับต่อมาเป็นการทดสอบหาความเร็วสูงสุดบน พื้นดิน พื้นสนามหญ้าและพื้นถนนลาดยาง หุ่นยนต์จะถูกเขียนโปรแกรมให้วิ่งเป็นเส้นตรงด้วยเวลาคงที่ 20 s และกำหนดค่า Pulse width

modulation (PWM) ที่ 50% 75% และ 100% บนพื้นแบบต่างๆ คำนวณความเร็วจากการวัดระยะทางที่เคลื่อนที่ได้หารด้วยเวลาที่โปรแกรมไว้

จากนั้นเป็นการทดสอบหาชั่วโมงการทำงาน โดยการเขียนโปรแกรมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปกลับ แล้วจับเวลาที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมด

สุดท้ายเป็นการทดสอบหาแรงฉุดลากสูงสุดบนถนนลาดยาง โดยจะใช้เชือกผูกกับตัวหุ่นยนต์และน้ำหนักที่ใช้ทดสอบโดยติดตั้งโพลิตเซลล์อยู่ตรงกลาง

#### 2.3.2 การทดสอบหาสมบัติหัวฉีด

หุ่นยนต์ฉีดพ่นความแม่นยำสูงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการทำงานของระบบควบคุมการพ่นของหัวฉีด หัวฉีดที่ใช้ทำจากวัสดุทองเหลือง มีขนาดรูหัวฉีดเท่ากับ 1 mm มีเกลียวที่หัวฉีด และเกลียวภายในฝาครอบ (Figure 7) สามารถปรับหัวฉีดให้พ่นเป็นละอองหรือเส้นตรงได้ โดยหมุนฝาครอบของหัวฉีดเกลียวของหัวฉีด ถ้าหมุนฝาครอบออกจากหัวฉีดจะทำให้พ่นเป็นเส้นตรง ถ้าหมุนเข้าจะทำให้พ่นเป็นละออง เกลียวภายในทำให้สารละลายถูกพ่นออกเป็นละอองโดยอาศัยการหมุนตัวของสารละลายภายใต้ความดันทำให้เกิดเป็นมุมพ่นของละออง

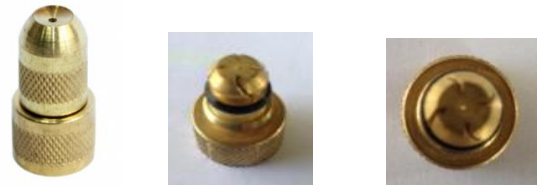


Figure 7 A sprayer nozzle consisting of the main nozzle and a cover with internal spiral grooves.

ข้อมูลที่ใช้สำหรับโปรแกรมระบบควบคุมอัตโนมัติที่สำคัญคือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการพ่นกับ Servo pulse width และสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมการพ่นของหัวฉีดกับ servo pulse width ทั้งนี้เพื่อให้ได้ปริมาณสารละลายที่พ่นออกมาตามต้องการ ดังนั้นการทดลองในงานวิจัยมีดังนี้

1. การสร้างสมการคำนวณอัตราการไหลและมุมของหัวฉีด
  - ชั่งน้ำหนักภาชนะเปล่าสำหรับใส่น้ำและบันทึกค่า
  - เขียนโปรแกรมเปิดหัวฉีดโดยกำหนดเวลาคงที่เป็นเวลา 15 s ที่ Servo pulse width เท่ากับ 150 290 430 และ 550 ms สำหรับมุมหัวฉีดแต่ละหัว และชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมน้ำที่รองรับน้ำ นอกจากนั้นวัดมุมการฉีดพ่นของหัวฉีด
  - ชั่งน้ำหนักน้ำในภาชนะ คำนวณปริมาตรที่ได้ นำเวลาที่บันทึกและปริมาตรไปคำนวณอัตราการไหล
  - สร้างสมการเส้นแนวโน้มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับ Servo pulse width ของแต่ละหัวฉีด และสมการเส้นแนวโน้มแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการพ่นละอองของหัวฉีดกับ Servo pulse width ของแต่ละหัวฉีด



