



การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่

Development of an unmanned autonomous tractor using GPS guidance for modern agriculture

เกรียงไกร แซมเสมว^{1*}, มนุศักดิ์ จานทอง¹, กรวี ตรีอำนรรค¹, วิชชาอุปภัย²

Grianggai Samseemoung^{1*}, Manusak Janthong¹, Krawee Treeamnuk¹, Wittha Upaphai²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 12110

¹Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani, 12110

²คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, ดุสิต, กรุงเทพฯ, 10300

²Faculty of Industrial Education, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Dusit, Bangkok, 10300

*Corresponding author: Tel: +66-8-9641-7532, Fax: +66-2-549-3581, E-mail: kkriankkai@hotmail.com, grianggai@exchange.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้างต้นแบบรถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่ และออกแบบอัลกอริธึมตัวควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และเส้นโค้งและสุดท้ายการทดสอบหาความสามารถในการทำงานจริงของรถแทรกเตอร์ โดยรถแทรกเตอร์จะประกอบด้วย รถแทรกเตอร์ขนาดเครื่องยนต์เบนซิน 15 Hp ส่วนควบคุมทิศทางและตำแหน่งของตัวรถส่วนระบุตำแหน่งและทิศทางของตัวรถส่วนควบคุมและประมวลผลและสุดท้ายส่วนควบคุมการมองเห็นระยะไกล จากการทดสอบภาคสนามพบว่าระบบควบคุมทิศทางและตำแหน่งของตัวรถที่ได้ออกแบบนั้น สามารถควบคุมให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่ที่ได้นั้นได้ แต่ขณะที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเร็วคงที่ รถแทรกเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งค่อนข้างคงที่ นั้นแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอขึ้นยังมีข้อจำกัดอยู่ กล่าวคือ ไม่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงได้อีก และยังพบอีกว่ามีค่าความสามารถในการทำงานเท่ากับ 3.57 Rai hr^{-1} ที่ความเร็วในการทำงาน 0.9 km hr^{-1} และทำงาน $1,440 \text{ hr year}^{-1}$ จะสามารถคืนทุนถ้าทำการไถให้ได้ปริมาณพื้นที่เท่ากับ $1,646 \text{ Rai}$ โดยรถแทรกเตอร์ต้นแบบมีแรงฉุดลาก $15,168 \text{ N}$ มีความเร็วในการทำงาน 0.25 m s^{-1} มีประสิทธิภาพการทำงาน 85.30% มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง $3.99 \text{ Liter hr}^{-1}$ มีค่าการลื่นไถล (% Slip) 21.4 มีค่ากำลังฉุดลาก 3.792 kW และมีค่าความสามารถในการทำงาน 3.57 Rai hr^{-1} ตามลำดับ

คำสำคัญ: รถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับ, ระบบนำทางGPS, เกษตรกรรมสมัยใหม่, การลื่นไถล, กำลังฉุดลาก

Abstract

The purpose of this research is to design and fabrication of the prototype of unmanned autonomous tractor with GPS guidance system for modern agriculture, design of position controller algorithm and linear movement along the route and moving curve, and the final test for the working ability of the tractor. The unmanned autonomous tractor is composed tractor with gasoline engine size 15 Hp, control the direction and position of the tractor, specify of the position and direction of the vehicle, control and processing part, and finally remote vision system. According to the study was found that the field test system is designed to control the movement for autonomous tractor based on GPS guidance and intelligent unmanned controlling system for modern farming, a tractor moves along a linear path with straight lines and curves. The motion control systems were designed to control the tractor's moving along the path but while the tractors tracing the trajectory of a straight line at a constant speed during the tractors are mistakes of a relatively stable position that mean the controls are also present limitations. It was also found that the ability to work at 3.57 Rai hr^{-1} at the speed of 0.9 km hr^{-1} and $1,440 \text{ hr year}^{-1}$ will be able to return if the plow to the area of $1,646 \text{ Rais}$ by tractors. Drawbar force

was 15,168 N at the working speed of 0.25 m s⁻¹, performance of 85.30%, rate of fuel consumption of 3.99 Liter hr⁻¹ with a slip value (% Slip) of 21.4, with a drawbar power at 3.792 kW and the ability to work on 3.57 Rai hr⁻¹.

Keywords: Unmanned autonomous tractor, GPS guidance system, Modern agriculture, Slip, Drawbar power

1 บทนำ

เกษตรกรรมสมัยใหม่นั้น จะมุ่งเน้นแนวทางในการลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มปริมาณของผลผลิตต่อพื้นที่ให้เพิ่มสูงขึ้นเท่าที่จะสามารถทำได้ โดยเฉพาะเกษตรกรเจ้าของพื้นที่ปลูกทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ นั้นพบว่าเมื่ออัตราการแข่งขันสูงมากในด้านการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาใช้ทั้งในส่วนของการเตรียมแปลง การดูแลรักษา และการเก็บเกี่ยว โดยจะพบว่าค่าจ้างแรงงานขั้นต่ำมีอัตราเพิ่มสูงมากซึ่งผันผวนกับจำนวนแรงงานภาคการเกษตรที่ลดต่ำลง และแรงงานที่มีทักษะที่ขาดแคลน จึงเป็นเหตุผลและความจำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีเข้ามาแก้ปัญหาดังกล่าว

โดยในต่างประเทศได้มีการวิจัยในการนำเอาระบบนำทางแบบ RTK GPS ที่มีค่าความผิดพลาดเพียง 1-2 cm เท่านั้น มาประยุกต์ใช้กับรถแทรกเตอร์ (Muhr et al., 2006) ส่วนการควบคุมตัวรถแทรกเตอร์นั้นได้มีงานวิจัยการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติการบังคับเลี้ยวของตัวรถแทรกเตอร์รุ่น John Deere 7800 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเพียง 2 cm (O'Connor et al., 1996) ต่อจากนั้นก็ได้มีการวิจัยออกแบบและสร้างระบบนำทางอัตโนมัติที่ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ไจโรสโคป (Gyroscope) เพื่อสร้างและรวบรวมข้อมูลของตำแหน่งพร้อมทั้งทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวรถแทรกเตอร์ (Noguchi et al., 2001) ซึ่งงานวิจัยที่พัฒนากันมานั้นยังทดลองกันเฉพาะในห้องปฏิบัติการอยู่เนื่องจากปัญหาด้านความปลอดภัย เพื่อลดปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการพัฒนาระบบช่วยในการมองเห็นระยะไกลแบบ Vision Sensor เข้าไปติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Benson et al., 2003) จนได้มีการพัฒนาระบบนำร่องที่มีความแม่นยำสูงด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์เรดาร์และเลเซอร์ เข้ามาช่วยทำการตรวจจับสิ่งกีดขวางเพื่อลดอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นซึ่งเทคนิคสมัยใหม่เหล่านี้พบว่ายังมีความไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการทำการเกษตรของบ้านเราทั้งหมด เนื่องด้วยการสนับสนุนจากภาครัฐและการถ่ายทอดเทคโนโลยีเหล่านี้ไปสู่กลุ่มเกษตรกรไทยนั้นกระทำไดยาก

งานวิจัยเกี่ยวกับเรื่อง STEERING CONTROL SYSTEM FOR AUTONOMOUS TRACTOR ในปี 2008 ได้มีการใช้ระบบควบคุมการนำทางแบบ optical fiber gyroscope (IMU) และระบบ real-time kinematic GPS ซึ่งเป็นระบบที่ผสมผสานกัน ในการทดลองหาประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่และการบังคับเลี้ยว นั้นได้ทำการทดลองในแปลงพื้นที่ปลูกถั่วเหลืองโดยจะเปรียบเทียบกับระบบที่สร้างขึ้นมากับแรงงานคน โดยการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถปลูกนั้นจะวิเคราะห์แบบ

kinetic movement model of tractor ในการหาค่าตัวแปรหรือค่าของพารามิเตอร์ของแบบจำลองจากผลการทดสอบในแปลงเมื่อทำการต่อพ่วงกับเครื่องปลูกถั่วเหลืองแบบหยอดเป็นแถวพบว่า ระบบสามารถที่จะควบคุมทิศทางการเลี้ยวได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับ hydraulic time delay (Tsubota et al., 2004)

ต่อมาได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับเรื่อง A Simple Method to Improve Autonomous GPS Positioning for Tractors ในปี 2011 โดยการปรับปรุงการวางตำแหน่งของ GPS บนรถแทรกเตอร์ วิธีที่ใช้นี้จะส่งผลต่อการรับสัญญาณจีพีเอสที่แม่นยำมากขึ้นและการใช้จีพีเอสร่วมกับระบบควบคุมแบบอื่นๆ เช่นระบบวงจรรีเล็คทรอนิกส์หรือระบบนำทางเฉื่อย (INS) หรือเรขาคณิตเพื่อให้ได้ตำแหน่งจุดกึ่งกลางและการวางแผนของเพลาล้อหลังรถแทรกเตอร์ที่แม่นยำมากขึ้น (Keiichi, 2008)

