



รายงานการวิจัย

การพัฒนารถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ (Development of an Autonomous Agricultural Tractor)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนารถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ (Development of an Autonomous Agricultural Tractor)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายศธา วาทกิจ

นายจรูญศักดิ์ สมพงศ์

นายกวี คงมัน

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2564

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายธีรวัฒน์ เจ๊ะเถื่อน นายฉัตริน เรืองจอหอ และนางสาวกมลชนน วงศ์สถาน ที่ช่วยทดสอบและเก็บรวบรวมข้อมูล



บทคัดย่อ

รถแทรกเตอร์ถูกนำมาใช้ในหลายขั้นตอนของกระบวนการผลิตทางการเกษตรในประเทศไทย เกษตรกรรู้สึกเหน็ดเหนื่อยเมื่อยล้าเมื่อต้องทำงานอยู่บนรถแทรกเตอร์เป็นเวลานาน ดังนั้น งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารถแทรกเตอร์ให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของรถแทรกเตอร์และสมการโพลีโนเมียลถูกนำมาใช้เพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบของรถแทรกเตอร์จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย ในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์รถแทรกเตอร์ถูกสร้างด้วยแบบจำลองทางคิเนแมติกส์ การจำลองสถานการณ์ถูกกระทำภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุมเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สิ่งรบกวนของระบบควบคุมถูกกำหนดจากความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยว ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ออกแบบได้ในสภาวะที่มีสิ่งรบกวน ในขณะที่ตัวควบคุมแบบป้อนกลับของระบบนำวิถีถูกนำมาใช้ชดเชยค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ รถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกดัดแปลงจากรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวที่พัฒนาสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์อัตโนมัติบนสภาพพื้นที่ต่างๆ ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning สามารถระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติบนพื้นคอนกรีตและพื้นลาดยางได้ด้วยระดับความถูกต้องที่ยอมรับได้ แต่ระดับความถูกต้องของการระบุตำแหน่งลดลงเมื่อปฏิบัติงานบนพื้นดินในแปลงเกษตร เพราะการไถของล้อ ผลการทดสอบภาคสนามยืนยันได้ว่า ระบบนำวิถีที่อาศัยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างน่าพอใจ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า รถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่พัฒนานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสภาวะการใช้งานจริงได้

คำสำคัญ: รถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ระบบนำวิถี

Abstract

In Thailand, tractors are commonly used for various agricultural operations. Since farmers feel fatigued and exhausted due to long hours of driving the tractor, the objective of this research, therefore, was to develop an autonomous tractor. Geometric relationship on the tractor and polynomial equations were employed to express a smooth trajectory that connected the configuration of the tractor at an initial position to a given target position. A kinematic model of the tractor was used in computer simulation. The simulation study was conducted under disturbed condition in order to examine the performance of both open loop and feedback controllers. The disturbance was defined from the deviation of the steering angle. The simulation results showed that the open loop controller could not steer the tractor along the designed trajectory precisely, while the feedback controller could compensate the positional and heading displacements. The autonomous tractor was modified from a small tractor. The developed steering controller could steer the autonomous tractor on various surfaces. The dead reckoning positioning system could find the tractor's position on concrete and paved surfaces with an acceptable level of accuracy. But the level of accuracy was decrease while on the soil surface in field due to wheel's slip. The experimental results showed that the guidance equipped with the feedback controller could steer the autonomous tractor from an initial position to a given target position satisfactorily. These results verified that the developed autonomous tractor could be applied for practical use.

Keywords: autonomous tractor, feedback control, guidance system

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ปรัชญานวัตกรรมกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 รถแทรกเตอร์เกษตร	4
2.2 ระบบควบคุม	9
2.3 การพัฒนาระบบนำวิถีสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ	10
บทที่ 3 การพัฒนาหลักวิธีการควบคุม	
3.1 แนวคิดในการพัฒนารถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ	14
3.2 การสร้างระบบออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่	16
3.2.1 แบบจำลองของรถแทรกเตอร์	16
3.2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่	17
3.2.3 การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพล	19
3.2.3 การจำลองสถานการณ์	21
3.3 ผลการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยการจำลองสถานการณ์	22
3.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์	26
บทที่ 4 การทดสอบภาคสนาม	
4.1 การสร้างระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว	31
4.1.1 การหาแรงบิดสูงสุดของการบังคับเลี้ยว	31
4.1.2 การออกแบบชุดบังคับเลี้ยว	33
4.1.3 การสอบเทียบมุมเลี้ยว	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.4 การลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวด้วยตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน	39
4.1.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว	40
4.1.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว	41
4.2 การสร้างระบบระบุตำแหน่งแบบท้องถิ่น	41
4.2.1 ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning	41
4.2.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดรอบการหมุน	43
4.2.3 การปรับแก้การ drift ของเซนเซอร์วัดทิศทางการเคลื่อนที่	44
4.2.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning	45
4.3 การทดสอบภาคสนาม	45
4.3.1 ผลการทดสอบบนพื้นคอนกรีต	51
4.3.2 ผลการทดสอบบนพื้นดินในแปลงเกษตร	60
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
การเผยแพร่ผลงานวิจัย	66
เอกสารอ้างอิง	67
ประวัติหัวหน้าโครงการ	68

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D	14
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้าย	18
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์สำหรับการจอดรถแบบขนาน	21
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของตัวแปรของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว	41
ตารางที่ 4.2 จำนวนสัญญาณ pulse ของเซนเซอร์วัดรอบการหมุนเมื่อรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 20 m	44



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รถแทรกเตอร์เกษตร	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างตัวรถแทรกเตอร์เกษตร (ก) แบบ monocoque (ข) แบบ chassis	5
รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร	5
รูปที่ 2.4 ระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์เกษตร	6
รูปที่ 2.5 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร	6
รูปที่ 2.6 ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์เกษตร	7
รูปที่ 2.7 ระบบต่อพ่วงแบบคานลากและแบบสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตร	7
รูปที่ 2.8 ระบบไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์เกษตร	8
รูปที่ 2.9 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร	8
รูปที่ 2.10 ระบบควบคุม (ก) แบบวงเปิด (ข) แบบวงปิด11	9
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบนำวิถีสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร	10
รูปที่ 2.12 Light bar ของบริษัท Trimble	11
รูปที่ 2.13 EZ-Pilot Pro Guidance System ของบริษัท Trimble	11
รูปที่ 2.14 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับพ่นสารเคมี ของบริษัท John Deere	12
รูปที่ 2.15 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับงานไถเตรียมดินด้วยโรตารีของ BRAIN	13
รูปที่ 2.16 รถดำนาอัตโนมัติของ NARC	13
รูปที่ 3.1 แบบเชิงความคิดของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	15
รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งระบบวัดคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	15
รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติต้นแบบ	16
รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า	16
รูปที่ 3.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้ายด้วย สมการโพลีโนเมียล	18
รูปที่ 3.6 ความผิดพลาดทางตำแหน่งของรถแทรกเตอร์	19
รูปที่ 3.7 โปรแกรมจำลองสถานการณ์สำหรับรถแทรกเตอร์	21
รูปที่ 3.8 ความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะมีแรงกระทำทางด้านข้าง	22
รูปที่ 3.9 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	23
รูปที่ 3.10 ทิศทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	23
รูปที่ 3.11 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	24

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	24
รูปที่ 3.13 ทิศทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	25
รูปที่ 3.14 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	25
รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	27
รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	27
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	28
รูปที่ 3.18 การเปรียบเทียบความผิดพลาดทางแกน y ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	28
รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบความผิดพลาดในทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	29
รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	29
รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	30
รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m	30
รูปที่ 4.1 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดบนพวงมาลัยรถแทรกเตอร์	31
รูปที่ 4.2 การวัดค่าแรงบิดในการบังคับเลี้ยวบนพื้นหญ้า	32
รูปที่ 4.3 แรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะดับเครื่องยนต์	32
รูปที่ 4.4 แรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะติดเครื่องยนต์	33
รูปที่ 4.5 แผนภาพลายเส้นของชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	34
รูปที่ 4.6 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	34
รูปที่ 4.7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของชุดบังคับเลี้ยว	35
รูปที่ 4.8 การติดตั้งทรานซ์ดิวเซอร์วัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	35
รูปที่ 4.9 แผนผังของระบบวัดมุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	36
รูปที่ 4.10 อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	36

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 การวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	37
รูปที่ 4.12 แผนผังการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ	38
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติและระยะสายเคเบิลของ ทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง	38
รูปที่ 4.14 การลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบ ความถี่ต่ำผ่าน	39
รูปที่ 4.15 ผลการลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวด้วยตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน	40
รูปที่ 4.16 การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว	40
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม P, PI และ PID สำหรับระบบควบคุม บังคับเลี้ยว	41
รูปที่ 4.18 การติดตั้งเซนเซอร์วัดทิศทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	42
รูปที่ 4.19 การติดตั้งเซนเซอร์วัดรอบการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์	42
รูปที่ 4.20 การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์แบบ dead reckoning	43
รูปที่ 4.21 ผลการปรับแก้การ drift ของเซนเซอร์วัดทิศทางเคลื่อน	44
รูปที่ 4.22 สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	46
รูปที่ 4.23 สภาพของพื้นคอนกรีตสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	47
รูปที่ 4.24 สภาพของพื้นดินในแปลงเกษตรสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ อัตโนมัติ	47
รูปที่ 4.25 การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ด้วยกล้องสำรวจแบบ total station	48
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างของหยดน้ำพื้นคอนกรีต	48
รูปที่ 4.27 การโรยปูนขาวบนตำแหน่งของหยดน้ำพื้นดินในแปลงเกษตร	49
รูปที่ 4.28 โปรแกรมควบคุมระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	49
รูปที่ 4.29 แผนผังของลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบนำวิถีรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	50
รูปที่ 4.30 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีต	52
รูปที่ 4.31 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ถอยหลังของรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีต	53
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต	54
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต	54
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต	55
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต	55

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต	56
รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต	56
รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	57
รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	57
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	58
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	58
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	59
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย	59
รูปที่ 4.44 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตร	61
รูปที่ 4.45 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ถอยหลังของรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตร	62
รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นดิน	63
รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นดิน	63
รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นดิน	64
รูปที่ 4.49 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นดิน	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันแรงงานวัยหนุ่มสาวจากภาคเกษตรหลังไหลสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตและบริการอย่างต่อเนื่อง เพราะแรงงานเหล่านี้เห็นว่าการทำงานการเกษตรเป็นงานที่หนักเหนื่อย ต้องพึ่งพาธรรมชาติ และมีรายได้ที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้จำนวนแรงงานในภาคเกษตรลดลง และแรงงานที่ทำงานอยู่มีอายุสูงขึ้น ปัญหาเหล่านี้จะทำให้ความเข้มแข็งของภาคเกษตรมีแนวโน้มถดถอยลง แนวทางหนึ่งที่จะสามารถช่วยให้การเกษตรกลายเป็นอาชีพที่ได้รับความสนใจมากกว่าปัจจุบันคือ การนำเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และระบบสารสนเทศ มาประยุกต์ใช้ในการเกษตร ซึ่งเรียกว่า การเกษตรแม่นยำ (precision agriculture) เทคโนโลยีนี้สามารถช่วยเหลือเกษตรกรในด้านต่างๆ เช่น ลดความเหน็ดเหนื่อยในการทำงาน ลดต้นทุนในการผลิต และทำให้การทำงานการเกษตรเป็นงานที่ทำได้ง่าย ซึ่งสามารถช่วยดึงดูดความสนใจของแรงงานวัยหนุ่มสาวให้หันกลับมาสนใจการเกษตรอีกครั้งได้

การเพิ่มขึ้นของประชากร การลดลงของพื้นที่เกษตรกรรม และการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การทำเกษตรแบบดั้งเดิมที่มีการใช้แรงงานคนหรือสัตว์ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการอาหารและพลังงานที่เพิ่มขึ้นได้ รถแทรกเตอร์จึงถูกนำเข้ามาใช้แทนแรงงานคนและสัตว์ เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มผลผลิต ลดระยะเวลาการทำงาน และลดการใช้แรงงานด้วย รถแทรกเตอร์ถูกนำมาใช้ในทุกระดับของกระบวนการผลิตทางการเกษตร ตั้งแต่การเตรียมดิน การปลูก การอารักขาพืช การเก็บเกี่ยว ตลอดจนการขนส่งผลผลิต รถแทรกเตอร์จึงถือเป็นต้นกำลังหลักในการประกอบอาชีพเกษตรกรรม แต่ประสิทธิภาพการทำเกษตรไม่ได้ขึ้นอยู่กับศักยภาพของรถแทรกเตอร์เพียงอย่างเดียว ปัจจัยอีกอันหนึ่งที่มีผลไม่แพ้กันก็คือเกษตรกรผู้ใช้รถแทรกเตอร์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดเกษตรกรจะต้องมีความเชี่ยวชาญในการใช้รถแทรกเตอร์ต่อพ่วงเครื่องมือเกษตรได้เป็นอย่างดี แต่ในบางครั้งถึงแม้เกษตรกรจะมีความชำนาญเป็นอย่างมาก หากเกษตรกรต้องทำงานอยู่บนรถแทรกเตอร์เป็นเวลานานอาจทำให้ร่างกายเกิดความเมื่อยล้าและอ่อนเพลีย ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง นอกจากนี้ในบางสถานการณ์เกษตรกรต้องเผชิญกับอันตรายจากสารเคมีที่มีอยู่ในปุ๋ยและยาปราบศัตรูพืช เพื่อสร้างความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการทำงานให้แก่เกษตรกร จึงมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรให้สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ

งานวิจัยเกี่ยวกับแทรกเตอร์อัตโนมัติเกิดขึ้นอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เพราะว่ามีคนนำเอาอุปกรณ์ไฮดรอลิกและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ ระบบ

ถ่ายทอดกำลัง และระบบอื่นๆ ของรถแทรกเตอร์มากขึ้น รวมไปถึงการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น เลเซอร์เซ็นเซอร์ กล้องวิดีโอ CCD และระบบระบุพิกัดบนพื้นโลก (global positioning system, GPS) มาใช้ในการเกษตร ปัจจัยเหล่านี้เอื้ออำนวยต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการสร้างรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ (autonomous tractor) ได้ง่ายขึ้น แต่รถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมของต่างประเทศไม่สามารถนำมาใช้กับพื้นที่เกษตรกรรมของประเทศไทยได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เพราะความแตกต่างกันของสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และเทคโนโลยีสนับสนุน ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติควรได้รับการพัฒนาให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรและเทคโนโลยีของแต่ละประเทศ

รถแทรกเตอร์อัตโนมัติในประเทศอเมริกาและทวีปยุโรปถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้งานในพื้นที่การเกษตรขนาดใหญ่ เพื่อลดความเมื่อยล้า เพิ่มความสะดวกสบายแก่เกษตรกร และลดค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ในขณะที่รถแทรกเตอร์อัตโนมัติในประเทศญี่ปุ่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยเหลือเกษตรกรซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุให้สามารถทำการเกษตรได้ โดยทั่วไปผู้ขับรถแทรกเตอร์จะต้องรับภาระในการบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ พร้อมกับควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างอื่นให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง ระบบขับเลี้ยวอัตโนมัติ (automatic steering) ถูกนำเข้ามาบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์แทนผู้ขับ ทำให้ผู้ขับสามารถควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างอื่นได้อย่างสะดวก ไม่เมื่อยล้า และทำงานได้นานขึ้น สำหรับประเทศไทยถึงแม้ในปัจจุบันยังไม่เกิดวิกฤตด้านแรงงานในภาคการเกษตร แต่ในอนาคตอันใกล้ปัญหานี้มีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้น รถแทรกเตอร์อัตโนมัติอาจจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการช่วยเหลือเกษตรกรไทยได้ อย่างไรก็ตามการวิจัยรถแทรกเตอร์อัตโนมัติให้มีฟังก์ชันการทำงานที่สมบูรณ์เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรของประเทศจะต้องอาศัยการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเริ่มงานวิจัยรถแทรกเตอร์อัตโนมัติอย่างจริงจัง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะสร้างรถแทรกเตอร์อัตโนมัติให้สามารถทำงานได้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรของประเทศ เพื่อใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับภาคการเกษตร และเป็นเครื่องมือในการพัฒนาการเกษตรแม่นยำสำหรับประเทศไทยต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อสร้างระบบระบุตำแหน่งท้องถิ่นของรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ
- 2) เพื่อสร้างระบบออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ
- 3) เพื่อสร้างระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรแบบอัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นพัฒนาระบบระบุตำแหน่งท้องถิ่น ระบบวางแผนเส้นทาง และระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ใน category I และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการรับส่งข้อมูลจากเซ็นเซอร์และควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1) ด้านวิชาการและวิจัย ทำให้ทราบองค์ความรู้สมัยใหม่ในการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรให้เหมาะสมกับการทำเกษตรของประเทศ ผลการวิจัยสามารถนำไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการได้ นอกจากนี้นักศึกษาทั้งในระดับปริญญาตรีและระดับบัณฑิตศึกษาของสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรที่เข้ามาช่วยในโครงการวิจัยนี้ จะได้รับความรู้ในการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ ซึ่งจะเป็นการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ต่อไป

2) ด้านบริการวิชาการ นักวิจัยในหน่วยงานต่างๆ เช่น กรมวิชาการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร บริษัทเอกชน และมหาวิทยาลัยต่างๆ สามารถนำฟังก์ชันการทำงานของรถแทรกเตอร์อัตโนมัตินี้ไปพัฒนาต่อยอด เพื่อให้รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถทำงานแทนแรงงานคนในภาระงานที่หนักและอาจสร้างอันตรายให้กับมนุษย์ได้ เช่น การใส่ปุ๋ย ยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รถแทรกเตอร์เกษตร

ในปัจจุบันรถแทรกเตอร์เกษตรมีบทบาทสำคัญในการเกษตร โดยถูกนำเข้าไปใช้แทนแรงงานคนและสัตว์ เพราะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทำให้สามารถเพิ่มผลผลิต ลดระยะเวลาการทำงาน และลดการใช้แรงงาน รถแทรกเตอร์ถูกนำมาใช้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตทางการเกษตร ตั้งแต่การเตรียมดิน การปลูก การอารักขาพืช การเก็บเกี่ยว ตลอดจนการขนส่งผลผลิต รถแทรกเตอร์จึงถือเป็นต้นกำลังหลักในการประกอบอาชีพเกษตรกรกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

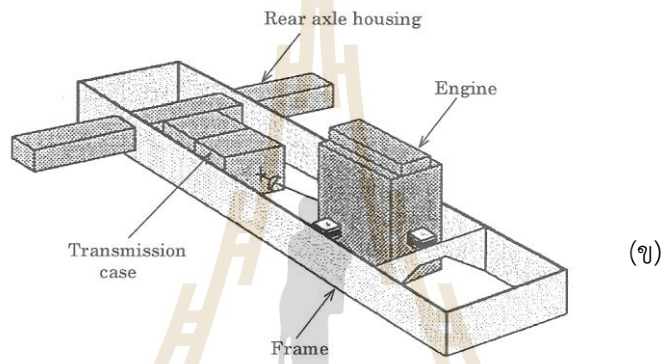
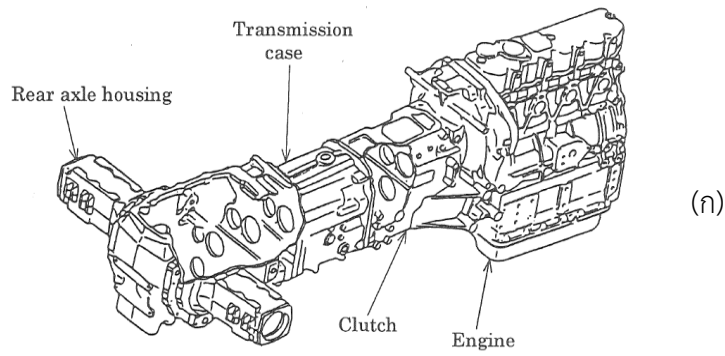


รูปที่ 2.1 รถแทรกเตอร์เกษตร

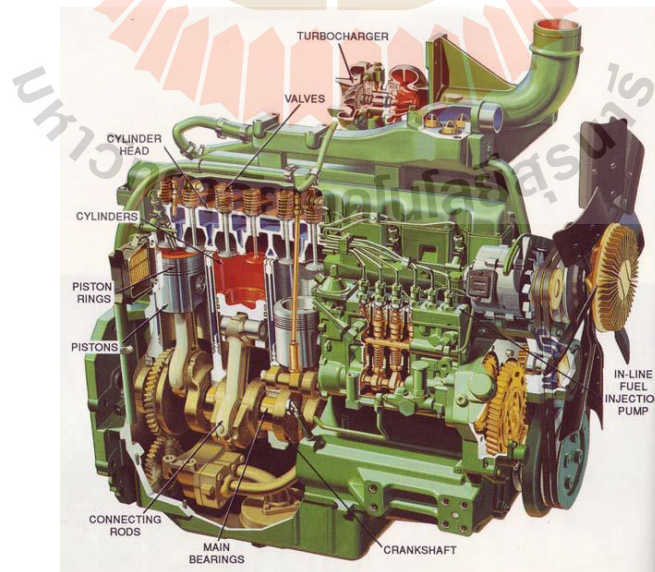
ระบบกลไกพื้นฐานสำคัญของรถแทรกเตอร์เกษตรสามารถจำแนกได้ ดังนี้ โครงสร้างตัวรถ เครื่องยนต์ ระบบขับเคลื่อน ระบบบังคับเลี้ยว ระบบไฮดรอลิก ระบบต่อพ่วง และระบบไฟฟ้า เป็นต้น

โครงสร้างตัวรถของรถแทรกเตอร์แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบ monocoque และโครงสร้างแบบ chassis โดยโครงสร้างแบบ monocoque สร้างจากเสื่อสูบ เสื่อเกียร์ และเสื่อเพลาล้อหลัง นิยมใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาดใหญ่ ส่วนโครงสร้างแบบ chassis สร้างจากชิ้นส่วนโลหะ เพื่อทำหน้าที่รองรับระบบกลไกอื่นๆ นิยมใช้กับรถแทรกเตอร์ขนาดกลางและขนาดเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เครื่องยนต์ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังของระบบอื่นๆ โดยในปัจจุบันนิยมใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังของรถแทรกเตอร์เกษตร เพราะสามารถสร้างแรงบิดได้สูง ทนทาน บำรุงรักษาง่าย เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

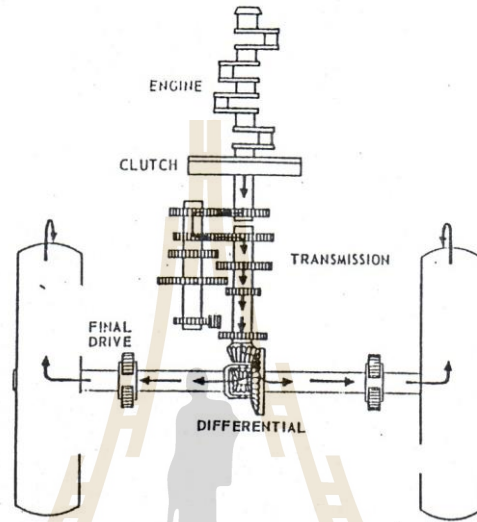


รูปที่ 2.2 โครงสร้างตัวรถแทรกเตอร์เกษตร (ก) แบบ monocoque (ข) แบบ chassis



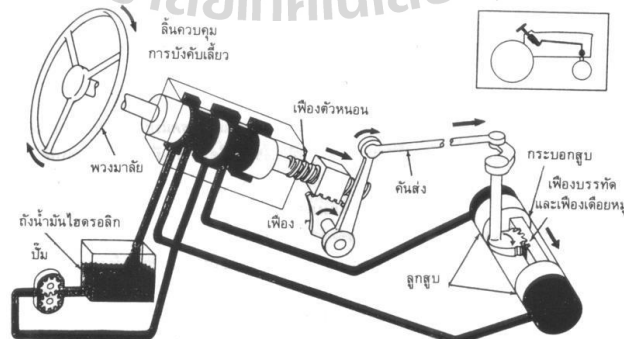
รูปที่ 2.3 เครื่องยนต์ดีเซลสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบขับเคลื่อนเป็นระบบส่งกำลังจากเครื่องยนต์เพื่อสร้างการเคลื่อนที่ให้กับรถแทรกเตอร์ไปในทิศทางที่ต้องการ และเพื่อขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่อพ่วงได้ ระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ แบบธรรมดา และแบบไฮดรอสแตติก ระบบขับเคลื่อนจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆ เช่น คลัทช์ เกียร์ เฟืองท้าย เฟืองขับล้อ ล้อ เบรค และเพล่าอำนาจกำลัง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4