2. การทดสอบหาความสูงของหัวฉีดที่เหมาะสม

- เปิดหัวฉีดพร้อมกันทุกหัวและปรับความสูงอุปกรณ์ฉีดพ่นขึ้นจนความกว้างของการพ่นไม่เปลี่ยนแปลง
- วัดความกว้างของการพ่นจากเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยบนพื้นที่ละหัว โดยใช้ภาชนะรองหัวที่เหลือไว้
- คำนวณหาความสูงจากความกว้างและมุมของการพ่นละออง โดยวัดมุมจากภาพถ่าย

3 ผลและวิจารณ์

3.1 จุดศูนย์ถ่วงและสมรรถนะด้านการเคลื่อนที่

จากผลการทดลองพบว่าหุ่นยนต์มีน้ำหนักรวม 52.40 kg การหาจุดศูนย์ถ่วงเป็นระยะห่างจากแกนกลางล้อหน้า และระยะสูงจากพื้น สามารถคำนวณได้จากสมการสมดุลโมเมนต์และความสัมพันธ์ของระยะต่างๆ ดังแสดงใน Figure 8 และการคำนวณดังนี้

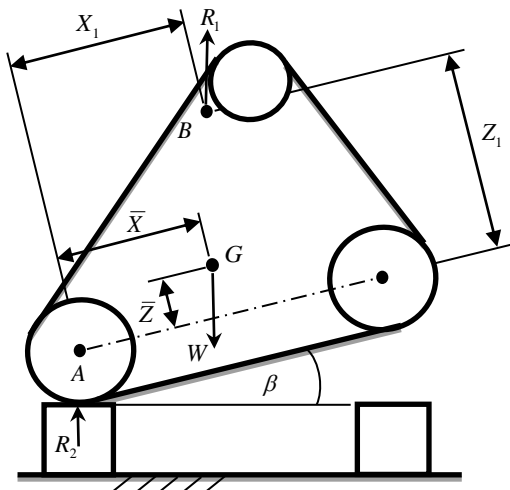


Figure 8 Determination of centre of gravity by weighing at an angle.

การคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์เริ่มจากนำหุ่นยนต์มาชั่งน้ำหนักทั้งหมด (W) และวัดน้ำหนักที่จุดแขวน (R1) โดยยกให้เอียงขึ้นดัง Figure 8 เป็นมุมเอียง 2 ค่า เมื่อทราบระยะห่างจากล้อที่อยู่บนพื้นถึงจุดแขวน X1 จะสามารถคำนวณ ระยะจุดศูนย์ถ่วงได้ จากสมการสมดุลโมเมนต์รอบจุด A คือ

$$-XW \cos \beta + ZW \sin \beta - Z_1 R_1 \sin \beta + X_1 R_1 \cos \beta = 0$$

ซึ่งเมื่อจัดรูปสมการ และแทน  $\beta$  ด้วย  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  สำหรับการทดลองแต่ละครั้งจะได้สมการเชิงเส้น 2 สมการ คือ

$$\begin{aligned} \bar{X} - \bar{Z} \tan \beta_1 &= \frac{R_1}{W} (X_1 - Z_1 \tan \beta_1) \\ \bar{X} - \bar{Z} \tan \beta_2 &= \frac{R_1}{W} (X_1 - Z_1 \tan \beta_2) \end{aligned}$$

จากการวัดได้ระยะ  $X_1 = 32.3$  cm และ  $Z_1 = 29.0$  cm น้ำหนักหุ่นยนต์รวม (W) เท่ากับ 52.4 kg เมื่อยกหุ่นยนต์ให้เอียงเป็นมุม  $\beta$  สองค่าเท่ากับ  $11.2^\circ$  และ  $14.2^\circ$  และทำให้ชั่งน้ำหนักที่มุมเอียง ( $R_1$ ) ทั้งสองได้เท่ากับ 39.01 และ 40.50 kg ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่างๆ ในแต่ละมุมลงในสมการสมดุลโมเมนต์ จะทำให้ได้สมการสองสมการ ซึ่งจะสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าจุดศูนย์ถ่วงหุ่นยนต์ตามแนวนอน  $\bar{X}$  และตามแนวตั้ง  $\bar{Z}$  ได้ โดยเป็นระยะที่ห่างจากแกนกลางล้อหน้า  $\bar{X} = 21.49$  cm และระยะ  $\bar{Z} = 8.69$  cm ซึ่งเมื่อวัดจากพื้นจะสูง 19.69 cm