ดังนั้นจากปัญหาที่พบและความต้องการของเกษตรกรเจ้าของพื้นที่ทั้งขนาดกลางและขนาดใหญ่ที่ต้องการลดแรงงานลงและเพิ่มปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ให้สูงขึ้นนั้น (เกรียงไกร และ เกียรติศักดิ์, 2557) กลุ่มผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรสมัยใหม่ขึ้นเพื่อที่จะทำให้เกิดการทำงานอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เป็นการลดเวลา ลดความเมื่อยล้าในการปฏิบัติงาน และลดต้นทุนการประกอบการของเกษตรกรให้ต่ำลง โดยที่ผลสัมฤทธิ์ของงานวิจัยนี้เมื่อดำเนินการเสร็จ จะพบได้ว่ามีความแตกต่างจากงานวิจัยที่มีอยู่แล้วดังนี้ โดยเกษตรกรนั้นจะได้ต้นแบบของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS ที่มีราคาถูก สามารถใช้งานได้จริง โดยระบบควบคุมและขับเคลื่อนนั้นมีความซับซ้อนน้อยมากสามารถดูแลบำรุงรักษาได้ง่าย และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานลง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะเห็นได้ชัดว่ามีบทบาทที่สำคัญมากในการกำหนดทิศทางการปริมาณของผลผลิตที่ได้ต่อพื้นที่ต่อปี และทิศทางการควบคุมค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้ลดต่ำลง

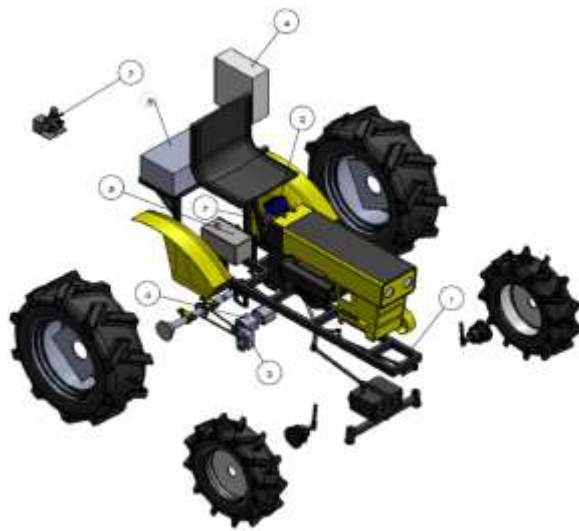
2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การออกแบบสร้างต้นแบบ รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ

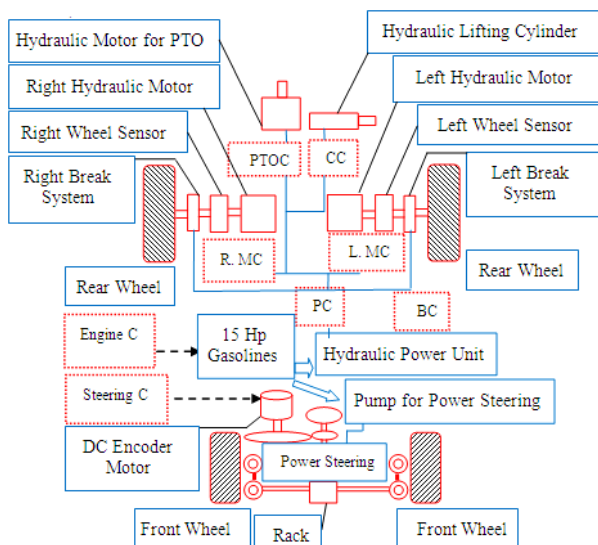
2.2 การออกแบบสร้างโครงสร้างหลักและระบบขับเคลื่อน

รถแทรกเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นรถขับเคลื่อนด้วยสองล้อหลัง ใช้ต้นกำลังเป็นเครื่องยนต์เบนซินขนาด 15 Hp เพื่อขับ

ปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกส์ การขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ใช้กำลังจากแรงดันและอัตราการไหลของน้ำมันไฮดรอลิกส์ แบบ Hydro-static ทั้งระบบ เนื่องจากเป็นระบบที่มีการบำรุงรักษาต่ำใช้งานได้ง่าย เหมาะกับการปฏิบัติงานในแปลง ซึ่งไม่ใช้ความเร็วสูง แต่ต้องการแรงฉุดลาก (Drawbar force) สูง เกษตรกรหรือคนขับไม่จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมก็สามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ได้ การออกแบบระบบ จะใช้ความเร็วการวิ่งและแรงฉุดลากใช้งานที่เหมาะสมของรถเป็นขอบเขต แล้วจึงคำนวณเป็นความเร็วรอบและแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ เพื่อใช้ในการติดตั้งต่อไป เช่นเดียวกับการใช้น้ำหนักและความเร็วรอบของอุปกรณ์ต่อพ่วง มาคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ที่ใช้ขับเคลื่อน PTO (Power take-off) และขนาดของกระบอกสูบยกวาง อุปกรณ์ต่อพ่วง (Hydraulic lifting cylinder) ต่อไป



(a)



(b)

Figure 1 Autonomous tractor based on GPS guidance and intelligent unmanned controlling system for

modern farming; (a) Overall configuration, 1. Frame 2. Gear ratio 3. Solenoid valve 4. Control box 5. Hydraulic pump 6. Hydraulic motor 7. Hydraulic valve 8. Hydraulic oil tank, (b) Power transmission and steering system.

รถแทรกเตอร์ที่พัฒนาขึ้น จะถูกควบคุมโดยใช้หลักการควบคุมกำลังของไหลแทน ซึ่งมีความแม่นยำ สะดวก และประหยัดกว่าการควบคุมชิ้นส่วนกลไกที่มีการเคลื่อนที่แบบอื่น (Keiichi, 2008) การออกตัว แรงความเร็ว เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การชะลอความเร็ว และการหยุดจอด (เบรกในระบบอัตโนมัติ) ของรถแทรกเตอร์ทำได้ด้วยการควบคุม วาล์วควบคุมอัตราการไหลหลัก (Flow control valve, FC) เพียงตัวเดียว ส่วนการควบคุมทิศทาง (การบังคับเลี้ยว) ทำผ่านชุดทดแรงหมุนพวงมาลัยด้วยน้ำมัน (Power steering) ซึ่งแยกวงจรน้ำมันออกจากวงจรขับเคลื่อนหลัก ทั้งนี้เพื่อเสถียรภาพในการบังคับเลี้ยวที่ไม่ต้องผูกโยงกับความเร็วรถไปด้วย เนื่องจากต้องคำนึงถึงความรวดเร็วในการบังคับเพื่อความปลอดภัยของรถหรือคน กรณีใช้คนขับสำหรับการควบคุม อุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งหมด ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ทำงานได้ทั้ง 2 ระบบ คือ การทำงานแบบอัตโนมัติและการบังคับด้วยคนขับ ทั้งนี้อุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมรถถูกออกแบบให้รับสัญญาณทั้งจากระบบอัตโนมัติและสามารถสลับมาใช้คนเร่ง เบรก คันโยก กระบอกสูบไฮดรอลิก และ PTO ได้ทั้งหมด เช่นเดียวกับระบบบังคับเลี้ยวที่คนสามารถหมุนพวงมาลัยได้โดยตรงเช่นกัน โดยที่วงจรถูกควบคุมด้วยคนขับจะถูกแยกออกจากวงจรขับเคลื่อนหลัก และผู้ขับสามารถเหยียบเบรกได้เช่นเดียวกับรถทั่วไป โดยอุปกรณ์ในระบบรถแทรกเตอร์ (Figure 1b) ประกอบด้วย

1) Gasoline Engine เป็นเครื่องยนต์เบนซินหลักขนาด 15 Hp เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนระบบต่างๆ ของรถแทรกเตอร์

2) Hydraulic Power Unit เป็นระบบผลิตกำลังหลัก ประกอบด้วย ถังน้ำมัน, ระบบกรอง, ปั๊มไฮดรอลิกส์, วาล์วความดันนิรภัย, วาล์วควบคุมอัตราการไหล และระบบระบายความร้อนออกจากน้ำมัน ตัวปั๊มได้รับกำลังขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์ขนาด 15 Hp เพื่อผลิตแรงดันน้ำมันคงที่สำหรับวงจรขับเคลื่อนทั้งหมด ด้วยอัตราการไหลสูงสุดอย่างปลอดภัย เพื่อจ่ายให้กับระบบต่อไป

3) Pump for Power steering เป็นปั๊มไฮดรอลิกส์เฉพาะสำหรับทดแรงหมุนพวงมาลัยชุดบังคับเลี้ยว ได้รับกำลังจากเครื่องยนต์แยกจากวงจรขับเคลื่อนหลัก

4) Hydraulic Motor for PTO คือมอเตอร์ไฮดรอลิกส์ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อน PTO มอเตอร์นี้ถูกควบคุมด้วย PTO Control (PTO C) ซึ่งเป็นวาล์ว 4/3 แบบปกติอยู่ในตำแหน่งห้องกลางเพื่อ bypass น้ำมันลงแทงค์และปลดให้ล้ามอเตอร์หมุนอิสระได้ ควบคุมแบบ On-off ด้วย Solenoid ไฟฟ้า

สำหรับเลื่อนวาล์วได้ 2 ตำแหน่ง เพื่อสลับทิศการหมุน PTO ได้ สัญญาณควบคุม PTO C มาจากระบบควบคุมอัตโนมัติ และคันบังคับด้วยมือกรณีขับด้วยคน

5) Hydraulic Lifting Cylinder คือกระบอกสูบไฮดรอลิกที่ทำหน้าที่ยก-วางอุปกรณ์ต่อพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์ กระบอกสูบนี้ถูกควบคุมด้วย Cylinder Control (CC) ซึ่งเป็นวาล์ว 4/3 แบบปกติอยู่ในตำแหน่งห้องกลางเพื่อ bypass น้ำมันลงแทงค์และล๊อคตำแหน่งกันสูบไว้ ควบคุมแบบ On-off ด้วย Solenoid ไฟฟ้า สำหรับเลื่อนวาล์วได้ 2 ตำแหน่ง เพื่อสลับทิศการเข้าออกของกันสูบได้ สัญญาณควบคุม CC มาจากระบบควบคุมอัตโนมัติ และคันบังคับด้วยมือกรณีขับด้วยคน