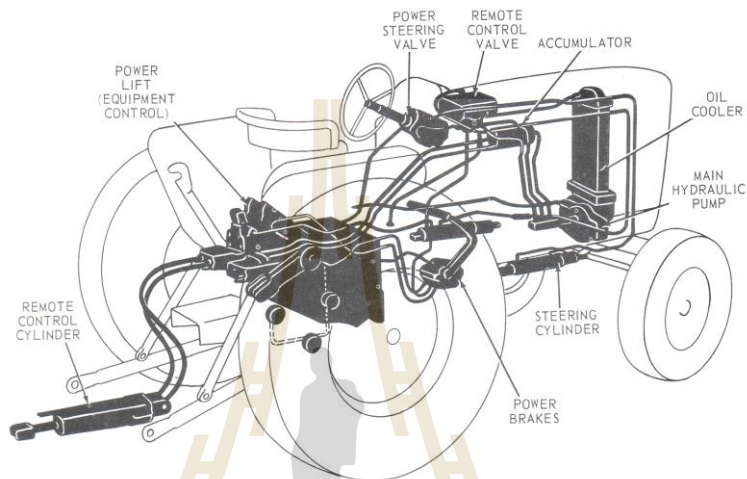
รูปที่ 2.4 ระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบบังคับเลี้ยวทำหน้าที่ควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ โดยทั่วไปจะใช้ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกเพื่อขับเคลื่อนการบังคับเลี้ยวแบบ Ackerman mechanism ดังแสดงในรูปที่ 2.5



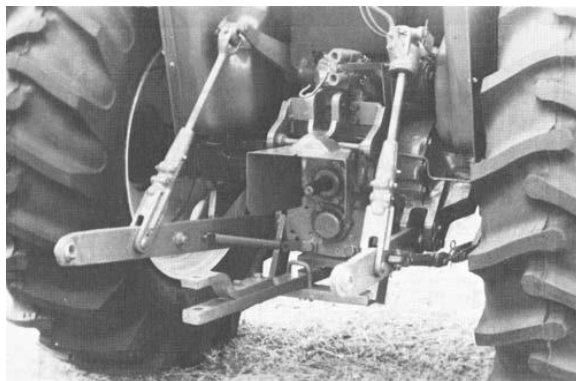
รูปที่ 2.5 ระบบบังคับเลี้ยวแบบไฮดรอลิกสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบไฮดรอลิกถูกใช้ในการยกหรือวางอุปกรณ์ต่อพ่วง ควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์หรือควบคุมแรงเพื่อลดลากอุปกรณ์ และเป็นระบบผ่อนแรงของระบบกลไกอื่นๆ เช่น ระบบบังคับเลี้ยว คลัตช์ เบรก นอกจากนี้รถแทรกเตอร์บางรุ่นยังสามารถต่อขยายระบบไฮดรอลิกเพื่อควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ ระบบไฮดรอลิกประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้ ปัมไฮดรอลิก กระจบอกไฮดรอลิก ทางเดินน้ำมันไฮดรอลิก วาล์วควบคุม และวาล์วนิรภัย เป็นต้น



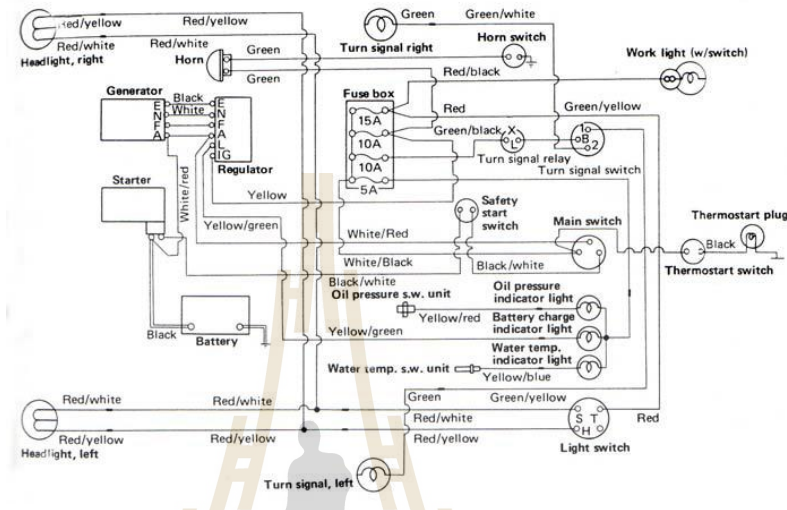
รูปที่ 2.6 ระบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบต่อพ่วงทำหน้าที่ต่อพ่วงอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับรถแทรกเตอร์ โดยทั่วไปรถแทรกเตอร์จะมีระบบต่อพ่วงแบบคานลาก (drawbar) และระบบต่อพ่วงแบบสามจุด (three-point hitch) โดยระบบต่อพ่วงแบบสามจุดสามารถควบคุมตำแหน่งการยกหรือวางอุปกรณ์ได้โดยอาศัยกำลังจากระบบไฮดรอลิก ดังแสดงในรูปที่ 2.7



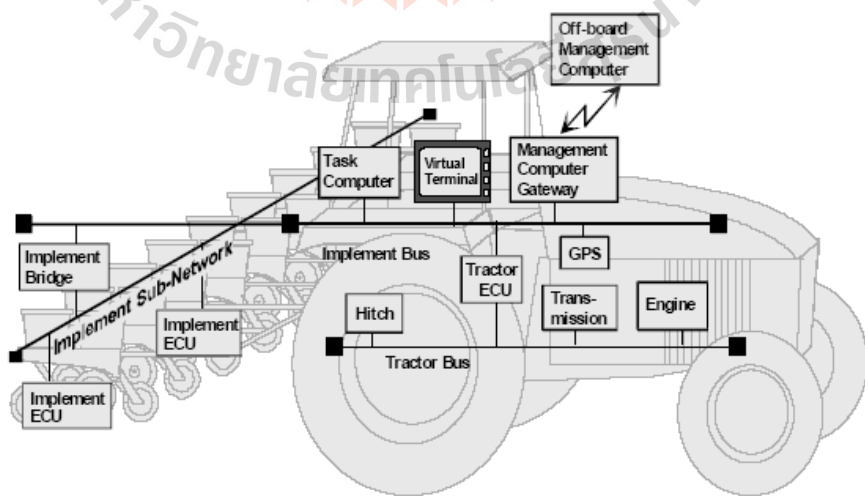
รูปที่ 2.7 ระบบต่อพ่วงแบบคานลากและแบบสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบไฟฟ้าทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้แก่ระบบอื่นๆ เช่น ระบบไฟแสงสว่าง มอเตอร์ สตาร์ท ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ และเซนเซอร์ต่างๆ เป็นต้น โดยมีแบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในขณะดับเครื่องยนต์ และอัลติเนเตอร์เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในขณะที่ติดเครื่องยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ระบบไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์เกษตร

และระบบอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฟังก์ชันการทำงานในเครื่องจักรกลเกษตร ระบบอิเล็กทรอนิกส์มักจะเป็นระบบที่ทำงานร่วมกันของ หน่วยประมวลผล (electronic control unit, ECU) และเซนเซอร์ต่างๆ ผ่านเครือข่าย controller are network, CAN ดังแสดงรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร

2.2 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมเป็นการเชื่อมโยงกันของส่วนต่างๆ ขึ้นเป็นระบบ เพื่อใช้ประโยชน์ในการควบคุมระบบพลวัต (dynamic system) หรือกระบวนการ (process) ให้ได้การตอบสนอง (response) ตามที่ต้องการ โดยมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ

1) เพื่อให้เอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับอินพุตอ้างอิง (reference input) เรียกว่า การคุมค่า (regulation) เช่น การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมระดับน้ำในถัง เป็นต้น

2) เพื่อให้ output แปรไปตาม reference input ที่เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เรียกว่า การตามรอย (tracking) และเรียกระบบตามรอยนี้ว่า ระบบเซอร์โว (servo system) เช่น การควบคุมเครื่องจักรกล จรวด รถอัตโนมัติ เป็นต้น

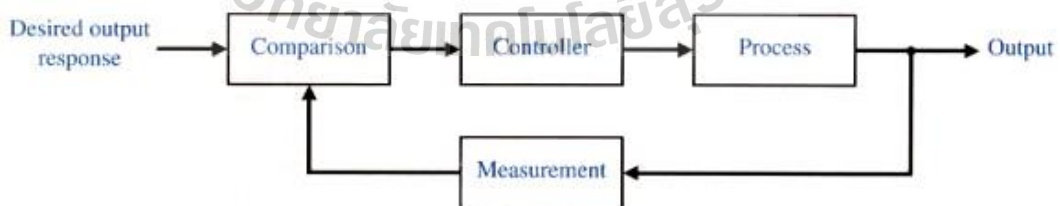
ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) ระบบควบคุมแบบวงเปิด ซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีการนำเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับ การตอบสนองที่ต้องการ

2) ระบบควบคุมแบบวงปิด ระบบควบคุมแบบนี้ส่วนใหญ่จะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งเป็นระบบที่มีการนำเอาต์พุตกลับมาเปรียบเทียบกับ การตอบสนองที่ต้องการ เพื่อให้ตัวควบคุมสร้างสัญญาณชดเชยผลต่างระหว่างเอาต์พุตกับอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 2.10



(ก)

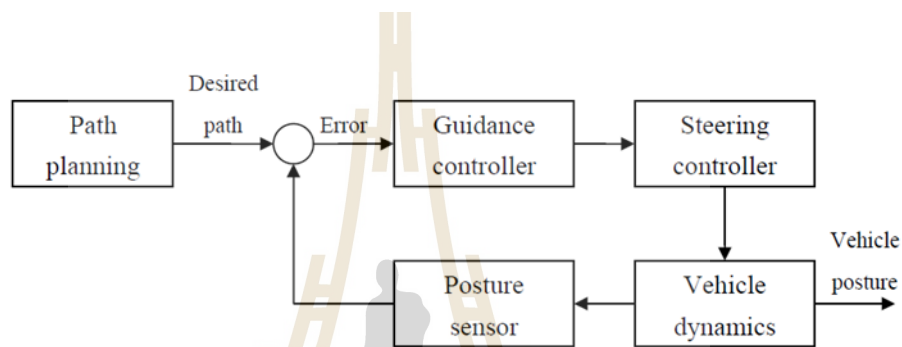


(ข)

รูปที่ 2.10 ระบบควบคุม (ก) แบบวงเปิด (ข) แบบวงปิด

2.3 การพัฒนาระบบนำวิถีสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถพัฒนาได้จากการติดตั้งระบบนำวิถี (guidance system) เข้ากับรถแทรกเตอร์แบบเดิม ซึ่งจะทำให้รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถปฏิบัติงานทางการเกษตรได้อย่างเหมาะสม ระบบนำวิถีส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ชุดเซนเซอร์สำหรับระบุตำแหน่งของตัวรถ ตัวออกแบบเส้นทาง ชุดควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ และชุดบังคับเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (Stombaugh et al., 1999) ในการทำงาน ชุดควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ จะคำนวณหาค่าสั่งบังคับเลี้ยวที่เหมาะสมตามค่าที่ตัววางแผนเส้นทางระบุไว้ แล้วส่งสัญญาณให้ชุดบังคับเลี้ยวเพื่อบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ต่อไป



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของระบบนำวิถีสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตร

ระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ guidance aid, automatic guidance และ autonomous guidance โดยที่ ระบบนำวิถีแบบ guidance aid เป็นระบบนำวิถีที่ให้ข้อมูลสำหรับการทำงานแก่ผู้ขับรถแทรกเตอร์ โดยการตัดสินใจในการควบคุมรถแทรกเตอร์ยังคงเป็นหน้าที่ของผู้ขับ ยกตัวอย่างเช่น light-bar เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณจาก GNSS เพื่อระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ให้ผู้ขับทราบว่า ขณะนี้รถแทรกเตอร์กำลังปฏิบัติงานอยู่บนเส้นทางที่กำหนดไว้หรือไม่ ทำให้ผู้ขับมีความสะดวกสบายในการขับรถแทรกเตอร์มากขึ้น light-bar เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมใช้งานเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีขนาดเล็ก ราคาถูก และสามารถติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 แม้ว่า light-bar จะสามารถอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ขับ ทำให้ผู้ขับสามารถบังคับรถแทรกเตอร์ได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าต้องขับรถแทรกเตอร์ในแปลงขนาดใหญ่ให้วิ่งตรงตามเส้นทางตามสัญญาณไฟของ light-bar ผู้ขับรถแทรกเตอร์อาจจะเหน็ดเหนื่อยได้ โดยทั่วไปผู้ขับรถแทรกเตอร์จะต้องรับภาระในการบังคับรถแทรกเตอร์ พร้อมกับควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างอื่นให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง เพื่อเป็นการช่วยเหลือผู้ขับ จึงได้มีการพัฒนาระบบนำวิถีแบบ automatic guidance ขึ้นมา

ระบบนำวิถีแบบ automatic guidance สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้เอง โดยมีผู้ขับรถแทรกเตอร์ช่วยทำงานในบางหน้าที่ ระบบขับเลี้ยวอัตโนมัตินี้มีการนำมาใช้งานได้จริงและมีจำหน่ายในท้องตลาด โดยระบบเหล่านี้ถูกผลิตออกมาเพื่อให้สามารถต่อเข้ากับชุดขับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ทั่วไปได้ ระบบนี้ประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณจาก GNSS และชุดควบคุมการขับเลี้ยว รถแทรกเตอร์ที่ติดตั้งระบบนี้สามารถนำไปปฏิบัติงานในการไถเตรียมดิน เพาะปลูก หว่านปุ๋ย หรือกำจัดวัชพืชได้ โดยระบบจะควบคุมรถแทรกเตอร์ให้วิ่งในแนวตรงตามร่องแถวได้อย่างถูกต้อง ผู้ขับมีหน้าที่เพียงแค่เลี้ยวรถกลับตรงหัวแปลง และหยุดรถในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 Light bar ของบริษัท Trimble



รูปที่ 2.13 EZ-Pilot Pro Guidance System ของบริษัท Trimble

ระบบนำวิถีแบบ autonomous guidance สามารถวางแผนเส้นทาง บังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์เพื่อปฏิบัติงาน และกลับมาโรงจอดได้ด้วยตัวเองโดยปราศจากผู้ขับ งานวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับระบบนี้ถูกตีพิมพ์อย่างมากมายทั้งในต่างประเทศ ตัวอย่างเช่น บริษัท John Deere ในประเทศอเมริกาได้ผลิตรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบสำหรับการพ่นสารเคมีในสวนผลไม้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ส่วนในแถบเอเชีย ประเทศญี่ปุ่นเป็นประเทศหนึ่งซึ่งมีงานวิจัยเกี่ยวกับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติจำนวนมาก เช่น สถาบันวิจัย Bio-oriented technology research advancement institute (BRAIN) ได้พัฒนารถแทรกเตอร์ต้นแบบสำหรับงานเตรียมดินด้วยโรตารีดังแสดงในรูปที่ 2.15 ศูนย์วิจัย National agricultural research center (NARC) ได้พัฒนารถแทรกเตอร์สำหรับดำนาอัตโนมัติต้นแบบ (Nagasaka et al., 2002) รถคันนี้ถูกดัดแปลงมาจากรถแทรกเตอร์ดำนาธรรมดา โดยใช้ programmable logic controller (PLC) เป็นตัวควบคุมระบบขับเคลื่อนของรถ และใช้ real-time kinematic GPS (RTK-GPS) และ inertial measurement unit (IMU) ในการระบุตำแหน่งของรถ ระบบนี้สามารถบังคับเลี้ยวรถดำนาให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ด้วยค่าระดับความผิดพลาดทางตำแหน่งภายในช่วง ± 10 cm ดังแสดงในรูปที่ 2.16

งานวิจัยเกี่ยวกับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติยังเป็นงานที่กำลังทำหายุสำหรับนักวิจัยในปัจจุบัน เพื่อตอบสนองต่อสภาวะการขาดแคลนแรงงานในภาคเกษตร ดังจะเห็นได้จากผลงานวิจัยที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Keicher and Seufert, 2000; Reid et al., 2000; Torii, 2000; Noguchi et al., 1997; Takigawa et al., 2002)



รูปที่ 2.14 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับพ่นสารเคมี ของบริษัท John Deere



รูปที่ 2.15 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับงานไถเตรียมดินด้วยโรตารีของ BRAIN



รูปที่ 2.16 รถดำนาอัตโนมัติของ NARC

บทที่ 3

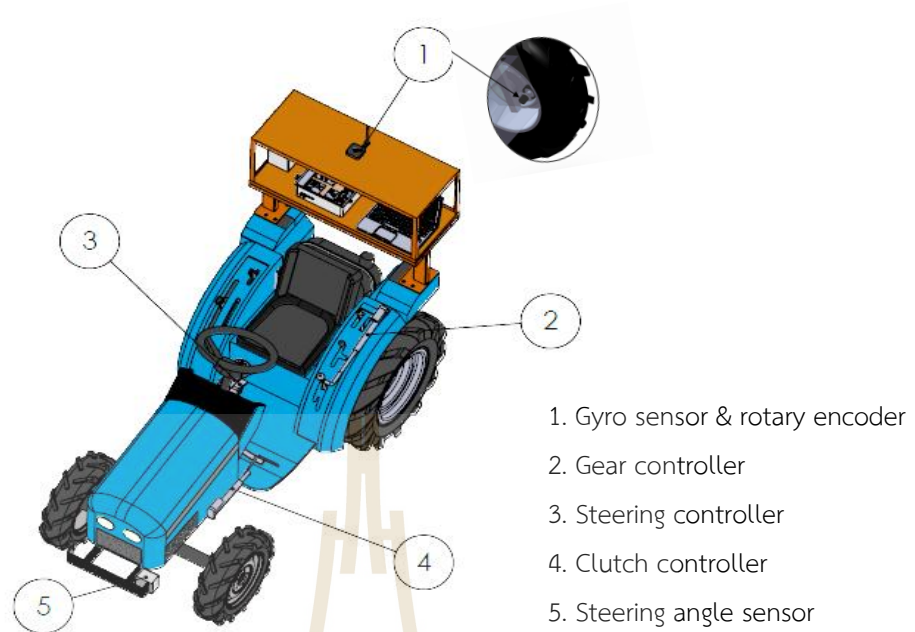
การพัฒนาหลักวิธีการควบคุม

3.1 แนวคิดในการพัฒนารถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

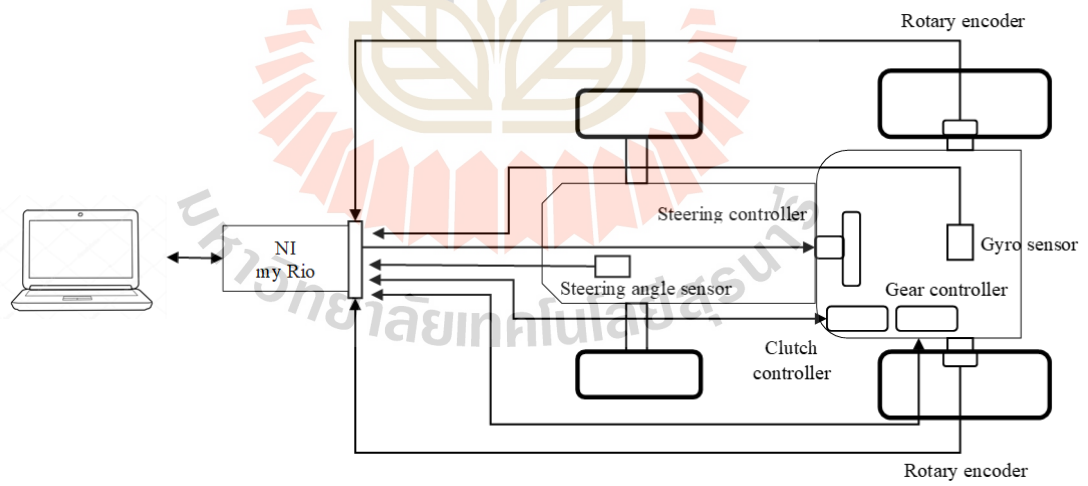
รถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติต้นแบบจะถูกสร้างจากการดัดแปลงรถแทรกเตอร์เกษตรขนาด เล็กยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D ซึ่งเป็นรถแทรกเตอร์ใน category I โดยการติดตั้งระบบออกแบบ เส้นทาง (path planning system) ระบบระบุตำแหน่งท้องถิ่น (local positioning system) ระบบ ควบคุมการบังคับเลี้ยว (steering control system) และอุปกรณ์ควบคุมคลัตช์และเกียร์ (clutch & gear controller) เพื่อให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่และบังคับเลี้ยวได้ด้วยการควบคุมจาก คอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 คอมพิวเตอร์แบบพกพาถูกใช้เพื่อออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ ควบคุมการทำงานของรถแทรกเตอร์ และเก็บข้อมูล อุปกรณ์สมองกลฝังตัว NI myRIO รุ่น 1900 ถูกใช้เพื่อติดต่อกับแผงวงจรควบคุมและ เซนเซอร์ต่างๆ ในระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์ รูปที่ 3.2 แสดงแผนผังการติดตั้งระบบควบคุมของรถ แทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ และรูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ อัตโนมัติต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจำเพาะของรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D

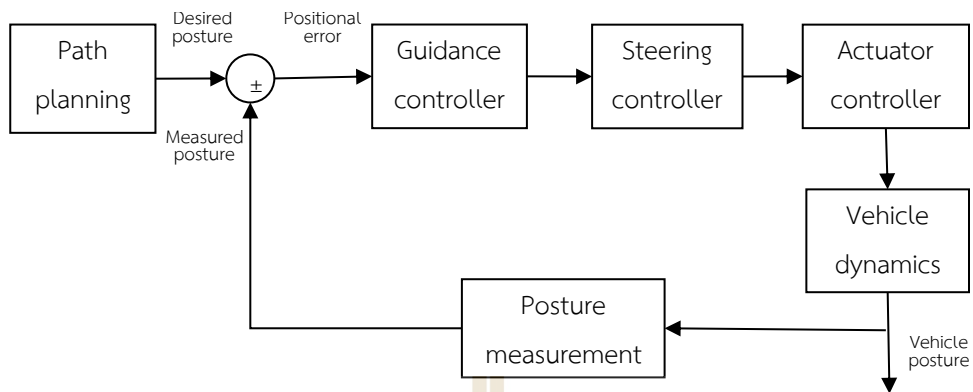
Specifications	
Engine	Water-cooled diesel
Number of cylinders	3
Maximum power at 2,500 rpm	19 hp
Transmission	Manual
Number of gears	3 forward, 2 reverse
Tires	Front 5-12, Rear 9.5-16
Steering	Hydrostatic
Wheelbase	1,500 mm
Overall width	1,150 mm
Overall length	2,300 mm



รูปที่ 3.1 แบบเชิงความคิดของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ



รูปที่ 3.2 แผนผังการติดตั้งระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ

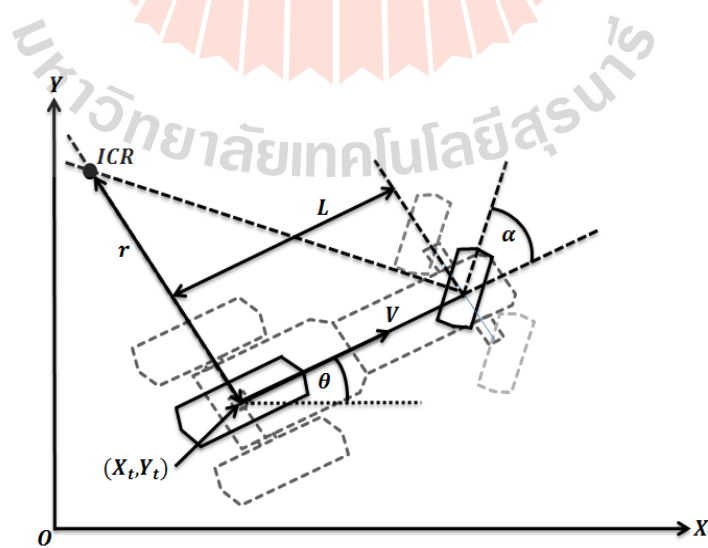


รูปที่ 3.3 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติต้นแบบ

3.2 การสร้างระบบออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่

3.2.1 แบบจำลองของรถแทรกเตอร์

การระบุท่าทางของรถแทรกเตอร์บนระนาบสองมิติสามารถแสดงด้วยพิกัดตำแหน่งและทิศทางของรถแทรกเตอร์ แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 เมื่อกำหนดให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่บนพื้นราบด้วยความเร็วคงที่อย่างช้าๆ และไม่มีการลื่นไถลระหว่างยางและพื้น แบบจำลองของรถแทรกเตอร์สามารถแสดงแทนด้วยแบบจำลองของรถจักรยาน จุดหมุนชั่วขณะของรถแทรกเตอร์ (ICR) จะอยู่ตรงจุดตัดระหว่างเส้นตรงที่ลากตั้งฉากกับทิศทางของล้อหน้าและเส้นตรงที่ลากตั้งฉากกับทิศทางของล้อหลัง



รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตระหว่างมุมเลี้ยว (α) รัศมีการหมุน (r) และระยะฐานล้อ (l) ของรถแทรกเตอร์เป็นดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.1

$$\tan \alpha = \frac{l}{r} \quad (3.1)$$

การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรถแทรกเตอร์สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{dx}{dt} = V \cos \theta \quad (3.2)$$

$$\frac{dy}{dt} = V \sin \theta \quad (3.3)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V \tan \alpha}{l} \quad (3.4)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของรถแทรกเตอร์

x คือ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังบนแกน X

y คือ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังบนแกน Y

θ คือ ทิศทางของรถแทรกเตอร์เทียบแกน X

การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ตามสมการที่ 3.2-3.4 ถูกออกแบบให้เป็นฟังก์ชันของเวลา ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนความเร็วของรถแทรกเตอร์ เพื่อที่จะทำให้รถแทรกเตอร์สามารถติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ได้ อย่างไรก็ตามความเร็วของรถแทรกเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ เพื่อความสะดวกในการออกแบบระบบควบคุมและให้สอดคล้องการใช้งานรถแทรกเตอร์ในงานทางการเกษตรที่มักจะกำหนดความเร็วของรถให้คงที่ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จะถูกออกแบบให้เป็นฟังก์ชันของการกระจัด x และถูกแสดงดังต่อไปนี้

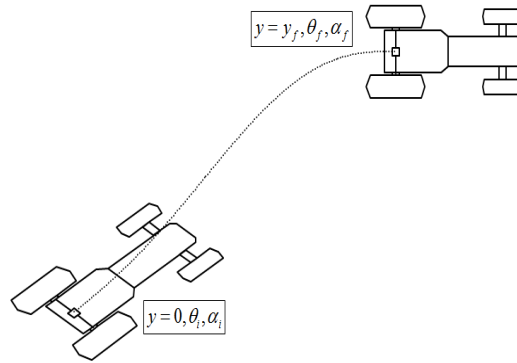
$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta \quad (3.5)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d\theta}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{\tan \alpha}{l \cos \theta} \quad (3.6)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\tan \alpha}{l \cos^3 \theta} \quad (3.7)$$

3.2.2 เส้นทางการเคลื่อนที่

เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้ายสามารถถูกออกแบบได้ง่ายโดยอาศัยสมการพหุนาม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ส่วนตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้าย



รูปที่ 3.5 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้ายด้วยสมการโพลีโนเมียล

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้าย

Initial condition	Final condition
$y = 0$	$y = y_f$
$\frac{dy}{dx} = \tan \theta_i$	$\frac{dy}{dx} = \tan \theta_f$
$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\tan \alpha_i}{l \cos^3 \theta_i}$	$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\tan \alpha_f}{l \cos^3 \theta_f}$

เมื่อกำหนดเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เท่ากับ 6 เงื่อนไข ดังนั้นสมการพหุนามกำลังห้าก็เพียงพอต่อการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามสมการพหุนามกำลังหกถูกนำมาใช้เพื่อความราบเรียบในการบังคับเลี้ยวดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$y = \frac{a}{x_f}x + \frac{b}{x_f^2}x^2 + \frac{c}{x_f^3}x^3 + \frac{d}{x_f^4}x^4 + \frac{e}{x_f^5}x^5 + \frac{f}{x_f^6}x^6 \quad (3.8)$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{a}{x_f} + \frac{2b}{x_f^2}x + \frac{3c}{x_f^3}x^2 + \frac{4d}{x_f^4}x^3 + \frac{5e}{x_f^5}x^4 + \frac{6f}{x_f^6}x^5 \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{2b}{x_f^2} + \frac{6c}{x_f^3}x + \frac{12d}{x_f^4}x^2 + \frac{20e}{x_f^5}x^3 + \frac{30f}{x_f^6}x^4 \quad (3.10)$$

เมื่อ a, b, c, d, e, f คือ สัมประสิทธิ์ของสมการพหุนาม

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ f ถูกกำหนด ค่าสัมประสิทธิ์ตัวอื่นๆ สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$a = x_f \tan \theta_i,$$

$$b = x_f^2 \frac{\tan(\alpha_i)}{2l \cos^3 \theta_i},$$

$$c = 10y_f - 4x_f \tan \theta_f + \frac{x_f^2 \tan \alpha_f}{2l \cos^3 \theta_f} - 6x_f \tan \theta_i - \frac{3x_f^2 \tan \alpha_i}{2l \cos^3 \theta_i} - f ,$$

$$d = -15y_f + 7x_f \tan \theta_f - \frac{x_f^2 \tan \alpha_f}{l \cos^3 \theta_f} + 8x_f \tan \theta_i + \frac{3x_f^2 \tan \alpha_i}{2l \cos^3 \theta_i} + 3f ,$$

$$e = 6y_f - 3x_f \tan \theta_f + \frac{x_f^2 \tan \alpha_f}{2l \cos^3 \theta_f} - 3x_f \tan \theta_i - \frac{x_f^2 \tan \alpha_i}{2l \cos^3 \theta_i} - 3f$$

และเมื่อเปรียบเทียบค่าของสมการที่ 3.7 กับสมการที่ 3.10 ดังนั้นมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha = \tan^{-1} \left(l \cos^3 \theta \left(\frac{2b}{x_f^2} + \frac{6c}{x_f^3} x + \frac{12d}{x_f^4} x^2 + \frac{20e}{x_f^5} x^3 + \frac{30f}{x_f^6} x^4 \right) \right) \quad (3.11)$$

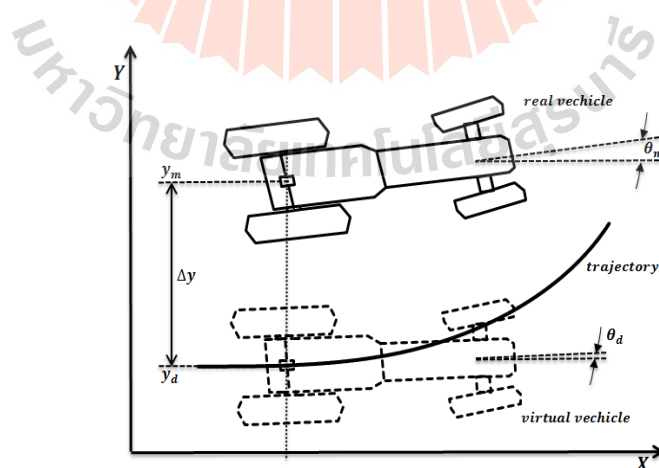
3.2.3 การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพล

การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์สามารถแสดงด้วยแบบจำลองตัวแปรสถานะของรถแทรกเตอร์ได้ดังนี้

$$\dot{q} = \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tan \theta \\ \frac{\tan \alpha}{l \cos \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix} = Aq + Bu \quad (3.12)$$

เมื่อ $u = -Kq$

ค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งของรถแทรกเตอร์จากเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้สามารถพิจารณาได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความผิดพลาดทางตำแหน่งของรถแทรกเตอร์

จากรูปที่ 3.6 virtual vehicle แสดงท่าทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ ออกแบบไว้ ส่วน real vehicle แสดงท่าทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางจริง Δy เป็นค่าผลต่างของระยะทางแกน y ของรถแทรกเตอร์ ส่วน $\Delta\theta$ เป็นค่าผลต่างของทิศทางของรถ แทรกเตอร์ ตัวห้อย m และ d หมายถึงข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ $\Delta y = y_m - y_d$ และ $\Delta\theta = \theta_m - \theta_d$ ดังนั้นแบบจำลองตัวแปรสถานะของ รถแทรกเตอร์ที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$$\Delta\dot{q} = A\Delta q + B\Delta u = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \Delta\alpha = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta y \\ \Delta\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \end{bmatrix} \Delta\alpha \quad (3.13)$$

$$\text{เมื่อ } A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial m}{\partial y} & \frac{\partial m}{\partial \theta} \\ \frac{\partial n}{\partial y} & \frac{\partial n}{\partial \theta} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial n}{\partial \alpha} \end{bmatrix}; \Delta u = \Delta\alpha$$

เมื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขดเขยและค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งเป็น $\Delta\alpha = -K\Delta q$ ดังนั้นค่ามุมเลี้ยวขดเขยความผิดพลาดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta\alpha = -k_1\Delta y - k_2\Delta\theta \quad (3.14)$$

และมุมเลี้ยวปรับแก้สำหรับรถแทรกเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha_f = \alpha + \Delta\alpha \quad (3.15)$$

เนื่องจากตัวแปรสถานะในแบบจำลองของรถแทรกเตอร์มีสองตัว ดังนั้นโพลจำนวนสองตัวจะถูก กำหนดไว้ที่ตำแหน่ง $p_1, p_2 = -p_{11} \pm p_{12}i$ พหุนามลักษณะเฉพาะจากตำแหน่งโพลเหล่านี้มีค่า เท่ากับ

$$(s - p_1)(s - p_2) = s^2 - (p_1 + p_2)s + p_1p_2 = s^2 - a_1s + a_0 \quad (3.16)$$

ส่วนพหุนามลักษณะเฉพาะจากแบบจำลองของรถแทรกเตอร์มีค่าเท่ากับ

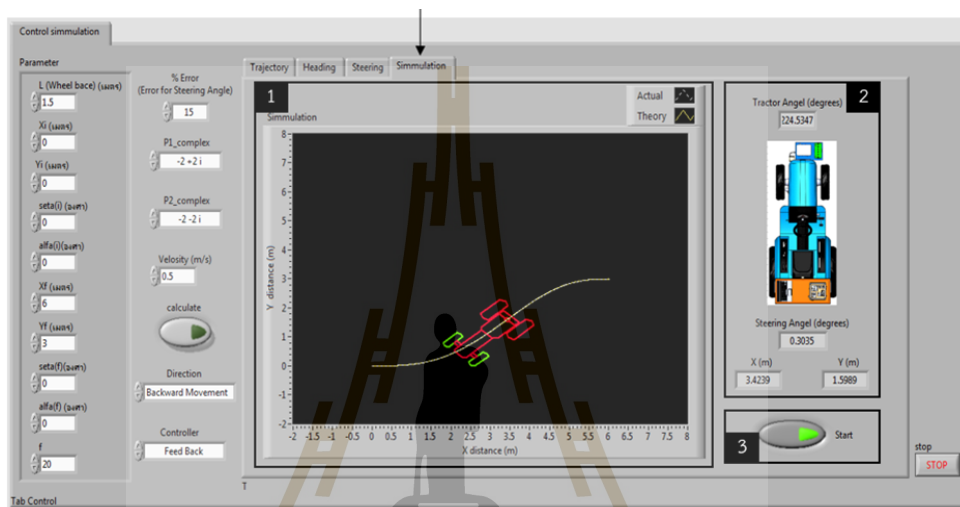
$$\begin{aligned} |sI - (A - BK)| &= \left| s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & a_{12} \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} \right| \\ &= \begin{vmatrix} s & -a_{12} \\ b_{21}k_1 & s - a_{22} + b_{21}k_2 \end{vmatrix} \\ &= s^2 - (a_{22} - b_{21}k_2)s + a_{12}b_{21}k_1 \end{aligned} \quad (3.17)$$

เมื่อกำหนดให้สมการที่ 3.16 เท่ากับสมการที่ 3.17 ค่าเกณฑ์ของการป้อนกลับสามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{a_0}{a_{12}b_{21}}, \\ k_2 &= \frac{a_1 - a_{22}}{-b_{21}} \end{aligned} \quad (3.18)$$

3.2.4 การจำลองสถานการณ์

การจำลองสถานการณ์ทางคอมพิวเตอร์ถูกกระทำเพื่อทดลองออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง และเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม โปรแกรมจำลองสถานการณ์ถูกพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การจอดรถแบบขนาน (parallel parking) ถูกเลือกใช้ในการจำลองสถานการณ์ ตัวแปรที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์จึงถูกกำหนดดังตารางที่ 3.3

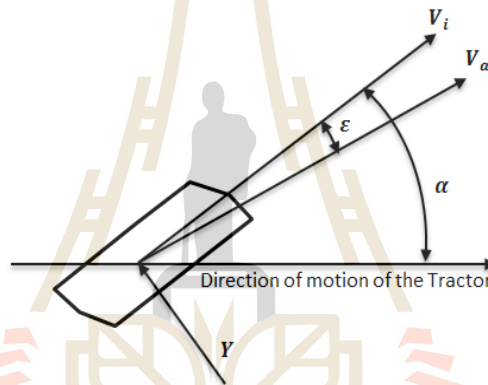


รูปที่ 3.7 โปรแกรมจำลองสถานการณ์สำหรับรถแทรกเตอร์

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์สำหรับการจอดรถแบบขนาน

ตัวแปร	
ตำแหน่งเริ่มต้น, x_i, y_i (m)	0, 0
ตำแหน่งสุดท้าย, x_f, y_f (m)	6, 3
ทิศทางเคลื่อนที่เริ่มต้น, θ_i (deg)	0
ทิศทางเคลื่อนที่สุดท้าย, θ_f (deg)	0
ระยะฐานล้อ, l (m)	1.5
ความเร็วรถ, V (m/s)	0.5
มุมเลี้ยวสูงสุด, α_{max} (deg)	45
สัมประสิทธิ์ f สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง	20

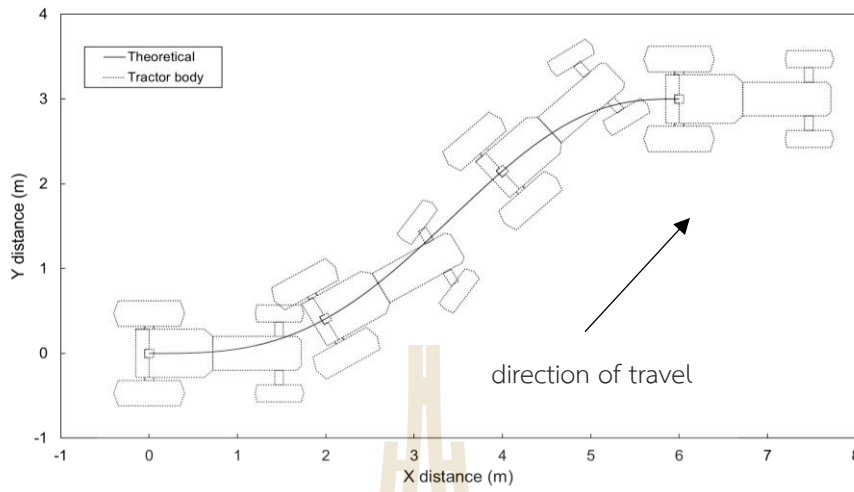
การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับถูกกระทำผ่านการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุม สิ่งรบกวนถูกกำหนดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวขณะบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ขณะบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ไปทางด้านซ้ายจากทิศทางการเคลื่อนที่เดิม V_i จะทำให้มีแรง Y กระทำทางด้านขวาของยาง รถแทรกเตอร์จะเคลื่อนที่ในทิศทาง V_a ซึ่งมีค่ามุมเลี้ยวน้อยกว่ามุมเลี้ยวจริง α ความแตกต่างระหว่างมุมเลี้ยวทั้งสองเรียกว่า มุมการคลาดเคลื่อน (drift angle, ε) ในการจำลองสถานการณ์ภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวน มุมการคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 15% ของมุมเลี้ยวจริง โพลของตัวควบคุมแบบป้อนกลับจะถูกเลือกใช้สามชุด และถูกกำหนดตำแหน่งไว้ดังนี้ ชุดโพลที่หนึ่ง กำหนดค่าตำแหน่ง $p_1, p_2 = -0.5 \pm 0.5i$, ชุดโพลที่สอง $p_1, p_2 = -1 \pm 1i$ และ ชุดโพลที่สาม $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$



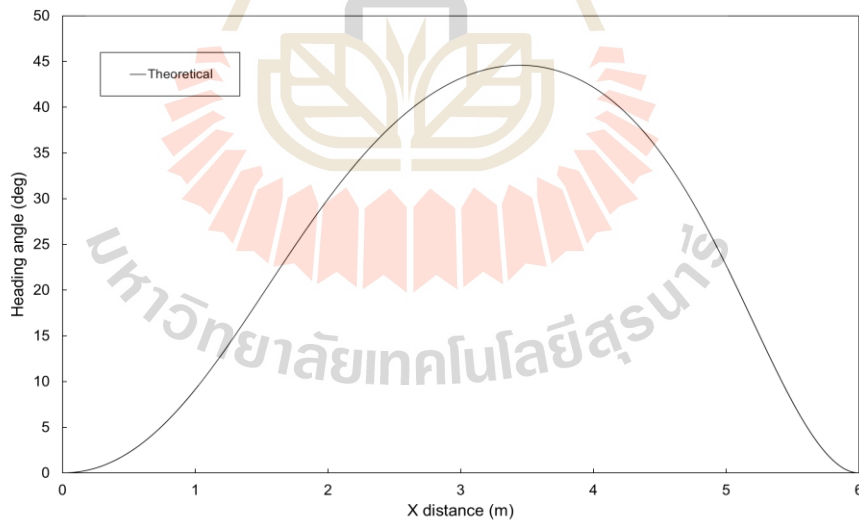
รูปที่ 3.8 ความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะมีแรงกระทำทางด้านข้าง

3.3 ผลการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยการจำลองสถานการณ์

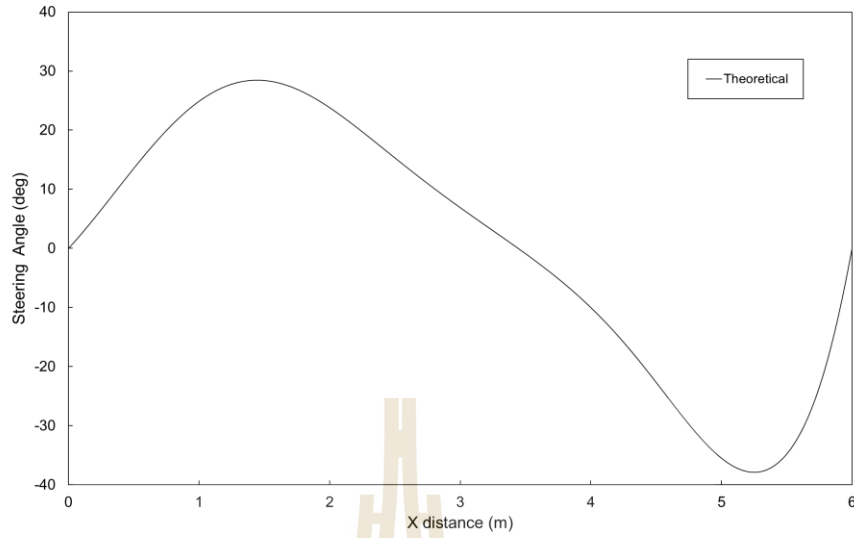
รูปที่ 3.9-3.11 แสดงผลการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ และมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m ส่วนข้อมูลของการเคลื่อนที่ถอยหลังแสดงในรูปที่ 3.12-3.14 จากผลการจำลองสถานการณ์แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมสามารถออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบสำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง และสามารถเลือกรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ทั้งไปข้างหน้าและถอยหลังในแบบเดียวกันได้ ซึ่งทำให้เกิดความสะดวกต่อการออกแบบเส้นทางในสภาพพื้นที่ที่ถูกจำกัดและมีสิ่งกีดขวาง



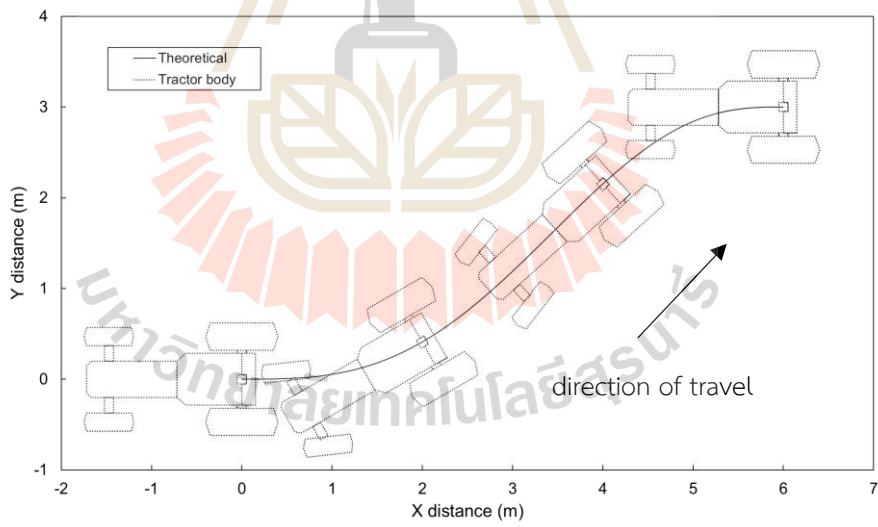
รูปที่ 3.9 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