การทดสอบความเร็วที่ค่า PWM ต่างๆ บนพื้นที่ที่แตกต่างกัน แสดงไว้ใน Figure 9

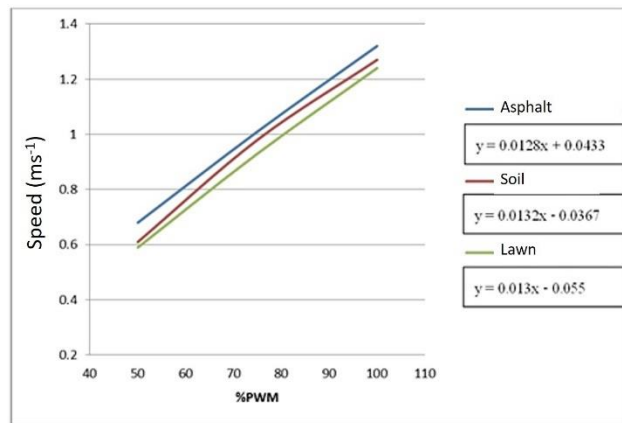


Figure 9 Relation between %PWM and velocity on different surfaces.

ซึ่งค่าสูงสุดที่ได้ คือ  $1.32 \text{ m s}^{-1}$  น้อยกว่าที่คำนวณไว้ คือ  $1.42 \text{ m s}^{-1}$  โดยพื้นถนนลาดยางมีความเร็วสูงที่สุดเนื่องจากการลื่นไถลน้อยที่สุด และเมื่อทำการทดสอบระยะเวลาใช้งานซึ่งคาดการณ์จากกำลังเฉลี่ยกับขนาดแบตเตอรี่ หุ่นยนต์ควรจะสามารถทำงานได้ 135 min ซึ่งในการทดสอบวัดได้เพียง 110 min ซึ่งทั้งความเร็วและเวลาใช้งานที่น้อยกว่าที่คาดการณ์เป็นผลมาจากแรงเสียดทานภายในที่สูงเนื่องจากความคลาดเคลื่อนงานประกอบมีค่าสูง ส่วนแรงฉุดลากบนถนนลาดยางที่วัดได้ คือ 392.40 N ซึ่งน้อยกว่าที่คำนวณไว้ คือ 411.23 N เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างสายพานกับพื้นจริงมีค่าน้อยกว่าที่ใช้ในการคำนวณซึ่งใช้ค่าเท่ากับ 0.8

3.2 สมการคำนวณอัตราการไหลและมุมพ่นของหัวฉีด

จากการทดสอบอัตราการไหลของหัวฉีดแต่ละหัวพบว่า เมื่อเพิ่ม Servo pulse width (SPW) จาก 150 ms เป็น 290 ms อัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่ม SPW ต่อเนื่อง อัตราการไหลมีค่าลดลง ดังแสดงตัวอย่างของหัวฉีด 4 (Figure 10) สมการแนวโน้มที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับ SPW เป็นสมการโพลีโนเมียลดังนี้

1. หัวฉีด 1

$$y = -0.0001x^2 + 0.0589x + 24.0700, R^2 = 0.887$$

2. หัวฉีด 2

$$y = -0.0001x^2 + 0.0617x + 23.6610, R^2 = 0.982$$

3. หัวฉีด 3

$$y = -6E-05x^2 + 0.0276x + 22.2480, R^2 = 0.961$$

4. หัวฉีด 4

$$y = -5E-05x^2 + 0.0231x + 21.7930, R^2 = 0.999$$

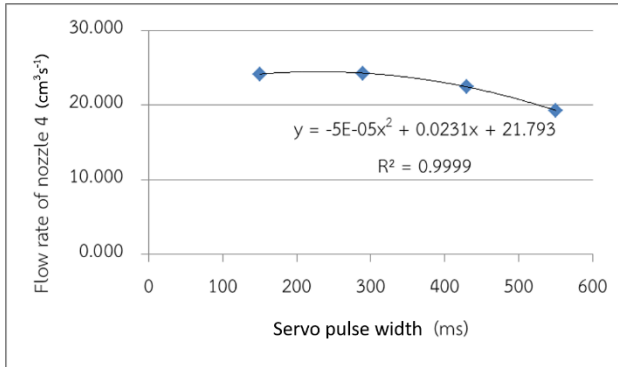


Figure 10 Change in flow rate of nozzle 4 with respect to an increase in servo pulse width.

