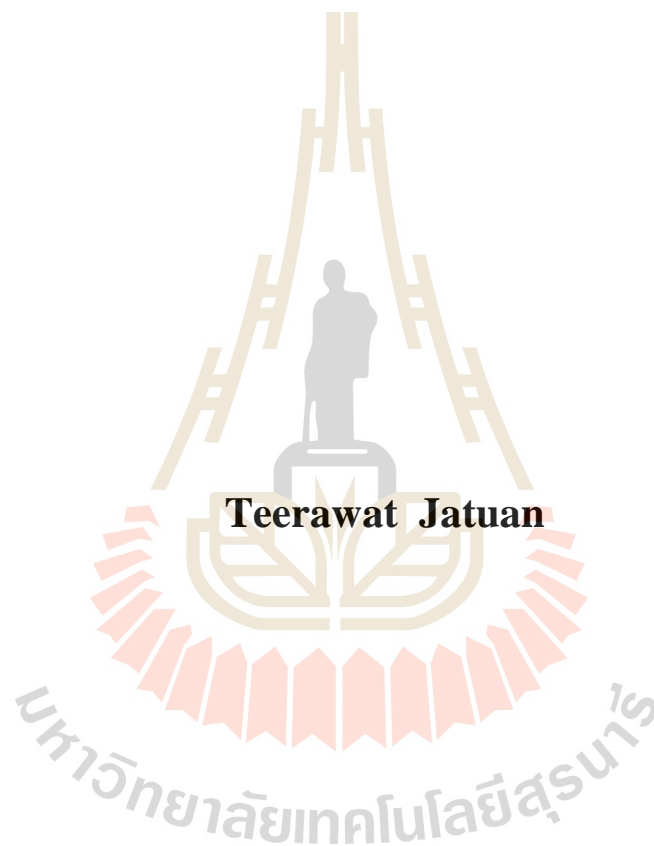


การพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
เพื่อการเลี้ยวกลับหัวแปลง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**DEVELOPMENT OF TRAJECTORY PLANNER OF
AUTONOMOUS TRACTOR FOR HEADLAND
TURNING OPERATION**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Agricultural and Food Engineering**

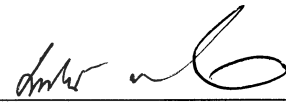
Suranaree University of Technology

Academic Year 2018

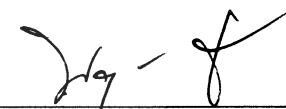
การพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
เพื่อการเลี้ยวกลับหัวแปลง

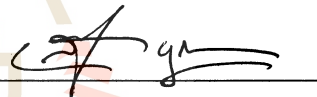
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผศ. ดร.เทวรัตน์ ตรีอำรรค)

ประธานกรรมการ

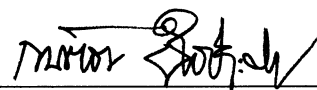

(ผศ. ดร.พวงศักดิ์ จุลยเสน)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


(อ. ดร.สามารถ นุญอาจ)
กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนดรร ข่านิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ธีรวัฒน์ เจเดือน : การพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการ
เลี้ยวกลับหัวแปลง (DEVELOPMENT OF TRAJECTORY PLANNER OF
AUTONOMOUS TRACTOR FOR HEADLAND TURNING OPERATION)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสนา, 172 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง การเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบทางปลาถูกนำมาใช้เพราะใช้พื้นที่หัวแปลงน้อย เส้นทางเลี้ยวกลับแบบทางปลาประกอบด้วยเส้นทางย่อย 5 เส้นทาง คือ ส่วนโค้งเปลี่ยนขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมถอยหลัง ส่วนโค้งวงกลมขาออก และส่วนโค้งเปลี่ยนขาออก ส่วนโค้งเหล่านี้ถูกออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง เรขาคณิตของรถแทรกเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และระยะห่างระหว่างแถวพืช ซึ่งสามารถสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับแบบทางปลาได้ 6 รูปแบบ ครอบคลุมการเลี้ยวกลับหัวแปลงไปร่องทางซ้าย ร่องทางขวา และร่องเดิม ในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์รถแทรกเตอร์ถูกสร้างด้วยแบบจำลองทางคิเนแมติกส์แบบ 2 มิติ การจำลองสถานการณ์ถูกกระทำภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุมเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สิ่งรบกวนของระบบควบคุมถูกกำหนดจากความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยว ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล ถูกนำมาใช้หาค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางหน้ารถ โปรแกรมจำลองสถานการณ์พัฒนาโดยใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW แบบจำลองของรถแทรกเตอร์ถูกสร้างทั้ง 2 มิติและ 3 มิติ เพื่อความเสมือนจริง จากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าระบบออกแบบเส้นทางที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงได้อย่างราบเรียบ และตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางได้อย่างถูกต้อง รถแทรกเตอร์ถูกติดตั้งระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ ระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์ และระบบประมวลผลสำหรับการทดสอบสมรรถนะในแปลง จากการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นบนพื้นปูนและพื้นดินพบว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ ส่วนตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง ได้ด้วยระดับความถูกต้องที่ยอมรับได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมการเลี้ยวกลับหัวแปลงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ธีรวัฒน์ เจเดือน

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา พยุงค์ศักดิ์ จุลยุเสนา

TEERAWAT JATUAN : DEVELOPMENT OF TRAJECTORY
PLANNER OF AUTONOMOUS TRACTOR FOR HEADLAND
TURNING OPERATION. THESIS ADVISOR :ASST. PROF.
PAYUNGSAK JUNYUSEN, Ph.D., 172 PP.

TRAJECTORY/AUTONOMOUS TRACTOR/HEADLAND TURNING

The objective of this study was to develop a trajectory planner of autonomous tractor for headland turning operation. The fish-tail headland turning was employed due to small area used. The fish-tail turning consisted of five paths, i.e. two arcs of clothoid and three arcs of circle. These paths were generated based on the relationship among tractor's geometry, ground speed and crop row distance. Six patterns of fish-tail turning could be designed for turning to left-side furrow, right-side furrow and same furrow. A two-dimensional 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 pole-placement feedback controller was employed for reducing the positional and heading displacements. The simulation program was written using LabVIEW. Both two-dimensional and three-dimensional graphic models of the tractor were used. The simulation results showed that the trajectory planner could generate the headland turning smoothly and the pole-placement controller could steer the tractor along the designed trajectory precisely. The actual-size tractor was equipped with the steering controller, the positioning system, the clutch and gear manipulating system and the processing system to conduct the field experiments. From the performance test using the autonomous tractor on concrete and ground

surfaces, it was found that the open-loop controller could not steer the tractor to the final position. Meanwhile, the pole-placement controller could steer the tractor along the designed headland turning trajectory with an acceptable level of accuracy. The experimental results showed that the headland turning algorithm could be used for practical application.



School of Agricultural Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature ธีรวัฒน์ เหมทอง

Advisor's Signature ดร. อ. [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ศักดิ์ จุลยุเสนา หัวหน้าสาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วาทกิจ อาจารย์ จรุงศักดิ์ สมพงษ์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการและช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีรชัย อาจหาญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วีระศักดิ์ เลิศลิทธิโยธิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เทวรัตน์ ตรีอำนาจ อาจารย์ ดร. สามารถ บุญอาจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรษา ลิบลับ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธีราพร จุลยุเสนา อาจารย์ ดร. วันวิสาข์ ทวีชื่นสกุล อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มงคล ศุภพันธ์ อาจารย์ยังยุทธ เลียงดิ่ง คุณกรรณิกา ประเสริฐสังข์ คุณชนากร แนวกลาง ที่ให้คำแนะนำปรึกษาและช่วยเหลือตลอดมา ขอขอบคุณ คุณไชยา ยอดโคกสูง นายช่างโยธาประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ขอขอบคุณที่น้องบัณฑิตทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณฉัตริน เรื่องจอหอ ที่ช่วยเหลือตอนลงปฏิบัติงานภาคสนาม

ขอขอบคุณคุณพ่อสมพงษ์ เจเดือน คุณแม่ส้มแป้น เจเดือน ญาติพี่น้อง และคุณจิราพร กรสันเทียะ ที่สนับสนุนค่าใช้จ่ายในระหว่างศึกษาและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ธีรวัฒน์ เจเดือน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทัศนั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 รถแทรกเตอร์.....	4
2.2.1 เครื่องยนต์ต้นกำลัง.....	4
2.2.2 ระบบขับเคลื่อน.....	5
2.2.2.1 ระบบคลัตช์.....	5
2.2.2.2 ระบบเกียร์.....	5
2.2.2.3 ระบบเฟืองท้าย.....	5
2.2.2.4 ระบบเฟืองทดเพลาล้อ.....	5
2.2.2.5 ระบบเบรก.....	5
2.2.2.6 ระบบล้อ.....	5
2.2.2.7 ระบบบังคับเลี้ยวควบคุมทิศทาง.....	5

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3	ระบบเพลาอำนาจกำลัง	5
2.2.4	ระบบไฮดรอลิก.....	5
2.2.5	ระบบต่อพ่วงเครื่องมือหรืออุปกรณ์เข้ากับรถแทรกเตอร์	6
2.2.6	ระบบไฟฟ้า	6
2.3	แบบจำลองทางคิเนเมติกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร	6
2.4	หลักการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์	7
2.4.1	การกำหนดปัญหาและตั้งวัตถุประสงค์	8
2.4.2	การสังเกตและวิเคราะห์ระบบ	9
2.4.3	การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์	9
2.4.4	การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์	9
2.4.5	การพิสูจน์โปรแกรม.....	9
2.4.6	การทดลองจำลองสถานการณ์	9
2.4.7	การพิสูจน์เปรียบเทียบ	10
2.5	ระบบควบคุม(Control system)	10
2.5.1	ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม(Classical Control System)	10
2.5.2	ระบบควบคุมแบบสมัยใหม่(Modern Control)	11
2.5.3	ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด(Modern Control)	11
2.5.4	ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด(Modern Control)	12
2.6	ตัวควบคุมพีไอดี(PID Controller)	12
2.6.1	การควบคุมแบบสัดส่วน(Proportional Control).....	13
2.6.2	การควบคุมแบบปริพันธ์(Integral Control)	13
2.6.3	การควบคุมแบบอนุพันธ์(Derivative Control)	13
2.7	ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปโปรแกรม LabVIEW	14
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.1 การพัฒนาขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทาง	18
2.8.2 การพัฒนาระบบระบุตำแหน่ง	21
2.8.3 การพัฒนาชุดบังคับลัยอัตโนมัติ	23
2.8.4 การพัฒนาการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ	24
2.9 รายการอ้างอิง	25
3 การออกแบบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง.....	30
3.1 บทคัดย่อ	30
3.2 บทนำ	30
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.3.1 การพัฒนาโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง.....	33
3.3.1.1 รูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลง.....	33
3.3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเลี้ยวกลับหัวแปลง	34
3.3.1.3 ลำดับการทำงานของโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับ รถหัวแปลง.....	38
3.3.1.4 การทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัว แปลง.....	39
3.3.2 การพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บน เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง	40
3.3.2.1 การสร้างแบบจำลองทางคิเนเมติกส์	40
3.3.2.2 ลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ ของรถแทรกเตอร์	41
3.3.2.3 การทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้น ทางเลี้ยวกลับหัวแปลง.....	42
3.3.3 การพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และพัฒนาโปร-	

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

	แกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม	
	การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์.....	42
3.3.3.1	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล.....	42
3.3.3.2	การกำหนดค่าความผิดพลาดของแบบจำลองทางคิเนติกส์.....	44
3.3.3.3	ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพลสำหรับ	
	เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา.....	45
3.3.3.4	การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของ	
	รถแทรกเตอร์.....	46
3.4	ผลการจำลองและการอภิปรายผล	47
3.4.1	ผลการทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง.....	47
3.4.1.1	เส้นทางการเคลื่อนที่.....	47
3.4.1.2	ทิศทางของรถแทรกเตอร์.....	50
3.4.1.3	มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์.....	51
3.4.2	ผลการทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทาง	
	เลี้ยวกลับรถหัวแปลง.....	52
3.4.2.1	พฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์.....	52
3.4.2.2	ระยะหัวแปลง.....	55
3.4.3	ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่	
	ของรถแทรกเตอร์	55
3.5	สรุปผลการวิจัย	59
3.6	รายการอ้างอิง.....	59
4	การทดสอบรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง	61
4.1	บทคัดย่อ	61
4.2	บทนำ.....	61

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	61
4.3.1	ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว.....	62
4.3.1.1	การออกแบบระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว	62
4.3.1.2	การสอบเทียบมุมเลี้ยว	66
4.3.1.3	การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยว	68
4.3.1.4	การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step Response	68
4.3.1.5	การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID.....	70
4.3.1.6	วิธีลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน(low pass filter)	71
4.3.2	ระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์	72
4.3.2.1	การติดตั้งและวิธีคำนวณ	72
4.3.2.2	การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์	75
4.3.3	ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ.....	79
4.3.3.1	การออกแบบระบบวัดมุมคันเกียร์	79
4.3.3.2	การออกแบบระบบวัดมุมคันคลัตช์.....	80
4.3.3.3	การพัฒนาโปรแกรมควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ	80
4.3.3.4	การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ.....	81
4.3.4	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง	82
4.3.5	ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้และส่วนควบคุมการเคลื่อนที่.....	82
4.3.5.1	การพัฒนาโปรแกรมส่วนต่อประสานกับผู้ใช้และส่วนควบคุมการเคลื่อนที่	83
4.3.6	การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ	

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง	86
4.4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล	88
4.4.1 ผลการสอบเทียบมุมเลี้ยว	88
4.4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ ขนาดเล็ก.....	89
4.4.3 ผลการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step Response	90
4.4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม	91
4.4.5 สมรรถนะของตัวควบคุม PID เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)	92
4.4.5.1 ผลการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response	92
4.4.5.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม	93
4.4.6 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์.....	95
4.4.7 ผลการออกแบบระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ	96
4.4.8 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ.....	96
4.4.9 ผลการทดสอบสมรรถนะขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ สำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง	97
4.5 สรุปผลการวิจัย	108
4.6 รายการอ้างอิง.....	108
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผล.....	111
5.2 ข้อเสนอแนะ	112

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก. แผนผัง โปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลียวกลับหัวแปลงแบบหางปลา.....	113
ภาคผนวก ข. ผลจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทาง เลียวกลับหัวแปลงแบบหางปลา.....	119
ภาคผนวก ค. ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วย วิธีวางตำแหน่งโพล.....	135
ภาคผนวก ง. การพัฒนาโปรแกรมคลัสต์ซ์และเกียร์อัตโนมัติ.....	141
ภาคผนวก จ. ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง.....	147
ภาคผนวก ฉ. ผลการทดสอบภาคสนาม.....	156
ภาคผนวก ช. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	170
ประวัติผู้เขียน.....	172

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ พีไอ พีดี พีไอดี 14
2.2	การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย 14
3.1	เงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางที่ออกแบบ 39
3.2	ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วย วิธีการวางตำแหน่ง โพล 58
4.1	การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ 69
4.2	ตัวแปรสำหรับการสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา 70
4.3	เงื่อนไขในการทดสอบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับ หัวแปลง..... 88
4.4	ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ 91
4.5	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได 91
4.6	ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติเมื่อใช้ตัวกรอง สัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)..... 93
4.7	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได 94
4.8	ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ..... 97
4.9	ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวาง ตำแหน่งโพล..... 98
ง.1	สัญลักษณ์สำหรับการวัดคุม..... 142

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แบบจำลองทางคิเนแมติกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร.....6
2.2	กระบวนการของการจำลองสถานการณ์.....8
2.3	ส่วนประกอบของระบบควบคุม..... 10
2.4	ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด 11
2.5	ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด 12
2.6	ตัวควบคุมพีไอดี ที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม 12
2.7	ส่วนประกอบหลักของโปรแกรม LabVIEW..... 15
2.8	ตัวอย่างการใช้ Control 15
2.9	ตัวอย่างการใช้ Indicator 16
2.10	ตัวอย่างการใช้ Decoration..... 16
2.11	ตัวอย่างการเขียน object บน Block Diagram..... 17
2.12	ส่วนประกอบของระบบนำวิถี 18
2.13	แสดงการวางแผนเส้นทางการกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบ fish-tail 18
2.14	เส้นทางการถอยรถเข้าจอดแบบขนาน 19
2.15	ภาพถ่ายทางอากาศของสนามและเส้นทางเคลื่อนที่..... 19
2.16	เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลง (ก)แบบเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (ข)แบบเคลื่อนที่ไปและถอยกลับ 20
2.17	เส้นทางเคลื่อนที่แบบเส้นตรงรวมกับแบบครึ่งวงรีเปรียบเทียบกับเส้นทาง เคลื่อนที่จากต้นยางจำลอง 20
2.18	รถดำนอัตโนมัติของ NARC 21
2.19	ตำแหน่งติดตั้งเซ็น โคลดเคอร์วัคระยะทาง 22
2.20	ตำแหน่งติดตั้งเซ็น โคลดเคอร์วัคระยะทาง 22
2.21	แผนผังระบบควบคุมการเลี้ยว 23
2.22	ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก..... 23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23	รถแทรกเตอร์อัตโนมัติ 24
3.1	แผนดำเนินการการพัฒนาโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง 31
3.2	แผนดำเนินการการพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บน เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง 32
3.3	แผนดำเนินการพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และพัฒนา โปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ แทรกเตอร์ 32
3.4	แผนดำเนินการทดสอบหาค่าโพลของตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวาง ตำแหน่งโพล 33
3.5	รูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลง 33
3.6	เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา 34
3.7	สัญลักษณ์และตัวแปร 35
3.8	ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา 38
3.9	แบบจำลองรูปลักษณะสองมิติของรถแทรกเตอร์ 40
3.10	แบบจำลองรูปลักษณะสามมิติของรถแทรกเตอร์ 41
3.11	ลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถ ที่หัวแปลง 41
3.12	ความผิดพลาดทางตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ 42
3.13	มุมการคลาดเคลื่อนของล้อหน้า(ϵ)ขณะหักเลี้ยวเป็นมุม α เนื่องจากแรงกระทำ ด้านข้าง Y 45
3.14	เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา 45
3.15	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพลสำหรับทดสอบสมรรถนะตัว ควบคุม 46
3.16	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย..... 48
3.18	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย..... 48
3.19	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา..... 49
3.20	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา..... 49
3.21	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา..... 49
3.22	ทิศทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย..... 50
3.23	ทิศทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา..... 50
3.24	มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย..... 51
3.25	มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา..... 51
3.26	โปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสองมิติ..... 52
3.27	โปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสามมิติ..... 52
3.28	การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย 53
3.29	การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัว แปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย 53
3.30	การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางซ้าย..... 54

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป($D = 1\text{ m}$) กรณีเลี้ยวเข้าร่องทางซ้ายจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะ สามมิติ	54
3.32 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืช()เท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย	55
3.33 โปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบควบคุม	56
3.34 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บน เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย	57
3.35 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บน เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย	57
3.36 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัว แปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย	57
4.1 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนาม	62
4.2 แผนผังระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนาม	62
4.3 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก	63
4.4 ระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ	63
4.5 ทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ยี่ห้อ AMETEK รุ่น PT-420-60	64
4.6 วงจรขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Cytron รุ่น MD30C Rev 2.0	64
4.7 รีเลย์ ยี่ห้อ Songle รุ่น SRD-05VDC-SL-C	65
4.8 ลิมิตสวิตช์ ยี่ห้อ Tend รุ่น TM-1701	65
4.9 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ	66
4.10 แผนผังของระบบควบคุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ	66
4.11 การสอบเทียบมุมเลี้ยว	67
4.12 วิธีการการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์	67
4.13 การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยวบนพื้นหญ้า	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 การวัดผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดตามวิธี Ziegler-Nichols step response	69
4.15 การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับลิ้นว	70
4.16 การลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)	71
4.17 ผลการลดความแปรปรวนของมุมลิ้นวด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน(low pass filter)	72
4.18 แผนผังของระบบวัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์	73
4.19 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์	73
4.20 ไจโรสโคป ยี่ห้อ KISTLER รุ่น TAG-32150M7-25-VR-EGA	74
4.21 ฟังก์ชัน Linear Fit ในโปรแกรม LabVIEW	75
4.22 (ก) การลอยของมุมทิศทางหน้ารถ (ข) มุมทิศทางหน้ารถเมื่อใช้สมการปรับแก้	75
4.23 ตำแหน่งติดตั้งชุดสายน้ำเกลือระบุตำแหน่งตัวรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ	76
4.24 การทำคำนิยามหุ่นพื้นด้วยชอร์ค	76
4.25 การทำคำนิยามหุ่นพื้นด้วยปูนขาว	77
4.26 การระบุพิกัดเส้นทางการเคลื่อนที่จริง	77
4.27 การระบุพิกัดเส้นทางการเคลื่อนที่จริง	78
4.28 ตัวแปรสำหรับคำนวณตำแหน่งจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่จริง	78
4.29 ระบบวัดมุมคันเกียร์	79
4.30 แผนผังของระบบวัดมุมคันเกียร์	79
4.31 ระบบวัดมุมคันคลัตช์	80
4.32 แผนผังของระบบวัดมุมชุดบังคับคันคลัตช์	80
4.33 หน้าจอแสดงผลและสั่งการระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ	81
4.34 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.35	แผนผังการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายสู่อุปกรณ์วัดคุม	82
4.36	การเรียกใช้ฟังก์ชันที่ใช้งานของ NI myRIO บน โปรแกรม LabVIEW	83
4.37	แผนภาพลำดับการทำงานของโปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ	84
4.38	โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Calculation&Simulation	85
4.39	โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Manual Control	85
4.40	โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Headland turning	86
4.41	สภาพพื้นปูนของศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	86
4.42	สภาพแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี	87
4.43	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวและระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง	89
4.44	อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวสูงสุด	89
4.45	ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า	90
4.46	ผลการตอบสนองของระบบแบบวงรอบเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg	90
4.47	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg	91
4.48	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่อง	92
4.49	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อ ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน โดยการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ จาก 0 เป็น 20 deg	93
4.50	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อ ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน เปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg	94
4.51	ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน	94
4.52	การเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่ กลับหัวแปลงเข่าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายทดสอบ	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
บนพื้นปูน	95
4.53 การเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่ กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายทดสอบ บนพื้นดิน.....	95
4.54 ชุดวัดคัมคั่นคลัตช์และคั่นเกียร์	96
4.55 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบ วงเปิด.....	99
4.56 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบ วงปิด.....	99
4.57 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบ วงปิด.....	100
4.58 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยว หัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	100
4.59 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลง เข้าร่องถัดไป(D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย	101
4.60 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย.....	102
4.61 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา.....	103
4.62 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย.....	104

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.63 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา.....	105
4.64 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=0m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเลี้ยวไปทางซ้าย.....	106
4.65 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=0m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเลี้ยวไปทางขวา.....	107
ก.1 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วน เส้นทางโค้งเปลี่ยนขาเข้า(จาก B ไป P_1).....	114
ก.2 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งวงกลมขาเข้า(จาก P_1 ไป s_1).....	115
ก.3 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งวงกลมถอยหลัง จาก s_1 ไป.....	116
ก.4 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งวงกลมขาออก จาก s_2 ไป P_2	117
ก.5 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งเปลี่ยนขาออก จาก P_2 ไป C	118
ข.1 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง เข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	120
ข.2 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง เข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	120
ข.3 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง เข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	121
ข.4 ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์ เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	121
ข.5 มุมเลี้ยวเมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตร หักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	121
ข.6 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัว แปลงเข้าร่องเดิม กรณีหักเลี้ยวไปทางซ้ายจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูป-	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ลักษณะสามมิติ	122
ข.7 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 0 m กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย	122
ข.8 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	123
ข.9 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	123
ข.10 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	124
ข.11 ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา	124
ข.12 มุมเลี้ยว เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา	124
ข.13 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัว แปลงเข้าร่องเดิม กรณีหักเลี้ยวไปทางขวา จำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูป ลักษณะสามมิติ	125
ข.14 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 0 m กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา	125
ข.15 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางซ้าย.....	126
ข.16 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางซ้าย.....	126
ข.17 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ร่องทางซ้าย.....	127
ข.18 ทิศทางหน้ารถของรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย.....	127
ข.19 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย.....	127
ข.20 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัว แปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีไปร่องทางซ้าย จำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง รูปลักษณะสามมิติ	128
ข.21 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย.....	128
ข.22 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	129
ข.23 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	129
ข.24 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	130
ข.25 ทิศทางหน้ารถของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา.....	130
ข.26 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา.....	130
ข.27 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีไปร่องทางขวา จำลองสถานการณ์ด้วยแบบ จำลองรูปลักษณะสามมิติ.....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.28	
เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา.....	131
ข.29	
การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	132
ข.30	
การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	132
ข.31	
การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้า ร่องทางขวา.....	133
ข.32	
ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทาง.....	133
ข.33	
มุมเลี้ยว เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทาง.....	133
ข.34	
พฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกยตรกลับ หัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1m$) กรณีไปร่องทางขวาจำลองสถานการณ์ด้วยแบบ จำลองรูปลักษณะสามมิติ.....	134
ข.35	
เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา.....	134
ค.1	
การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรขณะเคลื่อนที่บนเส้น ทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	136
ค.2	
การเปรียบเทียบทิศทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกยตรขณะเคลื่อนที่บนเส้น ทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	136
ค.3	
การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกยตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับ เลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	136

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เข้าร่องขวา.....	140
ค.14 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทาง กลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา	140
ค.15 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยว หัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา	140
ง.1 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 1	143
ง.2 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 2	144
ง.3 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 3	145
ง.4 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 4	145
ง.5 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 5	146
ง.6 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 6	146
จ.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง เดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบ บนพื้นปูน	148
จ.2 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง เดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบ บนพื้นปูน	148
จ.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง เดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบ บนพื้นดิน.....	149
จ.4 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง เดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบ บนพื้นปูน	149
จ.5 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป(D=1)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับ ทดสอบบนพื้นปูน	150