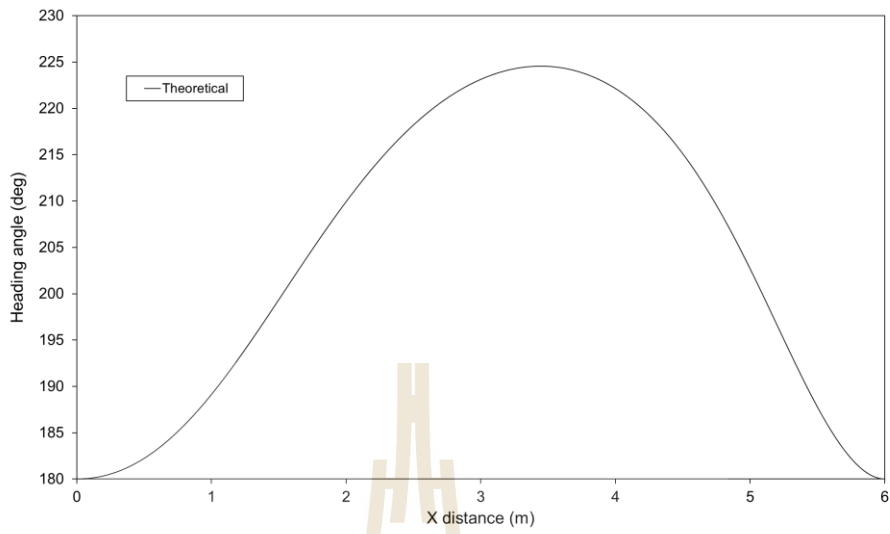
รูปที่ 3.10 ทิศทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



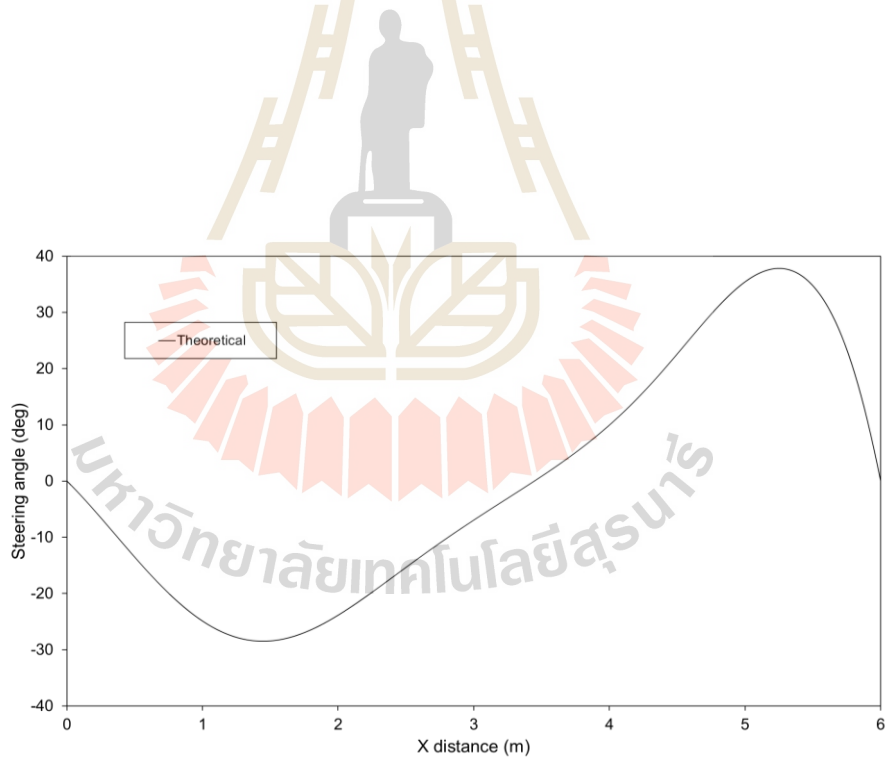
รูปที่ 3.11 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



รูปที่ 3.12 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



รูปที่ 3.13 ทิศทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



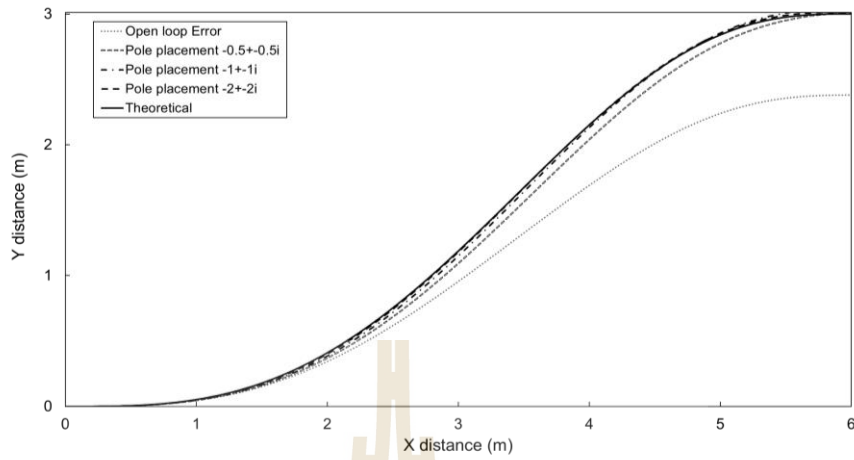
รูปที่ 3.14 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m

3.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยการจำลองสถานการณ์

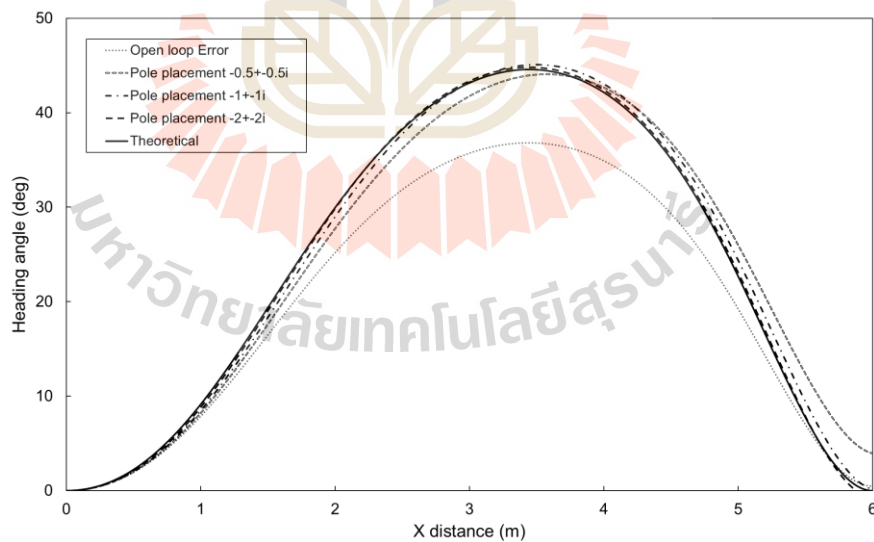
รูปที่ 3.15-3.19 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ มุมเลี้ยว ความผิดพลาดทางแกน y และความผิดพลาดในทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ เพราะตัวควบคุมนี้บังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์โดยใช้ค่ามุมเลี้ยวที่ได้จากการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว เมื่อรถแทรกเตอร์อยู่ภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวน มุมเลี้ยวนี้จะมีค่าไม่ตรงกับมุมเลี้ยวจริงที่รถแทรกเตอร์ต้องการ ส่งผลให้รถแทรกเตอร์มีระยะทางการเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่น้อยกว่าค่าที่ถูกออกแบบไว้ โดยมีค่าความผิดพลาดในแกน y ที่ตำแหน่งเป้าหมายเท่ากับ 0.62 m และมีค่าความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 7.8 deg ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19 ตามลำดับ

แม้ว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับทั้งสามสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ แต่การตอบสนองของตัวควบคุมที่ใช้ชุดโพล $p_1, p_2 = -0.5 \pm 0.5i$ มีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้รถแทรกเตอร์ไม่สามารถติดตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดในแกน y สูงสุดเท่ากับ 0.11 m และมีค่าความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่สูงสุดเท่ากับ 4.8 deg ส่วนความผิดพลาดในแกน y สูงสุดและความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่สูงสุดของตัวควบคุมที่ใช้ชุดโพล $p_1, p_2 = -1 \pm 1i$ และ $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ มีค่าเท่ากับ 0.04 m, 2.0 deg และ 0.01 m, 0.8 deg ตามลำดับ ถึงแม้ว่าการตอบสนองของตัวควบคุมที่ใช้ชุดโพล $p_1, p_2 = -1 \pm 1i$ และ $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุมที่ใช้โพล $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ มีสมรรถนะดีกว่า โดยเห็นได้จากความผิดพลาดในแกน y และความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ที่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ชุดโพล $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ จึงถูกเลือกสำหรับการควบคุมรถแทรกเตอร์ในการปฏิบัติงานจริง

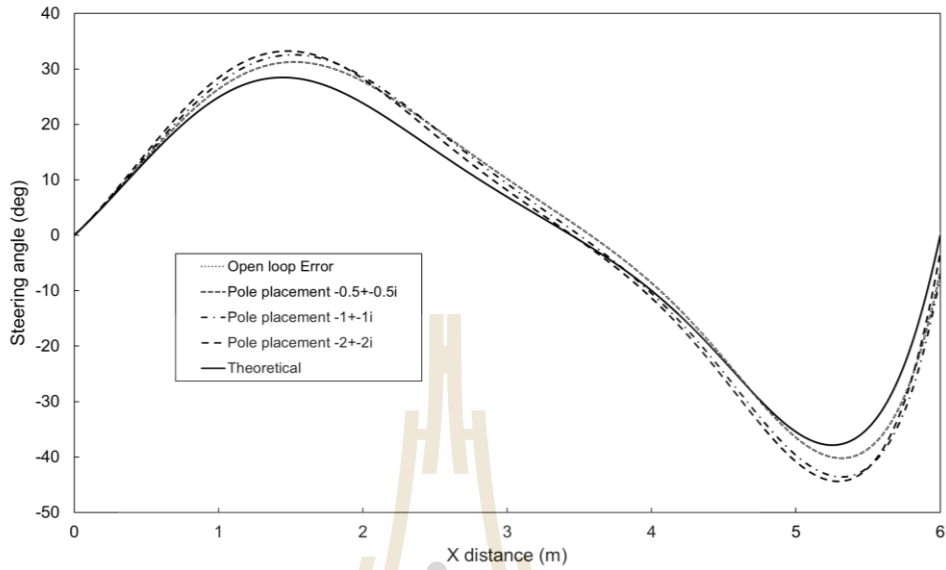
รูปที่ 3.20-3.22 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ และมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมแบบต่างๆ แสดงสมรรถนะในการควบคุมรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ถอยหลังได้เหมือนกับการควบคุมรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า เพราะแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถแทรกเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการเคลื่อนที่ถอยหลังมีความคล้ายคลึงกัน ต่างกันเพียงทิศทางของการเคลื่อนที่



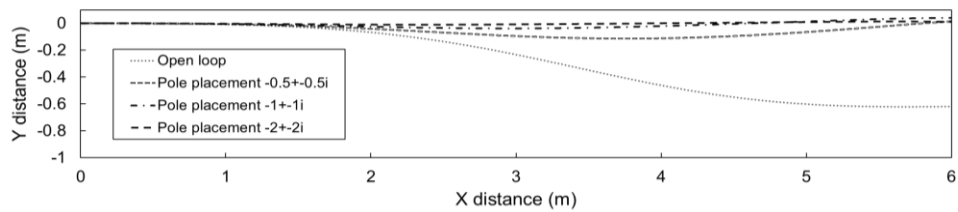
รูปที่ 3.15 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



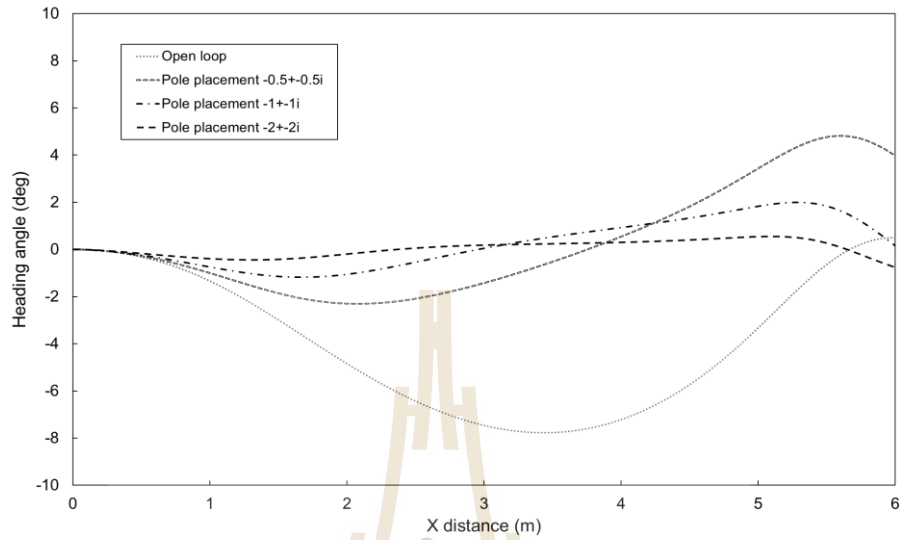
รูปที่ 3.16 การเปรียบเทียบทิศทางทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



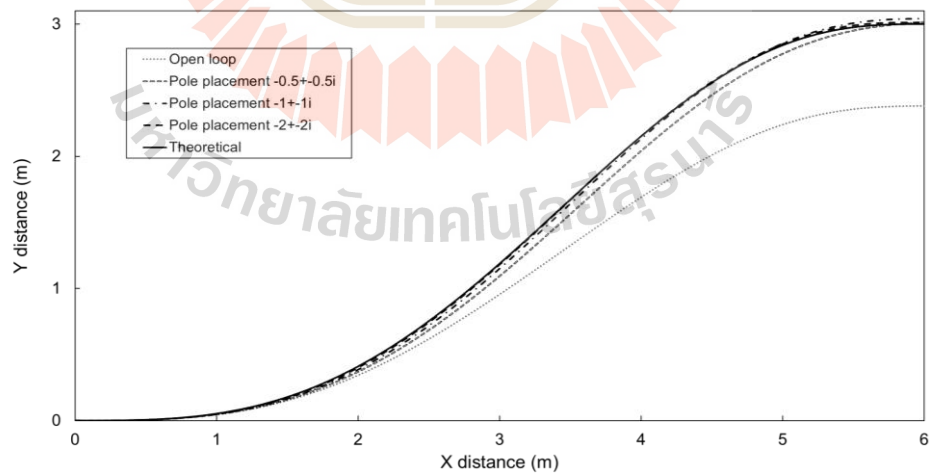
รูปที่ 3.17 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



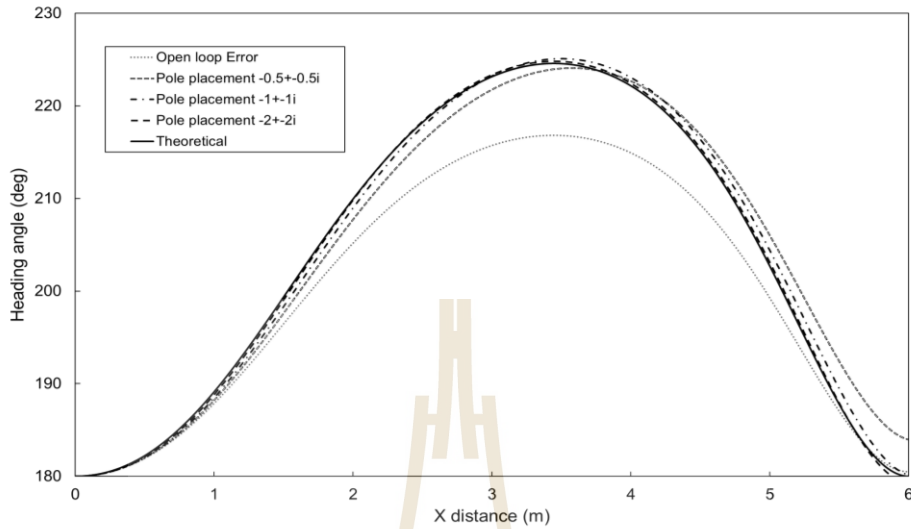
รูปที่ 3.18 การเปรียบเทียบความผิดพลาดทางแกน y ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



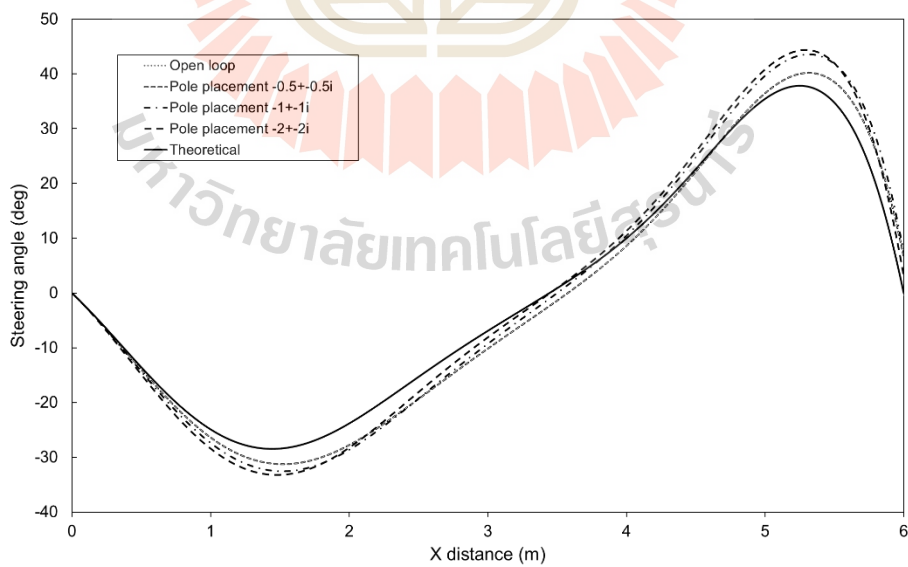
รูปที่ 3.19 การเปรียบเทียบความผิดพลาดในทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์
ขณะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



รูปที่ 3.20 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลัง
ไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



รูปที่ 3.21 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m



รูปที่ 3.22 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่ถอยหลังไปยังตำแหน่ง (6, 3) m

บทที่ 4

การทดสอบภาคสนาม

4.1 การสร้างระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว

4.1.1 การหาแรงบิดสูงสุดของการบังคับเลี้ยว

กลไกการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ถูกทดสอบเพื่อหาค่าแรงบิดสูงสุดสำหรับการกำหนดขนาดของมอเตอร์ คลัทช์ และชุดเฟืองโซ่ ค่าแรงบิดถูกวัดด้วยเครื่องมือเฉพาะทางที่สร้างจากเหล็กกล่อง ลูกกรอก เชือก และเซนเซอร์วัดแรงดึง แผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดที่ถูกติดตั้งบนพวงมาลัยดังแสดงในรูปที่ 4.1 ค่าแรงบิดของกลไกบังคับเลี้ยวหาได้จากสมการที่ 4.1

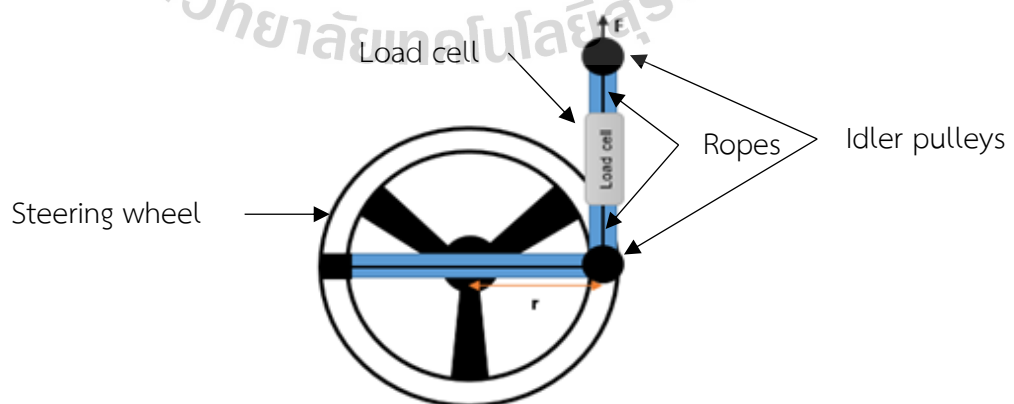
$$T = F \times r \quad (4.1)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของกลไกบังคับเลี้ยว (N.m)

F คือ แรงดึงในเส้นเชือก (N)

r คือ รัศมีของพวงมาลัย (m)

ค่าแรงดึงในเส้นเชือกถูกวัดด้วยโหลดเซลล์และเครื่องขยายสัญญาณยี่ห้อ HBM รุ่น Spider 8.0 โปรแกรม Catman ถูกใช้เพื่อแสดงและบันทึกค่าแรงดึง การทดสอบหาแรงบิดสูงสุดถูกกระทำออกเป็น 2 กรณี คือ การทดสอบขณะติดเครื่องยนต์และขณะดับเครื่องยนต์ โดยแต่ละกรณีทำการทดสอบบนพื้นคอนกรีต พื้นหญ้า และพื้นดิน พื้นคอนกรีตและพื้นหญ้ามีสภาพราบเรียบในแนวระดับ ส่วนพื้นดินเป็นดินลูกรัง ในการทดสอบ เส้นเชือกจะถูกดึงอย่างช้าๆ และต่อเนื่องจนล้อของรถแทรกเตอร์ถูกหักเลี้ยวจนสุด โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง รูปที่ 4.2 แสดงการวัดค่าแรงบิดบนพื้นหญ้า

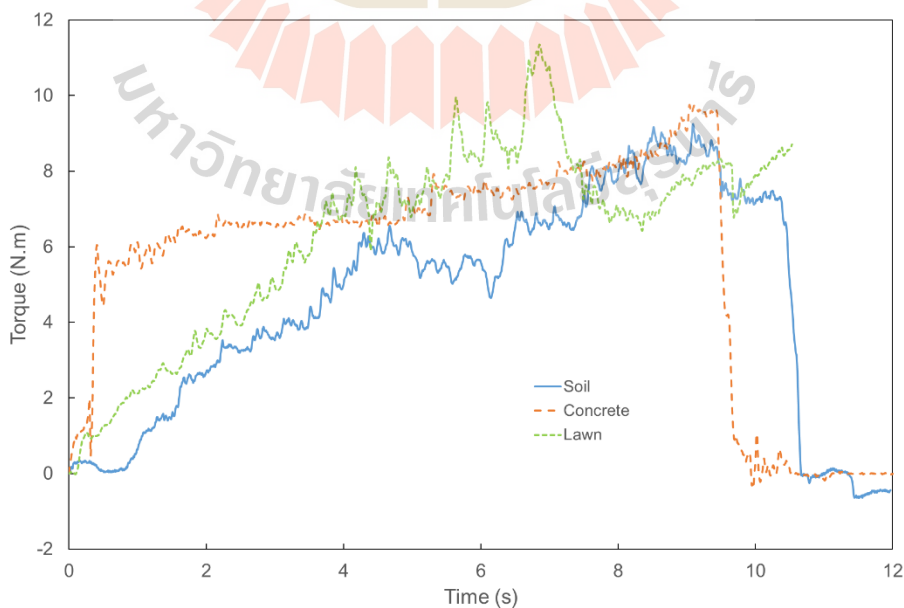


รูปที่ 4.1 แผนผังการติดตั้งเครื่องมือวัดแรงบิดบนพวงมาลัยรถแทรกเตอร์



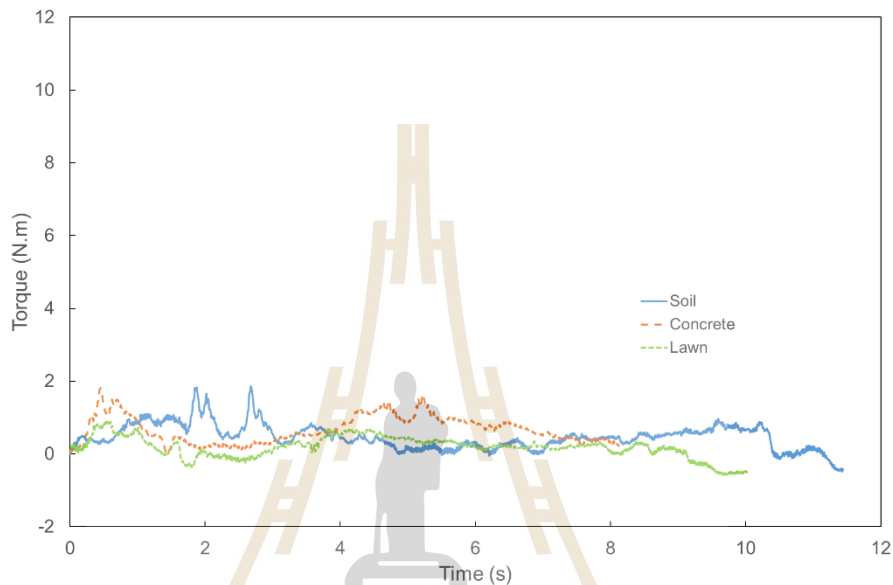
รูปที่ 4.2 การวัดค่าแรงบิดในการบังคับเลี้ยวบนพื้นหญ้า

จากการทดสอบหาแรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะดับเครื่องยนต์บนพื้นคอนกรีต พื้นดิน และพื้นหญ้า พบว่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 9.75 N.m 9.2 N.m และ 11.6 N.m ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ค่าแรงบิดในการหมุนพวงมาลัยบนพื้นคอนกรีตมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพราะแรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นคอนกรีตมีค่าค่อนข้างคงที่ ส่วนค่าแรงบิดในการหมุนพวงมาลัยบนพื้นดินและพื้นหญามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะขณะทำการทดสอบ ดินและหญ้าบริเวณที่สัมผัสกับยางจะเสียรูปและถูกอัดจนทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 แรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะดับเครื่องยนต์

รูปที่ 4.4 แสดงค่าแรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะติดเครื่องยนต์บนพื้นคอนกรีต พื้นดิน และพื้นหญ้า พบว่าแรงบิดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 1.81 N.m 1.87 N.m และ 0.7 N.m ตามลำดับ จากรูป จะเห็นได้ว่า ค่าแรงบิดมีค่าค่อนข้างต่ำและเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เพราะขณะติดเครื่องยนต์ ระบบพวงมาลัยเพาเวอร์แบบไฮดรอลิกของรถแทรกเตอร์จะช่วยผ่อนแรงในการหมุนพวงมาลัย

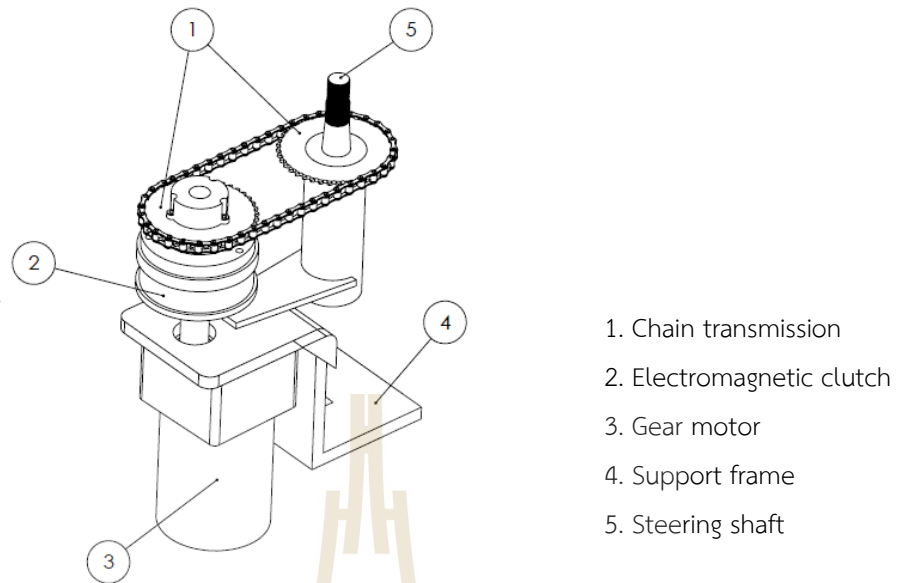


รูปที่ 4.4 แรงบิดในการหมุนพวงมาลัยขณะติดเครื่องยนต์

4.1.2 การออกแบบชุดบังคับเลี้ยว

แนวคิดในการออกแบบชุดบังคับเลี้ยวจะใช้มอเตอร์กระแสตรงเป็นต้นกำลัง ตัดต่อกำลังด้วยชุดคลัทช์แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อความสะดวกในการเปลี่ยนแปลงระหว่างการบังคับด้วยมือและการบังคับอัตโนมัติ ส่งผ่านกำลังเพื่อบังคับเลี้ยวผ่านชุดเฟืองโซ่ โดยติดตั้งเฟืองโซ่บริเวณแกนพวงมาลัยของรถแทรกเตอร์และแกนของมอเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 4.5

จากผลการทดสอบหาแรงบิดทำให้สามารถเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 60 W แรงบิดสูงสุด 11 N.m ชุดคลัทช์แม่เหล็กไฟฟ้า รุ่น CS-08-35G ขนาดแรงบิดสูงสุดที่ส่งผ่านได้เท่ากับ 11 N.m เฟืองโซ่ขนาด 40 ฟัน และโซ่เบอร์ 25 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์และชุดคลัทช์เพียงพอสำหรับการหมุนพวงมาลัยขณะติดเครื่องยนต์บนพื้นชนิดต่างๆ และเป็น 5 เท่า ของค่าแรงบิดสูงสุดในการหมุนพวงมาลัยขณะติดเครื่องยนต์

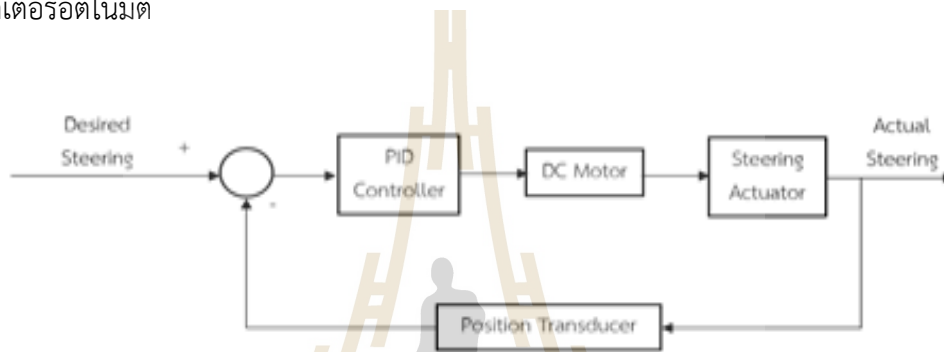


รูปที่ 4.5 แผนภาพลายเส้นของชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ



รูปที่ 4.6 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ

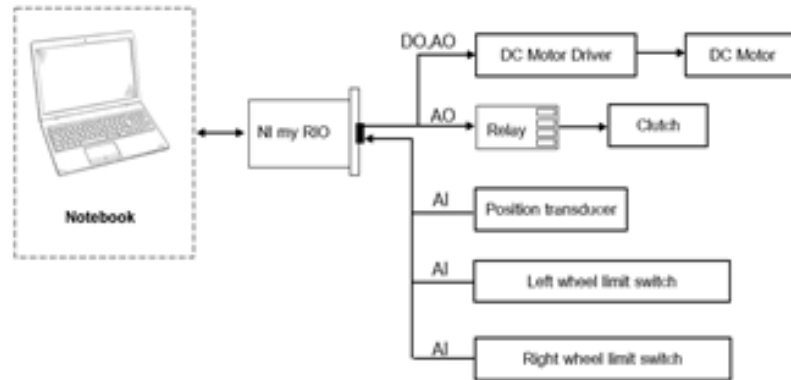
ระบบควบคุมแบบป้อนกลับถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของชุดบังคับเลี้ยวอย่างอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจากการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวที่ต้องการกับค่ามุมเลี้ยวจริงของรถแทรกเตอร์ ตัวควบคุมพีไอดีจะทำการคำนวณค่ามุมเลี้ยวขดเซยจากผลต่างของมุมเลี้ยวทั้งสอง และส่งสัญญาณบังคับเลี้ยวให้มอเตอร์เพื่อควบคุมระบบบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ ทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ยี่ห้อ AMETEK รุ่น PT-420-60 ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และแผงวงจรขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Cytron รุ่น MD30C Rev 2.0 ถูกนำมาใช้ขับมอเตอร์กระแสตรง รูปที่ 4.9 แสดงแผนผังของระบบวัดคุมชุดบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของชุดบังคับเลี้ยว

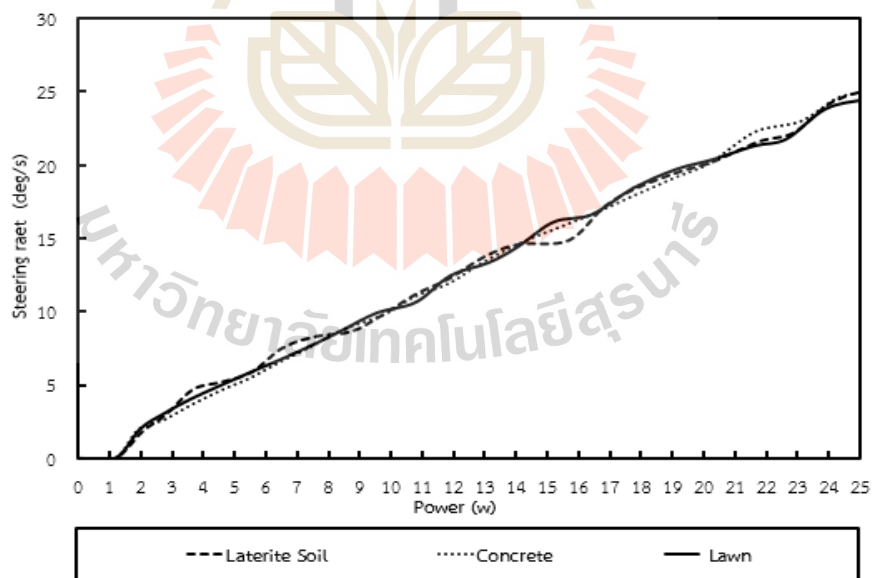


รูปที่ 4.8 การติดตั้งทรานสดิวเซอร์วัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.9 แผนผังของระบบควบคุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ

จากการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นของชุดบังคับเลี้ยวบนพื้นคอนกรีต พื้นดิน และพื้นหญ้า พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ เมื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 24 W อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวจะเท่ากับ 25 deg/s ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

4.1.3 การสอบเทียบมุมเลี้ยว

การสอบเทียบมุมเลี้ยวทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะยึดหดของสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง จากตำแหน่งการหักเลี้ยวขวาสุดไปซ้ายสุด ด้วยการลดระยะของสายเคเบิลลงครึ่งละประมาณ 5 mm รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ เส้นสัมผัสแก้มยางหาได้โดยการถ่ายตำแหน่งของแก้มยางด้วยปากกาเลเซอร์ ลงบนพื้นราบ ลูกดิ่งถูกนำมาระบุเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า



รูปที่ 4.11 การวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ

มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2 และรูปที่ 4.12

$$\alpha = 90 - \left(\frac{\alpha_L + \alpha_R}{2} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ α คือ มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

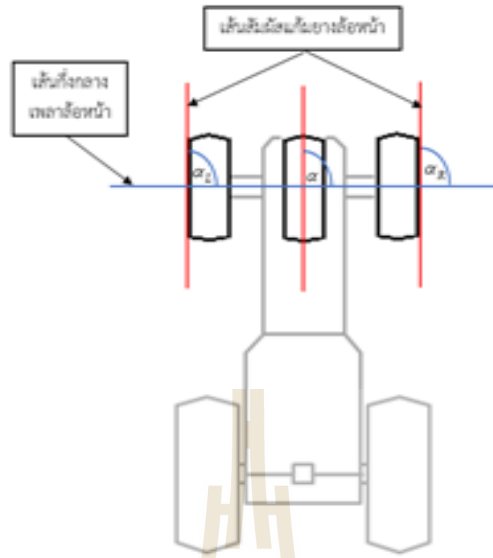
α_L คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าซ้ายกับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า

α_R คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าขวากับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า

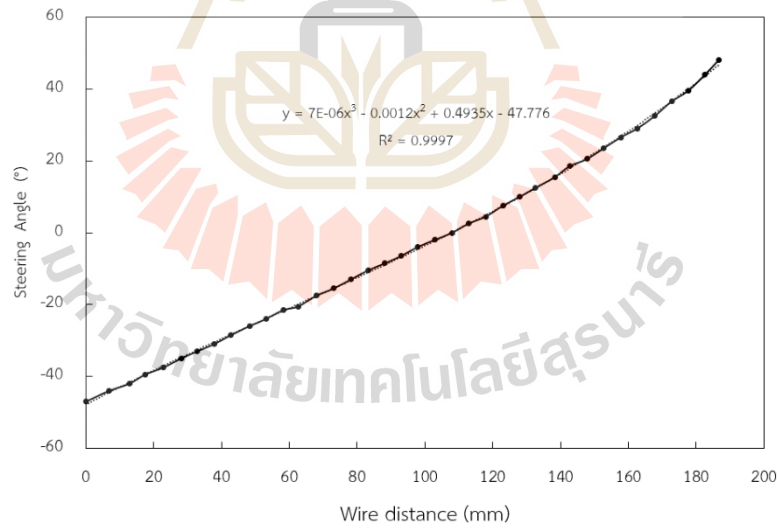
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะของสายเคเบิลสมการพหุนามกำลังสามถูกนำมาสร้างเส้นแนวโน้ม ดังแสดงสมการที่ 4.3

$$\alpha_{PT} = (7 \times 10^{-6})(L_{PT})^3 - 0.0012(L_{PT})^2 + 0.4935L_{PT} - 47.776 \quad (4.3)$$

โดยที่ L_{PT} คือ ระยะยึดหดของสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง (mm)



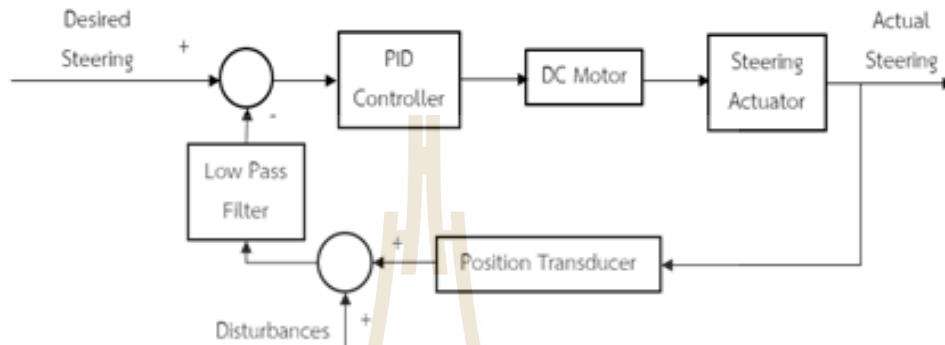
รูปที่ 4.12 แผนผังการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต้นแบบ



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติและระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง

4.1.4 การลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวด้วยตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

สัญญาณรบกวนที่เกิดจากความไม่เสถียรของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งทำให้วัดค่ามุมเลี้ยวได้ไม่ราบเรียบ ดังนั้นตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความแปรปรวนของค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

สมการที่ 4.4 แสดงการคำนวณหาค่ามุมเลี้ยวที่ผ่านตัวกรองสัญญาณ

$$\alpha_{LPF}(n) = (1 - a)\alpha_{PT}(n) + a\alpha_{LPF}(n - 1) \quad (4.4)$$

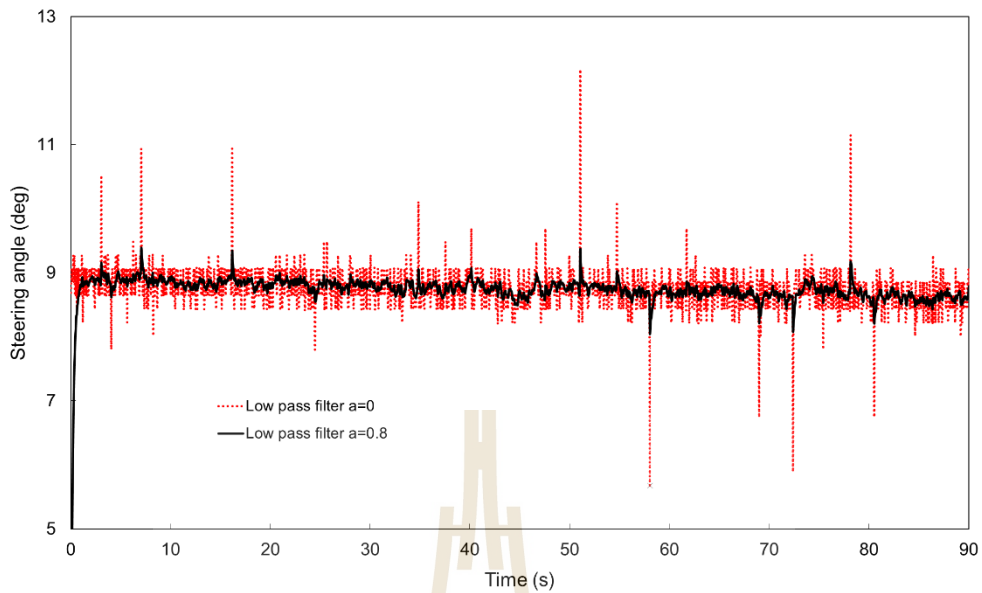
โดย α_{LPF} คือ มุมเลี้ยวปรับแก้จากตัวกรอง (deg)

α_{PT} คือ มุมเลี้ยวจากการวัด (deg)

a คือ ค่าคงที่ของตัวกรอง (0-1)

n คือ รอบการคำนวณ

อย่างไรก็ตามการปรับแก้มุมเลี้ยวด้วยวิธีนี้จะมีข้อจำกัดคือ เมื่อกำหนดค่าคงที่ a เท่ากับหรือใกล้เคียง 1 ค่ามุมเลี้ยวปรับแก้ที่ได้จะราบเรียบมาก เพราะระบบบังคับเลี้ยวตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงการบังคับเลี้ยวช้า จากการทดลองสุ่มค่าคงที่พบว่า เมื่อกำหนดค่าคงที่ a เท่ากับ 0.8 ตัวกรองสัญญาณสามารถลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวได้อย่างดี และการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยวยังเพียงพอต่อการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวด้วยตัวกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน

4.1.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว

การหาตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ทำโดยการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม P, PI และ PID เมื่อมีการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก +30 deg เป็น -30 deg การทดสอบทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์จอดอยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ของตัวแปรของตัวควบคุมทั้งสาม โดยค่าคงที่เหล่านี้หามาจากการปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมด้วยวิธีซีเกลอร์-นิโคลส์



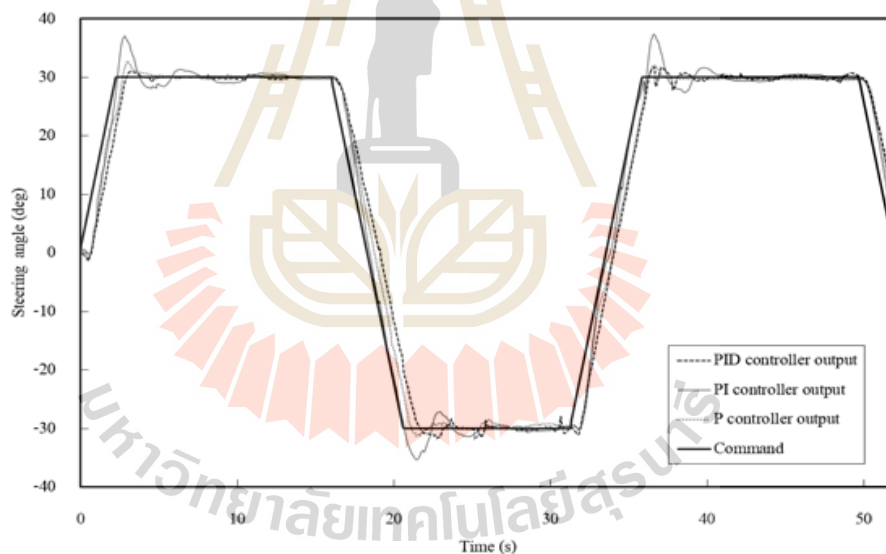
รูปที่ 4.16 การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว

ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่ของตัวแปรของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว

Controller	K_p	T_i	T_d
P	0.16	-	-
PI	0.14	0.0168	-
PID	0.19	0.0112	0.0028

4.1.6 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.17 จากรูปพบว่าตัวควบคุม PI ทำให้เกิดการพุ่งเกินที่มากเกินไปและมีเวลาเข้าที่ช้า ตัวควบคุม P และ PID มีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน แต่การกระตุกของชุดบังคับเลี้ยวยังสามารถสังเกตได้จากตัวควบคุม PID ดังนั้นตัวควบคุม P จึงเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เพราะสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบโดยไม่เกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยว



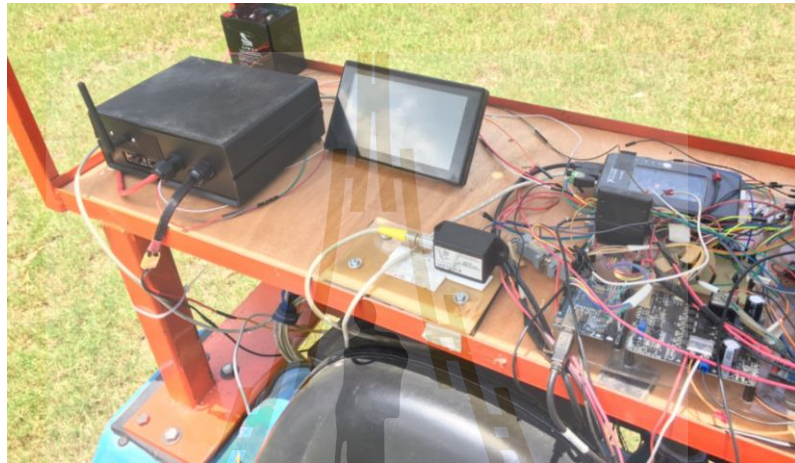
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม P, PI และ PID สำหรับระบบควบคุมบังคับเลี้ยว

4.2 การสร้างระบบระบุตำแหน่งแบบท้องถิ่น

4.2.1 ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning

ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ถูกเลือกใช้สำหรับการระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ โดยอาศัยพิกัดตำแหน่งเดิม ทิศทางการเคลื่อนที่ และระยะทางการเคลื่อนที่ วิธีการระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์แบบนี้สามารถทำได้โดยง่าย ด้วยการติดตั้งเซนเซอร์วัดทิศทาง

แบบจีโอโรสโคป ยี่ห้อ Kistler รุ่น TAG-32150M7-25-VR-EGA บริเวณแนวกลางตามยาวของรถแทรกเตอร์ เพื่อวัดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ และติดตั้งเซนเซอร์วัดรอบการหมุนแบบ rotary encoder ยี่ห้อ Omron รุ่น E6B2-CWZ5B บริเวณล้อของรถแทรกเตอร์เพื่อวัดจำนวนรอบการหมุนของล้อรถ ระยะทางการเคลื่อนที่ของรถสามารถคำนวณได้เมื่อทราบเส้นรอบวงของล้อรถ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 การติดตั้งเซนเซอร์วัดทิศทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.19 การติดตั้งเซนเซอร์วัดรอบการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์

รูปที่ 4.20 แสดงวิธีการคำนวณหาตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ เมื่อรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง x_1, y_1 ไปยังตำแหน่ง x_2, y_2 โดยตำแหน่ง x_2, y_2 สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + dS \cos \theta \\ y_2 &= y_1 + dS \sin \theta \end{aligned} \quad (4.5)$$

ส่วนระยะการเคลื่อนที่ dS สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} dS &= (dL + dR) / 2 \\ dL &= P_L \times \text{const}_L \\ dR &= P_R \times \text{const}_R \end{aligned} \quad (4.6)$$