สำหรับมุมพ่นของหัวฉีด พบว่า เมื่อเพิ่ม SPW มุมพ่นมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็นลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นเป็นในลักษณะแบบเลขชี้กำลัง (Exponential increase) ดังแสดงใน Figure 11

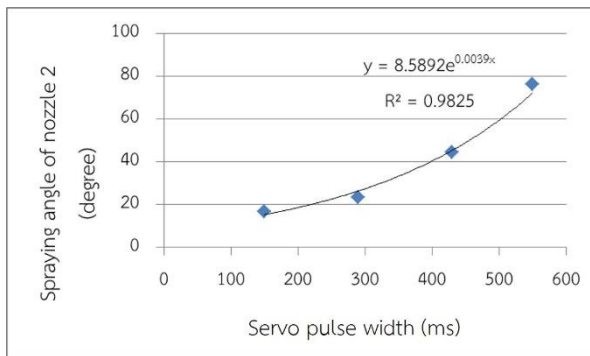


Figure 11 Change in spraying angle of nozzle 2 with respect to an increase in servo pulse width.

สมการเลขชี้กำลังที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างมุมพ่นหัวฉีดกับ SPW ของแต่ละหัวฉีด คือ

1. หัวฉีด 1

$$y = 13.554e^{0.0028x}, R^2 = 0.846$$

2. หัวฉีด 2

$$y = 8.589e^{0.0039x}, R^2 = 0.983$$

3. หัวฉีด 3

$$y = 11.850e^{0.003x}, R^2 = 0.942$$

4. หัวฉีด 4

$$y = 21.919e^{0.0024x}, R^2 = 0.962$$

สมการอธิบายคำนวณอัตราการไหลและมุมพ่นหัวฉีดจากค่า SPW ที่ได้เป็นสมการพื้นฐานสำคัญในการนำไปใช้เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหัวฉีดพ่นให้มีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติงานจริงอาจมีการทำงานของหัวฉีดไม่พร้อมกัน จึงได้มีการทดลองเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของจำนวนหัวฉีดในขณะทำงานต่ออัตราการไหลและมุมพ่นหัวฉีด โดยทดลองเปิดการทำงานหัวฉีดครั้งละ 1 2 3 และ 4 หัวฉีด โดยสลับการเปิด-ปิดหัวฉีดเป็นลำดับ และกำหนดค่า SPW ที่คำนวณจากสมการของแต่ละหัวฉีดที่ทำให้อัตราการไหล และมุมพ่นฉีดเท่ากัน จากการทดลองพบว่าตำแหน่งหัวฉีดมีอิทธิพลต่ออัตราการไหลและมุมพ่นฉีด ทำให้แต่ละหัวฉีดมีค่าไม่เท่ากัน นอกจากนั้นลำดับการเปิด-ปิดก็มีผลต่ออัตราการไหลและมุมพ่นฉีด เมื่อเปิดหัวฉีดเพิ่มขึ้นพร้อมกันครั้งละ 2 3 และ 4 หัวฉีด จะได้อัตราการไหลที่น้อยลงตามลำดับ เนื่องจากความเสียหายในท่อและข้อต่อต่างๆ และปั๊มพ่นให้อัตราการไหลที่จำกัด ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความดันที่สัมพันธ์ระหว่างหัวฉีด

สำหรับการทดสอบความสูงในการติดตั้งหัวฉีดพบว่าการกระจายตัวของสเปรย์จะได้พื้นที่กว้างที่สุดเฉลี่ย 40.71 cm ที่ความสูง ตั้งแต่ 58.14 cm ขึ้นไป ส่วนระยะห่างในการติดตั้งหัวฉีดที่เหมาะสมจะต้องให้มุมการพ่นฉีดมีการทับซ้อนที่ถูกต้องเพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอของสารที่ถูกฉีดพ่นตลอดพื้นที่ โดยสามารถคำนวณได้จากความสูง และมุมพ่นพ่นของหัวฉีด (Summer, 2012)