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
เปิดทดสอบบนพื้นปูน	154
จ.15 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้า ร่องถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวง เปิดทดสอบบนพื้นดิน	155
จ.16 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้า ร่องถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวง เปิดทดสอบบนพื้นปูน	155
ฉ.1 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบ- คุมแบบวงเปิด	157
ฉ.2 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบ- คุมแบบวงปิด	157
ฉ.3 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบ- คุมแบบวงปิด	158
ฉ.4 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยว หัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา.....	158
ฉ.5 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้า ร่องถัดไป(D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา	159
ฉ.6 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบ- คุมแบบวงเปิด	159
ฉ.7 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบ- คุมแบบวงปิด	160

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.8 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	160
จ.9 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย	161
จ.10 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย	161
จ.11 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด	162
จ.12 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	162
จ.13 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	163
จ.14 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา	163
จ.15 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา.....	164
จ.16 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด	164
จ.17 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิม	

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	165
จ.18 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	165
จ.19 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	166
จ.20 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย.....	166
จ.21 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด	167
จ.22 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	167
จ.23 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด	168
จ.24 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	168
จ.25 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิม(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา.....	169

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันแรงงานวัยหนุ่มสาวจากภาคเกษตรหลังไหลสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตและบริการอย่างต่อเนื่อง เพราะแรงงานเหล่านี้เห็นว่าการทำงานการเกษตรเป็นงานที่หนักเหนื่อย ต้องพึ่งพาธรรมชาติ และมีรายได้ที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้จำนวนแรงงานในภาคเกษตรลดลง และแรงงานที่ทำงานอยู่มีอายุสูงขึ้น ปัญหาเหล่านี้จะทำให้ความเข้มแข็งของภาคเกษตรมีแนวโน้มถดถอยลง แนวทางหนึ่งที่จะสามารถช่วยให้การเกษตรกลายเป็นอาชีพที่ได้รับความนิยมมากกว่าปัจจุบันคือการนำเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ และระบบสารสนเทศ มาประยุกต์ใช้ในการเกษตร ซึ่งเรียกว่า การเกษตรแม่นยำ (precision agriculture) เทคโนโลยีนี้สามารถช่วยเหลือเกษตรกรในด้านต่าง ๆ เช่น ลดความเหนื่อยในการทำงาน 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 นอกจากนี้ในบางสถานการณ์เกษตรกรต้องเผชิญกับอันตรายจากสารเคมีที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมีและยาปราบศัตรูพืช เพื่อสร้างความปลอดภัยและความสะดวกสบายในการทำงานให้แก่เกษตรกร จึงมีความพยายามในการพัฒนาเครื่องจักรกลเกษตรให้สามารถทำงานได้โดย

อัตโนมัติ

งานวิจัยเกี่ยวกับแทรกเตอร์อัตโนมัติเกิดขึ้นอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เพราะว่ามี การนำเอาอุปกรณ์ไฮดรอลิกและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ ระบบ ถ่ายทอดกำลัง และระบบอื่น ๆ ของรถแทรกเตอร์มากขึ้น รวมไปถึงการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น เลเซอร์เซ็นเซอร์ กล้องวิดีโอ CCD และระบบระบุพิกัดบนพื้นโลก (global positioning system, GPS) มาใช้ในการเกษตร ปัจจุบันนี้เอื้ออำนวยต่อการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับการ สร้างรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ (autonomous tractor) ได้ง่ายขึ้น แต่รถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่ถูก พัฒนาขึ้นมาใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมของต่างประเทศไม่สามารถนำมาใช้กับพื้นที่เกษตรกรรมของ ประเทศไทยได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ เพราะความแตกต่างกันของสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และ เทคโนโลยีสนับสนุน ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติควรได้รับการพัฒนาให้ เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรและเทคโนโลยีของแต่ละประเทศ

รถแทรกเตอร์อัตโนมัติในประเทศอเมริกาและทวีปยุโรปถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองการใช้ งานในพื้นที่การเกษตรขนาดใหญ่ เพื่อลดความเมื่อยล้า เพิ่มความสะดวกสบายแก่เกษตรกร และลด ค่าใช้จ่ายด้านแรงงาน ในขณะที่รถแทรกเตอร์อัตโนมัติในประเทศญี่ปุ่นถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยเหลือ เกษตรกรซึ่งส่วนใหญ่เป็นผู้สูงอายุให้สามารถทำการเกษตรได้ โดยทั่วไปผู้ขับรถแทรกเตอร์จะต้อง รับภาระในการบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ พร้อมกับควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างอื่นให้ทำงาน ได้อย่างถูกต้อง ระบบขับเลี้ยวอัตโนมัติ (automatic steering) ถูกนำเข้ามาบังคับเลี้ยวรถ แทรกเตอร์แทนผู้ขับ ทำให้ผู้ขับสามารถควบคุมเครื่องมือและอุปกรณ์อย่างอื่นได้อย่างสะดวก ไม่ เมื่อยล้า และทำงานได้นานขึ้น สำหรับประเทศไทยถึงแม้ในปัจจุบันยังไม่เกิดวิกฤตด้านแรงงานใน ภาคการเกษตร แต่ในอนาคตอันใกล้ปัญหานี้มีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้น รถแทรกเตอร์ อัตโนมัติอาจจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการช่วยเหลือเกษตรกรไทยได้ อย่างไรก็ตามการวิจัยรถ แทรกเตอร์อัตโนมัติให้มีฟังก์ชันการทำงานที่สมบูรณ์เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรของ ประเทศจะต้องอาศัยการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะต้องใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน จึงจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องเริ่มงานวิจัยรถแทรกเตอร์อัตโนมัติอย่างจริงจัง

การพัฒนาฟังก์ชันการทำงานแก่รถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ เป็นการเพิ่มความสามารถ ให้แก่ตัวรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติให้สามารถปฏิบัติงานได้หลากหลายมากขึ้น เช่นการพัฒนา ระบบวางแผนเส้นทางให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้ การเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงก็ เป็นฟังก์ชันหนึ่งที่สามารถพัฒนาต่อยอดให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรของประเทศ เพราะลักษณะแปลงเกษตรในประเทศไทยมีขนาดเล็ก ทำให้ผู้ขับรถแทรกเตอร์ต้องทำการเลี้ยว กลับหัวแปลงบ่อยครั้ง ลักษณะการเลี้ยวกลับหัวแปลงที่ผู้ขับใช้มีรูปแบบหลากหลายขึ้นอยู่กับภาระ การทำงาน การเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลาเป็นรูปแบบหนึ่งที่ผู้ขับรถแทรกเตอร์เกษตรนิยมใช้

เพราะเหมาะกับการงานที่ต้องกลับรถเมื่อแถวถัดไปอยู่ใกล้กันเช่นการยกร่องปลูกด้วยพานยกร่อง การฉีดพ่นสารเคมี เป็นต้น และใช้พื้นที่กลับเลี้ยวหัวแปลงน้อย

การวิจัยในครั้งนี้ต้องการพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงานเกษตรของประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
- 1.2.2 เพื่อสร้างระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
- 1.2.3 เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
- 1.2.4 เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงที่ได้ออกแบบไว้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบทางปลาอุกออกแบบสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่ขับเคลื่อนตัวเปล่าหรือต่อพ่วงอุปกรณ์ด้วยระบบพ่วงแบบสามจุด
- 1.3.2 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติถูกดัดแปลงจากรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ที่ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์ต่าง ๆ และเครื่องระบุตำแหน่งภาคพื้นดิน
- 1.3.3 ระบบออกแบบเส้นทางและระบบควบคุมถูกทดสอบบนรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่เคลื่อนที่บนพื้นปูนราบเรียบ และพื้นดินที่ถูกเตรียมไว้ให้มีสภาพราบเรียบ ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ
- 1.4.2 ได้ระบบควบคุมสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่เคลื่อนที่กลับเลี้ยวหัวแปลง ที่มีเสถียรภาพ
- 1.4.3 ได้รถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่มีสมรรถนะ มีความเสถียรภาพ
- 1.4.4 ได้ผลทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงที่มีเสถียรภาพ
- 1.4.5 เป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาเส้นทางเดินของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติต่อไป

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาการออกแบบระบบควบคุมและระบบสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ นั้น มีองค์ประกอบให้ศึกษาอยู่หลายส่วนด้วยกัน อาทิเช่น โครงสร้างและหลักการการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ หัวใจสำคัญในการควบคุมและสั่งการรถแทรกเตอร์อัตโนมัติให้เคลื่อนที่บนเส้นทางที่ออกแบบไว้ประกอบด้วยสามส่วนคือ ระบบควบคุมมุมเลี้ยวรถแทรกเตอร์ ระบบประมาณตำแหน่งและระบบควบคุมรถให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ ซึ่งทั้งสามระบบต้องใช้หลักการทางระบบควบคุม และอุปกรณ์ตรวจวัด มาทำงานร่วมกัน จึงต้องมีความเข้าใจทฤษฎีของระบบควบคุมที่จะออกแบบ และหลักการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งทฤษฎีและหลักการดังกล่าวได้รวบรวมไว้ในบทนี้แล้ว

2.2 รถแทรกเตอร์

คธา วาทกิจ (2559) ได้เขียนอธิบายไว้ว่าปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคการเกษตรรวมไปถึงจำนวนพื้นที่ที่ลดลงเนื่องจากถูกเปลี่ยนไปเป็นที่อยู่อาศัยหรือใช้ทำกิจกรรมอื่น ๆ ส่งผลให้การทำการเกษตรจำเป็นต้องหาวิธีการในการเพิ่มจำนวนครั้งของการปลูกพืชต่อหนึ่งฤดูกาลหรือเพิ่มผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตมากเพียงพอต่อความต้องการของจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น รถแทรกเตอร์ถูกนำไปใช้ในทุกระดับขั้นตอนของการเพาะปลูกพืช อาทิเช่น การเตรียมพื้นที่แปลง การต่อพ่วงอุปกรณ์เพื่อปลูกพืช (เครื่องหยอดเมล็ด) การดูแลบำรุงรักษาพืช (เครื่องหว่านปุ๋ย/เครื่องฉีดพ่นสารเคมี) การเก็บเกี่ยว (เครื่องซุด) เป็นต้น แสดงให้เห็นว่าการทำงานของรถแทรกเตอร์นั้นได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของวิธีการทำการเกษตรในปัจจุบัน ส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ทางการเกษตร มีดังนี้

2.2.1 เครื่องยนต์ต้นกำลัง

ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนระบบต่างๆของรถแทรกเตอร์ อาทิเช่น ระบบขับเคลื่อน ระบบเพลลาอำนาจกำลัง และระบบไฮดรอลิก รวมทั้งระบบไฟฟ้า รถแทรกเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง เนื่องจากให้แรงบิดที่สูงกว่าเครื่องยนต์เบนซิน

2.2.2 ระบบขับเคลื่อน

เป็นระบบที่ทำให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปได้พร้อมทั้งออกแรงผลักดันไปในทิศทางที่ต้องการ ในระบบขับเคลื่อนจะประกอบด้วย

2.2.2.1 ระบบคลัตช์ ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบขับเคลื่อนกับเครื่องยนต์ต้นกำลัง ทำให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่หรือหยุดได้โดยไม่ต้องดับเครื่องยนต์

2.2.2.2 ระบบเกียร์ ทำหน้าที่ทดความเร็วและแรงบิดจากเพลลาของเครื่องยนต์ไปยังเพลลาขับเคลื่อน เพื่อให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วและแรงผลักดันตามต้องการ

2.2.2.3 ระบบเฟืองท้าย ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังจากระบบเกียร์ไปยังเพลลาขับเคลื่อน ทำให้ล้อขับเคลื่อนทั้งสองข้างหมุนด้วยความเร็วเท่ากันในขณะวิ่งตรง และจะหมุนด้วยความเร็วแตกต่างกันในขณะเลี้ยว

2.2.2.4 ระบบเฟืองทดเพลลา ล้อ ทำหน้าที่ทดรอบความเร็วของเพลลาเฟืองท้ายที่ส่งไปยังเพลลาขับเคลื่อนให้ช้าลง เพื่อเพิ่มแรงบิดที่เพลลาขับเคลื่อนให้สูงขึ้นอีก

2.2.2.5 ระบบเบรก ทำหน้าที่สำหรับบังคับการหยุดรถแทรกเตอร์

2.2.2.6 ระบบล้อ ทำหน้าที่ให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปบนพื้นดินได้ ประกอบด้วยล้อขับเคลื่อนและล้อควบคุมทิศทาง โดยปกติรถแทรกเตอร์มีทั้งแบบขับเคลื่อน 4 ล้อ และ 2 ล้อ

2.2.2.7 ระบบบังคับเลี้ยวควบคุมทิศทาง ประกอบด้วยกลไกทำหน้าที่ถ่ายทอดการควบคุมทิศทางจากผู้ขับไปยังล้อควบคุมทิศทาง

2.2.3 ระบบเพลลาอำนาจกำลัง

ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังจากเครื่องยนต์ต้นกำลังโดยผ่านเพลลาอำนาจกำลังไปยังอุปกรณ์ที่ต้องการกำลังจากการหมุนในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ให้ทำงาน เช่น เครื่องตัดหญ้า เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

2.2.4 ระบบไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิกประกอบด้วย บั้มไฮดรอลิก น้ำมันไฮดรอลิก ทางเดินน้ำมันไฮดรอลิก และวาล์วควบคุม บั้มไฮดรอลิกถูกขับเคลื่อนหรือได้รับกำลังจากเครื่องยนต์ต้นกำลัง ระบบไฮดรอลิกนอกจากจะใช้สำหรับยกหรือวางเครื่องมือที่ต่อพ่วงกับรถแทรกเตอร์แล้วยังช่วยผ่อนแรงในการควบคุมรถแทรกเตอร์ เช่น ระบบเบรก ระบบคลัตช์ ระบบบังคับเลี้ยว และยังสามารถต่อออกไปใช้กับเครื่องมือภายนอกตัวรถแทรกเตอร์ได้ เช่น การยกใบมีดหรือบั้งกี้น้ำหรืออุปกรณ์ที่ใช้มอเตอร์ไฮดรอลิกขับเคลื่อน เป็นต้น

2.2.5 ระบบต่อพ่วงเครื่องมือหรืออุปกรณ์เข้ากับรถแทรกเตอร์

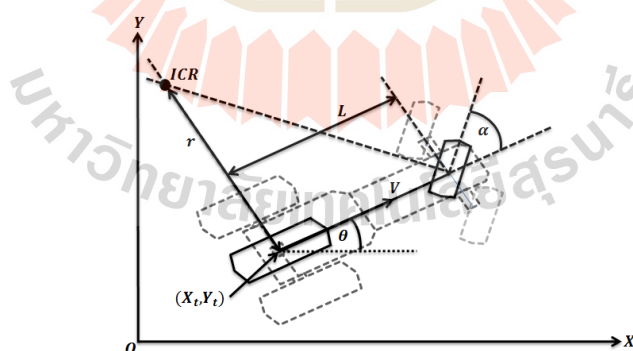
ระบบนี้จะประกอบด้วย คานลาก (drawbar) และหูพ่วงเครื่องมือแบบแขนพ่วง (linkage) สำหรับใช้ต่อพ่วงเครื่องมือหรืออุปกรณ์เข้ากับรถแทรกเตอร์ ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถควบคุมตำแหน่งการยกหรือวางได้โดยอาศัยระบบไฮดรอลิก

2.2.6 ระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าประกอบด้วย ตัวกำเนิดพลังงานไฟฟ้า (Generator) โดยอาศัยกำลังขับเคลื่อนจากเครื่องยนต์ ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าไปยังแบตเตอรี่ ระบบไฟแสงสว่างและไฟจราจร รวมทั้งอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น มอเตอร์สตาร์ทเครื่องยนต์ต้นกำลัง หัวเผาอากาศ ปัมเชื้อเพลิง หรือระบบจุดระเบิดโดยหัวเทียนในกรณีเครื่องยนต์ต้นกำลังเป็นเครื่องเบนซิน

2.3 แบบจำลองทางคิเนเมติกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร

การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เป็นการเคลื่อนที่แบบ นีออนโฮโลโนมิก (nonholonomic motion) เพราะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรถนั้น รถไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยตรง เนื่องจากรถไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในทุกทิศทางได้อย่างอิสระ แต่การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของรถนั้นจะขึ้นอยู่กับมุมของการเลี้ยว และความเร็ว ที่ป้อนให้แก่รถ สมมติให้การเคลื่อนที่สี่ล้อสี่ไม่เกิดการลื่นไถล รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองเรขาคณิตของรถแทรกเตอร์ ซึ่งมีสมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.4



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางคิเนเมติกส์ของรถแทรกเตอร์เกษตร

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = V \cos \theta \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = V \sin \theta \quad (2.2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{V \tan \alpha}{L} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{\tan \alpha}{L} \quad (2.4)$$

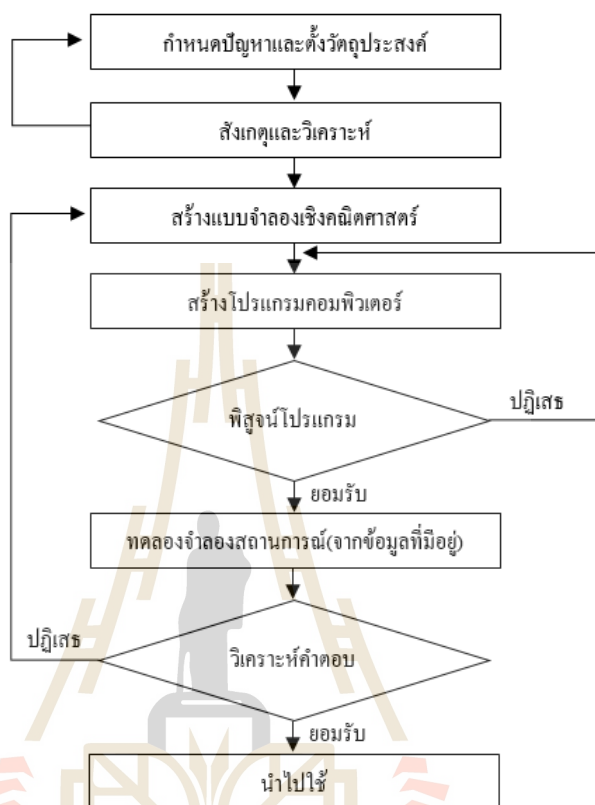
เมื่อ	X_t	คือระยะจากจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังถึงจุด(0,0)บนแกน X (m)
	Y_t	คือระยะจากจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังถึงจุด(0,0)บนแกน Y (m)
	α	คือมุมการหักเลี้ยว (deg)
	θ	คือทิศทางของหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X (deg)
	L	คือระยะห่างของล้อหน้าและหลัง (m)
	r	คือรัศมีการเลี้ยว (m)
	ICR	คือจุดศูนย์กลางวงเลี้ยว (m)

2.4 หลักการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์

สมยศ เชิญอักษร (2540) ได้เขียนอธิบายหลักการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ไว้ ดังนี้ ความต้องการที่จะเข้าใจปรากฏการณ์ต่างๆ ทางธรรมชาติทำให้มีการพัฒนาขั้นตอนต่างๆ เพื่อจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ขึ้น ถึงแม้ว่าการจำลองสถานการณ์ในแต่ละกรณีจะแตกต่างกันออกไปในเนื้อหารายละเอียด แต่ตรรกศาสตร์ในการจำลองสถานการณ์เหล่านั้นจะเหมือนกันทุกกรณี ลำดับของการจำลองสถานการณ์จะประกอบไปด้วยสิ่งต่างๆ ดังต่อไปนี้

- กำหนดปัญหาและตั้งวัตถุประสงค์
- สังเกตและวิเคราะห์ระบบ
- สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์
- สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- พิสูจน์โปรแกรม
- ทดลองจำลองสถานการณ์
- พิสูจน์เปรียบเทียบ

องค์ประกอบต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วแสดงในรูปที่ 2.2 ในแต่ละขั้นตอนของการจำลองสถานการณ์นั้น ไม่ได้แยกจากกันเด็ดขาดเสียทีเดียว แต่อาจมีการเหลื่อมหรือผสมขั้นตอนอื่นก็ได้



รูปที่ 2.2 กระบวนการของการจำลองสถานการณ์

2.4.1 การกำหนดปัญหาและตั้งวัตถุประสงค์

ขั้นตอนแรกของการจำลองสถานการณ์ ได้แก่ การกำหนดรายละเอียดต่างๆ ของระบบแล้วกำหนดขอบเขตของระบบให้ชัดเจน จากนั้นจึงกำหนดวัตถุประสงค์ของข้อปัญหาที่ต้องการแก้ไข ด้วยวิธีการเช่นนี้จะทำให้การสร้างแบบจำลองมีความประณีตใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุดเมื่อเทียบกับทรัพยากรหรือข้อมูลต่างๆ ที่มีอยู่ ตัววัตถุประสงค์นั้นเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าจะต้องหาคำตอบมากน้อยเพียงไรจากการจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองที่เลือกสร้างขึ้นไว้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการเชิงตัวเลขของคำตอบจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ทั้งสิ้น นอกจากนี้วัตถุประสงค์ยังเป็นตัวบ่งชี้ความมีประโยชน์ของแบบจำลองเอง รวมทั้งการทดลองเพื่อพิสูจน์เปรียบเทียบกับแบบจำลองนั้นด้วย

2.4.2 สังเกตและวิเคราะห์ระบบ

ขั้นตอนที่สองของการจำลองสถานการณ์ ได้แก่ การสังเกตปรากฏการณ์ทางธรรมชาติของระบบจริงภายในขอบเขตที่กำหนดไว้แล้ว จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์แยกระบบออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อหาลำดับการเกิดปรากฏการณ์ของแต่ละส่วนนั้น โดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ที่วางไว้เป็นหลัก

2.4.3 การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อใช้จำลองสถานการณ์นั้น ต้องใช้ตรรกศาสตร์ทั้งสองหัวข้อดังที่กล่าวมาแล้ว รวมทั้งความรู้พื้นฐานและทฤษฎีรองรับปรากฏการณ์ของระบบดังกล่าวด้วย โดยทั่วไปแล้วการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เริ่มต้นด้วยการตั้งสมมุติฐานของแบบจำลองให้ชัดเจนเพื่อย่อยระบบจริงลงมาให้ง่ายขึ้นและสามารถตรวจสอบแบบจำลองได้จริงในทางปฏิบัติ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นี้ก็คือสมการคณิตศาสตร์ ซึ่งอาจเป็นสมการเดี่ยวหรือเป็นระบบสมการก็ได้ ทั้งยังอาจเป็นสมการธรรมดาหรือสมการอนุพันธ์ก็ได้เช่นกัน

2.4.4 การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดอันหนึ่งของการจำลองสถานการณ์ การใช้อัลกอริทึม (algorithm) ของโปรแกรมเพื่อแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้หลักเชิงตัวเลขนั้น ต้องอาศัยความรู้ทางเทคนิคเฉพาะด้านมาประกอบทั้งนี้เพราะอัลกอริทึมแต่ละแบบจะมีประสิทธิภาพสูงก็ต่อเมื่อได้ใช้กับสมการทางคณิตศาสตร์ชนิดใดชนิดหนึ่งเท่านั้น การใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมนอกจากจะทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการรันโปรแกรมแล้วยังทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นลดน้อยลงอีกด้วย

2.4.5 การพิสูจน์โปรแกรม

การพิสูจน์โปรแกรมเป็นการจำลองสถานการณ์ขั้นพื้นฐาน โดยอาศัยข้อมูลเท่าที่มีอยู่ การพิสูจน์โปรแกรมทำได้โดยการป้อนค่าคงที่ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบให้กับโปรแกรม ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องเป็นค่าที่ถูกต้อง การพิสูจน์โปรแกรมนี้เป็นการปฏิบัติเพื่อสังเกตคุณลักษณะของโปรแกรมว่าสามารถให้คำตอบออกมาได้หรือไม่ ขนาดหรือปริมาณของคำตอบยังไม่ใช่สิ่งสำคัญของขั้นตอนนี้ โปรแกรมที่ใช้ได้คือโปรแกรมที่ให้คำตอบแบบเสถียร (stable) หรือเบนเข้าหาค่าคงที่ (converge) หากโปรแกรมไม่ผ่านการพิสูจน์ในขั้นนี้ ก็จำเป็นต้องย้อนกลับไปสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใหม่โดยใช้อัลกอริทึมอื่น

2.4.6 การทดลองจำลองสถานการณ์

หลังจากทดสอบว่าโปรแกรมทำงานได้แล้ว จึงเริ่มป้อนข้อมูลจริงๆ ที่เป็นตัวแปร

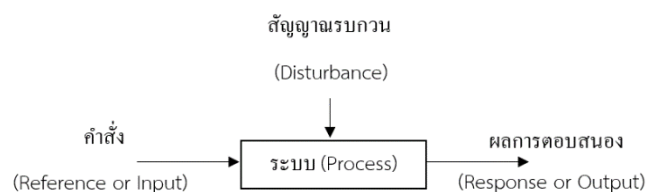
อิสระให้กับแบบจำลองแล้วสังเกตผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ขณะนี้ตัวแบบจำลองจะทำหน้าที่เสมือนเป็นตัวแทนระบบจริง คุณสมบัติที่เคลื่อนไหวของแบบจำลองอันเนื่องมาจากการป้อนค่าต่างๆ จะถือเสมือนคุณสมบัติที่เคลื่อนไหวของระบบจริง ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ออกมาต้องเก็บบันทึกไว้โดยละเอียดเพื่อนำไปพิสูจน์เปรียบเทียบในขั้นสุดท้ายต่อไป

2.4.7 การพิสูจน์เปรียบเทียบ

การจำลองสถานการณ์ใดๆก็ตามจะไร้ประโยชน์อย่างสิ้นเชิง หากมิได้มีการเปรียบเทียบกับปรากฏการณ์จริงๆ โดยทั่วไปแล้วหากปรากฏการณ์จริงๆ มีความสลับซับซ้อนมาก หรือต้องเกี่ยวข้องกับตัวแปรจำนวนมากๆ เราอาจจัดการออกแบบการทดลองขึ้นเพื่อศึกษาคุณลักษณะของตัวแปรเป็นส่วนตัวได้ หลักและวิธีการในการออกแบบการทดสอบนั้นต้องใช้พื้นฐานความรู้ทางสถิติเข้าช่วยเป็นอย่างมาก ความแม่นยำของผลลัพธ์จึงขึ้นอยู่กับอัลกอริธึมของโปรแกรมและวิธีการทางสถิติที่ใช้ประกอบกันนั้น ถ้าหากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองสถานการณ์แตกต่างจากระบบจริงมากจนไม่อาจยอมรับได้ เราจำเป็นต้องย้อนกลับไปวิเคราะห์ระบบใหม่เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบใหม่ขึ้น แล้วทำขั้นตอนทั้งหมดซ้ำอีกครั้งจนกว่าจะได้ผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์เป็นที่ยอมรับได้ว่าเหมือนผลลัพธ์จากระบบจริง