6) Right Hydraulic Motor และ Left Hydraulic Motor (R. Hydraulic Motor และ L. Hydraulic Motor) คือมอเตอร์ไฮดรอลิกสำหรับขับล้อหลังขวาและซ้ายตามลำดับ มอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ถูกควบคุมด้วย Right Motor Control Valve และ Left Motor Control Valve (R. MC และ L. MC) ซึ่งรับสัญญาณจากระบบควบคุมอัตโนมัติในกรณีต้องการเลี้ยวรถแทรกเตอร์ โดยเป็น On-off control สั่งให้ Solenoid เปลี่ยนตำแหน่งวาล์ว 4/3 มาอยู่ห้องกลางเพื่อทำให้น้ำมันไหลกลับจากปั๊มลงสู่แทงค์ และปรับแรงดันน้ำมันให้แกนมอเตอร์เป็นอิสระเพียงด้านใดด้านหนึ่งที่สัมพันธ์กับการเลี้ยว และเมื่อเลี้ยวเสร็จแล้วระบบจึงสั่งให้ Solenoid เลื่อนวาล์วมาอยู่ในตำแหน่งปกติ คือขับเดินหน้า สำหรับการควบคุมความเร็วของรถแทรกเตอร์มอเตอร์ทั้งคู่จะได้รับแรงดันน้ำมันคงที่ แต่อัตราการไหลน้ำมันจะถูกควบคุมด้วย Flow Control (FC) เพื่อลดอัตราการป้อนน้ำมันให้กับมอเตอร์ทั้งคู่ได้ โดย FC ต้องการสัญญาณควบคุมแบบสัญญาณแบบปรับค่าได้ (Analog Signal) จากระบบควบคุมอัตโนมัติและสัญญาณจากการเหยียบแป้นคันเร่ง กรณีขับด้วยคนได้ มีการป้อนสัญญาณกลับเพื่อตรวจสอบค่า output ด้วย FC นี้ต้องควบคุมอัตราการไหลจากศูนย์ (จากหยุดนิ่ง หรือหยุดรถด้วยเบรก) ไปถึงค่าสูงสุด (ความเร็วแล่นสูงสุดของรถแทรกเตอร์) ได้

7) Right Break System และ Left Break System (R. Break Sys. และ L. Break Sys.) คือระบบเบรกแบบดรัมสำหรับหยุดการเคลื่อนที่ ทั้งสองชุดนี้ได้รับสัญญาณจากการกดแป้นเบรกโดยคนขับเท่านั้น โดยในขณะที่กดแป้นเบรก ลิมิทสวิตช์ ใต้แป้นเบรก (Break Control Switch, BC) จะสั่งให้ Solenoid ของทั้ง R. MC และ L. MC ซึ่งเป็น On-off control ทำงานด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งวาล์ว 4/3 มาอยู่ห้องกลางเพื่อทำให้น้ำมันไหลกลับจากปั๊มลงสู่แทงค์ และปรับแรงดันน้ำมันให้แกนมอเตอร์เป็นอิสระก่อนในขั้นต้น จากนั้นเมื่อคนขับเหยียบเบรกเต็มที่ ผ้าเบรกจึงจับกับดรัมอย่างสมบูรณ์ และทำให้รถหยุดในที่สุด ในกรณีต้องการถอยหลังจากการแล่นเดินหน้า FC จะลดอัตราการไหลน้ำมันสู่มอเตอร์จนเป็นศูนย์ (บังคับให้รถหยุด) ก่อน จากนั้น R. MC และ L. MC

ซึ่งรับสัญญาณจากระบบควบคุมอัตโนมัติ โดยเป็น On-off control จะสั่งให้ Solenoid เปลี่ยนตำแหน่งวาล์ว 4/3 มาอยู่ในตำแหน่งกลับทิศทางการหมุน จากนั้น FC จึงสั่งจ่ายอัตราการไหลน้ำมันให้มอเตอร์ จนมอเตอร์หมุนกลับทิศได้ต่อไป

8) Power Steering เป็นระบบทดกำลังด้วยน้ำมันสำหรับหมุนพวงมาลัยเหมือนรถแทรกเตอร์หรือรถยนต์ปกติ

9) DC encoding motor ทำหน้าที่หมุนพวงมาลัยแทนคนในกรณีขับแบบอัตโนมัติ โดยเป็นการควบคุมแบบสัญญาณแบบปรับค่าได้โดย DC ServoMotor ที่ใช้ในการควบคุมรถไถนั้นจะใช้โหมดการควบคุมอัตราเร่ง (Velocity Control Mode) โดยมี อินพุตเป็นแรงดันทางไฟฟ้า 104 V และกระแส 2.6A มีความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ 20 Bit/rpm มีความเร็วสูงสุด 3000 rpm และมีการตอบสนองการสั่งงาน 2.0 kHz จากระบบควบคุมอัตโนมัติ (Steering Control, Steering C) หากต้องการปรับเป็นคนขับเอง สามารถทำได้ทันทีเพราะเพลลาของ DC motor มีแรงต้านการหมุนน้อยมากอยู่แล้ว เมื่อปลดการควบคุมออก

10) Engine Control (Engine C) คือ ระบบ ควบคุมเครื่องยนต์ปกติเมื่อสตาร์ทเครื่องแล้วจะปรับตั้งให้เครื่องยนต์เดินที่ความเร็วรอบที่ให้แรงบิดสูงสุดคงที่ตลอดจนกว่าจะหยุดรถแทรกเตอร์ จึงดับเครื่องซึ่ง Engine C เป็นการสั่งดับเครื่องในกรณีฉุกเฉินด้วย คนควบคุม (อาจจะขับอยู่ หรือสังเกตการณ์ผ่านระบบ Monitoring ก็ได้) จึงเป็นการควบคุมด้วยคนแบบรีโมท

11) Right wheel sensor และ Left wheel sensor คือ อุปกรณ์ตรวจจับการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์เพื่อเป็นเก็บข้อมูลจาก output ที่แท้จริงของระบบ ส่งกลับให้ผู้ควบคุมรถแทรกเตอร์ทราบถึง การเคลื่อนที่ (เดินหน้า หรือถอยหลัง) ความเร็วของรถแทรกเตอร์ความเร็วของล้อแต่ละข้าง สัญญาณจาก sensor ทั้งคู่นี้ถูกใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ และถูก monitor โดยคนควบคุมด้วย(สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2555)

2.2.1 การออกแบบอัลกอริธึม และชุดคำสั่งเฉพาะในการควบคุมทิศทางและตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ และระบบมองเห็นระยะไกล

ในการควบคุมทิศทางและตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้จีพีเอสรีโมเตอร์มาเป็นตัวต้นกำลังในการหมุนพวงมาลัยของรถแทรกเตอร์และใช้เซนเซอร์อีก 2 ชนิดเพื่อมาระบุตำแหน่งและทิศทางของรถแทรกเตอร์คือ ตัว GPS และ IMU ตามลำดับ โดยตัวระบุตำแหน่งของรถไถ (GPS) เป็นของบริษัท Garmin รุ่น GPS 72S โดยมีรายละเอียดคุณลักษณะคือมีจำนวนช่องรับสัญญาณ 12 channels แบบ High sensitivity GPS receiver by SiRF โดยที่ มีความคลาดเคลื่อนของการหาตำแหน่งไม่มากกว่า 10 m RMS และสามารถแสดงตำแหน่งพิกัดทั้งระบบพิกัด UTM และ

Latitude/Longitude อีกทั้งแสดงค่าพิกัดบน Datumสากล (WGS84) และ Datum ที่ใช้กับประเทศไทยได้ (GPS ใช้ระบบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ขณะนั้น) และเซ็นเซอร์IMU รุ่น Polulu CHR-6dmเป็นโมดูลที่รวมความสามารถของอุปกรณ์ 3 ตัวมารวมไว้ด้วยกัน คือ เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) เซ็นเซอร์วัดความเร่งเชิงมุม (Gyroscope) และเข็มทิศ (Compass) สามารถวัดค่าได้ 3 แกนคือ X,Y,Z สัญญาณความถี่ที่ 300 MHzมีระบบ EKF (Extended Kalman Filter) ในตัว เชื่อมต่อกันผ่าน UART ใช้กระแสในการเลี้ยงวงจร 3.3 V เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้มาก(IMUใช้บอกทิศทางการหันเหของรถแทรกเตอร์ขณะนั้น)ซึ่งในการควบคุมและประมวลผลจะใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย และมีการพัฒนาโปรแกรมขึ้น โดยคอมพิวเตอร์ใช้รับส่งสัญญาณแบบ Ethernet ระหว่างPC Main และ PC Target (บนรถแทรกเตอร์) โดยมีตัวรับส่งสัญญาณแบบ Access pointเพื่อใช้ในการรับข้อมูลจากตัว GPS และ IMU มาคำนวณหาทิศทางและตำแหน่งของรถไถ และส่งค่าการควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปยังแผงควบคุมมอเตอร์เพื่อควบคุมมอเตอร์ให้หมุนพวงมาลัยของรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังทิศทางและตำแหน่งที่

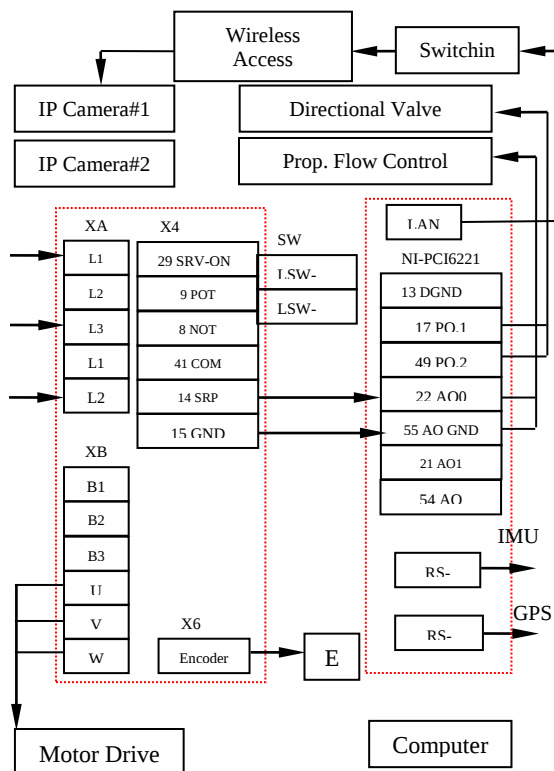


Figure 2 Connection diagrams, equipment used to control the direction and position of the tractor.