โดยที่ dS คือ ระยะการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ (m),

dL คือ ระยะการเคลื่อนที่ของล้อซ้าย (m),

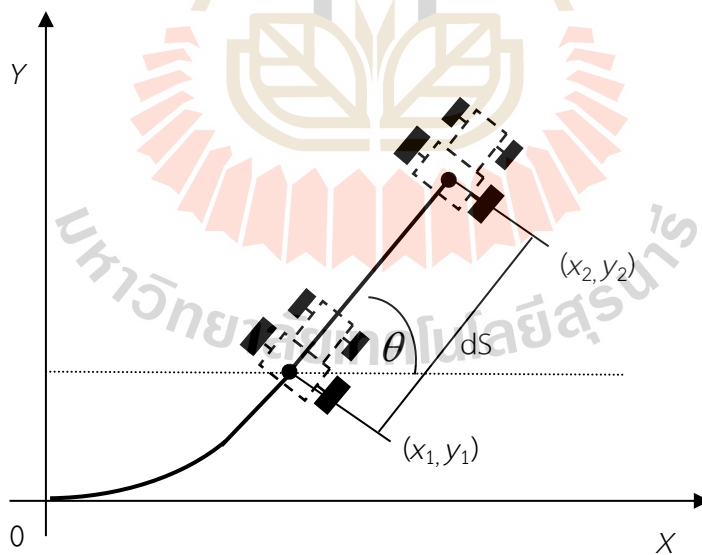
dR คือ ระยะการเคลื่อนที่ของล้อขวา (m),

P_L คือ จำนวน pulse ของ encoder ที่ล้อซ้าย (pulse)

P_R คือ จำนวน pulse ของ encoder ที่ล้อขวา (pulse)

const_L คือ ค่าคงที่ของ encoder ที่ล้อซ้าย (m/pulse)

const_R คือ ค่าคงที่ของ encoder ที่ล้อขวา (m/pulse)



รูปที่ 4.20 การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์แบบ dead reckoning

4.2.2 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดรอบการหมุน

การสอบเทียบเซนเซอร์วัดรอบการหมุนที่ติดตั้งบริเวณล้อหลังทั้งสองข้างของรถแทรกเตอร์ ถูกทำเพื่อหาค่าคงที่ของเซนเซอร์แต่ละตัว โดยการขับรถแทรกเตอร์เป็นเส้นตรงด้วยระยะทาง 20 m

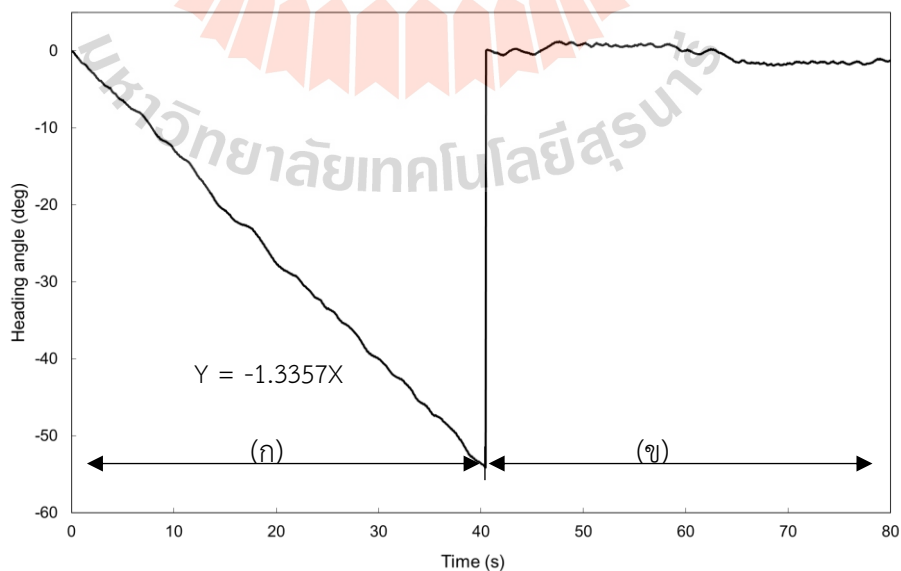
จำนวน 3 ครั้ง บนพื้นถนนลาดยางในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี บันทึกจำนวนสัญญาณ pulse ของเซนเซอร์ทั้งสองตัว ผลการสอบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากผลการสอบเทียบพบว่า ค่าคงที่ของ encoder ทั้งสองข้างมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเท่ากับ 0.00005 m/pulse

ตารางที่ 4.2 จำนวนสัญญาณ pulse ของเซนเซอร์วัดรอบการหมุนเมื่อรถแทรกเตอร์ เคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 20 m

No.	P_L (pulse)	P_R (pulse)	$const_L$ (m/pulse)	$const_R$ (m/pulse)
1.	399,317	402,690	0.00005	0.00005
2.	398,475	401,319	0.00005	0.00005
3.	398,916	401,758	0.00005	0.00005
Avg	398,902	401,922	0.00005	0.00005

4.2.3 การปรับแก้การ drift ของเซนเซอร์วัดทิศทางการเคลื่อนที่

เนื่องจากเซนเซอร์วัดทิศทางการเคลื่อนที่มี drift ทำให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่รถแทรกเตอร์หยุดนิ่ง จากการทดลองเบื้องต้นพบว่าค่าการ drift ของเซนเซอร์แปรผันโดยตรงกับเวลา ดังนั้นสมการทำนายแบบเชิงเส้นสามารถชดเชยการ drift ของเซนเซอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ผลการปรับแก้การ drift ของเซนเซอร์วัดทิศทางการเคลื่อนที่

(ก) ก่อนปรับแก้ (ข) หลังปรับแก้

4.2.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning

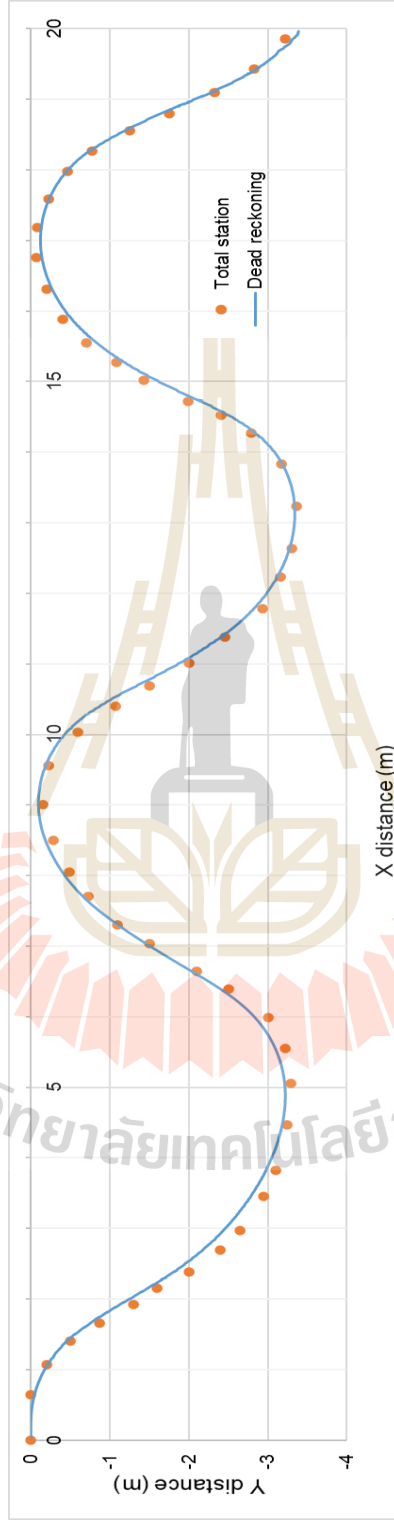
การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning สำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติทำโดยการบังคับล้อรถแทรกเตอร์ตามเส้นโค้งแบบ Sinusoidal ด้วยระยะทาง 20 m บนถนนลาดยางในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำแหน่งจริงของรถแทรกเตอร์บนพื้นถนนถูกระบุด้วยการหยดน้ำให้ตรงกับตำแหน่งกึ่งกลางเพลาล้อหลังของรถแทรกเตอร์ และใช้กล้องสำรวจแบบ total station ในการวัดค่าตำแหน่ง

ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning สำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.22 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งจริง โดยมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 15 cm ที่ระยะในแกน x เท่ากับ 4.9 m

ความผิดพลาดทางตำแหน่งที่เกิดจากระบบ dead reckoning เกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายประการ เช่น การลื่นไถลของล้อยางกับพื้นถนน ความไม่ราบเรียบของพื้น การใช้หยดน้ำระบุตำแหน่ง ฯลฯ ความผิดพลาดนี้จะเกิดขึ้นและสะสมตามระยะทางการเคลื่อนที่ โดยจะมีค่ามากเมื่อรถแทรกเตอร์ถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งที่มีรัศมีความโค้งน้อย เพราะล้อของรถแทรกเตอร์ทั้งสองข้างหมุนด้วยความเร็วที่แตกต่างกันมาก ดังนั้น การระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning จึงเหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นโค้งที่มีรัศมีความโค้งมากและระยะทางสั้น

4.3 การทดสอบภาคสนาม

การทดสอบสมรรถนะในภาคสนามของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกกระทำบนพื้นคอนกรีตและพื้นดินในแปลงเกษตร โดยการสมมติให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมาย (6, 3) m ด้วยการเคลื่อนที่ไปข้างและถอยหลังแบบจุดขนาน และแบบกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้ายเท่ากับ ± 30 deg ความเร็วของรถเท่ากับ 0.15 m/s รูปที่ 4.23 และ 4.24 แสดงสภาพของพื้นคอนกรีตและพื้นดินในแปลงเกษตรสำหรับการทดสอบ การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์บนพื้นที่จริงทำโดยการปล่อยหยดน้ำผ่านชุดสายน้ำเกลือลงบนพื้น ตำแหน่งของหยดน้ำจะถูกระบุด้วยกล้องสำรวจแบบ total station ยี่ห้อ Topcon รุ่น ES-105 ดังแสดงในรูปที่ 4.25-4.27 รูปที่ 4.28 แสดงโปรแกรมควบคุมระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์ที่ถูกพัฒนาด้วยซอฟต์แวร์ LabVIEW โดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.22 สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.23 สภาพของพื้นคอนกรีตสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.24 สภาพของพื้นดินในแปลงเกษตรกรสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



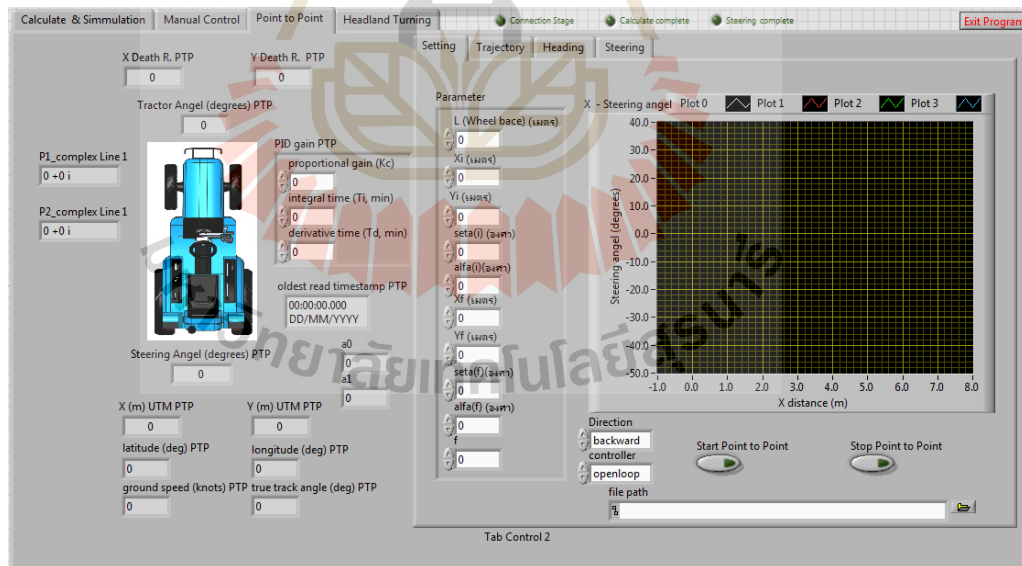
รูปที่ 4.25 การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ด้วยกล้องสำรวจแบบ total station



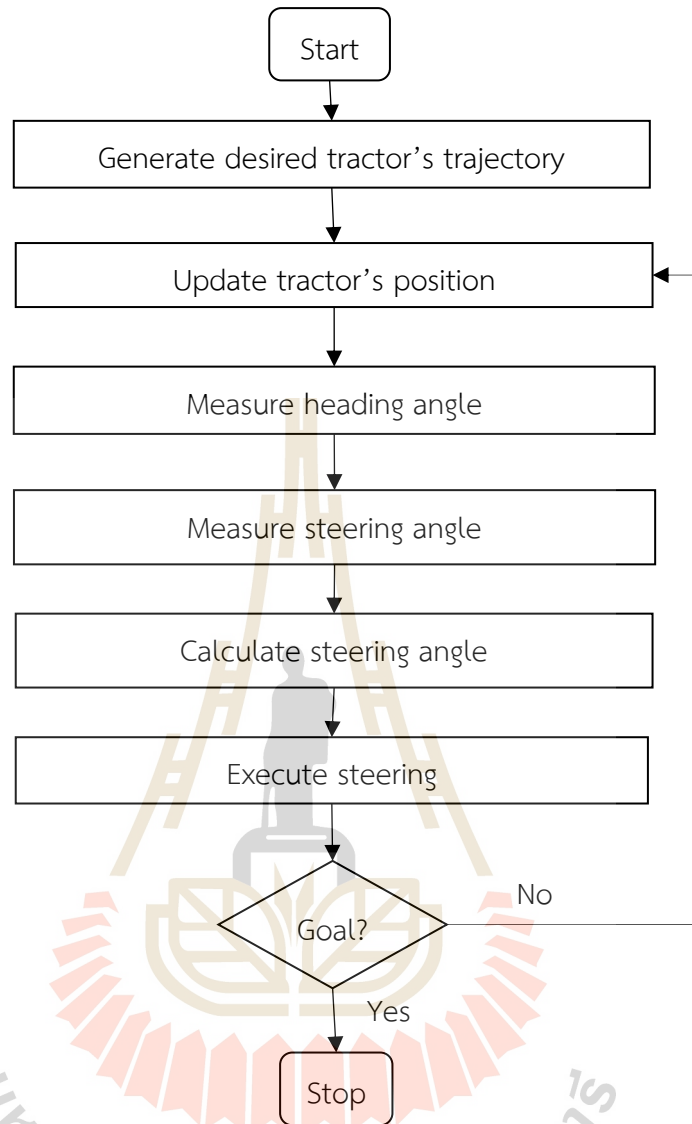
รูปที่ 4.26 ตัวอย่างของหยดน้ำพื้นคอนกรีต



รูปที่ 4.27 การโรยปูนขาวบนตำแหน่งของหยดน้ำพื้นดินในแปลงเกษตร



รูปที่ 4.28 โปรแกรมควบคุมระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.29 แผนผังของลำดับขั้นตอนการทำงานของระบบนำวิถีรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

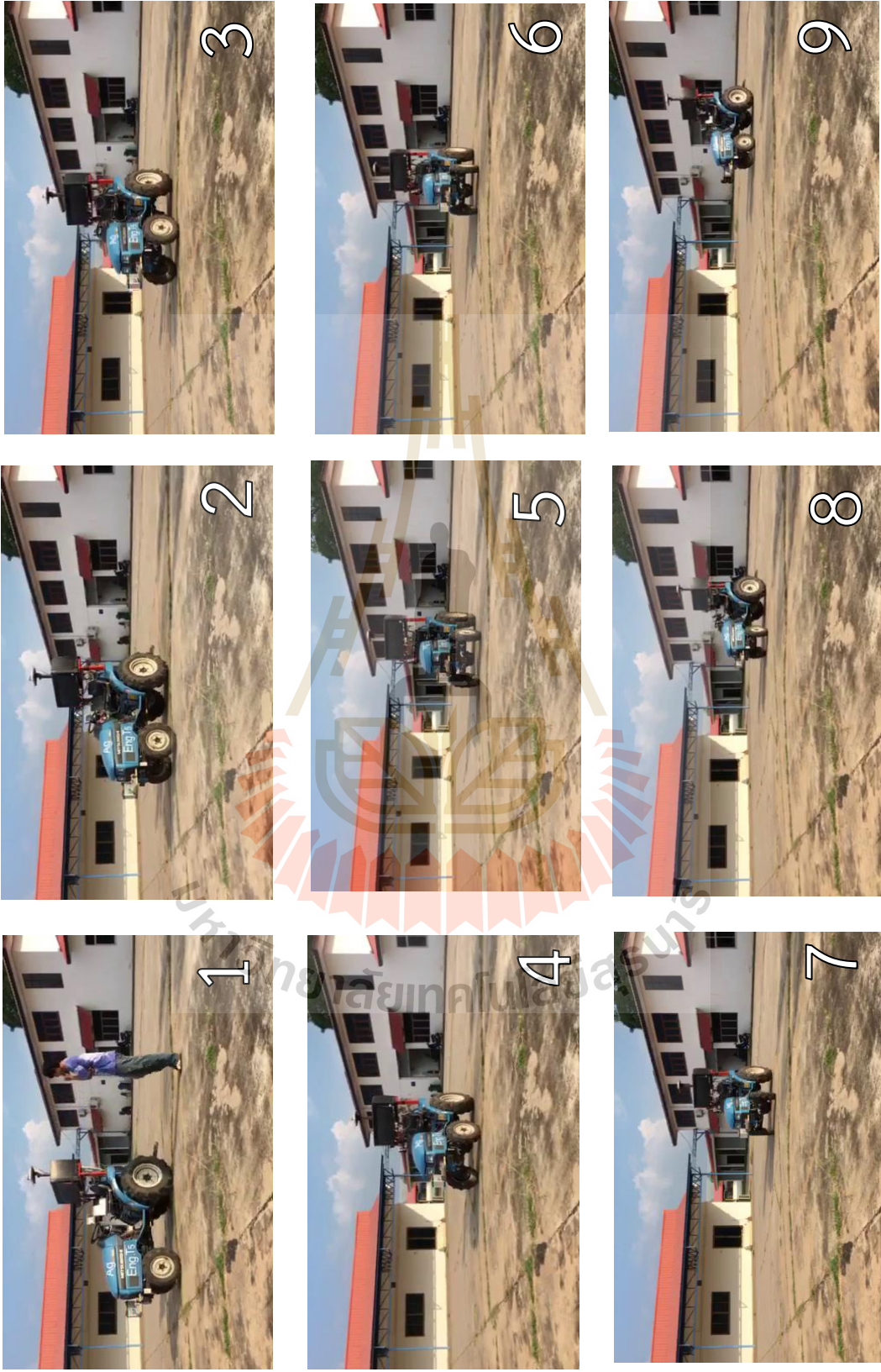
4.3.1 ผลการทดสอบบนพื้นคอนกรีต

สมรรถนะของระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกประเมินโดยการเปรียบเทียบผลการทดสอบภาคสนามกับผลการออกแบบเส้นทาง ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีตถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.30 และ 4.31 รูปที่ 4.32 และรูปที่ 4.33 แสดงตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังแบบจอดขนานบนพื้นคอนกรีตตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.35 แสดงทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังบนพื้นคอนกรีตตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดทางตำแหน่งในแกน Y ที่ตำแหน่งสุดท้ายเท่ากับ 0.50 m และ 1.10 m ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังตามลำดับ ความผิดพลาดทางตำแหน่งนี้เป็นผลมาจากการไถลทางด้านข้างของล้อและความล่าช้าในการตอบสนองของระบบบังคับเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ในขณะที่ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างน่าพอใจ โดยมีความผิดพลาดทางตำแหน่งในแกน Y น้อยกว่า 6 cm และทิศทางของการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งสุดท้ายน้อยกว่า 4 deg มุมเลี้ยวของตัวควบคุมแบบป้อนกลับมีค่าแตกต่างจากมุมเลี้ยวที่ออกแบบไว้ เพราะตัวควบคุมแบบป้อนกลับต้องสร้างมุมเลี้ยวเพื่อชดเชยความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

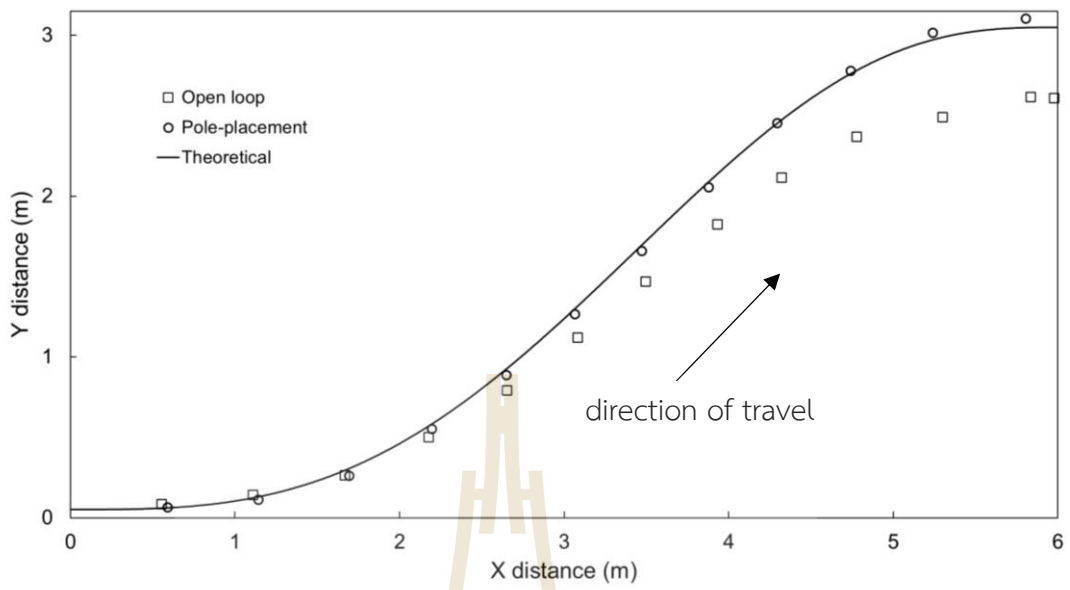
รูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 แสดงตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังแบบกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่สุดท้ายเท่ากับ ± 30 deg บนพื้นคอนกรีตตามลำดับ รูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41 แสดงทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังแบบกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่สุดท้ายเท่ากับ ± 30 deg บนพื้นคอนกรีตตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดทิศทางสุดท้ายเท่ากับ $+30$ deg ตัวควบคุมแบบป้อนกลับยังสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างน่าพอใจ โดยมีความผิดพลาดทางตำแหน่งในแกน Y น้อยกว่า 6 cm และทิศทางของการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งสุดท้ายน้อยกว่า 3 deg แต่เมื่อกำหนดทิศทางสุดท้ายเท่ากับ -30 deg ตัวควบคุมแบบป้อนกลับไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง เพราะมุมเลี้ยวที่ออกแบบไว้มีค่ามากกว่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ซึ่งถูกจำกัดไว้ในช่วง ± 45 deg ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43