2.5 ระบบควบคุม (control system)

สุชาติ จันทรจรมานิตย์ (2551) อธิบายว่าระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 2.3 คือตัวระบบ (system) ที่มีกระบวนการในการบังคับหรือสั่งการควบคุมเอาต์พุตที่ได้ให้มีค่าตามที่ต้องการ โดยการป้อนค่าอินพุตที่เหมาะสมให้ ซึ่งสามารถแบ่งพัฒนาการของระบบควบคุมตามยุคสมัยได้ 2 ยุค คือ ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม และระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ อีกทั้งยังแบ่งรูปแบบของการควบคุมได้ 2 ชนิด คือ ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด และระบบควบคุมแบบวงรอบปิด



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

2.5.1 ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม (classical control system)

เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกที่มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่

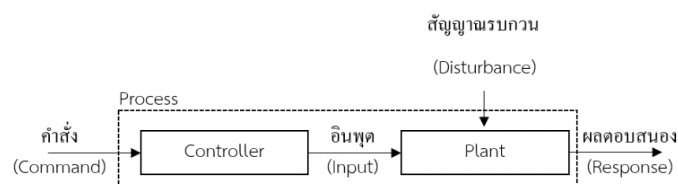
ไม่ซับซ้อนมาใช้ควบคุมระบบที่เป็นเชิงเส้น (linear system) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (time-invariant system) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ก็จะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ ได้แก่ ระบบควบคุมพีไอดี (pid controllers) เส้นทางเดินราก (root locus) แผนภาพโบด (bode plot) และแผนภาพไนควิสต์ (nyquist plot) เป็นต้น

2.5.2 ระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control)

เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงหลังอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ที่จำกัดการนำไปใช้งานกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (linear system) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (time-invariant System) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear system) และแปรเปลี่ยนตามเวลา (time-variant system) โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมักมีข้อจำกัดในการใช้งานกับระบบประเภทนี้ จึงได้มีการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการควบคุมแบบใหม่ขึ้นมา ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ ได้แก่ ระบบที่อาศัยรูปแบบที่อาศัยรูปแบบของสมการสเตต (state variable) ในการคำนวณ ระบบควบคุมความเหมาะสม (optimal control) ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (adaptive control) ระบบควบคุมลูกผสม (hybrid control) โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และตรรกศาสตร์คลุมเครือ (fuzzy logic) เป็นต้น

2.5.3 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (open loop control)

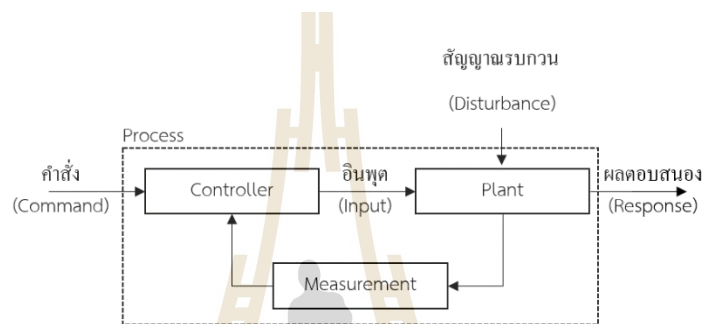
ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในการควบคุมแบบวงรอบเปิดตัวควบคุม (controller) จะส่งสัญญาณป้อน (input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (command or reference) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (response) ให้ได้ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิงที่ตั้งไว้ โดยไม่นำสัญญาณเอาต์พุตจริงมาตรวจสอบว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

2.5.4 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (closed loop control)

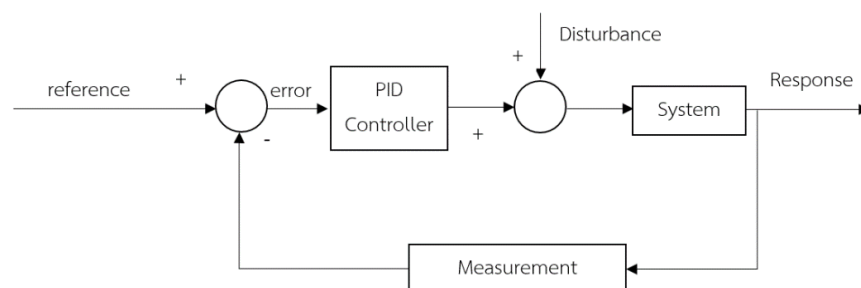
ลักษณะของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าอ้างอิงหรือคำสั่ง (referent input or command) กับสัญญาณเข้าที่พุดหรือผลตอบสนอง (output or response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับที่ติดตั้งไว้ (measurement or sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (system under controller or plant) เพื่อที่จะให้ผลผลิตเข้าที่พุดหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

2.6 ตัวควบคุมพีไอดี (pid controller)

กองพัน อารีรักษ์ (2560) และวิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2556) กล่าวว่าตัวควบคุมส่วนใหญ่ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการคือ ตัวควบคุมพีไอดี โดยต่ออนุกรมกับระบบที่ต้องการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และมีสมการคำนวณตามสมการที่ 2.5 เดชฤทธิ์ มณีธรรม (2560) เขียนสรุปคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ พีไอ ดี พีไอดีและข้อดี ข้อเสียไว้ตามตารางที่ 2.1 - 2.2



รูปที่ 2.6 ตัวควบคุมพีไอดี ที่ต่อเข้าในระบบแบบอนุกรม

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.5)$$

โดย $u(t)$ คือสัญญาณควบคุม $e(t)$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ ตัวควบคุมพีไอดีประกอบไปด้วยเทคนิคการควบคุมพื้นฐาน 3 แบบ ได้แก่ การควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control) การควบคุมแบบปริพันธ์ (integral control) และการควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative control) แต่ละการควบคุมสามารถนำมาใช้ร่วมกันเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่ต้องการ ตัวควบคุมมีพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่าเวลาคงตัว (T_i) และเวลาที่ใช้ในการอนุพันธ์ (T_d) แต่ละการควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (proportional control)

การควบคุมแบบสัดส่วนเป็นการควบคุมสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความผิดพลาดปัจจุบันที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อลดปริมาณค่าความผิดพลาดของระบบ ซึ่งสามารถเขียนสมการการคำนวณได้ตามสมการที่ 2.6 การควบคุมเหมาะสมกับกระบวนการที่ต้องการการตอบสนองรวดเร็วและยอมให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดคงที่ขนาดหนึ่งได้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.6)$$

2.6.2 การควบคุมแบบปริพันธ์ (integral control)

การควบคุมแบบปริพันธ์เป็นการควบคุมในระบบหรือแก้ไขความคลาดเคลื่อนด้วยการอินทิกรัลค่าคลาดเคลื่อน ทำให้กำจัดหรือลดค่าคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว แต่จะส่งผลทำให้ผลตอบสนองช่วงขณะมีประสิทธิภาพลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.7

$$u(t) = K_p \left(\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt \right) \quad (2.7)$$

2.6.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์เป็นการควบคุมในระบบหรือแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น โดยในระบบสัญญาณเข้าที่พุดจะถูกอนุพันธ์ค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อค่าสัญญาณความคลาดเคลื่อนคงที่ตัวอนุพันธ์จะให้สัญญาณออกเป็นศูนย์จึงไม่สามารถนำไปใช้ลำพังได้ ข้อดีของตัวควบคุมคือจะส่งผลให้การตอบสนองช่วงขณะมีประสิทธิภาพลดลง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดัง

สมการที่ 2.8

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.8)$$

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวควบคุมแบบ พีไอ พีดี พีไอดี ⁽¹⁾

คุณสมบัติ	ตัวควบคุมแบบพีไอ	ตัวควบคุมแบบพีดี	ตัวควบคุมแบบพีไอดี
ความเร็วในการตอบสนอง	เร็ว	เร็วมาก	เร็วมาก
ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงที่	มีค่าเป็นศูนย์	มีเกิดขึ้น	มีค่าเป็นศูนย์

⁽¹⁾ หมายเหตุ จาก คัมภีร์การใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (234), โดยเดชฤทธิ์ มณีธรรม, 2560, บริษัท วี.พีเอ็น(1991)จำกัด : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัดมหาชน.

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ⁽¹⁾

คุณสมบัติ	ตัวควบคุมแบบพี	ตัวควบคุมแบบไอ	ตัวควบคุมแบบดี
ความเร็วในการตอบสนอง	เร็ว	ช้า	เร็วมาก
ความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงที่	มีเกิดขึ้น	มีค่าเป็นศูนย์	ไม่สามารถควบคุมได้
หมายเหตุ			ไม่สามารถใช้ได้ตาม ถ้าพัง

⁽¹⁾ หมายเหตุ จาก คัมภีร์การใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (234), โดยเดชฤทธิ์ มณีธรรม, 2560, บริษัท วี.พีเอ็น(1991)จำกัด : บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัดมหาชน.

2.7 ซอฟต์แวร์สำเร็จรูปโปรแกรม LabVIEW

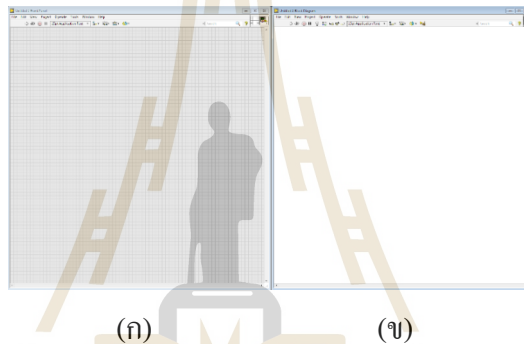
อรรถพล อารณพงษ์ (2559) ใช้โปรแกรม LabVIEW มาใช้ในการพัฒนาโปรแกรมระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถไถเดินตาม ทำให้จัดการกับข้อมูลของชุดทดสอบได้ง่ายและรวดเร็ว

ขงยุทธ์ เสียงดัง พยุงศักดิ์ จุลยุเสน และธีรวัฒน์ เจเถื่อน (2559) ใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับบอร์ด myRIO มาใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมปลายแขนกลกรีดยางพารา ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและใช้อุปกรณ์ควบคุมน้อยมีความเสถียรภาพสูง

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, กวี คงมั่น และขงยุทธ์ เสียงดัง (2559) ใช้โปรแกรม LabVIEW มาใช้พัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์สำหรับจำลองระบบออกแบบเส้นทางรถเคลื่อนที่สำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล พบว่าการใช้งาน โปรแกรมสามารถ

ลดขั้นตอนการเขียน โปรแกรม สามารถจัดการกับข้อมูลได้ง่ายและมีการแสดงผลในขณะทดสอบได้ LabVIEW จึงถูกนำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศิริ (2554) กล่าวว่า LabVIEW คือ ชุดพัฒนาแอปพลิเคชัน เพื่อใช้ในการสร้างระบบการวัด ระบบทดสอบ และระบบควบคุม โดยการใช้การเขียนโปรแกรมด้วยภาษาโค้ดรูปภาพ (graphical programming) และมีการต่อสายส่งค่าข้อมูลคล้ายกับการวาดภาพที่เข้าใจได้ง่าย LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้าง เครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW ถูกเรียกว่า Virtual Instrument (VI) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Front Panel และ Block Diagram แสดงดังรูปที่ 2.7

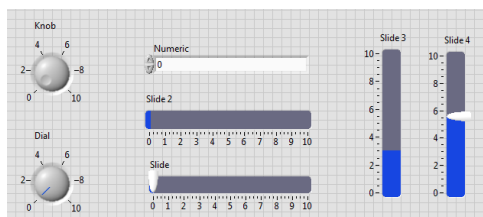


รูปที่ 2.7 ส่วนประกอบหลักของโปรแกรม LabVIEW (ก) Front Panel (ข) Block Diagram

Front Panel

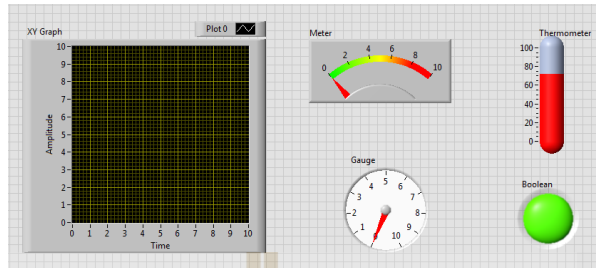
Front Panel มีหน้าที่แสดงผล รับคำสั่งจากผู้ใช้งาน โดยแบ่ง Object ที่วางอยู่บน Front Panel เป็นสามประเภทคือ

1) Control คือส่วนสำหรับรับค่าจากผู้ (input) เช่นปุ่มเลื่อน ปุ่มหมุน สวิตช์ กล้องใส่ข้อความ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.8



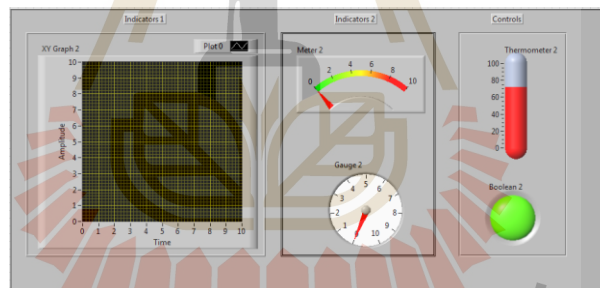
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการใช้ Control

2) Indicator คือ ส่วนที่ใช้แสดงค่า (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถป้อนค่าผ่านช่องทางนี้ได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ หลอดไฟ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการใช้ Indicator

3) Decoration คือ object ที่วางไว้เพื่อความเป็นระเบียบและความสวยงามของจอแสดงผล เช่น เส้นแบ่ง ข้อความ (Free label) ภาพประกอบ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.10



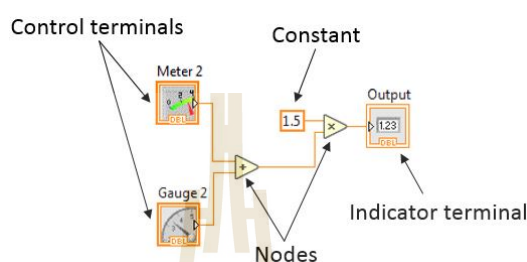
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการใช้ Decoration

Block Diagram

Block Diagram เป็นส่วนแสดง Source Code ของโปรแกรม ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปของภาษา G (graphical) Programming การเขียนโปรแกรมด้วยภาษา G มีหลักการเขียนต่างจากภาษาอื่น คือ เชื่อมจุดต่างๆเข้าด้วยกันแทนการเขียน Code คำสั่ง ทำให้ลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมแสดงตัวอย่างการเขียนดังรูปที่ 2.11 object ที่อยู่บน block diagram ที่สำคัญมีอยู่หกประเภทหลักคือ

- 1) Terminal คือ ไอคอนที่เกิดจากการสร้าง Control/Indicator
- 2) Constant คือ ข้อมูลที่เป็นค่าคงที่ ที่ผู้เขียน โปรแกรมกำหนดไว้
- 3) Node คือ บล็อกที่มีการประมวลผลอยู่ภายใน

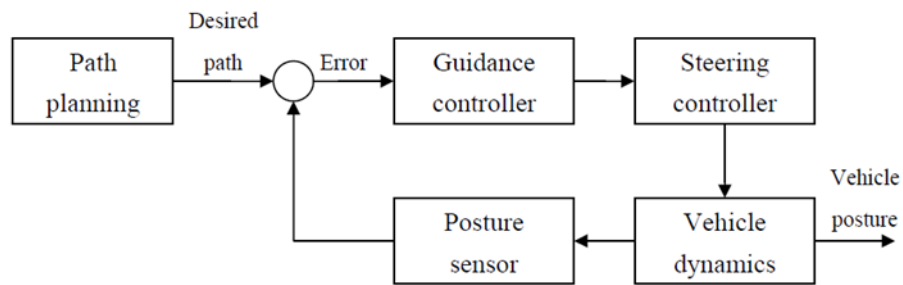
- 4) Wire คือสายที่ใช้สำหรับส่งผ่านข้อมูลจากไอคอนหนึ่งไปยังไอคอนหนึ่ง
- 5) Structure คือ กรอบที่ล้อมโค้ดไว้ สำหรับควบคุมการทำงานของโค้ดที่อยู่ภายใน เช่น While Loop For loop เป็นต้น
- 6) Decoration คือกราฟิกที่ใช้จัดระเบียบหรือเขียนอธิบายการทำงานของของโค้ด ซึ่งไม่มีผลต่อการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างการเขียน object บน block diagram

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการสร้างรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ไฮดรอลิก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเซนเซอร์ต่างๆ เข้ากับรถแทรกเตอร์แบบเดิม ซึ่งจะทำให้รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสามารถปฏิบัติงานทางการเกษตรได้อย่างเหมาะสม ระบบนำวิถีส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ชุดเซนเซอร์สำหรับระบุตำแหน่งของตัวรถ ตัวออกแบบเส้นทาง ชุดควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ และชุดบังคับเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.12 Stombaugh, Benson, and Hummel (1999) ได้เขียนอธิบายการทำงานของระบบควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ไว้ว่า ระบบควบคุมวิธีการเคลื่อนที่ที่จะคำนวณหาค่าสั่งบังคับเลี้ยวที่เหมาะสมตามค่าที่ตัววางแผนเส้นทางระบุไว้ แล้วส่งสัญญาณให้ชุดบังคับเลี้ยวเพื่อบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ต่อไป การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติกระทำอย่างกว้างขวางในกลุ่มประเทศพัฒนาแล้ว (Keicher and Seufert, 2000; Reid, Zhang, Noguchi and Dickson, 2000; Torii, 2000; Noguchi, Ishii and Terao 1997; Takigawa, Sutiarto, Koike, Kurosaki and Hasegawa, 2002; Astrand and Baerveldt, 1999; Sogaard and Olsen, 2003) และกำลังริเริ่มในประเทศไทย (เกรียงไกร แซมสีม่วง, มนุสศักดิ์ จานทอง, กระจวี ตรีอำนาจ และวิชา อุภักย์, 2560; ฉัตริน เรืองจอหอ, ชีรวัฒน์ เจเดือน, กมลชนน วงศ์สถาน และพยุงศักดิ์ จุลยุเสน, 2561; ชีรวัฒน์ เจเดือน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, ธธา วาทกิจ และจรูญศักดิ์ สมพงษ์, 2559) จากการค้นคว้าสามารถสรุปได้ดังนี้

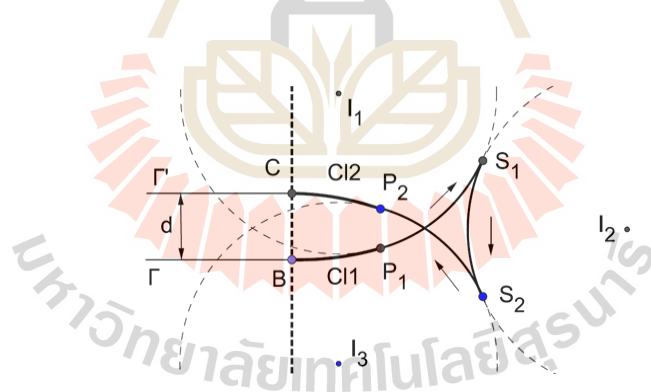


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของระบบนำวิถี

2.8.1 การพัฒนาขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทาง

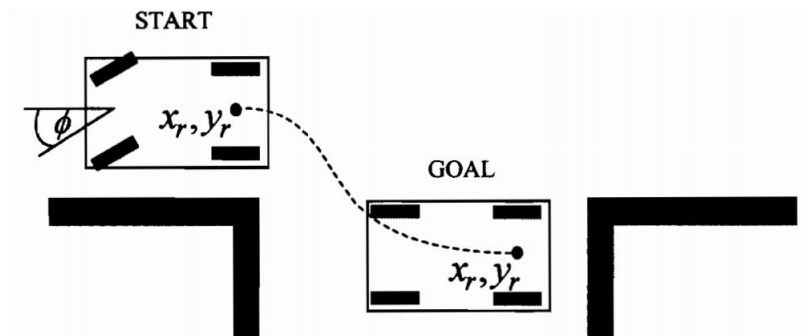
De Luca, Oriolo and Samson (1998) ได้เขียนอธิบายการเคลื่อนที่ของรถอัตโนมัติว่ามีพื้นฐานการเคลื่อนที่ 3 แบบคือ Point to point Path following และ Trajectory tracking

Cariou, Lenain, Thuilot and Martinet (2009) ได้ออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงเริ่มจากการออกแบบเส้นทางจาก B ไป P_1 โดยใช้คุณสมบัติของเส้นโค้งแบบ Clothoid ต่อมาออกแบบเส้นทางจาก P_1 ไป s_1 s_1 จนถึง P_2 โดยใช้คุณสมบัติของโค้งวงกลม สุดท้ายจะทำการออกแบบเส้นทางจาก P_2 ไป C โดยใช้คุณสมบัติของเส้นโค้งแบบ Clothoid ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการวางแผนเส้นทางรถกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบ fish-tail

อมร วรชมพู (2553) นำเสนอการออกแบบเส้นทางเคลื่อนที่ของการจอดรถแนวขนานโดยใช้วิธีผสมระหว่างเบสเฟริสและไปโคเร็กซ์ชันนัล คือระบบจะค้นหาเส้นทางจากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งจอดและค้นหาจากตำแหน่งที่จอดมายังตำแหน่งเริ่มต้นจากนั้นจะนำเส้นทางทั้งสองมาหาจุดเชื่อมต่อเพื่อให้ได้เส้นทางในการถอยเข้าจอด ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 เส้นทางรถออกรถเข้าจอดแบบขนาน

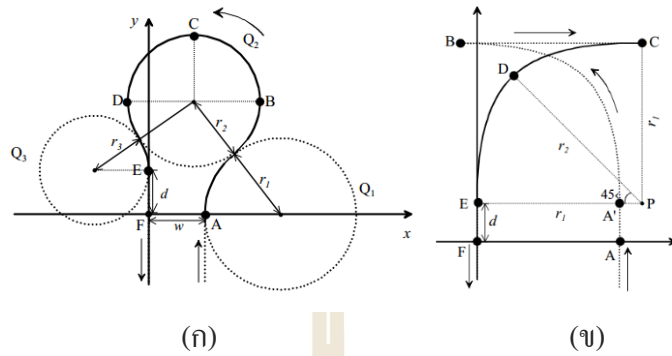
อมรศรี กิจวงศ์วัฒนะ (2551) ได้พัฒนาวิธีนำทางในรถอัตโนมัติด้วยอัลกอริทึมแบบเพลย์แบ็ก (Playback Algorithm) ประกอบด้วยขั้นตอนการบันทึกเพื่อเก็บข้อมูลของรถจากการตั้งงานควบคุมและข้อมูลจากเซนเซอร์มาประมวลตำแหน่งในแต่ละเวลา สร้างเป็นเส้นทางอ้างอิงให้กับขั้นตอนการเพลย์แบ็ก เพื่อให้รถเคลื่อนที่อัตโนมัติตามเส้นทางที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพถ่ายทางอากาศของสนามและเส้นทางรถเคลื่อนที่

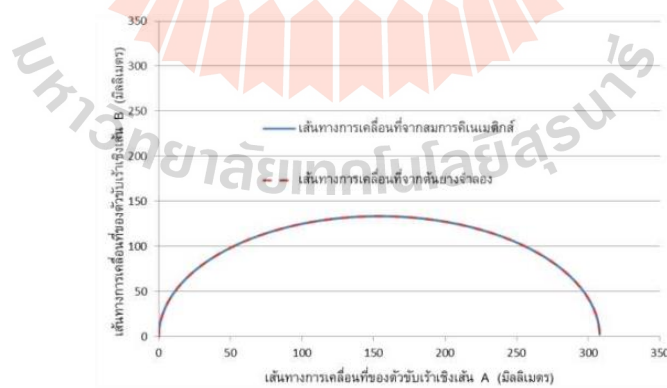
Kise, Noguchi, Ishii and Terao (2002) ได้สร้างขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง โดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันเส้นโค้งกำลังสาม เส้นทางถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบตามพฤติกรรมรถเคลื่อนที่ คือ 1.เคลื่อนที่ไปข้างหน้า 2.เคลื่อนที่ไปและถอยกลับ เส้นทางถูกสร้างขึ้น

จากข้อจำกัดของรถได้แก่ รัศมีวงเลี้ยวแคบสุดและความเร็วการหักเลี้ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวเปลง (ก) แบบเคลื่อนที่ไปข้างหน้า
(ข) แบบเคลื่อนที่ไปและถอยกลับ

ขงยุทธ์และคณะ (2559) ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีออกแบบเส้นทางที่เหมาะสมของปลายแขนกล เส้นทางถูกแบ่งออกเป็นสองแกนตามการออกแบบเครื่องกรีดยางอัด โนมัติ โปรแกรมสร้างเส้นทางถูกพัฒนาบน โปรแกรม LabVIEW จากผลทดสอบพบว่าเส้นทางเคลื่อนที่ที่สร้างขึ้นจากสมการเส้นตรงและสมการวงรีเป็นเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการกรีดยางบนต้นยางจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 เส้นทางเคลื่อนที่แบบเส้นตรงรวมกับแบบครึ่งวงรี
เปรียบเทียบกับเส้นทางเคลื่อนที่จากต้นยางจำลอง