โดยที่ภายในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถแบ่งหน้าที่ได้ 3 ส่วนหลัก คือ

1) การกำหนดจุดที่ต้องการให้รถแทรกเตอร์วิ่งผ่าน ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่โปรแกรมต้องติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ โดยให้ผู้ใช้กรอกข้อมูลจุดที่ต้องการจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณหาเส้นทางเดินของรถแทรกเตอร์ที่ผ่านจุดที่ผู้ได้กรอกข้อมูลไว้

2) ส่วนรับค่าจากเซ็นเซอร์ GPS และ IMU แล้วนำมาประมวลผลหาตำแหน่งและทิศทางของรถแทรกเตอร์ว่ารถแทรกเตอร์ณ ปัจจุบัน อยู่ ณ ตำแหน่งใดและหันหัวในทิศทางใด ในส่วนนี้จะทำงานอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาขณะที่รถแทรกเตอร์กำลังเคลื่อนที่

3) การคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมการหมุนของมอเตอร์เพื่อไปขับพวงมาลัยให้หมุนบังคับรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและตำแหน่งตามเส้นทางเดินของรถแทรกเตอร์ที่ได้คำนวณไว้ก่อนแล้วในหัวข้อที่ 1 โดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับและใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

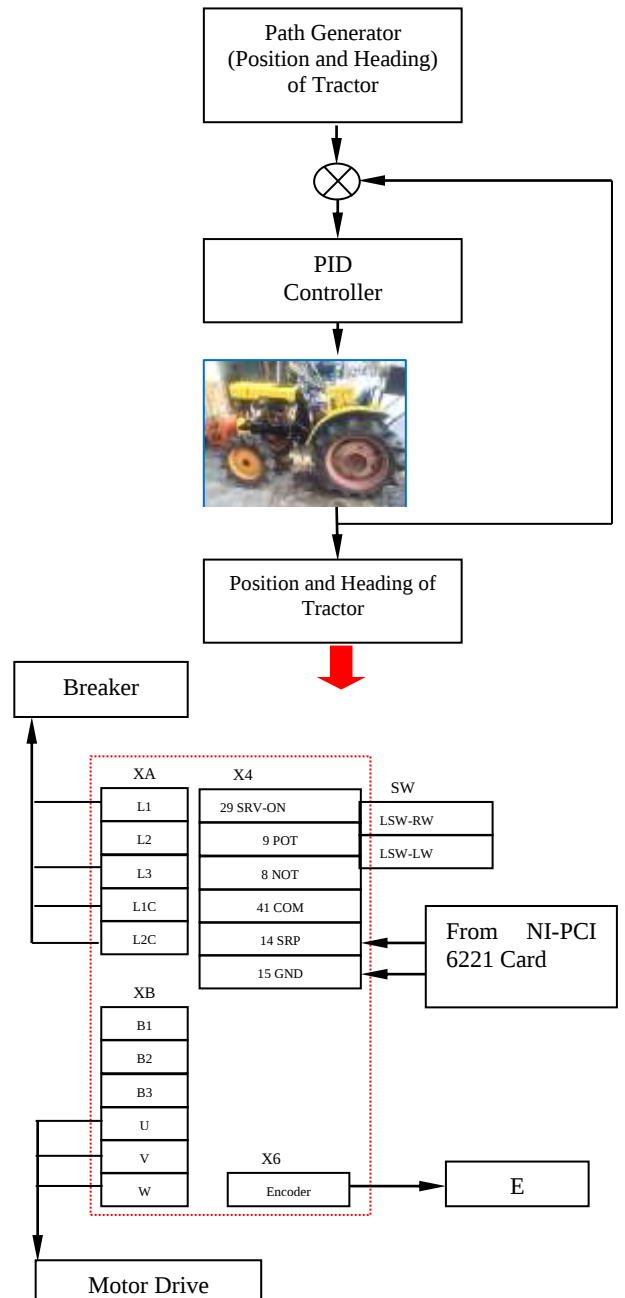


Figure 3 Overall proceduring of program used to control the direction and position of the tractor.

ระบบการมองเห็นระยะไกล (Remote Vision System) เป็นระบบที่ใช้สำหรับให้ผู้ควบคุมรถแทรกเตอร์ได้มองเห็นภาพด้านหน้าและด้านหลังของรถแทรกเตอร์และเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในขณะปฏิบัติงานของรถแทรกเตอร์โดยระบบนี้ประกอบไปด้วย กล้องไอพี (IP Camera) ที่ถูกติดตั้งอยู่บนตัวรถแทรกเตอร์และมีอุปกรณ์ Wireless access point เชื่อมต่อสัญญาณจากกล้องไอพี เพื่อส่งสัญญาณภาพจากกล้องไอพีส่งไปยังคอมพิวเตอร์ที่อยู่ภายนอกตัวรถแทรกเตอร์ผ่านอุปกรณ์ Wireless access point อีกตัวหนึ่ง โดยการแสดงภาพบนคอมพิวเตอร์จะมีการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้งานเฉพาะแสดงภาพและควบคุมอุปกรณ์บนรถแทรกเตอร์ระยะไกล

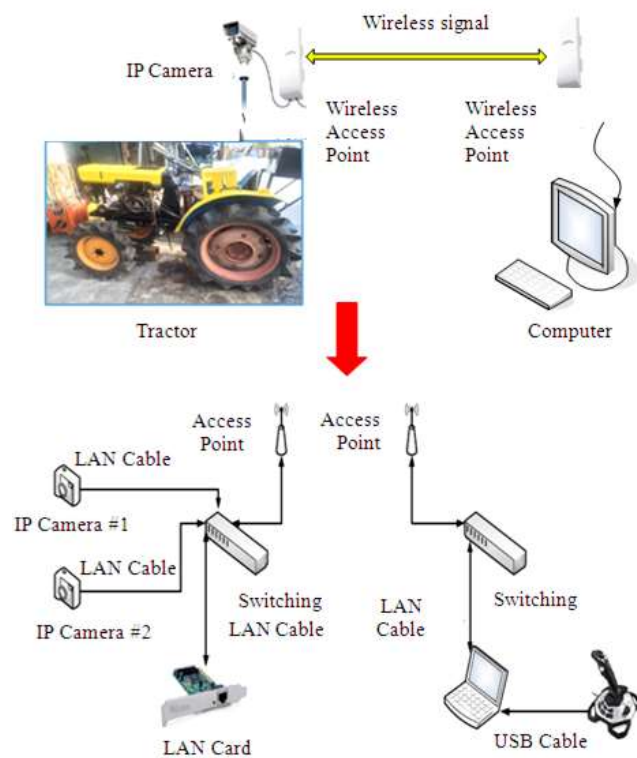


Figure 4 Instrumentation and overall procedural configuration. Remote vision system for unmanned tractor.

2.3 การทดสอบและประเมินผล

2.3.1 การสอบเทียบโดยการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์(Trajectory)

ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ส่วนใหญ่มีเคลื่อนที่ 2 แบบ คือ เคลื่อนที่อยู่ในแนวเส้นตรงขณะกำลังไถ และเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้งขณะกำลังเลี้ยว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เป็นเส้นตรงและ

เส้นโค้งบนระบบพิกัดฉาก โดยสมการในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.1.1 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

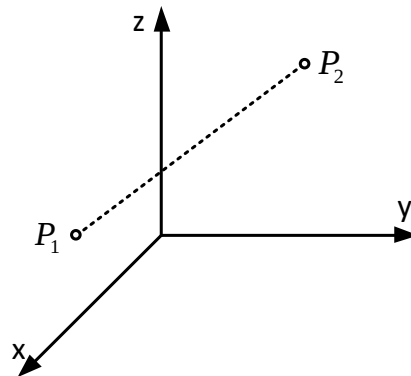


Figure 5 Linear trajectory.

จาก Figure 5 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงเพื่อทำให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง จำเป็นต้องมีการกำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ คือ จุด P_1 และจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ คือ จุด P_2 ส่วนจุดระหว่างการเคลื่อนที่จากจุด P_1 จนถึงจุด P_2 สามารถคำนวณหาได้จาก

$$P_s = P_1 + s(P_2 - P_1) \quad (2)$$

ในสมการที่ 2 มีพารามิเตอร์ s เป็นอัตราส่วนของตำแหน่งกับระยะทางที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$s = \frac{d}{l} \quad (3)$$

เมื่อ l คือความยาวของเส้นตรงที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ และ d คือ ตัวแปรตำแหน่งที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะของโปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะวิ่งเป็นเส้นตรง โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้โปรไฟล์ความเร็วเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal velocity profile) ดังแสดงใน Figure 6

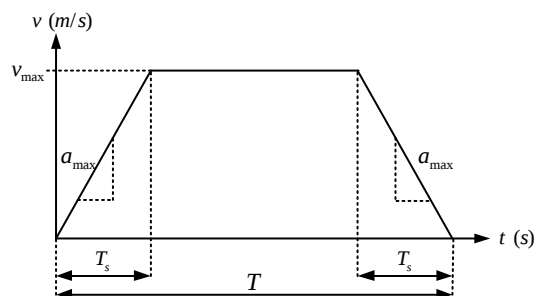


Figure 6 Speed profiles, rectangular, trapezoid.