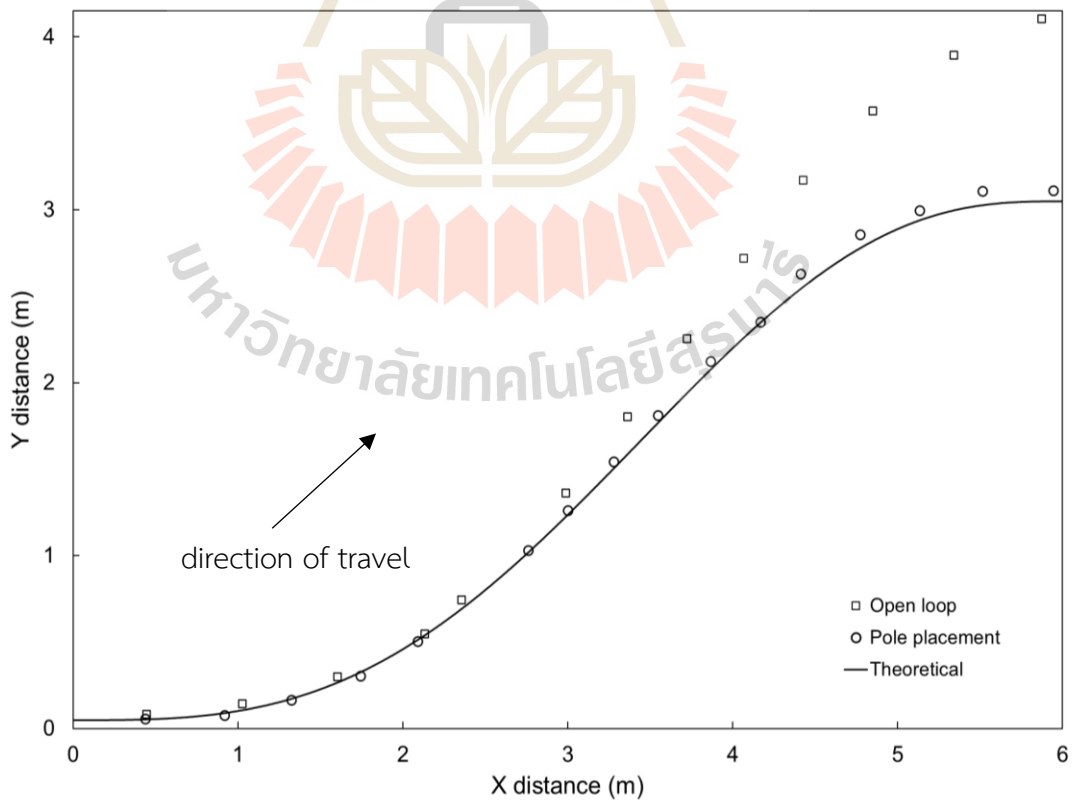
รูปที่ 4.30 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีต



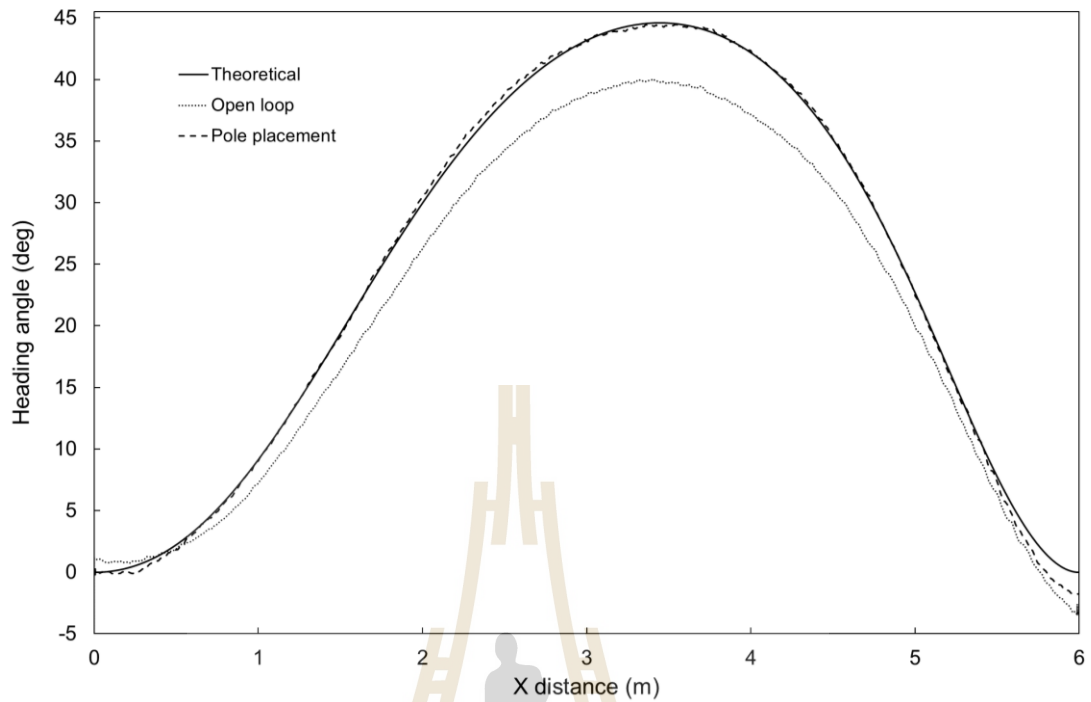
รูปที่ 4.31 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ถอยหลังของรถแทรกเตอร์บนพื้นคอนกรีต



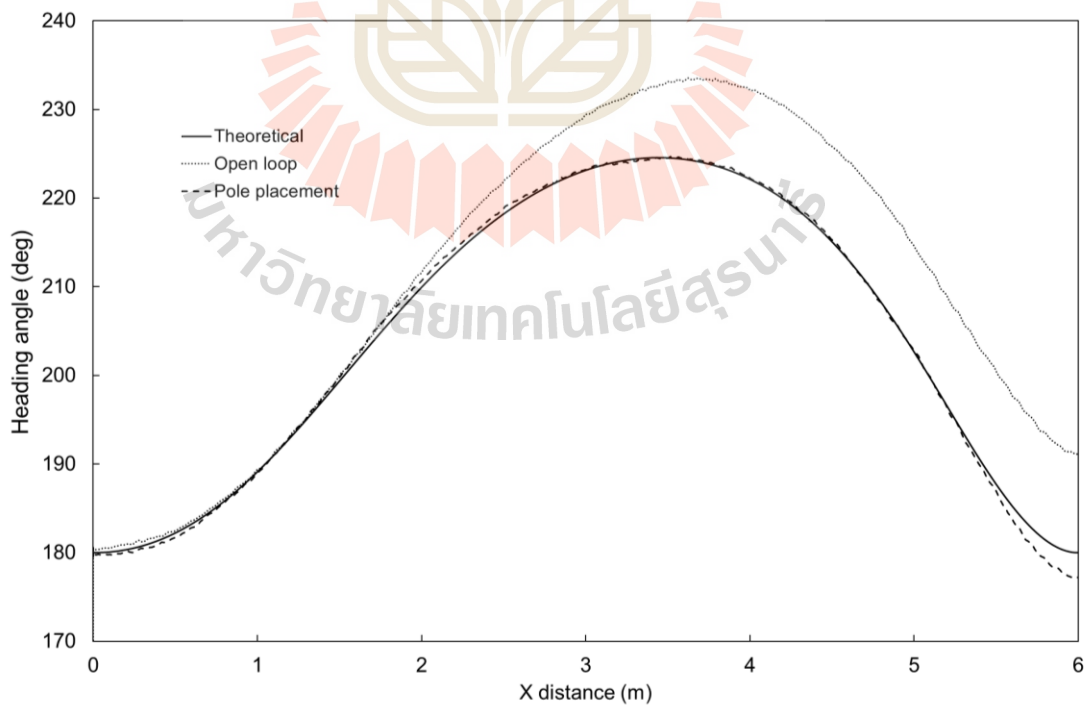
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต



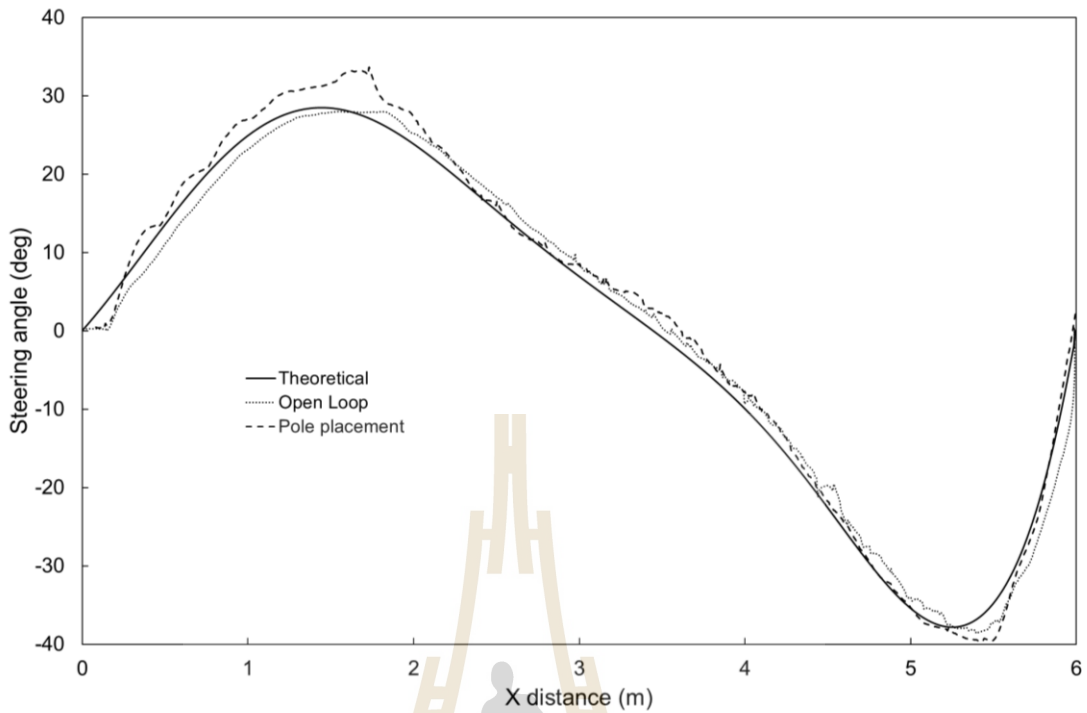
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต



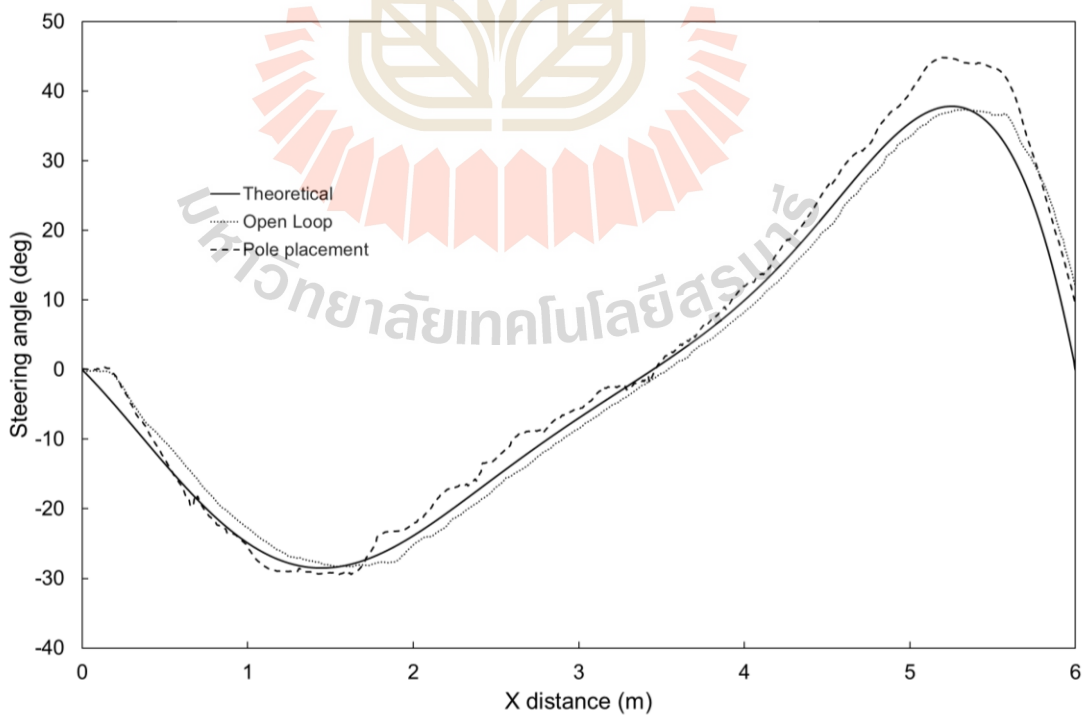
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต



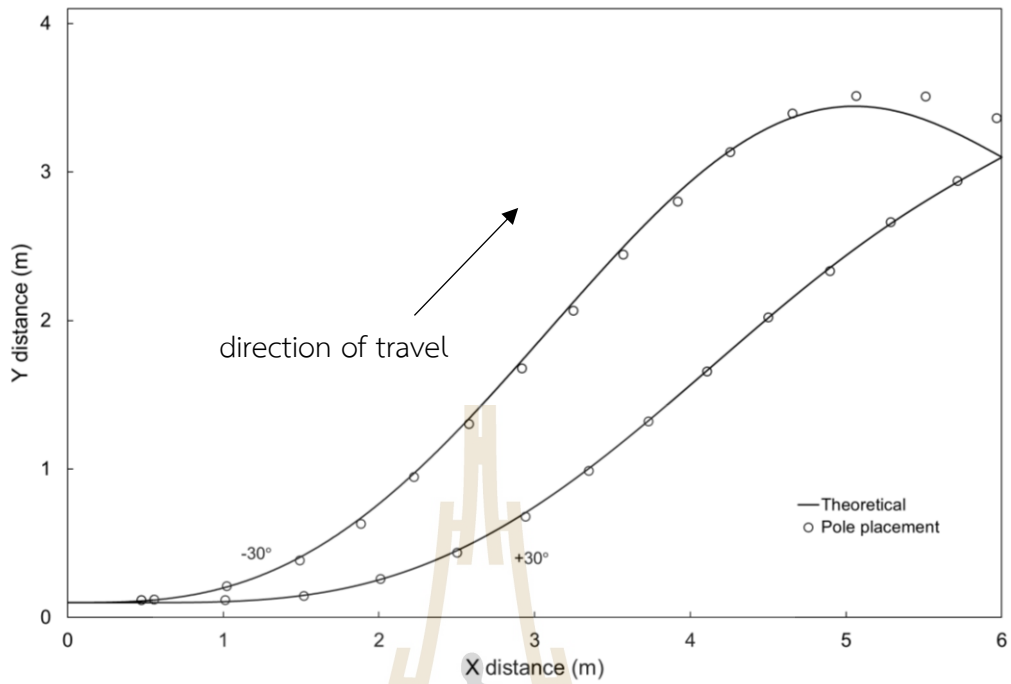
รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต



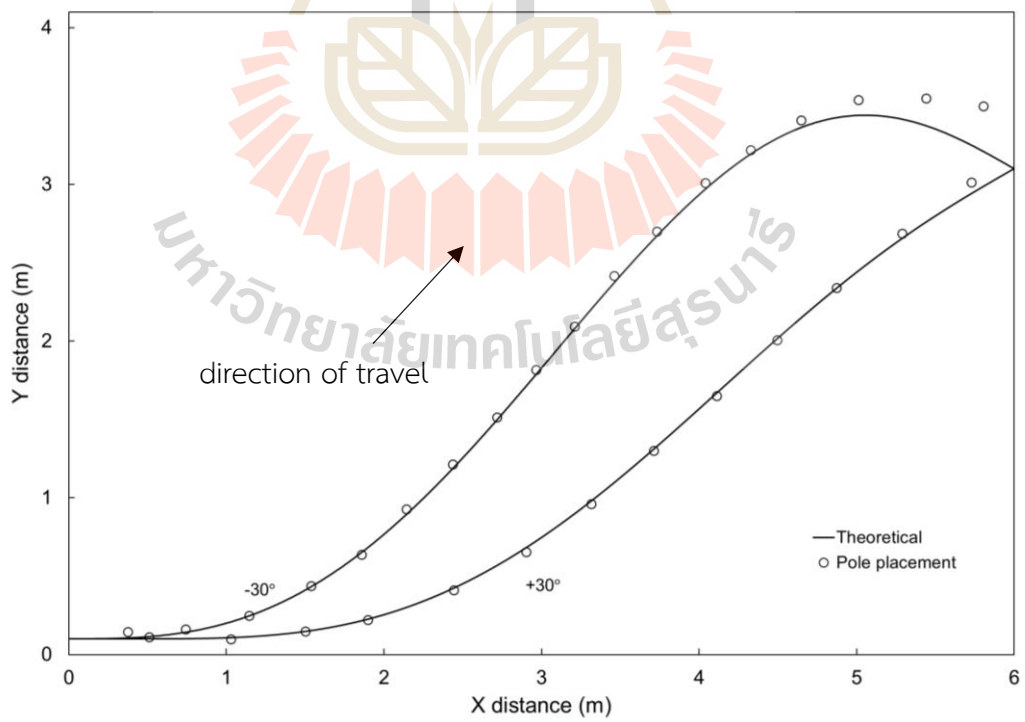
รูปที่ 4.36 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต



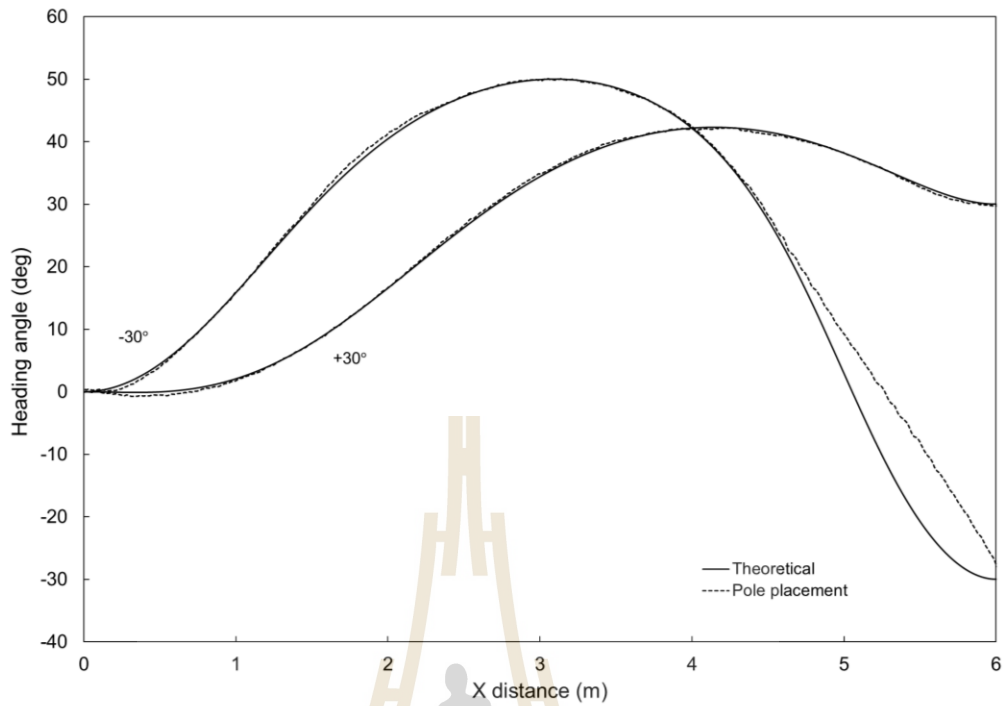
รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต



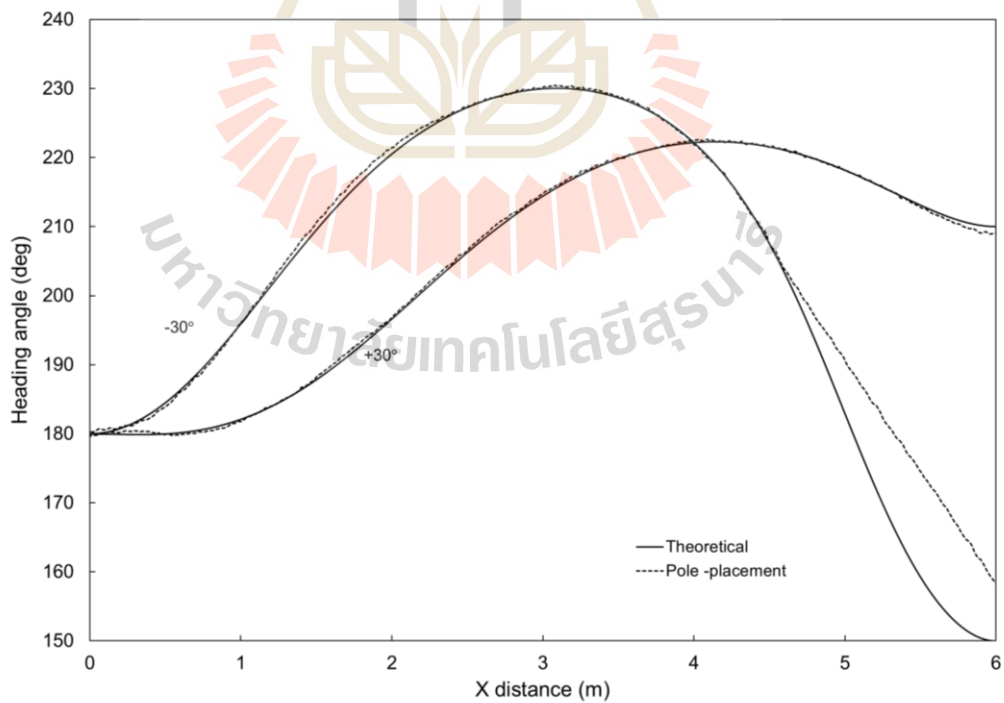
รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต
เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย



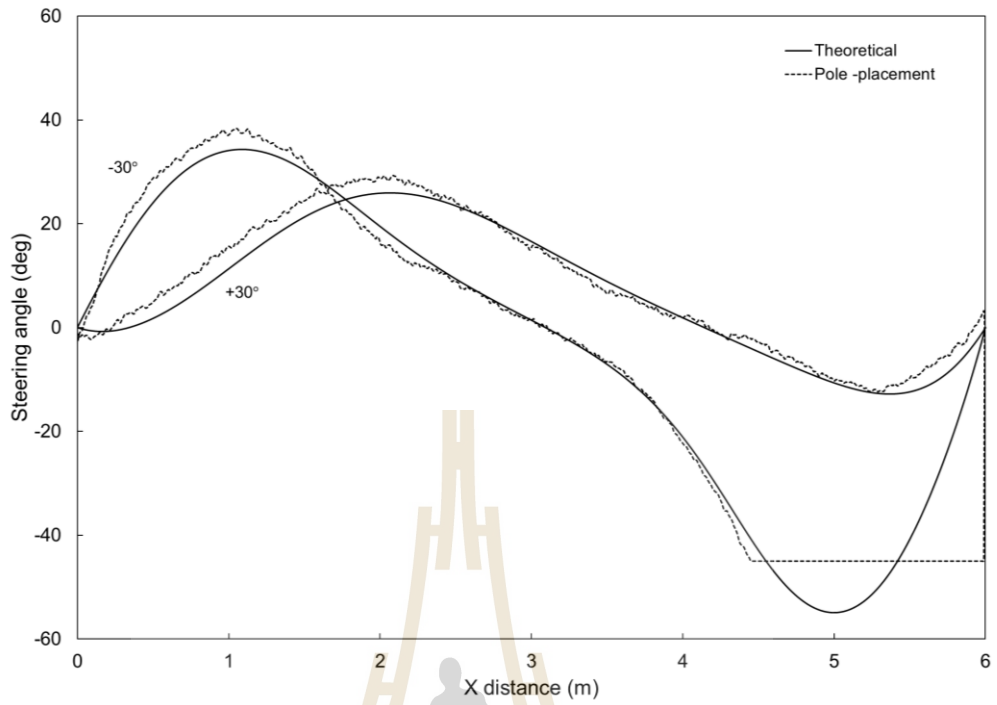
รูปที่ 4.39 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต
เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย



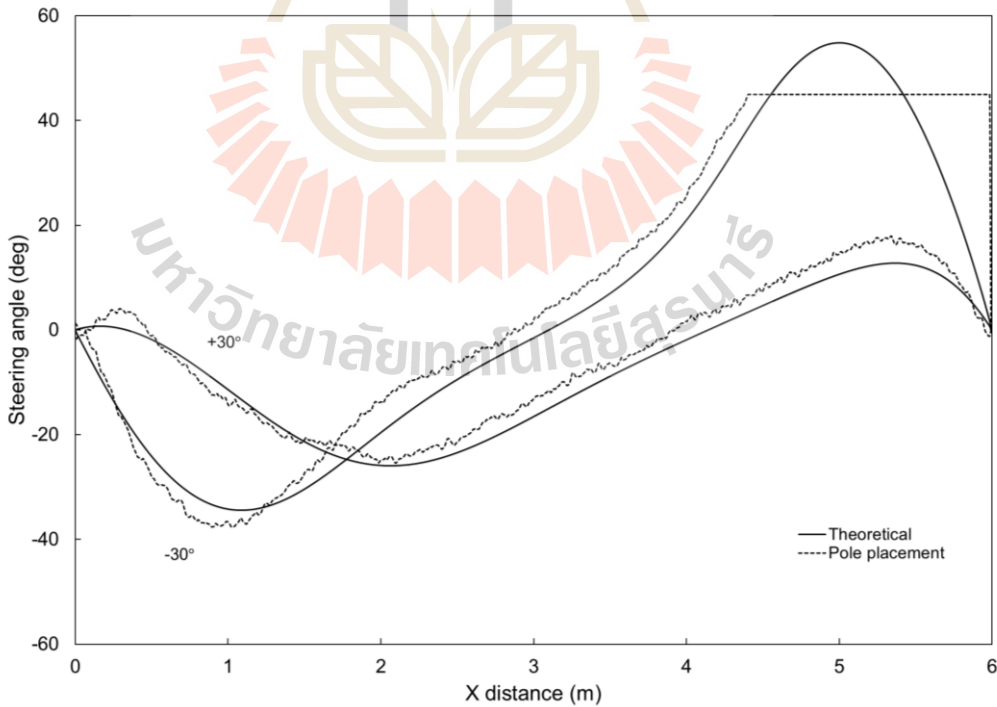
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต
เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบทิศทางของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต
เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย



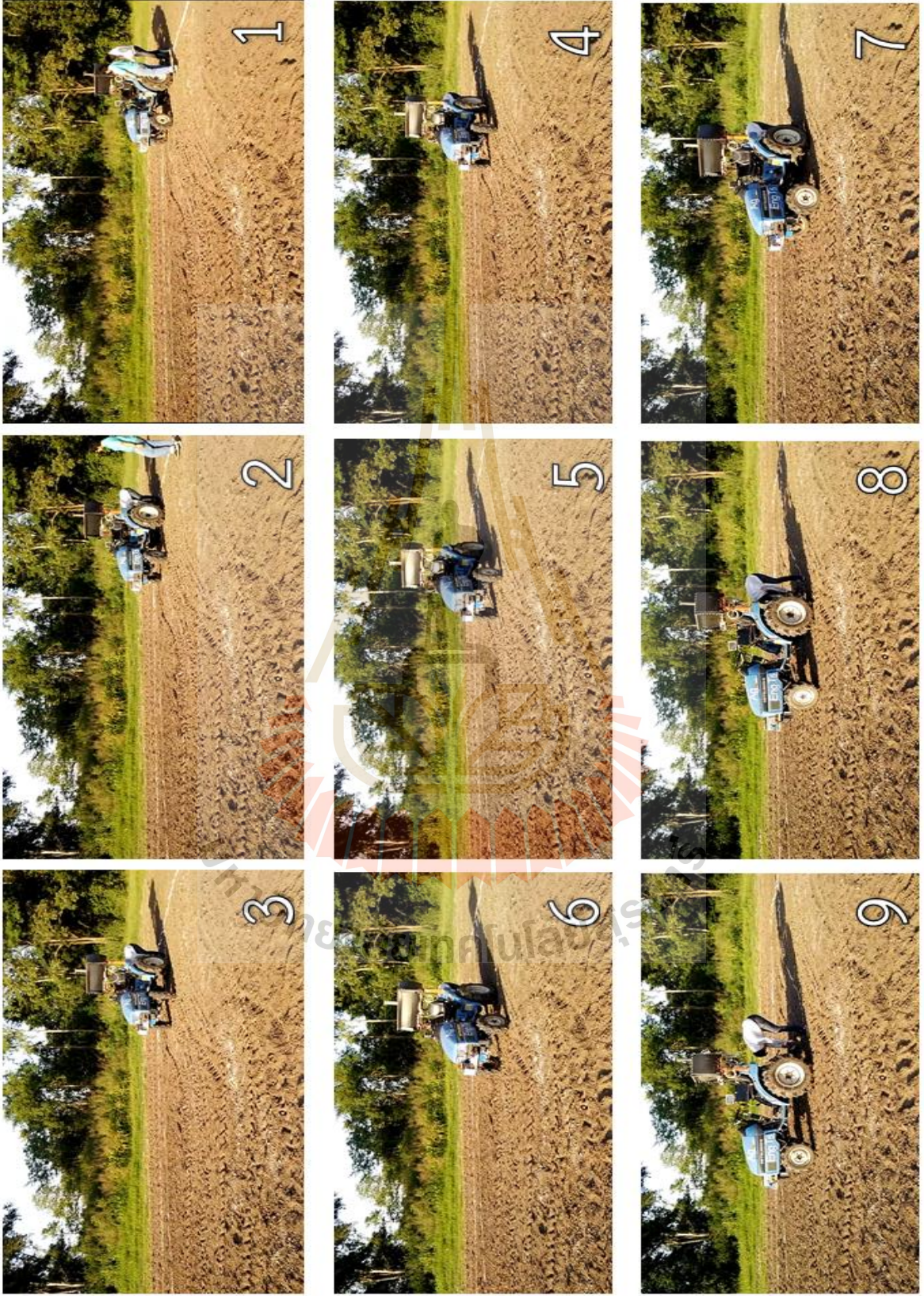
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย



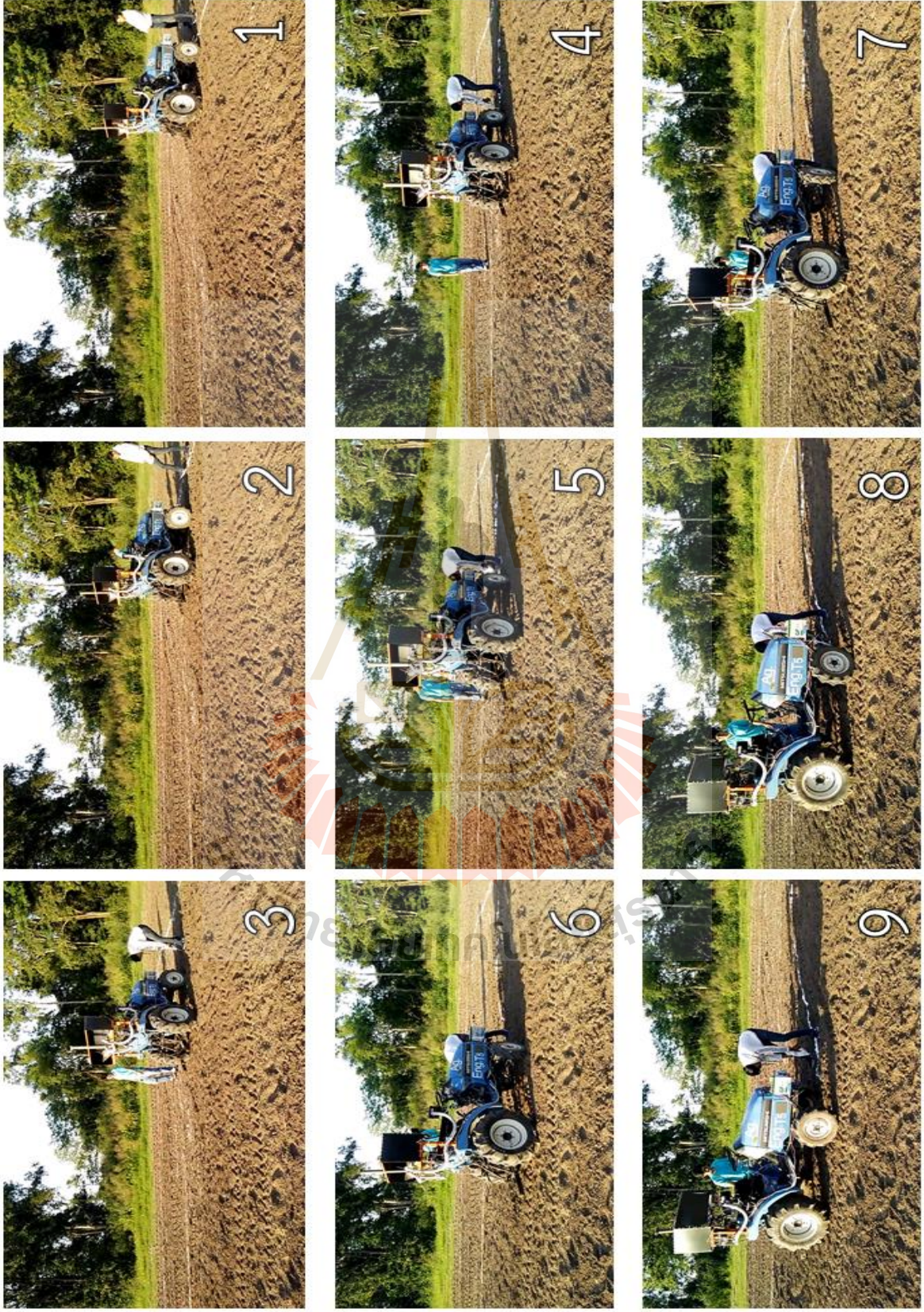
รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นคอนกรีต เมื่อเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่สุดท้าย

4.3.2 ผลการทดสอบบนพื้นดินในแปลงเกษตร

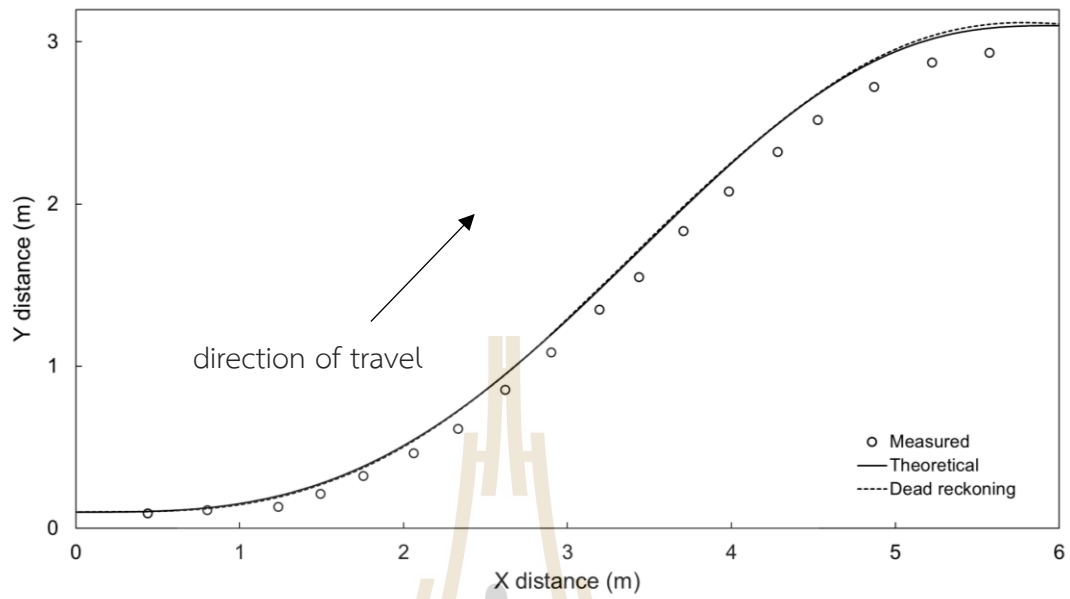
สมรรถนะของระบบนำวิถีของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกประเมินอีกครั้งบนพื้นดินในแปลงเกษตร ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตรถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.44 และ 4.45 รูปที่ 4.46 และรูปที่ 4.47 แสดงตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังแบบจอดขนานบนพื้นดินตามลำดับ ส่วนรูปที่ 4.48 และรูปที่ 4.49 แสดงมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังบนพื้นดินตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบป้อนกลับไม่สามารถบังคับรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ได้อย่างถูกต้อง โดยความผิดพลาดทางตำแหน่งในแกน Y มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากความล้มเหลวของระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ไม่ใช่ความล้มเหลวของตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของระบบระบุตำแหน่งบนพื้นดินในแปลงเกษตรคือการไถของล้อ ดังนั้นระบบนำวิถีที่มีระบบระบุตำแหน่งแบบสมบูรณ์ (absolute positioning system) เช่น ระบบระบุตำแหน่งด้วยเลเซอร์เซนเซอร์ ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม เป็นต้น หรือระบบนำวิถีที่มีระบบระบุตำแหน่งแบบสมบูรณ์ร่วมกับระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ควรถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ



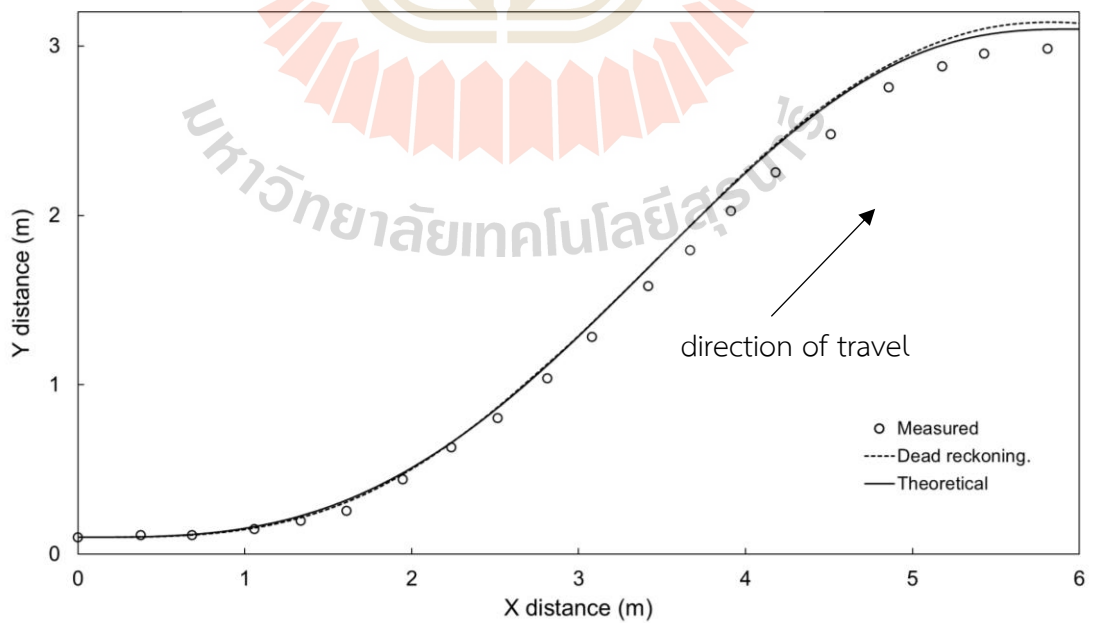
รูปที่ 4.44 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตร



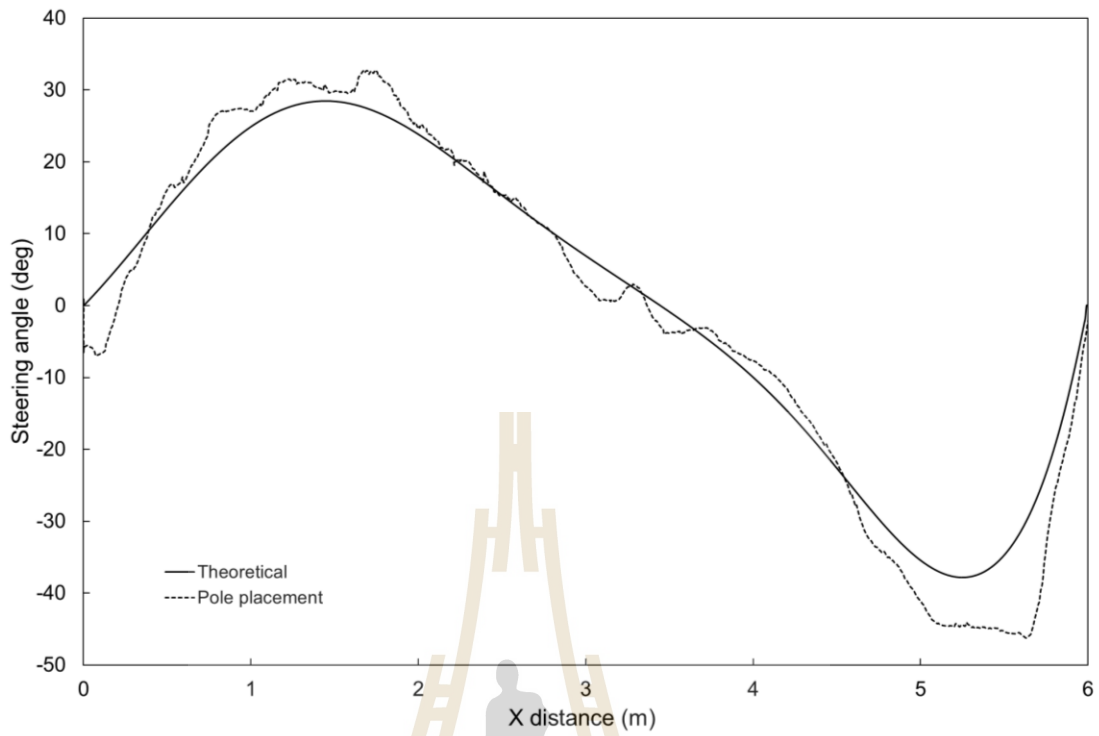
รูปที่ 4.45 ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ในแปลงเกษตร



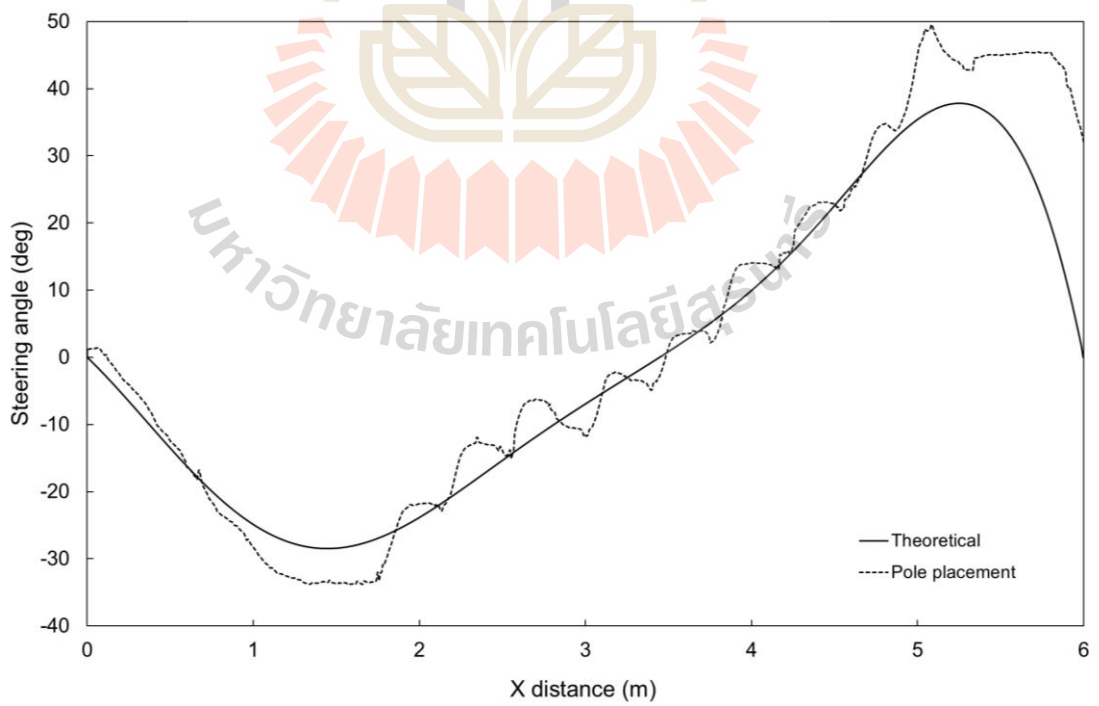
รูปที่ 4.46 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นดิน



รูปที่ 4.47 การเปรียบเทียบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นดิน



รูปที่ 4.48 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าบนพื้นดิน



รูปที่ 4.49 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ในการเคลื่อนที่ถอยหลังบนพื้นดิน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) ระบบออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่สามารถสร้างเส้นทางที่ราบเรียบจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย โดยอาศัยความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตและฟังก์ชันโพลีโนเมียล
- 2) ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ออกแบบได้ในสถานะที่มีสิ่งรบกวน ในขณะที่ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถชดเชยความผิดพลาดทางตำแหน่งและความผิดพลาดในทิศทางเคลื่อนที่ได้
- 3) ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวที่พัฒนาสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์อัตโนมัติบนสภาพพื้นที่ต่างๆ ได้อย่างน่าพอใจ
- 4) ระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning สามารถระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติบนพื้นคอนกรีตและพื้นลาดยางได้ด้วยระดับความถูกต้องที่น่าพอใจ แต่ระดับความถูกต้องของการระบุตำแหน่งลดลงเมื่อปฏิบัติงานบนพื้นดินในแปลงเกษตร เพราะการไถของล้อ
- 5) ผลการทดสอบภาคสนามยืนยันได้ว่า ระบบนำวิถีที่อาศัยตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างน่าพอใจ ดังนั้นระบบนำทางนี้มีศักยภาพที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในสถานะการใช้งานจริงได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรเพิ่มสมรรถนะของระบบออกแบบเส้นทางให้สามารถพัฒนาเส้นทางการเคลื่อนที่ได้หลายรูปแบบ เช่น เส้นทางสำหรับการกลับเลี้ยวหัวแปลงเกษตร เป็นต้น
- 2) ระบบระบุตำแหน่งแบบสมบูรณ์ (absolute positioning system) เช่น ระบบระบุตำแหน่งด้วยเลเซอร์เซนเซอร์ ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม เป็นต้น หรือการทำงานร่วมระบบระบุตำแหน่งแบบสมบูรณ์กับระบบระบุตำแหน่งแบบ dead reckoning ควรถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของการระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, กวี คงมัน และยงยุทธ เสียงดัง (2559), การออกแบบเส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, หน้า 131-138

ฉัตริน เรืองจอหอ, ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, กมลชนน วงศ์สถาน, และพยุงศักดิ์ จุลยุเสณ (2561), การ ออกแบบชุดบังคับลิ้นวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก, รายงานการประชุมวิชาการ วิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น, หน้า 159-163



เอกสารอ้างอิง

- Keicher, R., and Seufert, H. (2000). Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25 (1-2): 169–194.
- Nagasaka, Y., Umeda, N., Kanetai, Y., Taniwaki, K. and Sasaki, Y., 2004. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43(3), 223-234.
- Noguchi, N., Ishii, K. and Terao, H., 1997. Development of an agricultural mobile robot using a geomagnetic direction sensor and image sensor. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(1), 1-15.
- Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N. and Dickson, M. (2000). Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25 (1-2):155–167.
- Takigawa, T., Sutiarso, L., Koike, M., Kurosaki, H. and Hasegawa, H., 2002. Trajectory control and its application to approach a target: Part I. Development of trajectory control algorithms for an autonomous vehicle. *Transactions of the ASAE*, 45(4), 1191-1197.
- Torii, T.(2000). Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25 (1-2): 133–153.

ประวัติหัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยเสน สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และสำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาโท M.S. (Agricultural Science) และระดับปริญญาเอก Ph.D. (Agricultural
Science) จาก University of Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ในปี พ.ศ. 2548 ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง
หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มี
ผลงานวิชาการและผลงานวิจัยด้านเครื่องจักรกลเกษตรและพลังงานทดแทน