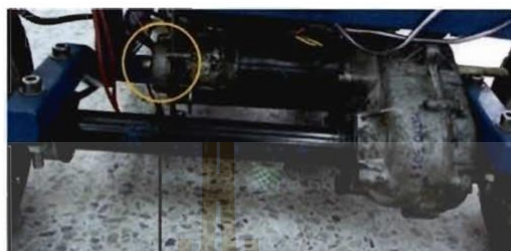
2.8.2 การพัฒนาระบบระบุตำแหน่ง

การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งมีการพัฒนาอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยการนำระบบระบุตำแหน่งที่มีมาประยุกต์ใช้เช่น งานวิจัยของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (O'Connor, Elkaim and Parkinson, 1995 1996; Bell 1999, 2000) ได้พัฒนาระบบระบุตำแหน่งด้วย four-antenna carrier phase GPS ติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ John Deere รุ่น 7800 ทำงานบนแปลงเกษตร พบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนของทิศทางหน้ารถ 1 deg และความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง 2.5 cm งานวิจัยของมหาวิทยาลัยอิลลินอยส์ (Stombaugh, Benson and Hummel, 1998) ได้พัฒนาระบบระบุตำแหน่งด้วยระบบ RTK GPS ติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Case รุ่น 2WD 7720 พบว่าเมื่อทดสอบให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 4.5 m/s ระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง 16 cm ศูนย์วิจัย national agricultural research center (NARC) ได้พัฒนารถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Inoue, Otsuka, Sugimoto and Murakami, 1997) และได้พัฒนารถแทรกเตอร์สำหรับดำนาอัตโนมัติต้นแบบ (Nagasaka, Otani, Shigeta and Taniwaki, 1998; Nagasaka, Taniwaki, Otani and Shigeta, 2002) รถคันนี้ถูกดัดแปลงมาจากรถแทรกเตอร์ดำนาธรรมดา โดยใช้ programmable logic controller (PLC) เป็นตัวควบคุมระบบขับเคลื่อนของรถ และใช้ real-time kinematics GPS (RTK-GPS) ในการระบุตำแหน่งของรถดังแสดงในรูปที่ 2.18 (Nagasaka, Otani, Shigeta and Taniwaki, 1998; Nagasaka, Taniwaki, Otani and Shigeta, 2002) ยังมีวิธีการระบุตำแหน่งอีกหลายรูปแบบเช่นวิธีการระบุตำแหน่งแบบการประมวลผลด้วยภาพ (Fehr and Gerrish, 1995; Gerrish, Fehr, Van Ee, and Welch, 1997; Reid, 1987; Reid and Searcy, 1986; Ollis and Stentz, 1996, 1997) การระบุตำแหน่งด้วยเลเซอร์เซนเซอร์ (Holmqvist, 1993; Yoshida, 1996) และวิธีการระบุตำแหน่งด้วยวิธี dead reckoning (Barshan and Durrant-Whyte, 1995; Goel, Roumeliotis and Sukhatme, 1999.) และมีงานวิจัยที่นำมาเป็นแนวคิดในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งของงานวิจัย มีดังนี้



รูปที่ 2.18 รถดำนาอัตโนมัติของ NARC

อมร วรชมพู (2553) ได้พัฒนารถจำลอง วัดระยะทางเคลื่อนที่ด้วยเซ็น โคลดเดอร์ติดตั้งอยู่บริเวณมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อหลังดังรูปที่ 2.19 และใช้เซ็นเซอร์เลเซอร์ระยะทางแบบการวางตัวของรถ ซึ่งเลือกใช้เซ็นเซอร์ชื่อ Honeywell เบอร์ HMC6352 และเลือกใช้ตัวกรองแบบ Moving average filter มาลดความผิดพลาดในการวัด



เซ็น โคลดเดอร์วัดระยะทาง

รูปที่ 2.19 ตำแหน่งติดตั้งเซ็น โคลดเดอร์วัดระยะทาง

อมรศรี กิจวงศ์วัฒน์ (2551) ได้พัฒนารถขับเคลื่อนอัตโนมัติ เลือกใช้การประมาณตำแหน่งแบบ Odometry ใช้หลักการแปลงจากจำนวนรอบการหมุนของล้อที่วัดได้ ให้เป็นระยะเชิงเส้นที่เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งก่อนหน้า โดยเลือกใช้เซ็น โคลดเดอร์แบบเพิ่มค่า รุ่น E6B2-CWZ6C ความละเอียด 300 พัลส์ต่อรอบติดตั้งอยู่ที่เพลลาของล้อหลังดังรูปที่ 2.20 ร่วมกับการหาตำแหน่งแบบสัมบูรณ์จากระบบบอกตำแหน่งพิกัดบนโลกหรือ GPS โดยเลือกใช้ฟิลเตอร์แบบปรับค่าได้ (Adaptive filter) ทำให้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากระบบ GPS มีผลกระทบต่อการประมาณตำแหน่งน้อยลง



รูปที่ 2.20 ตำแหน่งติดตั้งเซ็น โคลดเดอร์วัดระยะทาง

Murayama, Oshima, and Nagai (1994) ได้พัฒนาการคำนวณตำแหน่งของรถอัตโนมัติ ด้วยการวัดระยะทางที่รถเคลื่อนที่ไปได้จากการตรวจนับการหมุนของล้อและพวงมาลัยรถ และใช้การวัดระยะอ้างอิงเทียบกับตัวสะท้อนที่ติดตั้งตามเส้นทาง มีข้อดีที่ระบบมีการคำนวณไม่ซับซ้อน ใช้เซนเซอร์น้อยและทำงานได้ถูกต้องแม่นยำ เพราะมีการปรับแก้ค่าผิดพลาดของการวัดแบบ Odometry กับจุดสังเกตทุกระยะ แต่มีข้อเสียที่ต้องติดตั้งแผ่นสะท้อนตลอดเส้นทางรถเคลื่อนที่

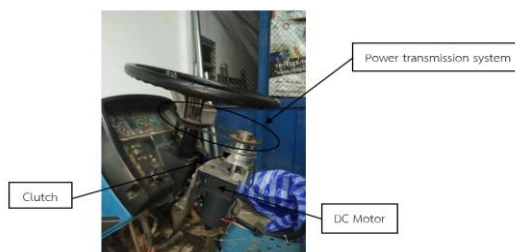
2.8.3 การพัฒนาชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

อมร วรชมพู (2553) ได้พัฒนาระบบควบคุมการเลี้ยวสำหรับควบคุมรถอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น มีแผนผังการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.21 ค่าเกน PID ได้จากการปรับจูนด้วยมือการวัดขนาดของมุมเลี้ยวจะใช้โพเทนซีโอมิเตอร์ปรับค่าได้ติดตั้งกับแกนเลี้ยว มีมุมการเลี้ยวสูงสุด ± 35 องศา และใช้ Moving average filter ในการกรองสัญญาณ



รูปที่ 2.21 แผนผังระบบควบคุมการเลี้ยว

ฉัตริน เรืองจอหอและคณะ (2561) ได้ออกแบบชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก ชุดบังคับเลี้ยวประกอบไปด้วย มอเตอร์กระแสตรงขนาด 24 V ครัทช์ ชุดเฟืองโซ่ และชุดจับยึด สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ด้วยอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวสูงสุดเท่ากับ 25 deg/s เมื่อใช้กำลังมอเตอร์ 24 W ชุดบังคับเลี้ยวแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

2.8.4 การพัฒนาการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมพวงมาลัยของรถทางการเกษตรเคลื่อนที่อัตโนมัติ (Marchant, Hague and Tillett, 1997; Nagasaka, Umeda, Kanetai, Taniwaki and Sasaki, 2004; Takigawa et al., 2002) ในงานวิจัยนี้ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับถูกออกแบบโดยใช้เทคนิคการวางตำแหน่งโพล สมรรถนะการตอบสนองของระบบควบคุมถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ จากการค้นคว้าบทความในประเทศไทยพบว่างานวิจัยส่วนการพัฒนาการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ทางการเกษตรถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากงานวิจัยของ เกรียงไกร แซมสีม่วง, มนุศศักดิ์ จานทอง, และวิชา อุปภัย (2559) ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมพีไอดีสำหรับรถแทรกเตอร์เกษตรเคลื่อนที่อัตโนมัติไร้คนขับ การออกแบบตัวควบคุมได้กำหนดตัวแปรสำหรับการควบคุม 2 ตัวแปรคือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่และทิศทางหน้ารถเพื่อควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด ทำการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ผลการทดสอบพบว่าขั้นตอนวิธีควบคุมที่ได้ออกแบบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี สามารถควบคุมตำแหน่งของรถให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้และมีค่าความผิดพลาดสูงสุด 0.065 m ในปี 2560 เกรียงไกร แซมสีม่วงและคณะ ได้นำเสนอผลการพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS ดังแสดงในรูป 2.23 เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากบทความของ เกรียงไกร แซมสีม่วงและคณะ (2559) จากการนำระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ไปใช้กับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นพบว่าระบบควบคุมทิศทางและตำแหน่งสามารถควบคุมให้รถแทรกเตอร์อัตโนมัติเคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่ได้แต่ขณะที่รถแทรกเตอร์อัตโนมัติเคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเร็วคงที่ รถแทรกเตอร์อัตโนมัติจะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งค่อนข้างคงที่



รูปที่ 2.23 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

2.9 รายการอ้างอิง

- กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศิริ. (2554). **LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม**. บริษัท วี.พรีนท์(1991)จำกัด:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัดมหาชน.
- เกรียงไกร แซมสีม่วง, มนุศักดิ์ จานทอง และวิชา อุปกัย. (2559). การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถได้อัตโนมติ. **การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ราชธานีวิชาการ ครั้งที่ 1**: 319-330.
- เกรียงไกร แซมสีม่วง, มนุศักดิ์ จานทอง, กระจวี ตรีอำรรค และวิชา อุปกัย. (2560). การพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่. **วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 23 (1)**: 39-54.
- กองพัน อารีรักษ์. (2560). **ระบบควบคุม**. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โคราช มาร์เก็ตติ้ง แอนด์ โปรดักชัน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- คชา วาทกิจ. (2559). **เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมรถแทรกเตอร์เกษตร**. สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ฉัตริน เรืองจอหอ, ชีรวัฒน์ เจเถื่อน, กมลชนน วงศ์สถาน และพยุศักดิ์ จุลยูเสน. (2561). การออกแบบชุดบังคับลิ้นวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. **การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5** (หน้า 159-163). ขอนแก่น:กลุ่มวิจัยวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2560). **คัมภีร์การใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino**. บริษัท วี.พรีนท์ (1991)จำกัด:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัดมหาชน.
- ชีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุศักดิ์ จุลยูเสน, คชา วาทกิจ, และจรรยาฤกษ์ศักดิ์ สมพงษ์. (2559). การจำลองระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17**. วันที่ 8-10 กันยายน 2559. กรุงเทพฯ.
- ชีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุศักดิ์ จุลยูเสน, กวี คงมั่น และขงยุทธ เลียงดั่ง. (2559). การออกแบบเส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล. **รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3**. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น.
- ขงยุทธ เลียงดั่ง พยุศักดิ์ จุลยูเสน และชีรวัฒน์ เจเถื่อน. (2559). เส้นทางที่เหมาะสมของแขนกลกรีดขางพารา. **รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3**. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น.

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2556). การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัท วี.พี.รินทร์ (1991)จำกัด:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์.
- ศูนย์ข้อมูลและการคาดการณ์เทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. รายงานการคาดการณ์ นวัตกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มเกษตรแม่นยำ. [ออนไลน์]. ได้จาก: stiic.sti.or.th/wp-content/uploads/2018/01/IIO_precision-farming_10.pdf
- สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. (2551). Control System [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/Control.pdf>
- สมยศ เชิญอักษร. (2540). การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบทางวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์:มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน
- อมร วรชมพู. (2553). การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของการจอดรถแนวขนานอัตโนมัติโดยวิธี ผสมระหว่างเบสเฟิร์สและไบไดเร็กชันนัล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชา วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อมรศรี กิจวงศ์วัฒน์. (2551). ระบบเพลย์แบ็คเพื่อใช้สำหรับนำทางในรถอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- อรรถพล อภรณ์พงษ์. (2559). การพัฒนาระบบรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของรถ ไถเดินตามในแปลงเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิศวกรรมเกษตรและ อาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Astrand, B. and Baerveldt, A.J., (1999). Mechatronics in agriculture: Robust recognition of plant rows. **Proceedings of the 2nd International Conference of Recent Advances in Mechatronics**, Istanbul, Turkey, pp. 135-141.
- Barshan, B., Durrant-Whyte, H.F., (1995). Inertial navigation system for mobile robots. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 11(3),328-342
- Bell, T., (2000). Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. **Computers and Electronics in Agriculture**, 25(2000):53-66.
- Bell, T., (1999). Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS. **Computers and Electronics in Agriculture: Special Issue Navigating Agricultural Field Machinery**.

- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B. and Martinet, P., (Oct. 2009). Motion planner and lateral-longitudinal controllers for autonomous maneuvers of a farm vehicle in headland., **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems.**
- De Luca, A., Oriolo, G. and Samson, C., (1998). **Feedback control of a nonholonomic car-like robot.** Lecture Notes in control and Information Sciences 229, Laumond, J.P. Ed., Springer Verlag, pp. 171-253.
- Fehr, B.W., Gerrish, J.B., (1995). **Vision-guided row crop follower.** Appl. Eng. Agric.11 (4):613-620.
- Gerrish, J.B., Fehr, B.W., Van Ee, G.R., Welch, D.P., (1997). Self-steering tractor guided by computer-vision. **Applied Engineering in Agriculture** 13 (5):559-563.
- Goel, P., Roumeliotis, S.I., Sukhatme, G.S., (1999). Robust localization using relation and absolute position estimates. **In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS).**
- Holmqvist, R. (1993). A laser optic navigation system for driverless vehicle. **Arnex Navigation AB**, ARNBL 344, p15.
- Inoue, K., Otsuka, K., Sugimoto, M., Murakami, N., (1997). **Estimation of place of tractor and adaptive control method of autonomous tractor using INS and GPS.** In: juste,F., Andrew, G., Valiente, J.,M., Benloch, J., V., (Eds.) Proc. Of BIO-ROBOTICS 97, Gandia, Valencia, EurAgEng and IFAC, 27-32.
- Keicher, R., and Seufert, H.(2000). Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. **Computers and Electronics in Agriculture.** 25 (1-2): 169–194.
- Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K. and Terao, H., (July 2002). Enhancement of turning accuracy by path planning for robot tractor. **Automation Technology for Off-Road Equipment Proceedings of the 2002 Conference**, Chicago, Illinois, USA.
- Marchant, J.A., Hague, T. and Tillett, N.D., (1997). Row-following accuracy of an autonomous vision-guided agricultural vehicle. **Computers and Electronics in Agricultural**, 16, 165-175.
- Murayama, O., Oshima, H.and Nagai, T. (1994). Navigation Algorithm Based on Teaching Playback System for Unmanned Dumptrucks in Mines. **Intelligent Vehicles 1994 Symposium**,24-26 October 1994. Paris. Pp.25-31.

- 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.
- Nagasaka, Y., Taniwaki, K., Otani, R. and Shigeta, K., (2002). An automated rice transplanter with RTKGPS and FOG. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 4.
- Nagasaka, Y., Otani, R., Shigeta, K., Taniwaki K., (1998). **Autonomous vehicle guidance system in paddy field**. In: AgEng Oslo, EurAgeng, 1-6.
- 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.
- O'connor, M., Elkaim, G., Parkinson, B., (1995). **Kinematic GPS for closed-loop control of farm and construction vehicles**. ION GPS-95. Palm Springs, CA, September pp.12-15.
- Ollis, M., Stentz, A., (1997). Vision-based perception for an automated harvester. IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems. Vol. 3, **IEEE**, Piscataway, NJ, pp.1838-1844.
- Ollis, M., Stentz, A., (1996). First results in vision-based crop line tracking. **Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Conference**, Minneapolis, MN, pp.951-956.
- 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.
- Reid, J.F., (1987). **The development of computer vision algorithms for agricultural vehicle guidance**. Unpublished Ph.D Thesis, Texas A&M University.
- Reid, J.F., Searcy, S.W., (1986). Detecting crop rows using the Hough Transform. **ASAE paper** 86-3042, St. Joseph, MI.
- Søgaard, H.T. and Olsen, H.J., (2003). Determination of crop rows by image analysis without segmentation. **Computers and Electronics in Agriculture** 38(2): 141-158.
- Stombaugh, T.S., Benson, E.R. and Hummel, J.W., (1999). Guidance control of agricultural vehicles at high field speeds. **Transactions of the ASAE**, 42(2), 537-544.

- Stombaugh, T., Benson E., Hummel, J.W., (1998). Automatic guidance of agricultural vehicles at high field speeds. **ASAE paper** 983110. St. Joseph. MI.
- Takigawa, T., Sutiarmo, 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.
- Yoshida, J., (1996). A study on the automatic farm machine system for rice. **Crop Engineering System Laboratory, Inc.**, Sakai, p. 148.



บทที่ 3

การออกแบบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ สำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง

3.1 บทคัดย่อ

งานส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถถูกสร้างขึ้นจากแนวคิดการออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับรถแบบทางปลาประกอบด้วยเส้นทางย่อย 5 เส้นทาง คือ ส่วนโค้งเปลี่ยนขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมถอยหลัง ส่วนโค้งวงกลมขาออก และส่วนโค้งเปลี่ยนขาออก ส่วนโค้งเหล่านี้ถูกออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง เรขาคณิตของรถแทรกเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และระยะห่างระหว่างแถวพืช รถแทรกเตอร์ถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางคิเนแมติกส์ 2 มิติและ 3 มิติ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพลถูกนำมาใช้ชดเชยค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางหน้ารถ การจำลองสถานการณ์ถูกกระทำภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุมเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สิ่งรบกวนของระบบควบคุมถูกกำหนดจากความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวขณะบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ จากการจำลองสถานการณ์พบว่า ระบบออกแบบเส้นทางที่พัฒนาขึ้นสามารถสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงได้อย่างถูกต้อง แบบจำลองรถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ออกแบบได้ และตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพลสามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.2 บทนำ

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติอย่างมาก เส้นทางการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งมีด้วยกันหลายรูปแบบ จึงจำเป็นต้องเลือกเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมกับงาน เพื่อให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ต้องการได้ การจำลองทางคิเนแมติกส์ของรถแทรกเตอร์เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์โดยไม่พิจารณาแรงที่เข้ามาเกี่ยวข้องและให้การเคลื่อนที่ลื่นไหลไม่เกิดการลื่นไถล แต่

เพื่อให้ผลการจำลองสอดคล้องกับการนำไปใช้จึงเพิ่มค่าคลาดเคลื่อนของมุมเกี่ยวในขณะหักเลี้ยวของรถแทรกเตอร์แก่แบบจำลองทางคิเนเมติกส์ และออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแบบจำลอง งานส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง และทดสอบสมรรถนะ

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

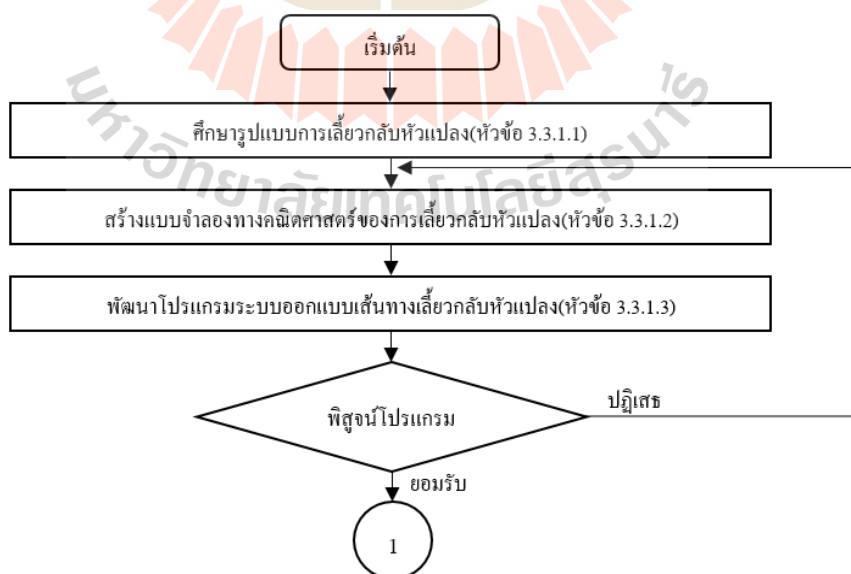
จากการศึกษาข้อมูลของการพัฒนารถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ทำให้สามารถเขียนแผนดำเนินการการพัฒนาขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.4 แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 พัฒนาโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง มีแผนดำเนินงานดังรูปที่ 3.1

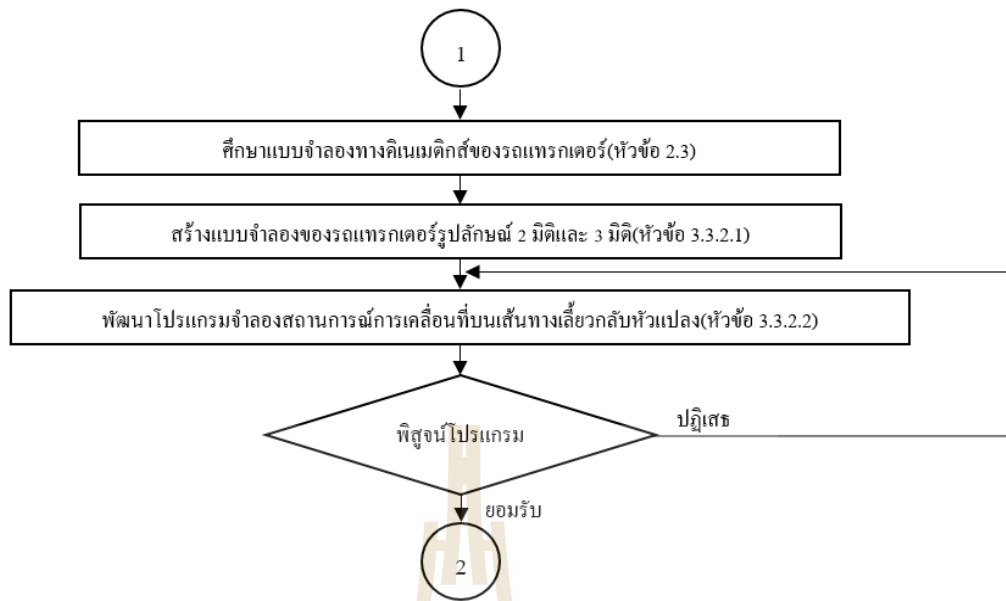
ขั้นที่ 2 พัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง มีแผนดำเนินงานดังรูปที่ 3.2

ขั้นที่ 3 พัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ มีแผนดำเนินงานดังรูปที่ 3.3

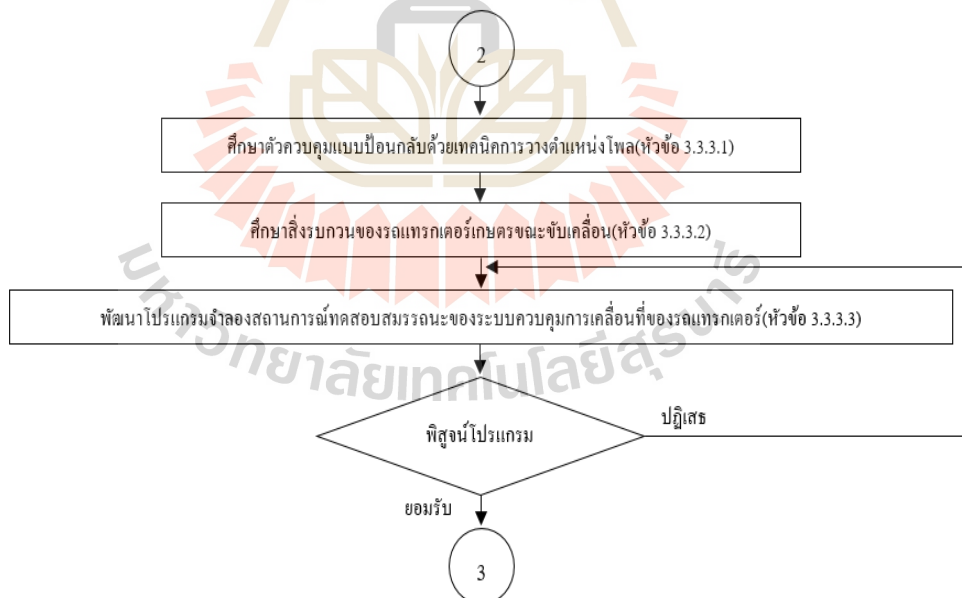
ขั้นที่ 4 ทดสอบหาค่าโพลของตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล มีแผนดำเนินงานดังรูปที่ 3.4



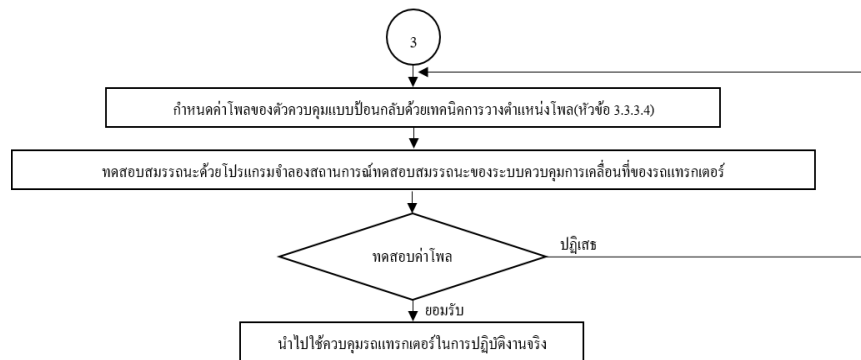
รูปที่ 3.1 แผนดำเนินการการพัฒนาโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง



รูปที่ 3.2 แผนดำเนินการการพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง



รูปที่ 3.3 แผนดำเนินการการพัฒนา ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



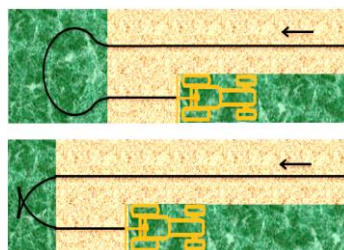
รูปที่ 3.4 แผนดำเนินการทดสอบหาค่าโพลของตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล

หลังดำเนินการสามารถนำขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลงไปควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นได้ มีรายละเอียดการดำเนินงานในขั้นต่าง ๆ ดังนี้