ส่วนตัวแปร d สามารถคำนวณได้จาก 3 สมการตามช่วงเวลา(Figure 6)(Kayacan et al., 2015)

$$d = \begin{cases} a_{\max} \left(\frac{t^2}{2} \right) & ; t \in [0, T_s] \\ v_{\max} t - \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T_s, T - T_s] \\ -a_{\max} \left(\frac{(t-T)^2}{2} \right) + v_{\max} T - \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T - T_s, T] \end{cases} \quad (4)$$

โดยที่ t และ T คือ เวลาและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด P_1 จนถึงจุด P_2 ตามลำดับ (มีหน่วยเป็น s) ส่วน $v_{\max}$ และ $a_{\max}$ คือ ความเร็วสูงสุด (m/s) และความเร่งสูงสุด (m/s²) ของรถแทรกเตอร์ตามลำดับ

2.3.1.2 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

เมื่อต้องการให้รถแทรกเตอร์วิ่งเป็นเส้นโค้งทำได้โดยนำเส้นตรงสองเส้นมาเชื่อมต่อกันซึ่งจะทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งขึ้นมา ดังแสดงใน Figure 7 โดยที่เส้นตรงเส้นแรกอยู่ระหว่างจุด P_1 กับ P_2 และเส้นที่สองอยู่ระหว่างจุด P_2 กับ P_3 ซึ่งเส้นโค้งที่เกิดขึ้น (เส้นประใน Figure 7) จะเริ่มจากจุด A (บนเส้นตรงเส้นแรก) สิ้นสุดที่จุด B (บนเส้นตรงเส้นที่สอง) โดยจุดที่อยู่บนเส้นโค้งระหว่างจุด A และจุด B สามารถคำนวณได้จาก

$$P(t) = A + V_1 n_{12} t + \frac{t^2}{2\Delta t} (V_2 n_{23} - V_1 n_{12}) \quad (5)$$

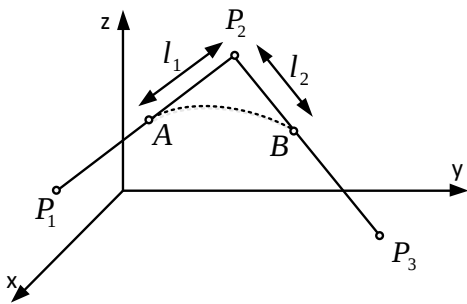


Figure 7 Curve caused by the straight line connecting the two lines.

จากสมการที่ 5 V_1 และ V_2 คือ ความเร็วของรถแทรกเตอร์ขณะวิ่งอยู่บนเส้นตรงเส้นแรกและเส้นที่สอง ตามลำดับ ตัวแปร n_{12} และ n_{23} คือ เวกเตอร์ทิศทางและ Δt คือผลต่างของเวลาซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 6-8

$$n_{12} = \frac{P_2 - P_1}{\|P_2 - P_1\|} \quad (6)$$

$$n_{23} = \frac{P_3 - P_2}{\|P_3 - P_2\|} \quad (7)$$

$$\Delta t = \frac{2l_1}{V_1} \quad (8)$$

2.3.1.3 การสร้างระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดได้นั้น จำเป็นต้องควบคุมตัวแปร 2 ตัวแปร คือ 1. ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 2 มุมหันเหของรถแทรกเตอร์ ดังนั้นรูปการควบคุมจึงถูกออกแบบให้มี 2 ลูปตามตัวแปรที่ต้องควบคุม โดยลูปแรกเป็นรูปการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ค่าความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ (Distance error) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 9 และลูปที่สองเป็นรูปการควบคุมมุมหันเหของรถแทรกเตอร์ค่าความผิดพลาดของมุมหันเห (Heading error) คำนวณได้จากสมการที่ 10 (Kayacan et al., 2016)

$$Distance\ error = \sqrt{(x_{ref} - x_{act})^2 + (y_{ref} - y_{act})^2} \quad (9)$$

$$Heading\ error = \tan^{-1}((y_{ref} - y_{act}), (x_{ref} - x_{act})) - \theta_{act} \quad (10)$$

เมื่อ x_{ref} และ y_{ref} คือ ตำแหน่งอ้างอิงของเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในแนวแกน x และ y ตามลำดับ และ x_{act} , y_{act} และ θ_{act} คือ ตำแหน่งรถแทรกเตอร์ปัจจุบันในแนวแกน x , y และมุมหันเหรถแทรกเตอร์ปัจจุบัน ซึ่งวัดจากจุดศูนย์ถ่วงของรถแทรกเตอร์ตามลำดับ โดยที่ค่าความผิดพลาดของระยะทางและมุมหันเหถูกนำไปเป็นอินพุตของตัวควบคุมแบบฟuzzy จากนั้นคำนวณสัญญาณขาออกเป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนและมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ซึ่งเป็นสัญญาณขาเข้าของโมเดลจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์ (Kinematic model) คือ v_1 และ v_2 โดยไดอะแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ได้ออกแบบได้แสดงดัง Figure

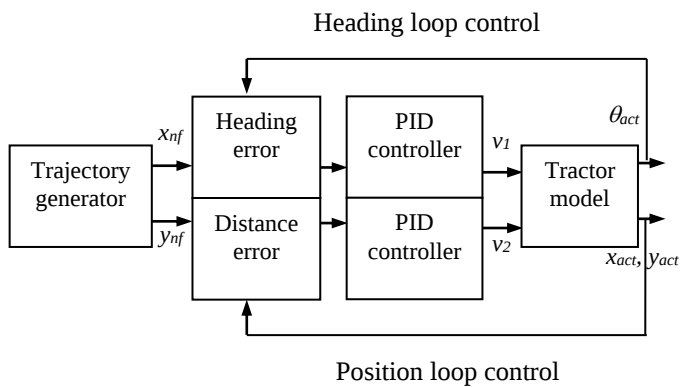


Figure 8 Control diagram.

2.4 การทดสอบหาค่าความสามารถในการทำงานจริงของรถแทรกเตอร์ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและค่าอัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้า

การเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบจะมีวิธีดำเนินการดังนี้

1) การสิ้นเปลือง (slip)

ดำเนินการโดยการทำให้เครื่องหมายที่ล้อรถแทรกเตอร์และนับจำนวนรอบล้อของรถแทรกเตอร์ให้ได้จำนวน 5 รอบนำจำนวนรอบล้อนั้นมาคูณกับเส้นรอบวงก็จะได้ระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ได้ในทางทฤษฎีและจะต้องทำการวัดระยะทางจริงที่ล้อเคลื่อนที่ได้โดยใช้เทปวัดความยาวในการวัดและใช้หลักทแยงในการมาร์คจุดเมื่อเริ่มนับล้อและหลังการนับล้อสิ้นสุดลงทำ

การทดลอง 3 ซ้ำใน 1 แปลงโดยอุปกรณ์คือเทปวัดความยาวและหลักทแยงหาได้จากสมการคำนวณการสิ้นเปลือง เมื่อค่าเปอร์เซ็นต์การสิ้นเปลือง

$$(\% \text{Slip}) = \frac{\text{ระยะเคลื่อนที่ทางทฤษฎี} - \text{ระยะเคลื่อนที่จริง}}{\text{ระยะเคลื่อนที่ทางทฤษฎี}} \times 100$$

2) หน้ากว้างในการทำงาน

หน้ากว้างในการทำงานของอุปกรณ์คราดสปริงสามารถหาได้โดยการวัดความกว้างของอุปกรณ์คราดสปริงโดยใช้อุปกรณ์คือเทปวัดความยาวในการวัด

3) ความลึกจากการใช้คราดสปริง

ความลึกจากการใช้คราดสปริงจะสามารถหาค่าได้โดยสุ่มวัดทั้งหมด 10 ค่าใน 1 แปลงอุปกรณ์ในการวัดคือเครื่องมือการวัดความลึกจากการใช้คราดสปริง

4) ความเร็วในการทำงาน

ความเร็วในการทำงานสามารถที่จะหาได้โดยการปัก Pole 2 หลักมีระยะห่างกัน 10 m ตำแหน่งการปักบริเวณกลางแปลงแล้วทำการจับเวลาในการทำงานขณะรถแทรกเตอร์กำลังวิ่งผ่าน Pole ที่ปักไว้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้งต่อ 1 แปลง

5) ปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

จะทำการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงให้เต็มถึงทุกครั้งก่อนทำการไถและวัดปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งที่ทำงานเสร็จใน 1 แปลงทดสอบด้วยบิกเกอร์พลาสติกทรงกระบอกแบบอ่านค่าได้ละเอียดแล้วบันทึกผล



(a)



(b)



(c)

Figure 9 The ability test of the tractor in field. (a) Tractor with cultivators; (b) Distance measured of 10 meters for the % Slip; (c) The width measured of the cultivators.

การทดสอบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS มีวัตถุประสงค์เพื่อ

ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องฯ ซึ่งปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ ความสามารถในการทำงานที่ระยะทาง 10 m

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังไฟฟ้า มีรายละเอียดค่าข้อมูลการศึกษาดังนี้

1) ความสามารถในการทำงานจริงของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS(Rai hr⁻¹)

$$\text{ความสามารถในการทำงานจริง} = \frac{\text{พื้นที่ในการทำงานจริง}}{\text{เวลาที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (11)$$

2) อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS(Liter hr⁻¹)

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง} = \frac{\text{ปริมาณน้ำมันที่ใช้ทั้งหมด}}{\text{เวลาที่ใช้ทั้งหมด}} \quad (12)$$

3) อัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS(kWhr)

$$\text{อัตราการสิ้นเปลืองไฟฟ้า} = \frac{IVt}{1000} \quad (13)$$

เมื่อ I = กระแสไฟฟ้าของเครื่อง Gasoline generator ขนาด 1,000 watts (A) และ V = แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่อง Gasoline generator ขนาด 1,000 watts (V)

2.5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

2.5.1 การวิเคราะห์และประเมินค่าใช้จ่ายโดยเฉลี่ย

วิธีการประเมินค่าใช้จ่ายโดยรวมจะเกี่ยวกับต้นทุนในการใช้งานรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS ต้นแบบ สมมุติว่าเกษตรกรผู้ใช้ทำการซื้อเครื่องต้นแบบฯ แทนการใช้แรงงานคนซึ่งค่าใช้จ่าย

โดยรวมจะประกอบด้วยค่าเสื่อมราคาของเครื่อง (คิดค่าเสื่อมราคาโดยวิธีเส้นตรงเมื่อประมาณอายุการใช้งานของเครื่องต้นแบบฯ ได้ 5 years) และค่าเสียโอกาสของเงินทุน (คิดดอกเบี้ยที่ 10%) ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมดจะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของการจ้างรถแทรกเตอร์และต้นทุนแปรผัน (Hunt, 1995)

2.5.2 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

เป็นการคาดคะเนว่าเมื่อทำการลงทุนใช้รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS ต้นแบบไปแล้วจะได้รับผลตอบแทนกลับคืนมาในจำนวนเงินเท่ากับที่ลงทุนไปก่อนหน้านี้ภายในระยะเวลากี่ปีโดยคิดดอกเบี้ยที่ 10% แต่ไม่ทราบค่า ak ทำการเปลี่ยนค่า ak ไปเรื่อยๆจนค่าทั้งสองข้างของสมการเท่ากันก็จะได้ค่า ak โดยที่ ak นั้นคือระยะเวลาคืนทุน (year)

2.5.3 การวิเคราะห์หาจุดคุ้มทุน

เป็นการคาดคะเนว่าการหาจำนวนหน่วยขายของเครื่องต้นแบบฯ ที่ทำให้ยอดขายรวมเท่ากับค่าใช้จ่ายรวม/ ต้นทุนทั้งหมดจึงเป็นจุดที่ไม่มีกำไรหรือขาดทุนเกิดขึ้นในการใช้เครื่องต้นแบบฯ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ราคาขาย} - \text{ต้นทุนคงที่} - \text{ต้นทุนแปรผัน} = \text{กำไร} \quad (4)$$

3 ผลและวิจารณ์

3.1 ต้นแบบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS

จาก Figure 10 แสดงต้นแบบรถแทรกเตอร์ฯ ที่ได้จากการออกแบบโดยสามารถทำงานได้ทั้งแบบสั่งการระยะไกลและแบบ manual โดยจะมีคันบังคับด้วยมือติดตั้งไว้บริเวณด้านหน้าใกล้ที่นั่งคนขับ



Figure 10 Specifications of the sensors. (a) Autonomous tractor based on GPS guidance; (b) Gear reducer for steering; (c) 3 point hitch for drawbar; (d) Proportional electro-hydraulic pressure control valve; (e) Hydraulic motor.

3.2 ต้นแบบอัลกอริทึม และชุดคำสั่งเฉพาะในการควบคุมทิศทางและตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS พร้อมระบบมองเห็นระยะไกล

จาก Figure 11 แสดงต้นแบบขั้นตอนการควบคุมและทำงานของชุดคำสั่งเฉพาะในการควบคุมทิศทาง การมองเห็นระยะไกล และตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ

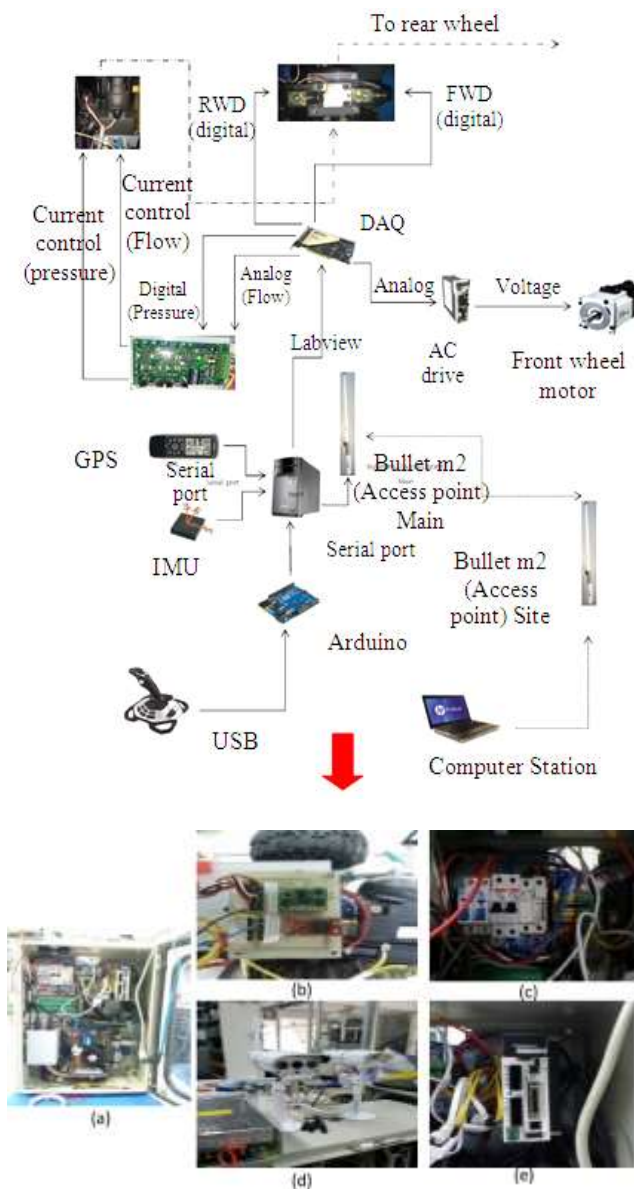


Figure 11 Specifications of the control system. (a) Main control box; (b) Network and DAQ cards; (c) Main switch; (d) Vision system; (e) Real time express board linear motor.

3.3 ผลการสอบเทียบการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

ในการทดลองได้จำลองโมเดลจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการออกแบบตัวควบคุมแบบฟีดแบ็ค ดังแสดงใน Figure 12 ในการจำลองรถแทรกเตอร์ได้กำหนดให้ค่าระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง L เท่ากับ 1 m โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1. ควบคุมตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง 2. ควบคุมตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและเส้นโค้ง

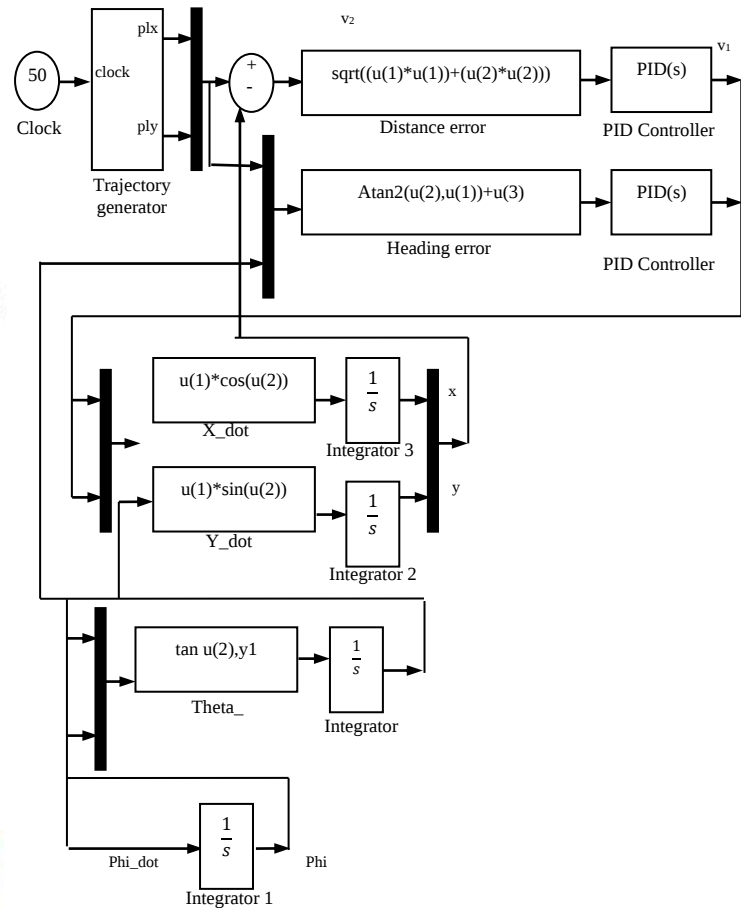


Figure 12 Kinematic model simulation and tractor controller with MATLAB/Simulink program.

ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_1, y_1) = (0, 0)$ m และจุดสิ้นสุดอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_2, y_2) = (10, 10)$ m ความเร็วสูงสุดที่ 1 m/s ความเร่งสูงสุดที่ 1 m/s² โดยที่รถแทรกเตอร์มีมุมหันเหเริ่มต้นของรถแทรกเตอร์ $\theta = 0$ degree เมื่อเทียบกับแกน x ส่วนค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คในรูปควบคุมตำแหน่งมีค่าเป็น $K_p = 12, K_I = 0$ และ $K_D = 0$ และค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คในรูปควบคุมมุมหันเหมีค่าเป็น $K_p = 20, K_I = 2$ และ $K_D = 10$ โดยผลการทดลองได้แสดงใน Figure 13, 14.