หุ่นยนต์ที่ออกแบบสามารถใช้งานกับแปลงปลูกผักหลายชนิดที่ปลูกในช่วงเวลาแตกต่างกัน เนื่องจากสามารถที่จะฉีดพ่นยาหรือสารอาหารให้เหมาะกับแต่ละแถวได้ ทำให้เก็บเกี่ยวผลผลิตได้ต่อเนื่อง ซึ่งหุ่นยนต์ฉีดพ่นทั่วไปที่มีการออกแบบจะไม่มีกรควบคุมเฉพาะแต่ละหัวจึงเหมาะกับการปลูกพืชเชิงเดี่ยวมากกว่า (Innok robotics, 2019)

4 สรุป

หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสำหรับการฉีดพ่นความแม่นยำสูงทำงานเป็นไปตามที่ออกแบบ มีจุดศูนย์ถ่วงเป็นระยะที่ห่างจากแกนกลางล้อหน้า 21.49 cm และสูงจากพื้น 19.69 cm มีความเร็วสูงสุดบนพื้นลาดยางเท่ากับ 1.32 m s<sup>-1</sup> และมีแรงฉุดลากเท่ากับ 392.40 N บนพื้นลาดยาง

อัตราการไหลของหัวฉีดเปลี่ยนแปลงในรูปแบบสมการโพลิโนเมียลเมื่อเพิ่ม SPW และมุมพ่นพ่นเปลี่ยนแปลงในรูปแบบสมการเลขชี้กำลังเมื่อเพิ่ม SPW อย่างไรก็ตาม ลำดับการเปิด-ปิดหัวฉีดและจำนวนหัวฉีดที่ทำงานพร้อมกันมีอิทธิพลต่ออัตราการไหลและมุมพ่นพ่นที่ไม่เป็นไปตามสมการคำนวณ ซึ่งจะต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมทั้งในส่วนของการปรับแก้สมการให้สามารถชดเชยอัตราการไหลผิดพลาดจากการเปิด-ปิดหัวฉีดได้ ซึ่งจะส่งผลให้การฉีดพ่นมีความแม่นยำสูงขึ้น รวมถึงการทดสอบสมรรถนะในการทำงานในสภาพพื้นที่ต่างๆ เช่น เพอร์เซ็นต์การสิ้นเปลือง และการ

ขึ้นทางชัน เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายของการพัฒนาหุ่นยนต์ต่อไป

## 5 เอกสารอ้างอิง

พงษ์ศิริ เตียมณา อธิมาตริ ตีระนาถวิทยากุล ภูชิต สุเสวนานนท์  
ปัญหาภาคย์ ธงवास และเพิ่มทรัพย์ สุขแสงจันทร์ 2561  
หุ่นยนต์ต้นแบบเพื่อเกษตรกรรมความแม่นยำสูง สืบค้นจาก  
<http://admission.eng.ku.ac.th/highlights/kuagrobot>  
เมื่อ 11 ธันวาคม 2561

ภูริพันธุ์ สุวรรณฤกษ์ 2523 การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์  
ภาคสนามโดยใช้กลไก Rocker-bogie วิทยานิพนธ์วิศวกรรม  
ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย

Aishwarya, B.V., Archana, G., Umayal, C. 2015 .  
Agriculture robotic vehicle based pesticide sprayer  
with efficiency optimization. Proceeding of 2015  
IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture  
and Rural Development (TIAR), 59-65. July 2015,  
Chennai, India.

Fernando, A.A.C., Ricardo, C. 2013. Agricultural  
Robotics, Unmanned Robotic Service Units in  
Agricultural Tasks. IEEE Industrial Electronics  
Magazine, 48-58.

Greenpeace Thailand. 2016. Pesticides and health  
effects as awareness increased. Available at:  
<https://www.greenpeace.org/thailand/publication/2920/pesticide-health/>. Accessed on 10 November  
2019.

Innok Robotics. 2019. Spraying Robot. Available at:  
<https://www.innok-robotics.de/en/products/heros/applications/spraying-robot>. Accessed on 10  
November 2019.

Slaughter, D.C., Giles, D.K., Downey, D. 2008.  
Autonomous Robotic Weed Control Systems: A  
Review. Computer and Electronics in Agriculture  
61(1), 63-78.

Summer, P.E. 2012. Sprayer Nozzle Selection.  
University of Georgia, Bulletin 1158.