3.3.1 การพัฒนาโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

3.3.1.1 รูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลง

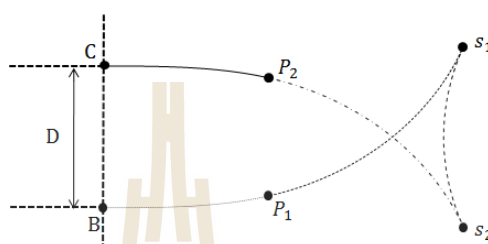
การเลี้ยวกลับหัวแปลงเป็นฟังก์ชันหนึ่งที่สามารถพัฒนาต่อขยายให้เหมาะสมกับสถานะการทำงานเกษตรของประเทศ เพราะลักษณะแปลงเกษตรในประเทศไทยมีขนาดเล็ก ทำให้ผู้ขับขี่รถแทรกเตอร์ต้องทำการเลี้ยวกลับหัวแปลงบ่อยครั้ง ลักษณะการเลี้ยวกลับหัวแปลงที่ผู้ขับขี่มีรูปแบบหลากหลายขึ้นอยู่กับภาระการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.5 การเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลาเป็นรูปแบบหนึ่งที่ผู้ขับขี่รถแทรกเตอร์เกษตรนิยมใช้เพราะเหมาะกับภาระงานที่ต้องกลับรถเมื่อแถวถัดไปอยู่ใกล้กันเช่นการขยกร่องปลูกด้วยพานขยกร่อง การฉีดพ่นสารเคมี เป็นต้น และใช้พื้นที่เลี้ยวกลับหัวแปลงน้อย



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลง

3.3.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเลี้ยวกลับหัวแปลง

เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลาเริ่มจากเส้นทางโค้งเปลี่ยนขาเข้าจาก B ไป P_1 เส้นทางโค้งวงกลมขาเข้าจาก P_1 ไป s_1 เส้นทางโค้งวงกลมดอยหลังจาก s_1 ไป s_2 เส้นทางโค้งวงกลมขาออกจาก s_2 ไป P_2 และเส้นทางโค้งเปลี่ยนขาออกจาก P_2 ไป C เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลาแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา

ข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา มีดังนี้ $\Delta T_t, X_i, Y_i, \theta_i, \alpha_i, L, V_t, \omega_a, D, \alpha_f$

เมื่อ	X_i คือ ระยะเริ่มต้นจากจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังถึงจุด (0,0) บนแกน X(m)
	Y_i คือ ระยะเริ่มต้นจากจุดศูนย์กลางเพลาล้อหลังถึงจุด (0,0) บนแกน Y(m)
	θ_i คือ ทิศทางของหน้ารถเริ่มต้นเทียบกับแกนอ้างอิง x(deg)
	α_i คือ มุมการหักเลี้ยวเริ่มต้น (deg)
	α_f คือ มุมการหักเลี้ยวสูงสุด (deg)
	ω_a คือ อัตราการหักเลี้ยว (deg s ⁻¹)
	D คือ ระยะห่างระหว่างร่องพื้ช (m)
	V_t คือ ความเร็วของรถ (m s ⁻¹)
	ΔT_t คือ ความถี่ในการเก็บข้อมูล (s)
	L คือ ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำและเพลาล้อหลัง (m)

การสร้างสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถเพื่อสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถได้นำแบบจำลองรูปที่ 2.1 มาทำการหาสมการประมาณตำแหน่งและทิศทางหน้ารถของรถที่เวลา $t-1$ ได้ตามสมการที่ 3.1 โดยพิจารณาว่าการเคลื่อนที่แต่ละช่วงเป็นเส้นตรง จากการกำหนด

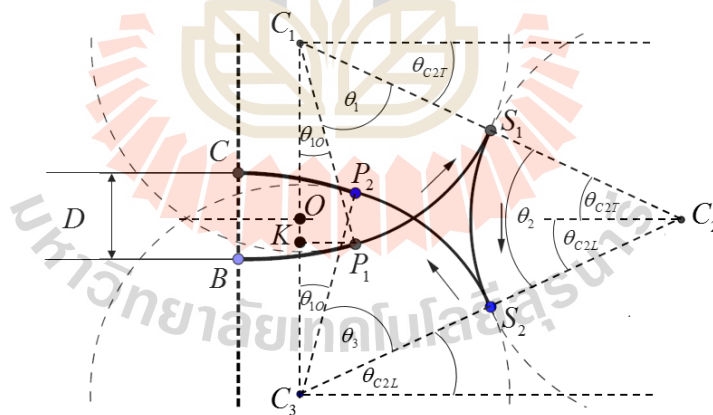
ช่วงเวลาในการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ที่เวลาน้อย ๆ

$$\begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \\ \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{t-1} + \Delta X_t \\ Y_{t-1} + \Delta Y_t \\ \theta_{t-1} + \Delta \theta_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{t-1} + V_t \Delta T_t \cos(\theta_{t-1} + \Delta \theta_t) \\ Y_{t-1} + V_t \Delta T_t \sin(\theta_{t-1} + \Delta \theta_t) \\ \theta_{t-1} + \Delta \theta_t \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถ α , และการเปลี่ยนแปลงทิศทางของหน้ารถที่เกิดขึ้น $\Delta \theta$, แสดงได้ตามสมการที่ 3.2

$$\Delta \theta_t = \frac{V_t \Delta T_t}{L} \tan(\alpha_t) \quad (3.2)$$

การสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลานั้นดัดแปลงจาก Cariou, Lenain, Thuilot and Martinet (2009) มีพารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการสร้างเส้นทางแสดงในรูปที่ 3.7 วิธีการหาค่าพารามิเตอร์มีรายละเอียดการคำนวณดังนี้



รูปที่ 3.7 สัญลักษณ์และตัวแปร

วิธีการหาจุดศูนย์กลางเส้นทางโค้งวงกลมขาเข้าจาก P_1 ไป s_1 เมื่อกำหนดให้จุด B เป็นจุดเริ่มต้น (0, 0) ตำแหน่ง C_1 สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3 และ 3.4

$$X_{C_1} = X_{P_1} - r \sin(\theta_{BP_1}) \quad (3.3)$$

$$Y_{C1} = Y_{P1} + r \cos(\theta_{fBP1}) \quad (3.4)$$

$$r = \frac{L}{\tan(\alpha_{fBP1})} \quad (3.5)$$

เมื่อ	X_{C1}	คือ ระยะจากจุด B ถึงจุด $C1$ บนแกน X (m)
	Y_{C1}	คือ ระยะจากจุด B ถึงจุด $C1$ บนแกน Y (m)
	X_{P1}	คือ ระยะจากจุด B ถึงจุด $P1$ บนแกน X (m)
	Y_{P1}	คือ ระยะจากจุด B ถึงจุด $P1$ บนแกน Y (m)
	r	คือ รัศมีวงเลี้ยว (m) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5
	θ_{fBP1}	คือ ทิศทางของหน้ารถที่จุดสิ้นสุดเส้นทาง B ไป $P1$ (m)
	α_{fBP1}	คือ มุมเลี้ยวที่จุดสิ้นสุดเส้นทาง B ไป $P1$ (m)

วิธีการหามุม θ_1 สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทางตรีโกณมิติของเส้นทางเลี้ยวกลับรถหัวแปลงแบบทางปลา จากรูปที่ 3.7 จะพบว่า θ_1 มีค่าอยู่ระหว่าง $\frac{3}{2}\pi + \theta_{10} \leq \theta_1 \leq 2\pi - \theta_{C2T}$ สามารถหาค่ามุม θ_{10} ได้จากสมการที่ 3.6 และสามารถหาค่ามุม θ_{C2T} ได้จากสมการที่ 3.7

$$\theta_{10} = \cos^{-1}\left(\frac{C1K}{C1P1}\right) \quad (3.6)$$

เมื่อ $C1K = \sqrt{(Y_{P1} - Y_{C1})^2}$

$$C1P1 = \sqrt{((X_{P1} - X_{C1})^2 + (Y_{P1} - Y_{C1})^2)}$$

$$\theta_{C2T} = \sin^{-1}\left(\frac{C1O}{2r}\right) \quad (3.7)$$

ซึ่ง $C1O = \sqrt{((X_o - X_{C1})^2 + (Y_o - Y_{C1})^2)}$

$$X_o = X_{C1}$$

$$Y_o = \frac{D}{2}$$

เมื่อ X_o คือ ระยะจากจุด O ถึงจุด B บนแกน X (m)

Y_o คือ ระยะจากจุด O ถึงจุด B บนแกน Y (m)

วิธีการหาจุดศูนย์กลางเส้นทางโค้งวงกลมถอยหลังจาก s_1 ไป s_2 ตำแหน่ง $C2$ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.8 และ สมการที่ 3.9

$$X_{C2} = X_o - 2r \cos(\theta_{C2T}) \quad (3.8)$$

$$Y_{C2} = \frac{D}{2} \quad (3.9)$$

เมื่อ X_{C2} คือ ระยะจากจุด C_2 ถึงจุด B บนแกน X (m)

Y_{C2} คือ ระยะจากจุด C_2 ถึงจุด B บนแกน Y (m)

วิธีการหามุม θ_2 สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทางตรีโกณมิติของเส้นทางเลี้ยวกลับรถหัวแปลงแบบหางปลา จากรูปที่ 3.7 จะพบว่า θ_2 มีค่าอยู่ระหว่าง $\pi + \theta_{C2T} \leq \theta_2 \leq \pi - \theta_{C2T}$ สามารถหาจุดศูนย์กลางเส้นทางโค้งวงกลมขาออกจาก s_2 ไป P_2 ตำแหน่ง $C3$ ได้จากสมการที่ 3.10 และ สมการที่ 3.11

$$X_{C3} = X_{C1} \quad (3.10)$$

$$Y_{C3} = -(C1O - \frac{D}{2}) \quad (3.11)$$

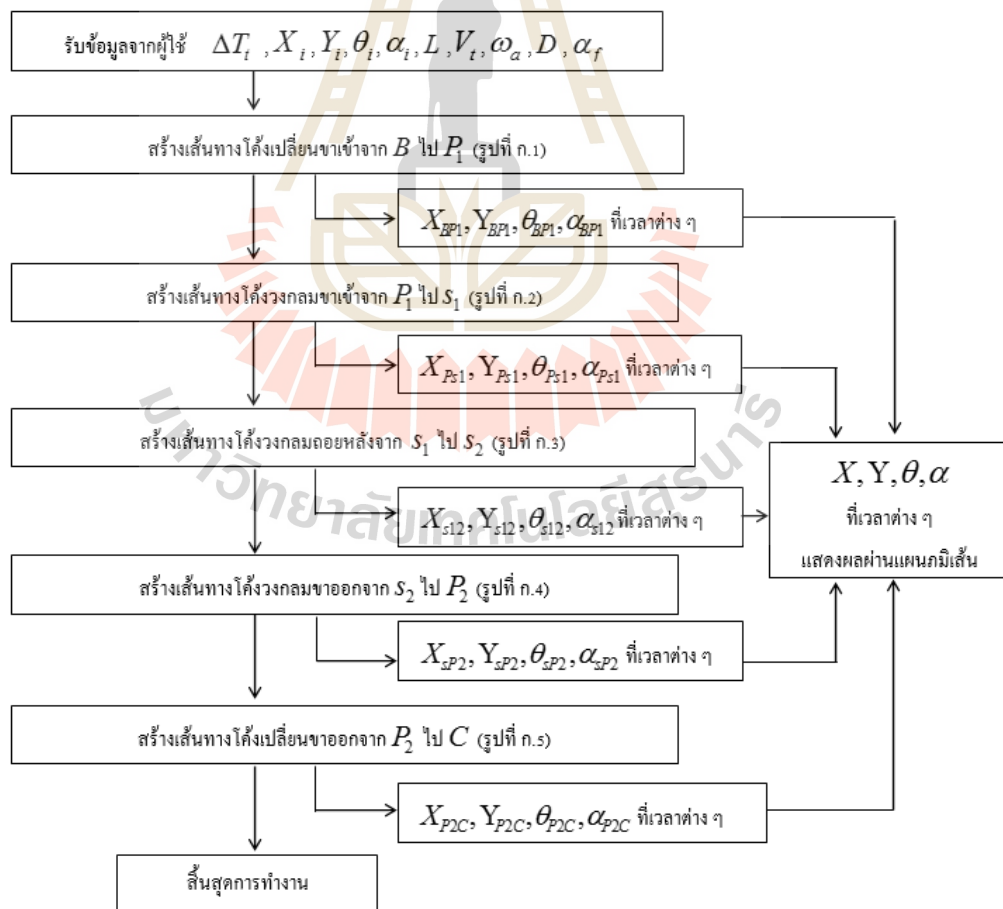
เมื่อ X_{C3} คือ ระยะจากจุด C_3 ถึงจุด B บนแกน X (m)

Y_{C3} คือ ระยะจากจุด C_3 ถึงจุด B บนแกน Y (m)

วิธีการหามุม θ_3 สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทางตรีโกณมิติของเส้นทางเลี้ยวกลับรถหัวแปลงแบบหางปลา จากรูปที่ 3.7 จะพบว่า θ_3 มีค่าอยู่ระหว่าง $\theta_{c2T} \leq \theta_3 \leq \frac{\pi}{2} - \theta_{10}$

3.3.1.3 ลำดับการทำงานของโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

ระบบสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลาได้ถูกพัฒนาบนโปรแกรม LabVIEW ก่อนทำการสร้างเส้นทางผู้ใช้งาน โปรแกรมต้องป้อนข้อมูลดังนี้ $\Delta T_i, X_i, Y_i, \theta_i, \alpha_i, L, V_i, \omega_a, D, \alpha_f$ หลังจากป้อนข้อมูลที่จำเป็น โปรแกรมจะทำการสร้างเส้นทางโดยอัตโนมัติตามลำดับการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.8 หลังจากสร้างเส้นทางจะได้ข้อมูลออกมา 3 ค่า คือ ตำแหน่งตัวรถ มุมเลี้ยว และทิศทางหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา

3.3.1.4 การทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลียวกลับหัวแปลง

การทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลียวกลับหัวแปลงจะสมมติค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเส้นทางเพื่อดูผลการคำนวณเส้นทางเคลื่อนที่ ทิศทางหน้ารถและมุมเลียวของรถแทรกเตอร์เกษตร ค่าพารามิเตอร์มีค่าดังตารางที่ 3.1 และสมมติค่าระยะห่างระหว่างแถวพืช (D) ตามการทำงานในแปลงเกษตร โดยสามารถแบ่งการเลียวกลับหัวแปลงได้ 6 กรณีคือ

1. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m
2. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m
3. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปร่องทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m
4. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปร่องทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m
5. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปร่องทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m
6. รถแทรกเตอร์เกษตรเลียวกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลียวไปร่องทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m

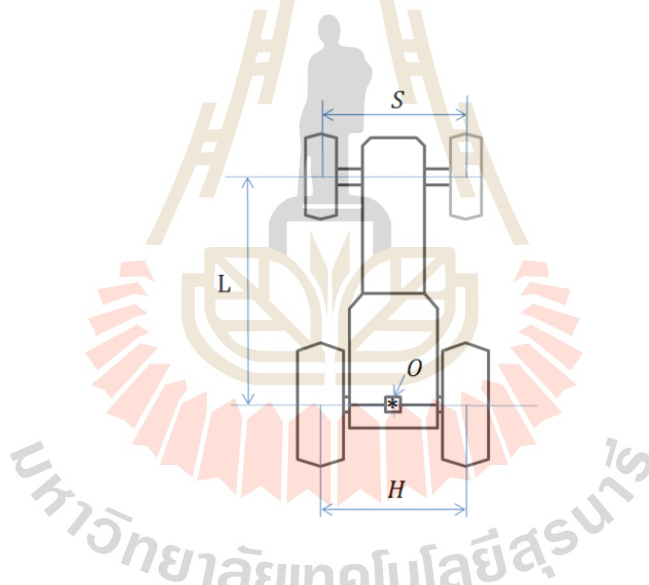
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางที่ออกแบบ

Parameters	Value
ΔT_t	0.05 s
X_i	0 m
Y_i	0 m
θ_i	0 deg
α_i	0 deg
L	1.5 m
V_t	0.2 m s ⁻¹
ω_a	20 deg s ⁻¹
α_f	30 deg

3.3.2 การพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

3.3.2.1 การสร้างแบบจำลองทางคิเนเมติกส์

การสร้างแบบจำลองรูปลักษณะสองมิติของรถแทรกเตอร์(รูปที่ 3.9) ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม LabVIEW ก่อนทำการขึ้นรูปได้เก็บค่าสัดส่วนของรถแทรกเตอร์ Mitsubishi รุ่น MT 190D ได้ค่าระยะห่างของเพลาล้อหน้าและเพลาล้อหลัง($L = 1.5$ m) ความยาวเพลาล้อหน้า ($S = 0.93$ m) ความยาวเพลาล้อหลัง($H = 0.93$ m) มีจุด O เป็นจุดอ้างอิงตำแหน่งรถ จากพฤติกรรมของรถทั่วไปสามารถแบ่งตัวรถออกเป็น 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งตัวรถ ส่วนที่สองล้อหน้าซ้าย และส่วนที่สามล้อหน้าขวา การทำให้แบบจำลองรูปลักษณะสองมิติของรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ได้ในนั้น ต้องนำทฤษฎีการย้ายแกนและทฤษฎีการหมุนแกนประกอบกับข้อมูลตำแหน่งตัวรถ (X, Y) มุมเลี้ยว (α) และทิศทางหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X (θ) มาประมวลผลให้แบบจำลองสองมิติเคลื่อนที่และเปลี่ยนทิศทาง



รูปที่ 3.9 แบบจำลองรูปลักษณะสองมิติของรถแทรกเตอร์

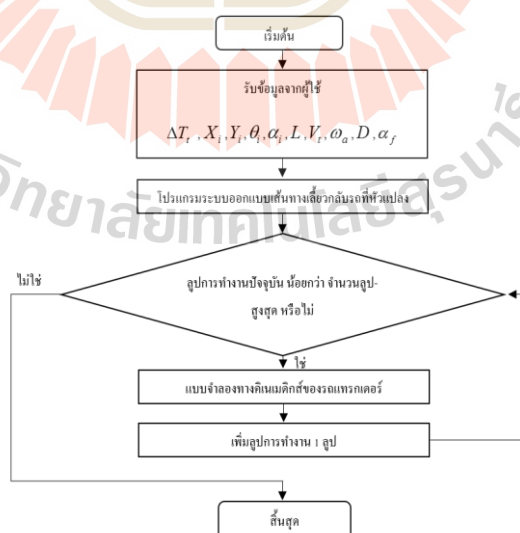
การสร้างแบบจำลองรูปลักษณะสามมิติของรถแทรกเตอร์(รูปที่ 3.10) ก่อนทำการขึ้นรูปได้เก็บค่าขนาดของชิ้นส่วนที่จำเป็นของรถแทรกเตอร์ Mitsubishi รุ่น MT 190D เช่น ล้อหน้า ล้อหลัง เป็นต้น ขึ้นรูปด้วยโปรแกรม SolidWorks[®] และจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงด้วยโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 3.10 แบบจำลองรูปลักษณะสามมิติของรถแทรกเตอร์

3.3.2.2 ลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ลำดับการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.11 การทำงานเริ่มจากผู้ใช้ป้อนค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงโปรแกรมออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงจะให้ข้อมูลมา 3 ค่า คือ ตำแหน่งตัวรถ มุมเลี้ยว และทิศทางหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X ที่เวลาต่าง ๆ ต่อมาจะเข้าสู่รูปแบบจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่โดยการป้อนค่าตำแหน่งตัวรถ มุมเลี้ยว และทิศทางหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X ให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะวนลูปจนลูปการทำงานปัจจุบันมากกว่าจำนวนลูปสูงสุด



รูปที่ 3.11 ลำดับการทำงานของโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง

3.3.2.3 การทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับ

หัวแปลง

การทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงจะสมมติค่าพารามิเตอร์และรูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลงเช่นเดียวกันกับการทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง(หัวข้อ 3.3.1.4)

3.3.3 การพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์และพัฒนาโปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

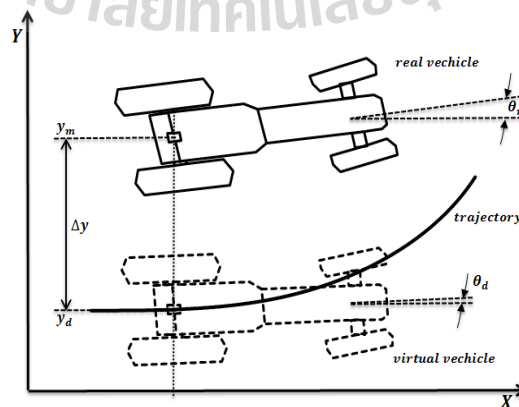
3.3.3.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล

1) การหามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ด้วยวิธีการทำให้เป็นเชิงเส้น 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 3.12



รูปที่ 3.12 ความผิดพลาดทางตำแหน่งของรถแทรกเตอร์

จากรูปที่ 3.12 virtual vehicle แสดงท่าทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ออกแบบไว้ ส่วน real vehicle แสดงท่าทางของรถแทรกเตอร์ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางจริง Δy เป็นค่าผลต่างของระยะทางแกน y ของรถแทรกเตอร์ ส่วน $\Delta\theta$ เป็นค่าผลต่างของทิศทางของรถแทรกเตอร์ ตัวห้อย m และ d หมายถึงข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่ได้จากการคำนวณตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ $\Delta y = y_m - y_d$ และ $\Delta\theta = \theta_m - \theta_d$ ดังนั้นแบบจำลองตัวแปรสถานะของรถแทรกเตอร์ที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้นสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

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

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

เมื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวขดเซชและค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งเป็น $\Delta\alpha = -K\Delta q$ ดังนั้นค่ามุมเลี้ยวขดเซชความผิดพลาดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

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

และมุมเลี้ยวแก้ไขสำหรับรถแทรกเตอร์สามารถหาได้ดังนี้

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

2) การออกแบบการควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล เนื่องจากตัวแปรสถานะในแบบจำลองของรถแทรกเตอร์มีสองตัว ดังนั้นโพลจำนวนสองตัวจะถูกกำหนดไว้ที่ตำแหน่ง $p_1, p_2 = -p_{11} \pm p_{12}i$ พหุนามลักษณะเฉพาะจากตำแหน่งโพลเหล่านี้มีค่าเท่ากับ

$$(s - p_1)(s - p_2) = s^2 - (p_1 + p_2)s + p_1 p_2 = s^2 - a_1 s + a_0 \quad (3.16)$$

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

$$k_1 = \frac{a_0}{a_{12}b_{21}} \quad (3.18)$$

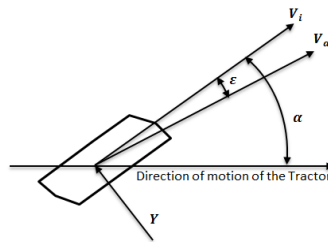
$$k_2 = \frac{a_1 - a_{22}}{-b_{21}} \quad (3.19)$$

การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพล จะใช้โปรแกรม LabVIEW เกณฑ์ในการพิจารณาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมที่เหมาะสม จะพิจารณาค่าเกณฑ์ที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่น้อย และมุมเลี้ยวขดเซย์ไม่รุนแรงเกินไป

3.3.3.2 การกำหนดค่าความผิดพลาดของแบบจำลองทางคิเนเมติกส์

การทดสอบระบบควบคุมจำเป็นต้องจำลองระบบให้คล้ายกับระบบจริง เพื่อดูผลการตอบสนองของตัวควบคุม จึงเพิ่มค่าคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวในขณะหักเลี้ยวของรถแทรกเตอร์แก่แบบจำลองทางคิเนเมติกส์ มงคล กวางวโรภาส (2530) กล่าวว่าในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ขณะเลี้ยวรถคนขับบิดพวงมาลัยเพื่อบังคับให้ล้อหน้าหักเลี้ยวเป็นมุม α จากแนวทิศทางการเคลื่อนที่เดิม ซึ่งมีผลทำให้เกิดแรงทางด้านข้าง Y กระทำต่อล้อ แรงนี้เกิดจากแรงต้านทานของดินเนื่องจากดินต้องเคลื่อนตัว (deform) เพื่อให้เกิดแรงนี้ขึ้นขณะที่ล้อหมุนรถจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าพร้อมกับเคลื่อนที่ไปด้านข้างด้วย ซึ่งแนวทิศการเคลื่อนที่จริงคือ V_a ไม่ใช่แนวการหัก

เลี้ยวจริง ค่าของความแตกต่างระหว่างสองมุมนี้เรียกว่ามุมการคลาดเคลื่อน หรือ drift angle ε มุมนี้เกิดจากการเคลื่อนตัวของดินภายใต้ล้อบวกกับการบิดตัวของยาง ดังในรูปที่ 3.13

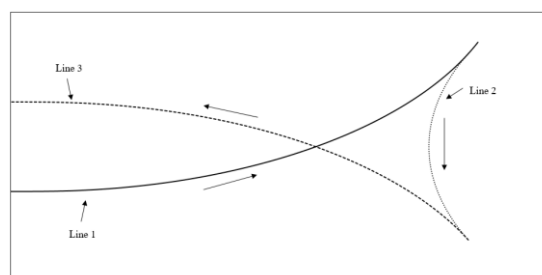


รูปที่ 3.13 มุมการคลาดเคลื่อนของล้อหน้า(ε)ขณะหักเลี้ยวเป็นมุม α เนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง Y

จากข้อมูลทำให้จำลองค่าความผิดพลาด โดยการคูณด้วยค่าร้อยละที่กำหนดกับมุมเลี้ยวที่เลี้ยวจริงจะได้มุมเลี้ยวที่รถทำได้เพื่อส่งให้แก่แบบจำลองทางคิเนแมติกส์ ของรถแทรกเตอร์เพื่อดูผลการตอบสนองของระบบควบคุม

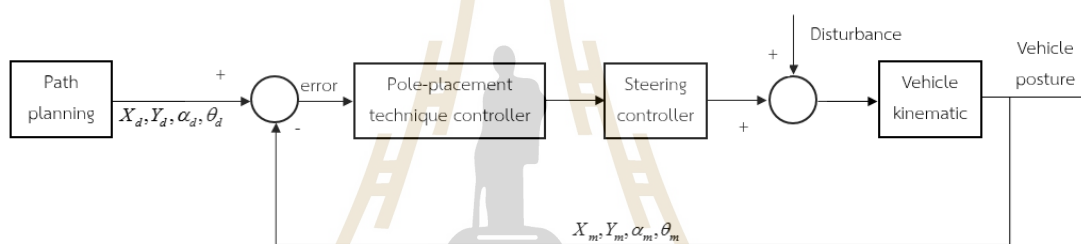
3.3.3.3 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพลสำหรับเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ โดยใช้ตัวควบคุมเทคนิคการวางตำแหน่งโพล ก่อนทำการสร้างระบบควบคุมได้ทำการ แบ่งเส้นทางออกเป็น 3 เส้นทางแสดงดังรูปที่ 3.14 โดยเส้นทางที่ 1 จะรวมเส้นทางโค้งเปลี่ยนขาเข้าจาก B ไป P_1 เส้นทางโค้งวงกลมขาเข้าจาก P_1 ไป s_1 เส้นทางโค้งวงกลมถอยหลังจาก s_1 ไป s_2 และเส้นทางที่ 3 จะรวมเส้นทางเส้นทางโค้งวงกลมขาออกจาก s_2 ไป P_2 เส้นทางโค้งเปลี่ยนขาออกจาก P_2 ไป C