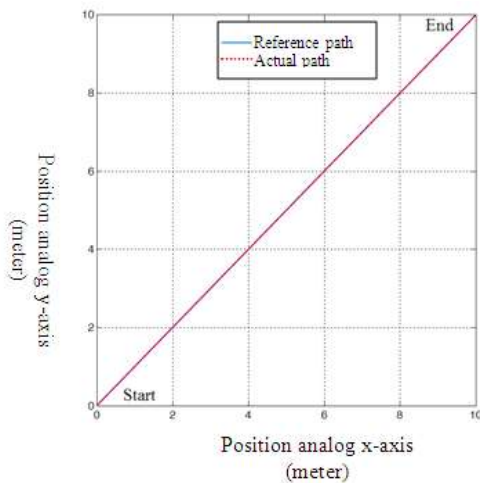


Figure 13 The result of the trial, the position of the tractor driver to follow a straight line motion path.

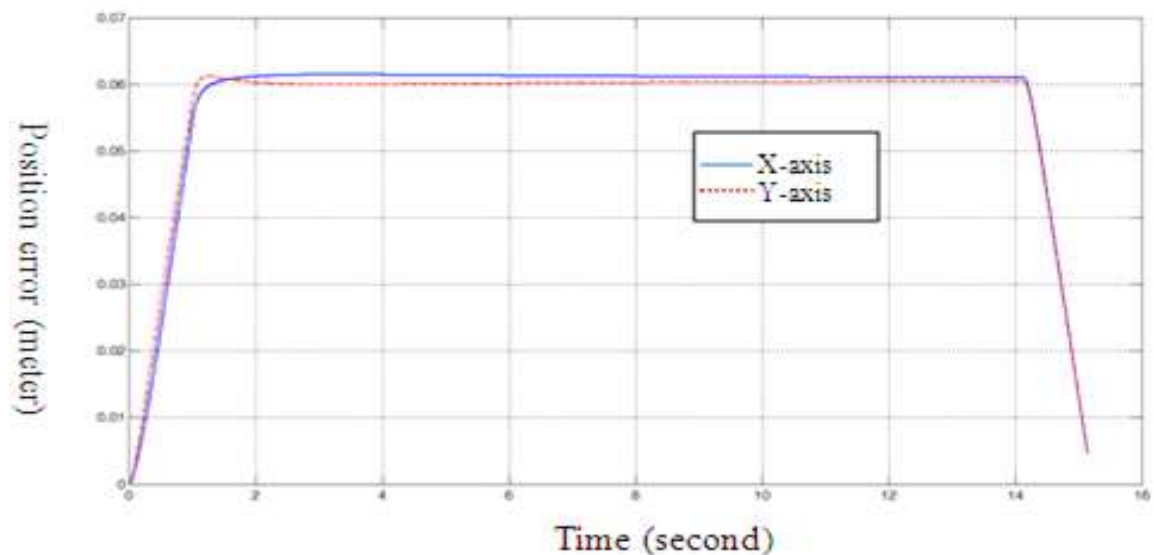


Figure 14 The error in the movement of the tractor along the axis x and y .

ใน Figure 13 จะแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ (เส้นปะสีแดง) กับเส้นทางเดินแบบเส้นตรงที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นเต็มสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถแทรกเตอร์สามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดให้ได้เป็นอย่างดี และสามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้ โดยที่มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ทั้งในแนวแกน x (เส้นเต็มสีน้ำเงิน) และแกน y (เส้นปะสีแดง) ได้แสดงใน Figure 14 ค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 0.062 m ขณะที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 1 m/s และมีความผิดพลาดขณะเมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่ 0.005 m

3.4 ผลการสอบเทียบการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

สำหรับการสอบเทียบนี้ เส้นการเคลื่อนที่ที่จะถูกสร้างจากแบบเส้นตรงและเส้นโค้งมารวมกัน เพื่อสร้างเส้นการเคลื่อนที่ให้เป็นรูปตัวยูกลับหัว โดยจะเริ่มจาก 1. แบบเส้นตรง มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_1, y_1) = (0, 0)$ m และจุดสิ้นสุดอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_2, y_2) = (0, 10)$ m และ 2. แบบเส้นโค้ง ได้กำหนดจุดเชื่อมต่อกันของเส้นตรง 2 เส้น (จุด P_2) ที่จุด $(x_3, y_3) = (5, 20)$ m 3. แบบเส้นตรง ที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_4, y_4) = (10, 10)$ m และจุดสิ้นสุดอยู่ที่ตำแหน่ง $(x_5, y_5) = (10, 0)$ m โดยทุกๆ เส้นการเคลื่อนที่มีความเร็วสูงสุดที่ 1 m/s ความเร่งสูงสุดที่ 1 m/s² โดยที่รถแทรกเตอร์มีมุมหันเหเริ่มต้น $\theta = 0$ degree เมื่อเทียบกับแกน x ส่วนค่า

เกรนในการทดลองนี้มีค่าเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมาโดย
ผลการทดลองได้แสดงใน Figure 15, 16

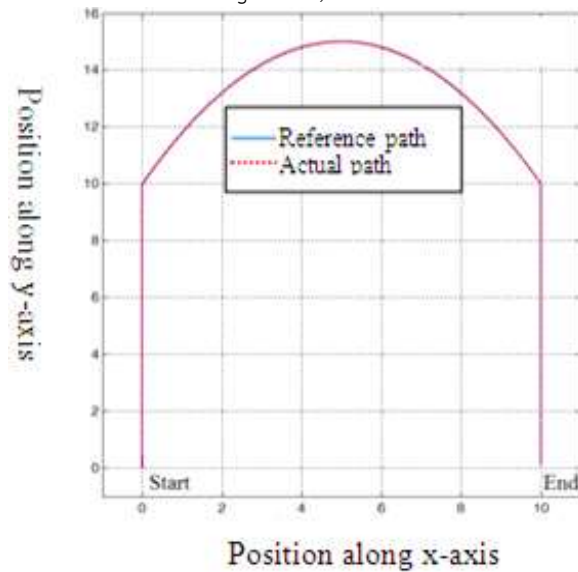


Figure 15 The result of the trial, the position of the tractor driver to follow a path, lines and curves.

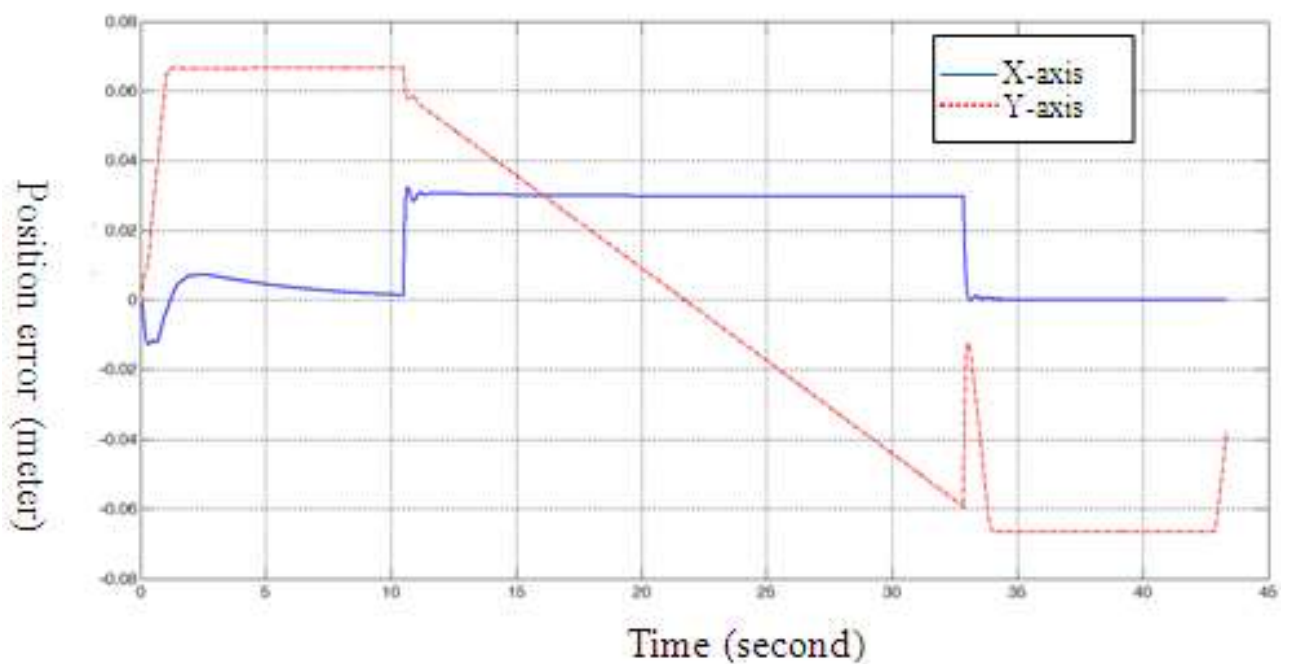


Figure 16 The error in the movement of the tractor when moving straight and curved lines.