รูปที่ 3.14 เส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบหางปลา

การสร้างระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับเส้นทางที่ 1 และเส้นทางที่ 3 จะมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อรถเคลื่อนที่(Kinematic model) จะส่งข้อมูล $X_m, Y_m, \alpha_m, \theta_m$ กลับมาเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าคลาดเคลื่อนของทิศทางหน้ารถ($\Delta\theta$)และค่าคลาดเคลื่อนในแนวแกน Y (ΔY) ที่ตำแหน่ง X_m แล้วส่งค่าคลาดเคลื่อนทั้งสองค่าเข้าไปยังระบบควบคุมที่ออกแบบเพื่อหามุมเลี้ยวใหม่ที่ป้อนให้กับรถแทรกเตอร์เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อน(α_f) การทำงานจะวนไปเรื่อย ๆ จนถึงตำแหน่ง X_d สุดท้าย ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับเส้นทางที่ 2 ไม่สามารถนำค่า X มาเป็นค่าอ้างอิงได้เพราะลักษณะเส้นทางนั้นมีการใช้ X ซ้ำกัน จึงต้องใช้ค่า Y แทน โดยมีหลักการทำงานเหมือนระบบควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับเส้นทางที่ 1 และเส้นทางที่ 3 แต่เปลี่ยนจากอ้างอิงตำแหน่ง X เป็นอ้างอิงตำแหน่ง Y ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพลสำหรับทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมมีลำดับการทำงานดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพล
สำหรับทดสอบสมรรถนะตัวควบคุม

3.3.3.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จะสมมติค่าพารามิเตอร์และรูปแบบการเลี้ยวกลับหัวแปลงเช่นเดียวกันกับการทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง(หัวข้อ 3.3.1.4) แต่เพิ่มความผิดพลาดของการหักเลี้ยวเท่ากับ 15 % และมีกรณีย่อย 4 กรณีคือ

1. open loop คือจำลองสถานการณ์โดยป้อนมุมเลี้ยวตามทฤษฎีที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg และคูณด้วยค่าร้อยละความผิดพลาดที่กำหนดจะได้มุมเลี้ยวที่รถทำได้ให้แก่ Kinematic model ของรถแทรกเตอร์
2. pole placement $-1 \pm 1i$ คือจำลองสถานการณ์โดยสมมติค่าโพลให้กับระบบควบคุมเท่ากับ $p_1, p_2 = -1 \pm 1i$ และป้อนมุมเลี้ยวปรับแก้ (มุมเลี้ยวใหม่ที่ได้จากระบบควบ-

คุมการเคลื่อนที่) ที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg และคูณด้วยค่าร้อยละความผิดพลาดที่กำหนดจะได้มุมเลี้ยวที่รถทำได้ให้แก่ Kinematic model ของรถแทรกเตอร์

3. pole placement $-2 \pm 2i$ คือจำลองสถานการณ์ โดยสมมติค่าโพลให้กับระบบควบคุมเท่ากับ $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ และป้อนมุมเลี้ยวปรับแก้ (มุมเลี้ยวใหม่ที่ได้จากระบบควบคุมการเคลื่อนที่) ที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg และคูณด้วยค่าร้อยละความผิดพลาดที่กำหนดจะได้มุมเลี้ยวที่รถทำได้ให้แก่ Kinematic model ของรถแทรกเตอร์

4. pole placement $-3 \pm 3i$ คือจำลองสถานการณ์ โดยสมมติค่าโพลให้กับระบบควบคุมเท่ากับ $p_1, p_2 = -3 \pm 3i$ และป้อนมุมเลี้ยวปรับแก้ (มุมเลี้ยวใหม่ที่ได้จากระบบควบคุมการเคลื่อนที่) ที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg และคูณด้วยค่าร้อยละความผิดพลาดที่กำหนดจะได้มุมเลี้ยวที่รถทำได้ให้แก่ Kinematic model ของรถแทรกเตอร์

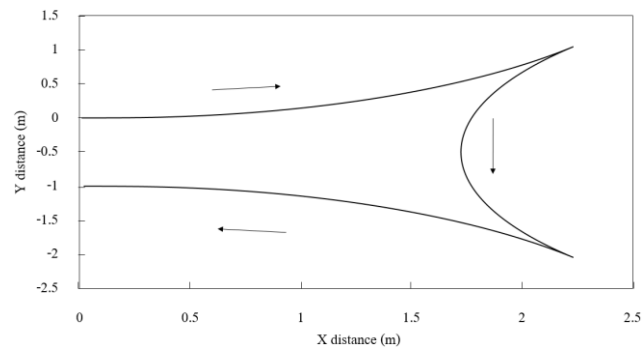
3.4 ผลการจำลองและการอภิปรายผล

3.4.1 ผลการทดสอบโปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

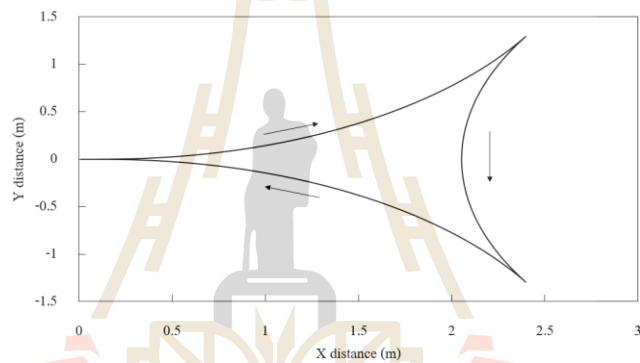
โปรแกรมระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงได้ถูกพัฒนาบนโปรแกรม LabVIEW มีหน้าจอแสดงผลดังรูปที่ 3.26 มีผลการทำงานดังนี้

3.4.1.1 เส้นทางเคลื่อนที่

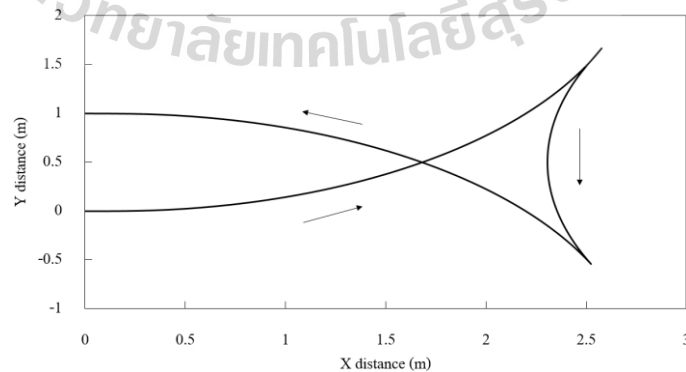
จากรูปที่ 3.16 - 3.21 แสดงเส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้ายและหักเลี้ยวไปทางขวากำหนดระยะห่างระหว่างแถวพีชเท่ากับ 0 m 1 m และ -1 m พบว่าเส้นทางเคลื่อนที่มีลักษณะคล้ายหางปลา ทั้งกรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายและทางขวาระยะทางที่ต้องใช้เฉลี่ยอยู่ที่ 8.4 m สำหรับเส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์กรณีหักเลี้ยวไปทางขวาจะมีลักษณะเป็นภาพสะท้อนของเส้นทางเคลื่อนที่กรณีหักเลี้ยวไปทางซ้าย



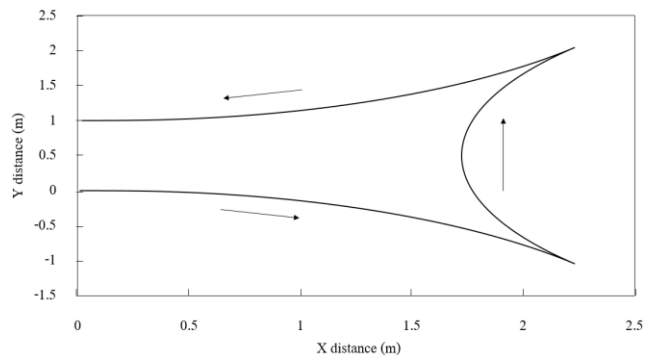
รูปที่ 3.16 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแฉกพีชเท่ากับ -1 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย



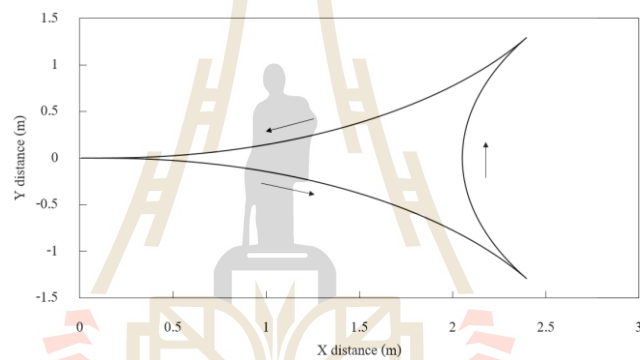
รูปที่ 3.17 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแฉกพีชเท่ากับ 0 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย



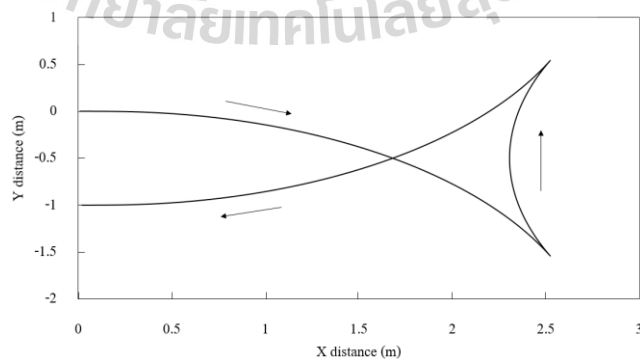
รูปที่ 3.18 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแฉกพีชเท่ากับ 1 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ 3.19 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแกวฟิชเท่ากับ -1 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเดียวไปทางขวา



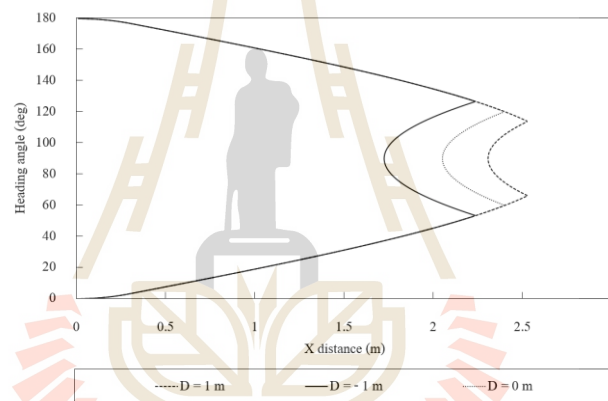
รูปที่ 3.20 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแกวฟิชเท่ากับ 0 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเดียวไปทางขวา



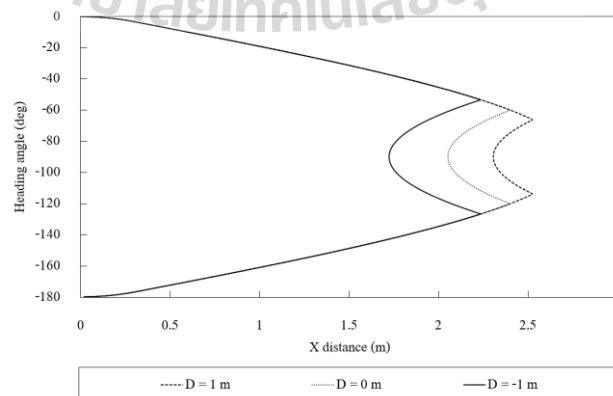
รูปที่ 3.21 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ระยะห่างระหว่างแกวฟิชเท่ากับ 1 m
กรณีรถแทรกเตอร์หักเดียวไปทางขวา

3.4.1.2 ทิศทางของรถแทรกเตอร์

จากรูปที่ 3.22 - 3.23 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางหน้ารถเทียบกับแกนอ้างอิง X กับระยะการเคลื่อนที่บนแกนอ้างอิง X ทิศทางของรถแทรกเตอร์กรณีหักเลี้ยวไปทางซ้ายและหักเลี้ยวไปทางขวามีลักษณะเป็นภาพสะท้อน โดยเส้นที่บแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = -1$ m เส้นประสีเหลี่ยมผืนผ้าแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = 1$ m เส้นประวงกลมแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = 0$ m เมื่อสังเกตเส้นความสัมพันธ์ในช่วงแรกและช่วงสุดท้ายก่อนขึ้นร่องใหม่ของการเคลื่อนที่ที่เส้นจะทับกันพอดี มีเพียงช่วงปลายที่ไม่ทับกัน เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะช่วงโค้งส่วนเปลี่ยนขาเข้าและโค้งส่วนเปลี่ยนขาออกเมื่อใช้รถแทรกเตอร์คันเดิมและกำหนดพารามิเตอร์เหมือนกันจะทำให้เส้นทางทั้งสามกรณีทับกันพอดีแต่เส้นทางโค้งวงกลมทั้งสามเส้นทางนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างร่องที่กำหนด



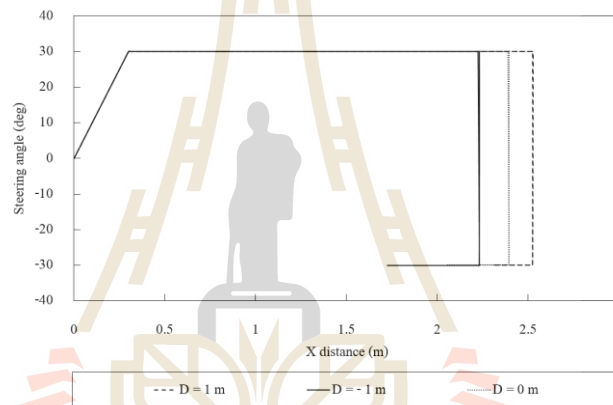
รูปที่ 3.22 ทิศทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย



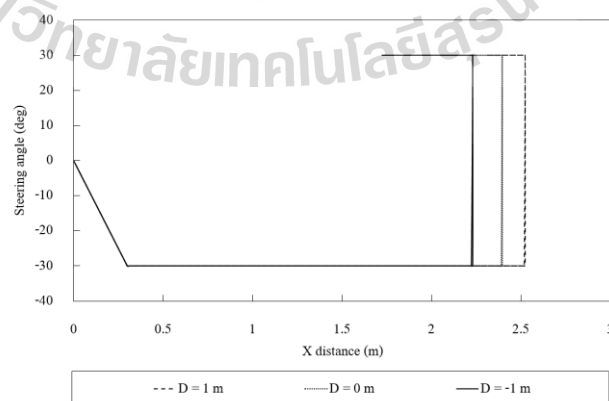
รูปที่ 3.23 ทิศทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา

3.4.1.3 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

จากรูปที่ 3.24 - 3.25 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหักเลี้ยวกับระยะการเคลื่อนที่บนแกนอ้างอิง X มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์กรณีหักเลี้ยวไปทางซ้ายและหักเลี้ยวไปทางขวามีลักษณะเป็นภาพสะท้อน โดยเส้นทึบแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = -1$ m เส้นประสีเหลี่ยมผืนผ้าแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = 1$ m เส้นประวงกลมแสดงเส้นความสัมพันธ์เมื่อกำหนด $D = 0$ m เมื่อดูเส้นความสัมพันธ์จะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกันแต่ตำแหน่งการเปลี่ยนมุมเลี้ยวจาก α_f ไป $-\alpha_f$ จะไม่ทับกัน เพราะตำแหน่งเปลี่ยนมุมเลี้ยวจะอยู่ที่ตำแหน่ง s_1 และตำแหน่ง s_2 ตำแหน่งทั้งสองถูกกำหนดโดยเส้นทางโค้งวงกลมทั้งสามเส้นทาง ซึ่งเส้นทางโค้งวงกลมจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างแถวพืชที่กำหนด



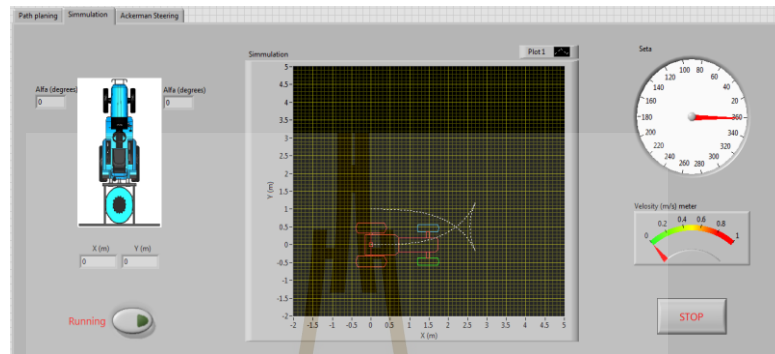
รูปที่ 3.24 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางซ้าย



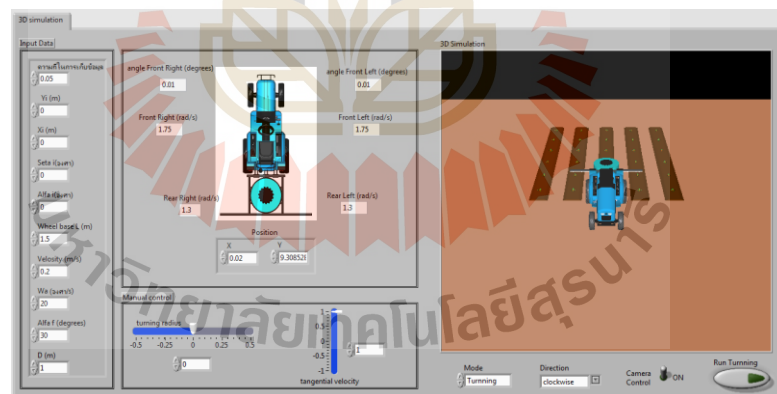
รูปที่ 3.25 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวไปทางขวา

3.4.2 ผลการทดสอบโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัว แปลง

หน้าจอแสดงผลโปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถ
ที่หัวแปลงแสดงดังรูปที่ 3.26 - 3.27



รูปที่ 3.26 โปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง
ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสองมิติ

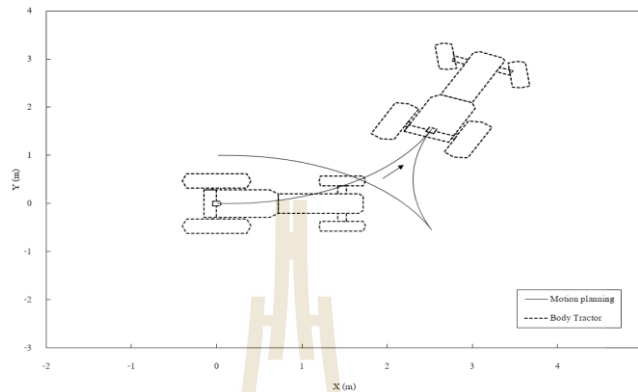


รูปที่ 3.27 โปรแกรมจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง
ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสามมิติ

3.4.2.1 พฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

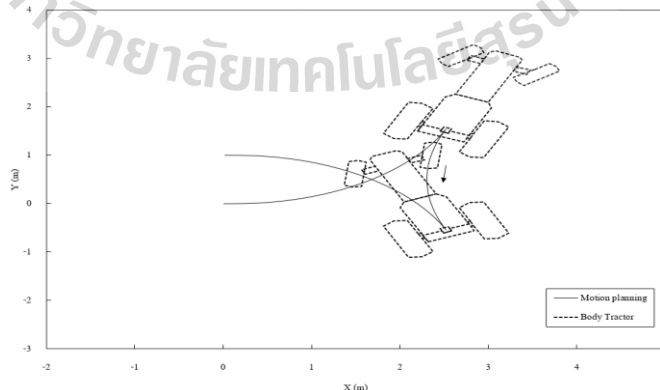
รูปที่ 3.28 - 3.30 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์
บนเส้นทางเคลื่อนที่ที่กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย รูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.31 (1-3) จะ

เห็นการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางที่ 1 ตอนเริ่มต้นมุมเลี้ยวจะมีค่าเป็น 0 deg เมื่อเคลื่อนที่รถแทรกเตอร์จะหักเลี้ยวซ้ายด้วยอัตราคงที่เท่ากับ ω_d จนกระทั่งมุมเลี้ยวเท่ากับ α_f มุมเลี้ยวจะคงที่จนสุดเส้นทางที่ 1



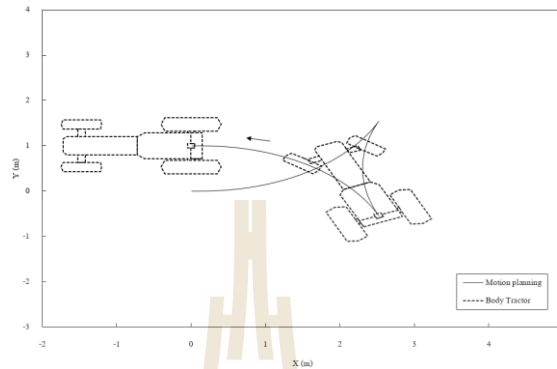
รูปที่ 3.28 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย

เมื่อรถแทรกเตอร์ถึงตำแหน่งสุดท้ายของเส้นทางที่ 1 รถแทรกเตอร์จะหยุดการเคลื่อนที่เพื่อทำการหักเลี้ยวพ่วงมาลัยมาที่มุม $-\alpha_f$ แล้วเคลื่อนที่ถอยหลังเพื่อเข้าสู่เส้นทางที่ 2 ขณะเคลื่อนที่มุมเลี้ยวจะคงที่ (เท่ากับ $-\alpha_f$) จนสุดเส้นทางที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.31 (4-6)

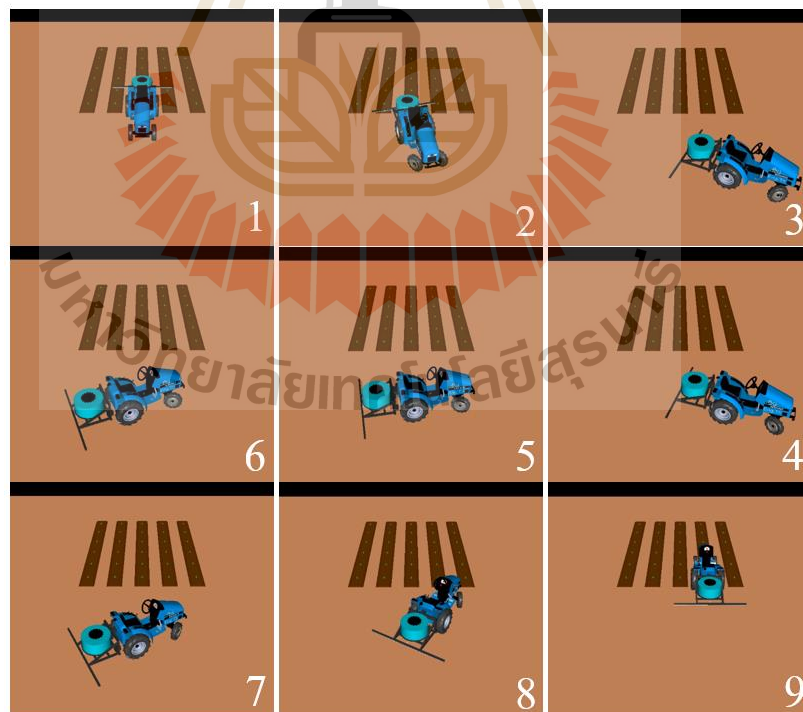


รูปที่ 3.29 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย

เมื่อรถแทรกเตอร์ถึงตำแหน่งสุดท้ายของเส้นทางที่ 2 รถแทรกเตอร์จะหยุดการเคลื่อนที่เพื่อทำการหักเลี้ยวพวงมาลัยมาที่มุม α_f แล้วเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเข้าสู่เส้นทางที่ 3 เพื่อเข้าสู่แถวพืช ดังแสดงในรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.31 (7-9)



รูปที่ 3.30 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย

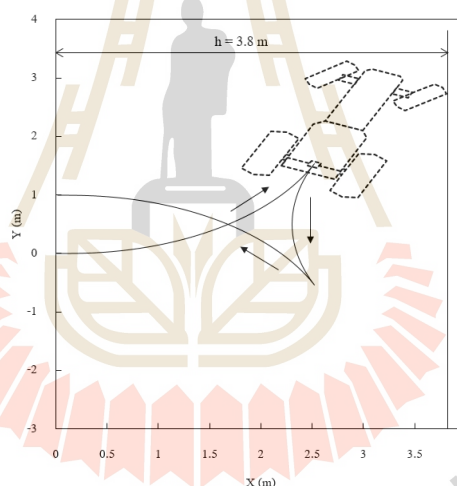


รูปที่ 3.31 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{ m}$) กรณีเลี้ยวเข้าร่องทางซ้ายจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสามมิติ

สำหรับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กรณีรถหักเลี้ยวไปทางขวา จะมีพฤติกรรมเสมือนภาพสะท้อนกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กรณีรถหักเลี้ยวไปทางซ้าย สามารถดูพฤติกรรมเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางอื่น ๆ ได้ที่ภาคผนวก ข

3.4.2.2 ระยะเวลาแปลง

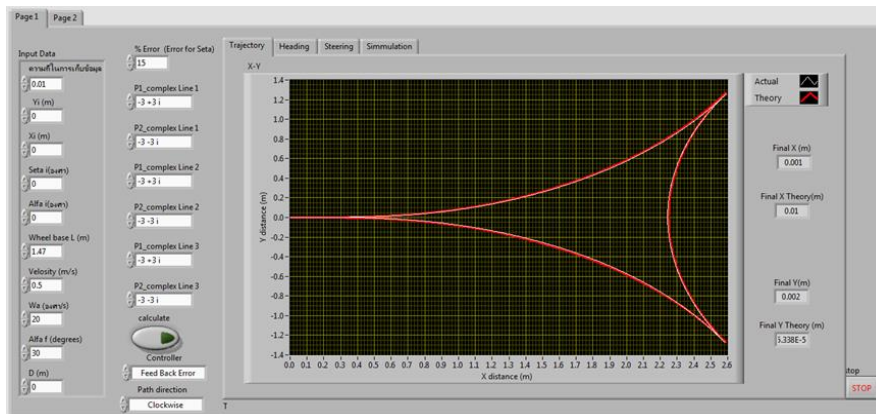
จากการจำลองสถานการณ์ทำให้ทราบว่า เมื่อรถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ระบุเงื่อนไขตามตารางที่ 3.1 แล้วกำหนดระยะห่างระหว่างร่องพืชม (D) เท่ากับ 0 m 1 m และ - 1 m ทั้งกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายและทางขวาใช้ระยะเวลาแปลง (h) ประมาณ 3.8 m รูปที่ 3.32 แสดงตัวอย่างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กรณีรถแทรกเตอร์หักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย ส่วนระยะเวลาแปลงของการเลี้ยวกลับรูปแบบอื่น ๆ ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 3.32 เส้นทางการเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืชม (D) เท่ากับ 1 m กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย

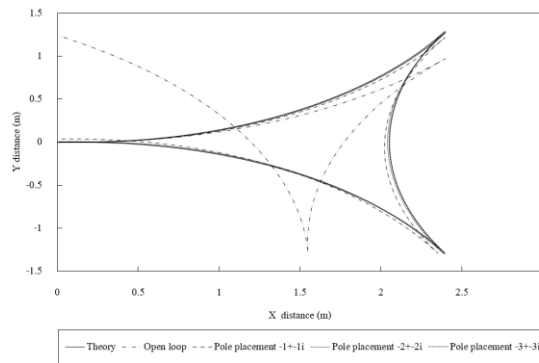
3.4.3 ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบสมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

เมื่อป้อนค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้างเส้นทางตามที่กำหนดเงื่อนไขไว้ในตารางที่ 3.1 ป้อนค่าโพล และป้อนค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนให้แก่ตัวโปรแกรมจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางที่ออกแบบ โปรแกรมที่พัฒนาสามารถดูได้ในรูปที่ 3.33

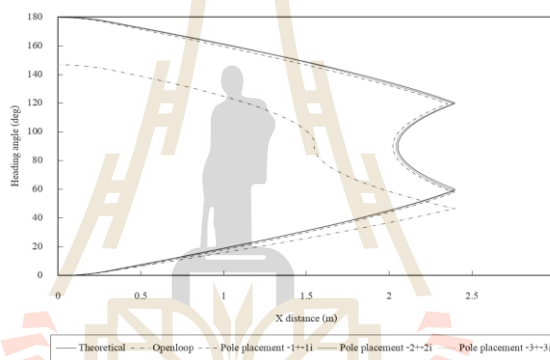


รูปที่ 3.33 โปรแกรมจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบควบคุม

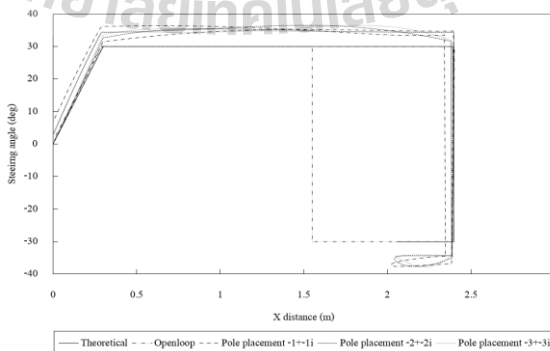
ตัวอย่างผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพลแสดงดังรูปที่ 3.34 - 3.36 สามารถดูผลการทดสอบสมรรถนะเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ค รูปที่ 3.34 - 3.36 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่และมุมเลี้ยว ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกยตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ และตารางที่ 3.2 รวมผลค่าความผิดพลาดในแกน Y และค่าความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ตำแหน่งสุดท้ายของการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมบนเส้นทางต่าง ๆ จากผลการจำลองสถานการณ์จะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้ การตอบสนองของตัวควบคุมที่ใช้โพล $p_1, p_2 = -2 \pm 2i$ และ $p_1, p_2 = -3 \pm 3i$ มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุมที่ใช้โพล $p_1, p_2 = -3 \pm 3i$ มีสมรรถนะดีกว่า โดยเห็นได้จากความผิดพลาดในแกน Y และความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ที่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้โพล $p_1, p_2 = -3 \pm 3i$ จึงถูกเลือกสำหรับการควบคุมรถแทรกเตอร์ในการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 3.34 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ 3.35 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ 3.36 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเขาร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย

ตารางที่ 3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพล

รูปแบบการเลี้ยวกลับรอด	ตัวควบคุม	ค่าผิดพลาดทางแกนY ที่ตำแหน่งสุดท้าย (m)	ค่าผิดพลาดของทิศทาง หน้ารถ ที่ตำแหน่งสุดท้าย (deg)
เลี้ยวกลับเข้าร่องเดิม (D=0) เลี้ยวทางซ้าย	Open loop	1.3	-33.1
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	0.04	0.07
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	0.01	0.42
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	0.003	0.15
เลี้ยวกลับเข้าร่องเดิม (D=0) เลี้ยวทางขวา	Open loop	-1.24	-33.02
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	-0.04	-0.1
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	-0.01	-0.4
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	-0.003	-0.1
เลี้ยวกลับเข้าร่องถัดไป (D=1) เลี้ยวเข้าร่องซ้าย	Open loop	1.6	-26.8
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	0.04	0.22
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	0.008	0.4
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	0.003	0.15
เลี้ยวกลับเข้าร่องถัดไป (D=1) เลี้ยวเข้าร่องขวา	Open loop	1.6	-26.8
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	0.04	0.22
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	0.008	0.4
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	0.003	0.15
เลี้ยวกลับเข้าร่องถัดไป (D=-1) เลี้ยวเข้าร่องซ้าย	Open loop	0.92	-38.235
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	-0.04	-0.14
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	-0.01	0.41
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	-0.01	0.15
เลี้ยวกลับเข้าร่องถัดไป (D=-1) เลี้ยวเข้าร่องขวา	Open loop	-0.92	-38.35
	$p_1, p_2 = -1 \pm 1 i$	-0.04	-0.04
	$p_1, p_2 = -2 \pm 2 i$	-0.008	0.41
	$p_1, p_2 = -3 \pm 3 i$	-0.003	0.15

3.5 สรุปผลการวิจัย

1) ระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

เส้นทางเลี้ยวกลับรถแบบทางปลาประกอบด้วยเส้นทางย่อย 5 เส้นทาง คือส่วนโค้งเปลี่ยนขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมถอยหลัง ส่วนโค้งวงกลมขาออก และส่วนโค้งเปลี่ยนขาออก ส่วนโค้งเหล่านี้ถูกออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเรขาคณิตของรถแทรกเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และระยะห่างระหว่างร่องพื้ ซึ่งสามารถสร้างเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงแบบทางปลาได้ 6 รูปแบบ ครอบคลุมภาระงานเลี้ยวกลับหัวแปลง ไปร่องทางซ้าย ร่องทางขวา และเลี้ยวกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม ถูกตรวจสอบ โดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW จากการจำลองสถานการณ์พบว่าระบบออกแบบเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลงสามารถสร้างเส้นทางได้อย่างถูกต้อง

2) การจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัวแปลง

รถแทรกเตอร์ถูกสร้างด้วยแบบจำลองทางคิเนเมติกส์แบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถจำลองสถานการณ์ให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ได้ เมื่อจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถแสดงพฤติกรรมขนาดเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ได้เสมือนจริง

3) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์

ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วยเทคนิคการวางตำแหน่งโพลถูกนำมาใช้ชดเชยค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางการรถ การจำลองสถานการณ์ถูกกระทำภายใต้สถานะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุมเพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สิ่งรบกวนของระบบควบคุมถูกกำหนดจากความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวขณะบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ถูกตรวจสอบโดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW จากการจำลองสถานการณ์พบว่าตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.6 รายการอ้างอิง

- กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศิริ. (2554). **LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม**. บริษัท วี.พี.พี. (1991) จำกัด: บริษัท ซี.เอ็ดดูเคชั่น จำกัดมหาชน.
- กองพัน อารีรักษ์. (2560). **ระบบควบคุม**. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โคราช มาร์เก็ตติ้ง แอนด์ โปรดักชัน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ธีรวัฒน์ เจเดือน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ, และจรรยาศักดิ์ สมพงษ์. (2559). การจำลองระบบ ออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17**. วันที่ 8-10 กันยายน 2559. กรุงเทพฯ.

ธีรวัฒน์ เจเดือน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, กวี คงมั่น และชยยุทธ์ เสียงดัง. (2559). การออกแบบเส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชันโพลีโนเมียล. รายงานการประชุม **วิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3**. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น.

มงคล กวางวโรภาส (2530). **เครื่องท่อนแรงในฟาร์ม**. สำนักพิมพ์นลิน:กรุงเทพฯ

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2556). **การควบคุมระบบพลศาสตร์**. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัท วิ.พรินท์ (1991)จำกัด:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์.

สมยศ เชิญอักษร. (2540). **การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบทางวิศวกรรม**. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์:มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน

Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B. and Martinet, P., (Oct. 2009). Motion planner and lateral-longitudinal controllers for autonomous maneuvers of a farm vehicle in headland., **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**

บทที่ 4

การทดสอบรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับหัวแปลง

4.1 บทคัดย่อ

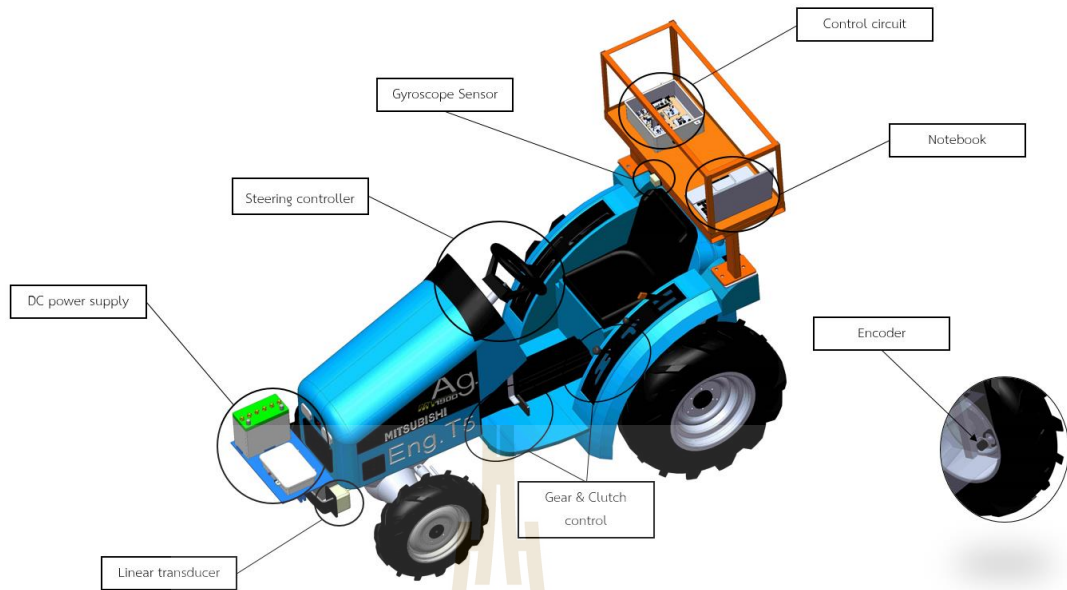
งานวิจัยส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบสมรรถนะขั้นต้นของวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลงด้วยการประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์มาพัฒนารถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ได้อย่างอัตโนมัติ รถแทรกเตอร์ได้ถูกติดตั้งระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ ระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์ ระบบจ่ายไฟกระแสตรง ระบบประมวลผลควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ และควบคุมสั่งงานผ่านโปรแกรมที่พัฒนาจากโปรแกรม LabVIEW การทดสอบจะทดสอบบนพื้นปูนและพื้นดิน หลังทำการทดสอบพบว่าขั้นต้นวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงที่พัฒนาขึ้นสามารถบังคับรถแทรกเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 บทนำ

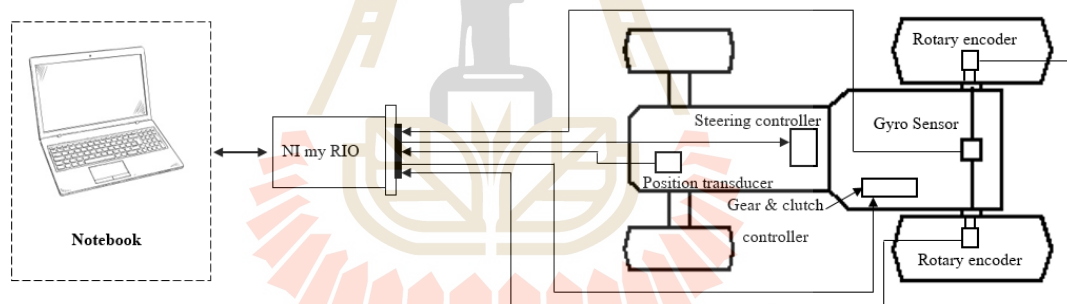
จากการศึกษาในบทที่ 3 รถแทรกเตอร์ถูกจำลองด้วยแบบจำลองทางกึ่งเมตริกส์บนพิกัดฉากใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดของแบบจำลองผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าขั้นต้นวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถหัวแปลงสามารถนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจำลองได้ ดังนั้นในบทนี้จะนำขั้นต้นวิธีที่ออกแบบมาควบคุมรถแทรกเตอร์จริง โดยประยุกต์ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์มาพัฒนารถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ได้อย่างอัตโนมัติ การทดสอบสมรรถนะจะทดสอบบนพื้นปูน และพื้นดิน

4.3 วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนาม แบ่งออกเป็น 6 ส่วนคือ ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว ระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์ ระบบจ่ายไฟกระแสตรง ระบบประมวลผลควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ และโปรแกรมสำหรับควบคุมการขับเคลื่อนอัตโนมัติ มีตำแหน่งติดตั้งดังรูปที่ 4.1 และแผนผังระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนามแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 รถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนาม



รูปที่ 4.2 แผนผังระบบควบคุมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับทดสอบภาคสนาม

4.3.1 ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว

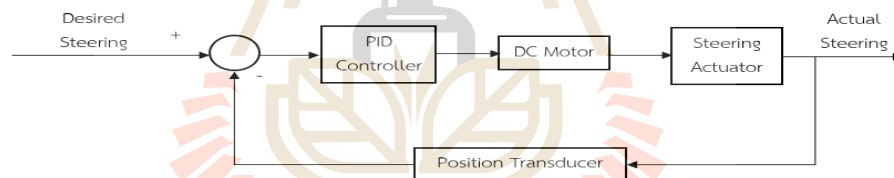
4.3.1.1 การออกแบบระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว

ชุดบังคับเลี้ยว(ฉัตริน เรืองจอหอ, ชีรวัฒน์ เจเดือน, กมลชนน วงศ์สถาน, และพยุงศักดิ์ จุลยุเสน, 2561) ใช้มอเตอร์เกียร์กระแสตรงขนาด 60 W แรงบิดสูงสุด 11 N.m. เป็นต้นกำลัง ส่งผ่านกำลังด้วยชุดเฟืองโซ่(จำนวน 40 ฟัน โซ่เบอร์25)เพื่อหมุนแกนพวงมาลัย และตัดต่อกำลังด้วยคลัตช์รุ่น CS-08-35G แรงบิดขนาด 11 N.m. เพื่อความสะดวกในการบังคับด้วยมือ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดถูกนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจากการเปรียบเทียบค่ามุมเลี้ยวที่ต้องการกับค่ามุมเลี้ยวจริงของรถแทรกเตอร์ ตัวควบคุมจะทำการคำนวณค่ามุมเลี้ยวชดเชยและส่งสัญญาณบังคับเลี้ยวให้มอเตอร์เพื่อควบคุมระบบบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์



รูปที่ 4.4 ระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

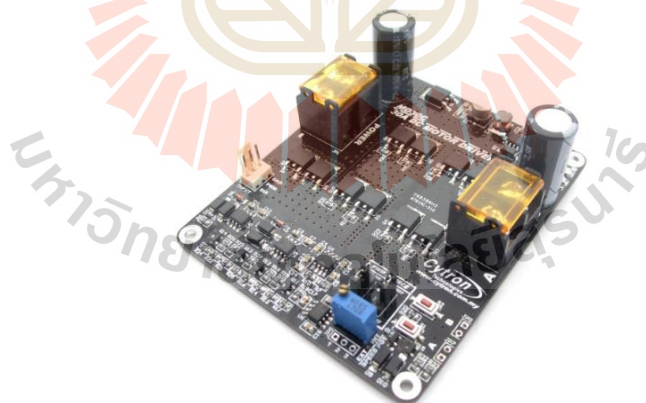
อุปกรณ์วัดมุมต่าง ๆ ถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพาโดยผ่านบอร์ด NI myRIO อุปกรณ์วัดมุมประกอบไปด้วย

1. ทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ยี่ห้อ AMETEK รุ่น PT-420-60 แสดงดังรูปที่ 4.5 ถูกนำมาใช้เพื่อวัดค่ามุมเลี้ยว ในการใช้งานป้อนไฟเลี้ยง 24 V สามารถวัดตำแหน่งได้ 0 Inch ถึง 60 Inch สัญญาณค่าออกเป็นค่ากระแสไฟฟ้าช่วง 4 mA(0 Inch) ถึง 20 mA(60 Inch) สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านทาง Analog input



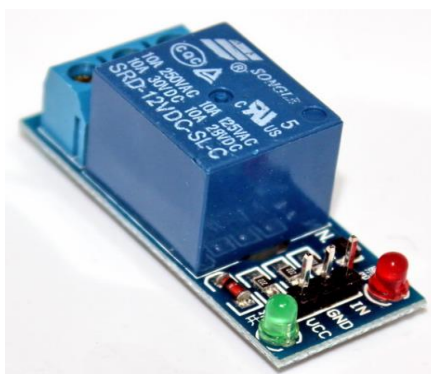
รูปที่ 4.5 ทรานสดีวเซอร์วัดตำแหน่ง ยี่ห้อ AMETEK รุ่น PT-420-60

2. วงจรขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Cytron รุ่น MD30C Rev 2.0 แสดงดังรูปที่ 4.6 ถูกนำมาใช้ขับมอเตอร์เกียร์กระแสตรง ในการใช้งานนั้นจะป้อนไฟเลี้ยง 24 V วงจรการทำงานของชุดไดร์มอเตอร์นี้จะเป็นแบบ Fully NMOS H-Bridge เพื่อให้มอเตอร์สามารถกลับทางหมุนได้ สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านสัญญาณควบคุม 2 สัญญาณ คือ PWM ผ่านช่อง Digital output สำหรับควบคุมความเร็ว และ Analog output ขนาด 5 V สำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 4.6 วงจรขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Cytron รุ่น MD30C Rev 2.0

3. รีเลย์ ยี่ห้อ Songle รุ่น SRD-05VDC-SL-C แสดงดังรูปที่ 4.7 ถูกนำมาใช้ตัดต่อไฟกระแสตรงเข้าคัลด์ซ์ ในการใช้งานจะนำมาตัดต่อไฟ 24 V สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านสัญญาณควบคุม Analog output ขนาด 5 V



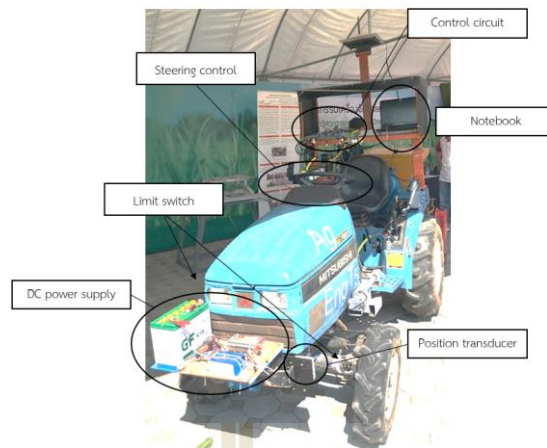
รูปที่ 4.7 รีเลย์ ยี่ห้อ Songle รุ่น SMD-05VDC-SL-C

4. ลิมิตสวิทช์ ยี่ห้อ Tend รุ่น TM-1701 แสดงดังรูปที่ 4.8 ถูกนำมาใช้ตรวจรู้มุมเลี้ยวตอนหักเลี้ยวขวาสุดและซ้ายสุดเพื่อเป็นการป้องกันระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวเสียหายในการใช้งานจะจ่ายไฟเลี้ยง 5 V สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านทาง Analog input

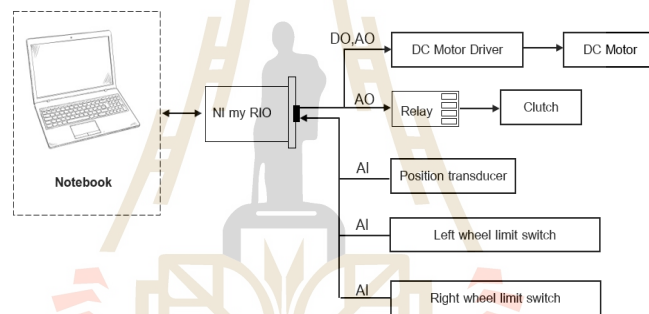


รูปที่ 4.8 ลิมิตสวิทช์ ยี่ห้อ Tend รุ่น TM-1701

รูปที่ 4.9 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติบนรถแทรกเตอร์ แผนผังของระบบวัดมุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 4.10 โปรแกรมควบคุมถูกพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4.9 การติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ



รูปที่ 4.10 แผนผังของระบบวัดมุมสำหรับชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

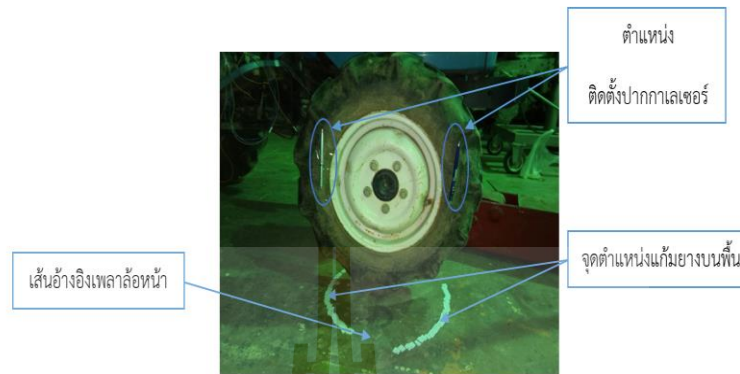
4.3.1.2 การสอบเทียบมุมเลี้ยว

การสอบเทียบมุมเลี้ยวทำโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะของสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง จากตำแหน่งการหักเลี้ยวขวาสุดไปซ้ายสุดด้วยการลดระยะของสายเคเบิลลงครึ่งละประมาณ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.12 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1

$$\alpha = 90 - \left(\frac{\alpha_L + \alpha_R}{2} \right) \quad (4.1)$$

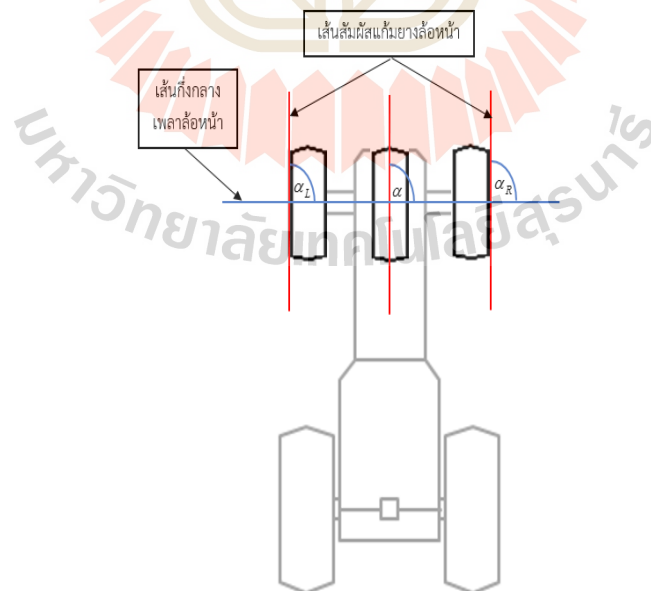
เมื่อ α คือ มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

α_L คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าซ้ายกับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า
 α_R คือ มุมระหว่างเส้นสัมผัสแก้มยางด้านนอกล้อหน้าขวากับเส้นกึ่งกลางเพลาล้อหน้า



รูปที่ 4.11 การสอบเทียบมุมเลี้ยว

รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ เส้นสัมผัสแก้มยางหาได้โดยการถ่ายตำแหน่งของแก้มยางด้วยปากกาเลเซอร์ลงบนพื้นราบ ลูกดิ่งถูกนำมาระบุเส้นกึ่งกลางเพลลา ไม้บรรทัดครึ่งวงกลมถูกนำมาวัดมุมเลี้ยว



รูปที่ 4.12 วิธีการการวัดมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์

4.3.1.3 การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับกล้วย

การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับกล้วยโดยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์กระแสตรงจากแรงดันไฟฟ้า 0 V จนถึง 24 V แบ่งช่วงครั้งละ 1 V เพื่อวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และกำลังของมอเตอร์ ทำการทดสอบบนพื้นปูน พื้นดิน และพื้นหญ้าทดสอบขณะติดเครื่อง รูปที่ 4.13 แสดงการทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับกล้วย



รูปที่ 4.13 การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับกล้วยบนพื้นหญ้า

4.3.1.4 การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

ตัวควบคุมแบบ PID ดังสมการที่ 4.2 ถูกนำมาใช้ควบคุมการทำงานของชุดบังคับกล้วยอัตโนมัติ ค่าตัวแปร K_p , T_i และ T_d ถูกปรับจูนด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols เพราะมีความสะดวกและไม่ต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Naranjo, et al, 2007; Åström and Hägglund, 1995; กองพัน อารีรักษ์, 2560; ยุทธนา กันทะพะยา และเฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์, 2559)