จาก Figure 16 แสดงผลเส้นทางเดินแบบเส้นตรงที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นเต็มสีน้ำเงิน) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ (เส้นปะสีแดง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถแทรกเตอร์สามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดให้ได้เป็นอย่างดีทั้งเส้นตรงและเส้นโค้ง (เส้นปะสีแดงทับกับเส้นเต็มสีน้ำเงินเกือบเป็นเส้นเดียวกัน) โดยที่มีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในการเคลื่อนที่

ของรถแทรกเตอร์ทั้งในแนวแกน x (เส้นเต็มสีน้ำเงิน) และแกน y (เส้นปะสีแดง) ได้แสดงใน Figure 15 โดยค่าความผิดพลาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเวลา คือ 1. ช่วงเวลาที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเส้นแรก (ช่วงเวลา 0 s ถึง 10.5 s) จะเห็นได้ว่า ค่าความผิดพลาดในแนวแกน y จะมากกว่าในแนวแกน x เนื่องจากรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ใน

แนวแกน y เพียงแกนเดียวเท่านั้น 2. ช่วงเวลาที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นโค้ง (ช่วงเวลา 10.5 s ถึง 33.5 s) ในช่วงเวลานี้ค่าความผิดพลาดในแนวแกน y มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสูงแต่เป็นแบบเชิงเส้น เนื่องจากรถแทรกเตอร์มีการเคลื่อนในแนวแกน y ขึ้นและลง ส่วนในแนวแกน x จะคงที่ 3. ช่วงเวลาที่รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเส้นสุดท้าย (ช่วงเวลา 33.5 s ถึง 43.5 s) จะเห็นได้ว่า ค่าความผิดพลาดในแนวแกน y จะมากกว่าในแนวแกน x (เหมือนกับผลช่วงแรก) ซึ่งค่าความผิดพลาดสูงสุดเมื่อรถแทรกเตอร์เกิดการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและเส้นโค้งอยู่ที่ 0.065 m และมีความผิดพลาดขณะเมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่ 0.04 m

3.5 ผลการทดสอบหาค่าความสามารถในการทำงานจริงของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS (Raihr⁻¹)

Table 1 Test data of the unmanned tractor-driven by installing the equipment with GPS navigation system.

Operating data	An autonomous tractor based on GPS guidance and intelligent unmanned controlling system
Drawbar force(N)	15,168
Working speed(m/s)	0.25
Performance(%)	85.30
Fuel consumption rate (Literhr ⁻¹)	3.99
% Slip	21.4
Drawbar power(kW)	3.792
Working performance (Rai hr ⁻¹)	3.57



(a)



(b)



(c)

Figure 17 Specifications of the working performance tested. (a) Low altitude image data for working path; (b) The position of the tractor driver to follow a path; (c) Wireless vision sensor (front view and rear view).

3.6 ผลการทดสอบหาค่าความสามารถอัตราการใช้เชื้อเพลิงรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS (Liter hr⁻¹)

ในการทดสอบรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS พบว่า มีค่าการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง จากเครื่องยนต์เบนซินขนาด 15 hp เท่ากับ 3.99 Liter hr⁻¹ ที่ความเร็วในการทดสอบ 0.9 km hr⁻¹ และมีการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากเครื่อง Gasoline generator ขนาด 1,000 watts เท่ากับ 0.77 Liter hr⁻¹

3.7 ผลการทดสอบหาค่าอัตราการใช้ไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS (kW hr)

จากการทดสอบหาค่าอัตราการใช้ไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS จากเครื่อง Gasoline generator ขนาด 1,000 watts พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.00937 kW hr

Table 2 Relationship between the input voltage value, input current and control pressure of the unmanned tractor-driven automatic install equipment with GPS navigation system.

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

3.8 ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์ของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS

จากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยคิดต้นทุนคงที่เฉลี่ยที่ราคาของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS อยู่ที่ 764,100 THB อายุการใช้งาน 5 years อัตราดอกเบี้ยคิดที่ 10% ใช้ผู้ควบคุมเครื่อง 1 คน ความสามารถในการทำงานของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS 3.57 Rai hr⁻¹ ความเร็วในการทำงาน 0.9 km hr⁻¹ และทำงาน 1,440 hr year⁻¹ จะได้ค่าใช้จ่ายต้นทุนผันแปรเฉลี่ยต่อไร่ จะอยู่ที่ 368 THB โดยคิดจากมูลค่าเครื่อง ราคา 764,100 THB พื้นที่การทำงานภายในต่อวันเท่ากับ 44,800 m² day⁻¹ ทำงานวันละ 8 h มีค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 35.80 THB/Rai (อัตราการใช้เชื้อเพลิง 1.12 Liter Rai⁻¹ ที่ราคาน้ำมันเบนซิน 31.96 THB/Liter) ค่าซ่อมบำรุง 300 THB/Rai และมีอัตราการใช้เงินในราคา 800 THB

ดังนั้นถ้าใช้รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS สามารถคืนทุนถ้าทำการไถให้ได้ปริมาณพื้นที่เท่ากับ 1,646 Rai

4 สรุป

จากผลการทดสอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ พบว่าระบบเป็นการออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS พร้อมกับการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับรถแทรกเตอร์ฯ บนระบบพิกัดฉาก โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มี 2 แบบ กล่าวคือ เส้นตรงและเส้นโค้ง สำหรับตัวควบคุมที่ใช้คือตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยมีผู้ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และผู้ควบคุมมุมหันของรถแทรกเตอร์ฯ ซึ่งการทดลองได้จำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink การทดลองแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1. รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ตามเส้นทาง

เคลื่อนที่แบบเส้นตรงและ 2. รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและเส้นโค้ง โดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมที่ได้ออกแบบนั้น สามารถควบคุมให้รถแทรกเตอร์ฯ เคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้นั้นได้ เห็นได้ว่าขณะที่รถแทรกเตอร์ฯ เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเร็วคงที่ รถแทรกเตอร์ฯ จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งค่อนข้างคงที่ นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอมีข้อจำกัดอยู่ คือไม่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงได้ และจากผลการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS พบว่ามีค่าความสามารถในการทำงานเท่ากับ 3.57 Rai hr⁻¹ ที่ความเร็วในการทำงาน 0.9 km hr⁻¹ และทำงาน 1,440 hr year⁻¹ จะสามารถคืนทุนถ้าทำการไถให้ได้ปริมาณพื้นที่เท่ากับ 1,646 Rai โดยรถแทรกเตอร์ต้นแบบฯ มีแรงฉุดลาก 15,168 N มีความเร็วในการทำงาน 0.25 m s⁻¹ มีประสิทธิภาพการทำงาน 85.30% มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 3.99 Liter hr⁻¹ มีค่าการลื่นไถล (% Slip) 21.4 มีค่ากำลังฉุดลาก 3.792 kW และมีค่าความสามารถในการทำงาน 3.57 Rai hr⁻¹

5 ข้อเสนอแนะหรือแนวความคิดงานวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถที่จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการต่อยอดในการนำเอาเทคโนโลยีรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS ไปใช้งานจริงและในการลดข้อจำกัดตัวควบคุมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่นั้น ควรที่จะพัฒนาตัวควบคุมที่สามารถปรับค่าเกนของตัวควบคุมได้ อาทิเช่น ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive controller) เป็นต้น เพื่อที่ทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลงเข้าสู่ “ศูนย์”

6 กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัย ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) โครงการวิจัย-เงินงบประมาณ พ.ศ.2558 โดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี ที่สนับสนุนเงินงบประมาณ อุปกรณ์ บุคลากร และสถานที่ ในการเตรียมการทดสอบงานวิจัยในครั้งนี้ซึ่งความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้รับทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

7 เอกสารอ้างอิง

เกรียงไกร แซ่ม่วง, เกียรติศักดิ์ แสงประดิษฐ์. 2557. การพัฒนาระบบถ่ายภาพทางอากาศระยะไกลแบบติดตั้งบนเฮลิคอปเตอร์บังคับวิทยุสำหรับการเฝ้าระวังการระบาดของโรคพืชในพื้นที่ปลูกพืชมันสำปะหลัง. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 20(1), 1-9.

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. 2555.การแข่งขันรถไถ
ขับเคลื่อนอัตโนมัติ, [ระบบออนไลน์],
แหล่งข้อมูล:http://www.research.doae.go.th/webphp/webmaster/filepdf_news/Precision%20Farming.pdf, เข้าถึงเมื่อ 25 เมษายน 2559.

Benson, E.R., Reid, J.F., Zhang, Q. 2003. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection. *Biosyst Eng* 86(4), 389–398.

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

Keiichi, Inoue. 2008. Steering control system for autonomous tractor. In: *Proceeding of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*, TOYAMA, 34-42. 15-18 Sep 2009, Japan.

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.

Kayacan, E., Ramon, H., Saeys, W. 2016. Robust Trajectory Tracking Error Model-Based Predictive Control for Unmanned Ground Vehicles, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 21(2), 806-814.

Muhr, T., Noack, P.O. 2006. Mobile data repeaters enhancing the availability of RTK correction data in the field. In: *Proceedings of the 2006 automation technology for off-road equipment conference*, 65-69. Sep 2006, Bonn, Germany.

Noguchi, N., Reid, J.F., Zhang, Q., Will, J.D., Ischii, K. 2001. Development of robot tractor based on RTK-GPS and gyroscope. *ASAE Paper*, 01-1195.

O'Connor, M., Bell, T., Elkaim, G., Parkinson, B.W. 1996. Automatic steering of farm vehicles using GPS. In: *Proceedings of the Third international conference on precision agriculture*, 767–778. 23–26 June 1996, Minneapolis, MN.

Tsubota, R., Noguchi, N., Mizushima, A. 2004. Automatic guidance with a laser scanner for a robot tractor in an orchard. In: *Proceedings of the automation technology for off-road equipment conference*, 65-69. Kyoto, Japan.