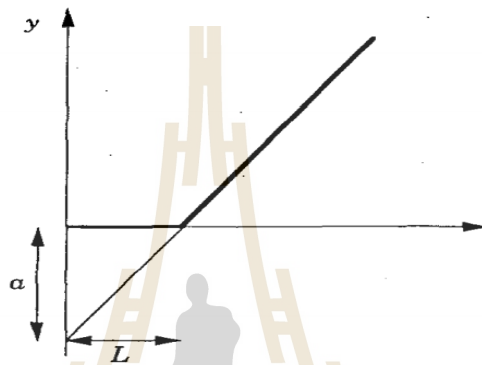
$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ $G_c(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน

K_p คือ อัตราขยายเชิงปรับส่วน

T_i คือ ค่าเวลากงตัว
 T_d คือ เวลาที่ใช้ในการอนุพันธ์

ค่าตัวแปร K_p , T_i และ T_d คำนวณจากผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ด้วยการพิจารณาค่าคงที่ a และ L ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.14 การวัดผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได ตามวิธี Ziegler-Nichols step response (Åström et al.1995)

ตารางที่ 4.1 การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ

Controller	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$	-	-
PI	$0.9/a$	$3L$	-
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

การหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมทำโดยการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg การทดสอบทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์จอดอยู่กับที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยว

4.3.1.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม PID ถูกทำดังนี้

1) การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุต
ขั้นบันไดที่ 20 deg

2) การทดสอบการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุต
แบบต่อเนื่อง มุมเลี้ยวที่ใช้ในการทดสอบได้มาจากการสร้างเส้นทางของรถแทรกเตอร์กรณีรถ
เคลื่อนที่กลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา(ธีรวัฒน์ เจเดือน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, ศธา วาทกิจ, และจรรณ
ศักดิ์ สมพงษ์. 2559) ค่าพารามิเตอร์การสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลาแสดงในตาราง
ที่ 4.2 การทดสอบทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์จอดอยู่กับที่ ดังแสดง
ในรูปที่ 4.15

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรสำหรับการสร้างเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา

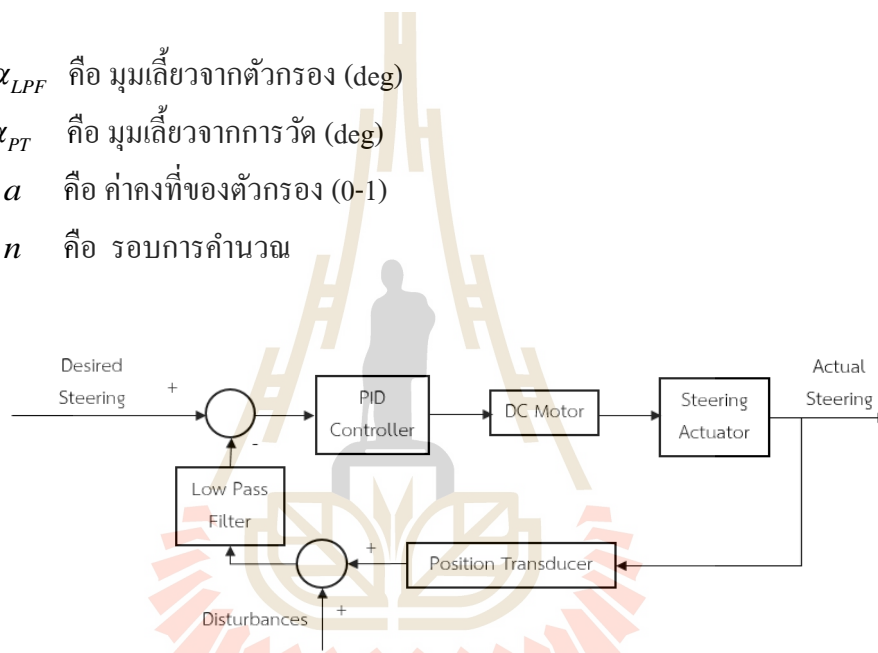
Parameters	Value
ความถี่ในการเก็บข้อมูล (ΔT_i)	0.05 s
ตำแหน่งเริ่มต้นบนแกน X (X_i)	0 m
ตำแหน่งเริ่มต้นบนแกน Y (Y_i)	0 m
ทิศทางหน้ารถเริ่มต้น (θ_i)	0 deg
มุมเลี้ยวเริ่มต้น (α_i)	0 deg
ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางเพลาล้อหน้าและล้อหลัง (L)	1.5 m
ความเร็วรถแทรกเตอร์ (V_r)	0.2 m s ⁻¹
ความเร็วการเลี้ยว (ω_a)	13 deg s ⁻¹
มุมเลี้ยวสูงสุด (α_f)	30 deg

4.3.1.6 วิธีลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน(low pass filter)

สัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งทำให้ค่ามุมเลี้ยวที่อ่านได้ไม่ราบเรียบ ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดความไม่ราบเรียบของค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยมีสมการการคำนวณดังสมการที่ 4.3

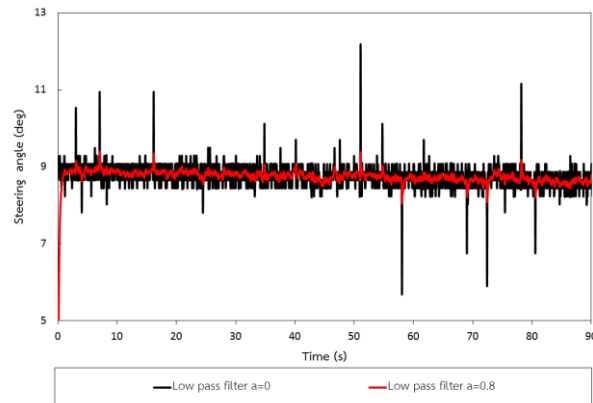
$$\alpha_{LPF}(n) = (1-a)\alpha_{PT}(n) + a\alpha_{LPF}(n-1) \quad (4.3)$$

โดย α_{LPF} คือ มุมเลี้ยวจากตัวกรอง (deg)
 α_{PT} คือ มุมเลี้ยวจากการวัด (deg)
 a คือ ค่าคงที่ของตัวกรอง (0-1)
 n คือ รอบการคำนวณ



รูปที่ 4.16 การลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)

ค่าคงที่ของตัวกรองมีอิทธิพลต่อการตอบสนองของระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว เมื่อค่าคงที่ใกล้เคียง 1 จะทำให้ได้ค่ามุมเลี้ยวที่ราบเรียบแต่ระบบควบคุมจะตอบสนองช้า ดังนั้นค่าคงที่นี้จึงถูกกำหนดไว้เท่ากับ 0.8 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการลดความแปรปรวนของมุมเลี้ยวด้วยตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน(low pass filter)

4.3.2 ระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์

การระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์เลือกใช้หลักการ Dead reckoning โดยคำนวณหาตำแหน่งปัจจุบันของรถแทรกเตอร์ จากการอ้างอิงตำแหน่งและทิศทางหน้ารถเดิม

4.3.2.1 การติดตั้งและวิธีคำนวณ

รูปที่ 4.19 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดของระบบระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ อุปกรณ์วัดต่างๆถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพาโดยผ่านบอร์ด NI myRIO จากสมการที่ 4.4 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์จะสามารถคำนวณหาตำแหน่งได้จากมุมการหมุนของล้อหรือการนับจำนวนพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ ที่ติดตั้งอยู่บริเวณล้อหลังทั้งสองล้อของรถแทรกเตอร์ และสามารถหาทิศทางหน้ารถได้จากการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม มีแผนผังของระบบวัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ดังรูปภาพที่ 4.18

$$X_k = X_{k-1} + \frac{L_M}{T_W} \frac{(\Delta T_L + \Delta T_R)}{2} \cos(\theta_M) \quad (4.4)$$

$$Y_k = Y_{k-1} + \frac{L_M}{T_W} \frac{(\Delta T_L + \Delta T_R)}{2} \sin(\theta_M)$$

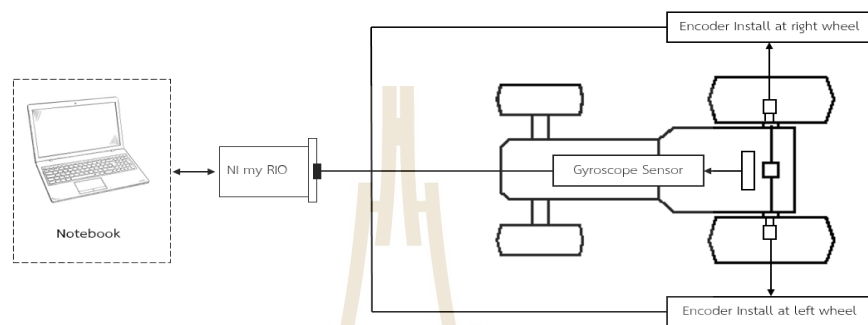
เมื่อ ΔT_L คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ที่ล้อขับเคลื่อนด้านซ้าย (Pulse)

ΔT_R คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ที่ล้อขับเคลื่อนด้านขวา (Pulse)

T_w คือ จำนวนพัลส์เอ็นโค้ดเดอร์เมื่อล้อหมุนเป็นระยะ L_M (Pulse)

L_M คือ ระยะทางสำหรับสอบเทียบระยะทางต่อจำนวนพัลส์เอ็นโค้ดเดอร์ (m)

θ_M คือ ทิศทางหน้ารถได้จากการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม(rad)



รูปที่ 4.18 แผนผังของระบบวัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์



รูปที่ 4.19 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์

รูปที่ 4.19 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดสำหรับระบุตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ อุปกรณ์วัดคุมต่างๆถูกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพาโดยผ่านบอร์ด NI myRIO

อุปกรณ์วัดคุมประกอบไปด้วย

1. เ็นโคคเตอร์ การใช้งานป้อนไฟเลี้ยง 5 V สัญญาณขาออกเป็นพัลส์ 0 V และ 5 V ในการเคลื่อนที่ 1 รอบของเอ็น โคคเตอร์จะนับจำนวนพัลส์ได้ทั้งหมด 600 พัลส์ สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านทาง Digital input แสดงการติดตั้งดังรูปที่ 4.19 ทางขวา

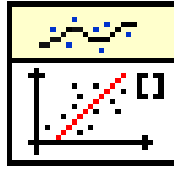
2. เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม ยี่ห้อ KISTLER รุ่น TAG-32150M7-25-VR-EGA ถูกนำมาใช้หาทิศทางหน้ารถของรถแทรกเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.20 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ งาน 8-42 V (ในงานวิจัยใช้ไฟเลี้ยง 12 V) ความสามารถวัดความเร็วเชิงมุมสูงสุด 150 deg/s สัญญาณรบกวน 0.2 deg/s RMS (25Hz BW) สามารถเชื่อมต่อกับบอร์ด NI myRIO ผ่านทาง Analog input จากการใช้งานพบว่าขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมบอกทิศทางหน้ารถมีการ Drift ไปในแนวเดียวกันตามรูปที่ 4.22 (ก) จากภาพจะเห็นว่า การ Drift เป็นเชิงเส้นสมการเส้นตรงจึงถูกใช้เป็นสมการปรับแก้ดังสมการ 4.5 ฟังก์ชัน linear fit ถูกนำมาใช้หาความชันของสมการปรับแก้ หลังใช้สมการปรับแก้พบว่าสามารถลดการลอยของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมได้ตามรูปที่ 4.22 (ข)

$$G_{error} = m_G G_n \quad (4.5)$$

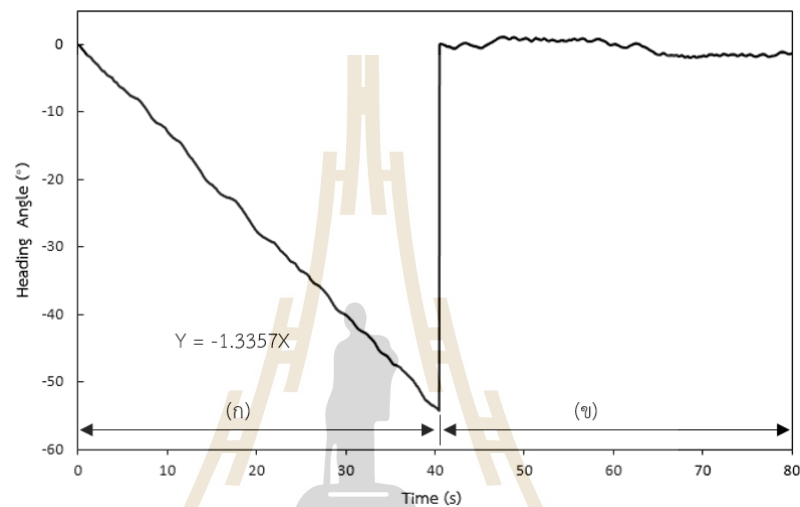
โดย G_{error} คือค่ามุมคลาดเคลื่อน (deg)
 G_n คือจำนวนครั้งที่วนลูบการทำงาน
 m_G คือค่าความชันของสมการปรับแก้



รูปที่ 4.20 ไจโรสโคป ยี่ห้อ KISTLER รุ่น TAG-32150M7-25-VR-EGA



รูปที่ 4.21 ฟังก์ชัน Linear Fit ในโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 4.22 (ก) การลดยของมุมทิศทางหน้ารถ (ข) มุมทิศทางหน้ารถเมื่อใช้สมการปรับแก้

ก่อนทำการทดสอบจะทำการสอบเทียบจำนวนพัลส์ต่อระยะทางที่เคลื่อนที่และทำการหาความชันของสมการปรับแก้เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมทุกครั้งเพื่อเพิ่มความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่ง

4.3.2.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์

1. วิธีระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่จริง

การทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์เป็นการตรวจสอบความแม่นยำของตำแหน่งที่ได้จากระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์กับตำแหน่งจริง การติดตามตำแหน่งจริงได้ใช้ชุดให้น้ำเกลือ การติดตั้งปลายสายน้ำเกลือ(ตำแหน่งที่หยดน้ำหยด)จะถูกติดตั้งให้ปลายสายอยู่ตำแหน่งกลางเพลาล้อหลังเพื่อให้ตรงกับการระบุตำแหน่งด้วยวิธี Dead reckoning การติดตั้งดูได้จากรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งติดตั้งชุดสายน้ำเกลือระบบตำแหน่งตัวรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

ตำแหน่งจริงถูกระบุขณะทำการทดสอบ โดยขณะทำการทดสอบจะตั้งค่าความถี่ของหยดน้ำให้เหมาะสมและสม่ำเสมอตลอดการทดสอบ เมื่อรถแทรกเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ที่จะปรากฏรอยหยดน้ำขึ้นที่พื้นตามเส้นทางที่รถเคลื่อนที่ไป ตำแหน่งหยดน้ำบนพื้นจะปรากฏชั่วคราวจึงต้องตามทำตำหนิลงบนพื้นให้ชัดเจน ในกรณีทดสอบบนพื้นปูนได้ใช้ชอล์คขีดทำเครื่องหมายลงบนหยดน้ำ (แสดงดังรูปที่ 4.24) และในกรณีทดสอบบนพื้นดินได้ใช้ปูนขาวโรยบนหยดน้ำ (แสดงดังรูปที่ 4.25)



รูปที่ 4.24 การทำตำหนิหยดน้ำบนพื้นด้วยชอล์ค



รูปที่ 4.25 การทำตำแหน่งหยดน้ำบนพื้นด้วยปูนขาว

ตำแหน่งจริงที่ถูกทำตำแหน่งลงบนพื้น ได้ถูกระบุพิกัดด้วยกล้อง Total station ยี่ห้อ TOPCON รุ่น ES-105 และ PRISM ยี่ห้อ MYZOX รุ่น MG-2500 Series ดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 การระบุพิกัดเส้นทางการเคลื่อนที่จริง

ขั้นตอนการระบุตำแหน่งจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่จริง

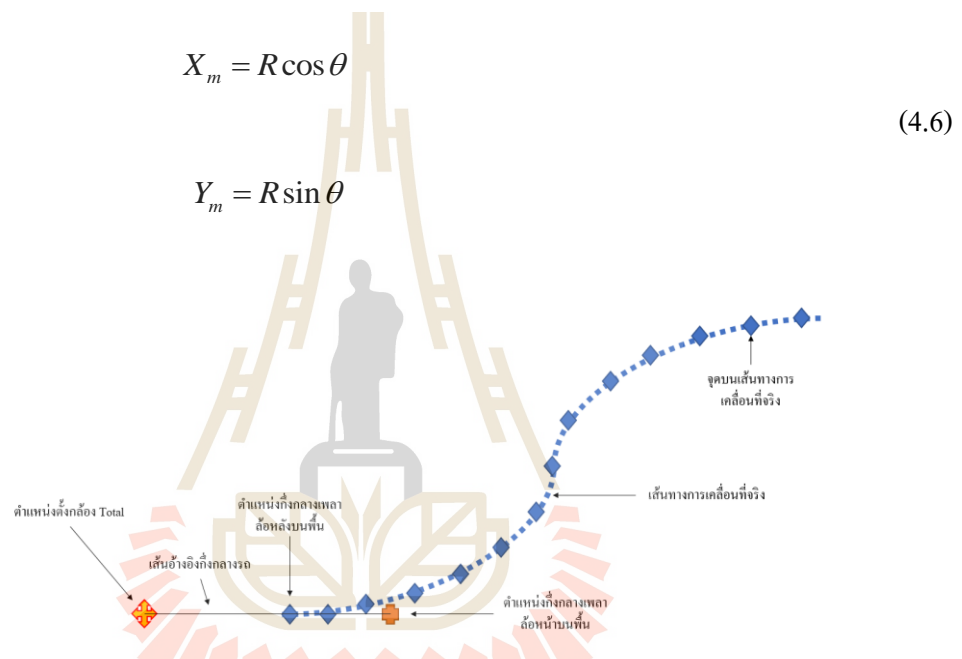
1. ทำการถ่ายตำแหน่งกึ่งกลางเพลาล้อหน้าและตำแหน่งกึ่งกลางเพลาล้อหลังลงบนพื้นที่ทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.27

2. ทำการหาเส้นอ้างอิงกึ่งกลางรถ และทำการตั้งกล้อง Total station ลงบนเส้นอ้างอิงกึ่งกลางรถ ดังแสดงในรูปที่ 4.27

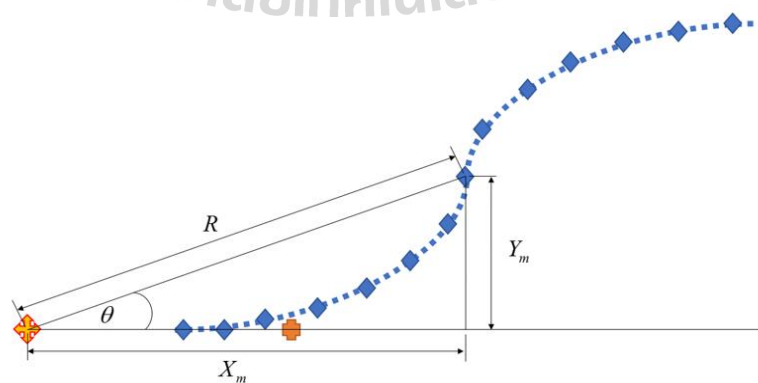
3. ทำการตั้งปริซึมบนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการทราบตำแหน่งและทำการส่องกล้อง Total station ไปยังปริซึม ค่าพิกัดที่ได้จากกล้องจะบอกระยะจากกล้องไปปริซึม (R) และมุมกวาดจากเส้นอ้างอิงกึ่งกลางรถไปยังปริซึม (θ) ดังแสดงในรูปที่ 4.28

4. ทำข้อ 2 และ ข้อ 3 จนครบทุกจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่จริง

5. นำข้อมูลตำแหน่งที่ได้มาแปลงให้อยู่ในพิกัด X-Y ตามสมการที่ 4.6



รูปที่ 4.27 การระบุพิกัดเส้นทางการเคลื่อนที่จริง



รูปที่ 4.28 ตัวแปรสำหรับคำนวณตำแหน่งจุดบนเส้นทางการเคลื่อนที่จริง

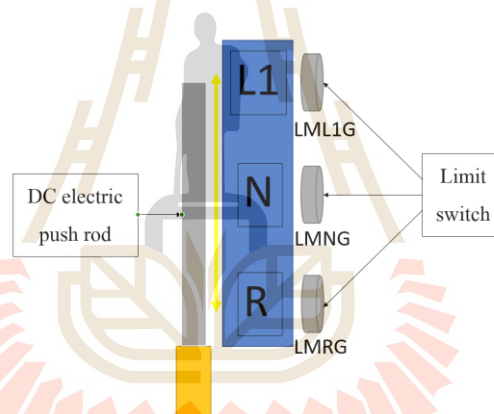
2. เงื่อนไขการทดสอบ

การทดสอบสมรรถนะของระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์เงื่อนไขการทดสอบเหมือนกับทดสอบสมรรถนะขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง เงื่อนไขการทดสอบตามหัวข้อ 4.1.6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อชี้แจงขีดจำกัดของระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์ที่พัฒนาขึ้น

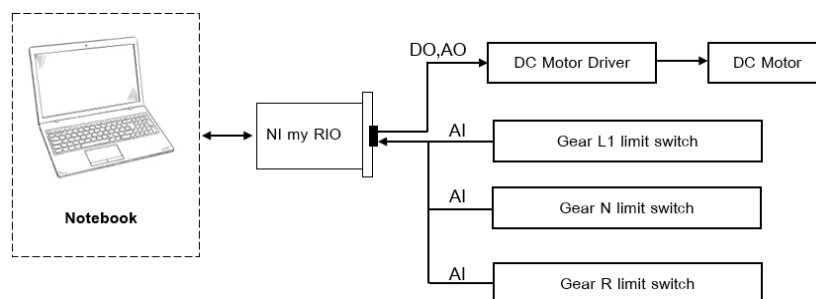
4.3.3 ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

4.3.3.1 การออกแบบระบบควบคุมคันเกียร์

รูปที่ 4.29 แสดงแนวคิดในการออกแบบระบบควบคุมคันเกียร์จะใช้ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเป็นตัวหลัก/ดึงคันเกียร์และใช้ลิ้มิตสวิตช์เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ทำการติดตั้งลิ้มิต-สวิตช์ที่ตำแหน่งเกียร์เดินหน้าระดับ 1 (L1) เกียร์ว่าง (N) และเกียร์ถอยหลัง(R) แผนผังของระบบควบคุมชุดบังคับเกียร์แสดงดังรูปที่ 4.30



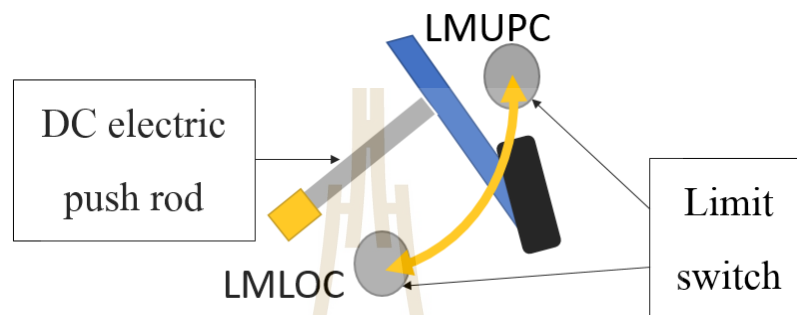
รูปที่ 4.29 ระบบควบคุมคันเกียร์



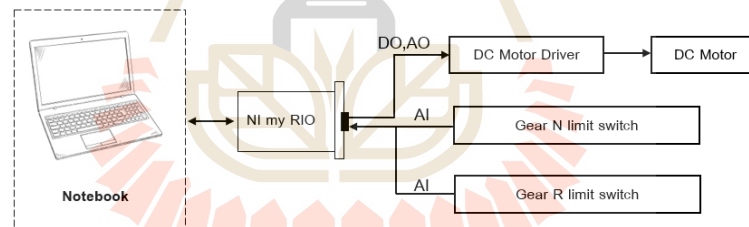
รูปที่ 4.30 แผนผังของระบบควบคุมคันเกียร์

4.3.3.2 การออกแบบระบบวัดมุมกันคลัตช์

รูปที่ 4.31 แสดงแนวคิดในการออกแบบระบบวัดมุมกันคลัตช์จะใช้ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเป็นตัวผลัก/ดึงกันคลัตช์และใช้ลิมิตสวิตช์เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ทำการติดตั้งลิมิต-สวิตช์ที่ตำแหน่งกันคลัตช์สูงสุดและตำแหน่งกันคลัตช์ต่ำสุด แผนผังของระบบวัดมุมชุดบังคับคลัตช์แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ระบบวัดมุมกันคลัตช์



รูปที่ 4.32 แผนผังของระบบวัดมุมชุดบังคับคลัตช์

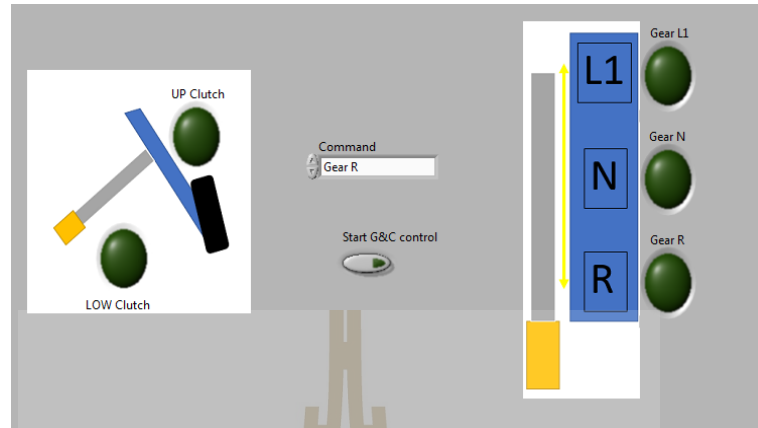
4.3.3.3 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

รูปที่ 4.33 แสดงหน้าจอแสดงผลและสั่งการระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติจากรูจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. ส่วนแสดงสถานะของลิมิตสวิตช์
2. ส่วนคำสั่ง(command)
3. ปุ่มเริ่มระบบ

ในกรณีรถแทรกเตอร์อยู่ในโหมดขับเคลื่อนอัตโนมัติ การสั่งการจะใช้เพียงคำสั่ง(command) สามารถอ่านรายละเอียดการพัฒนาโปรแกรมควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

ได้ในภาคผนวก ง



รูปที่ 4.33 หน้าจอแสดงผลและสั่งการระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

4.3.3.4 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

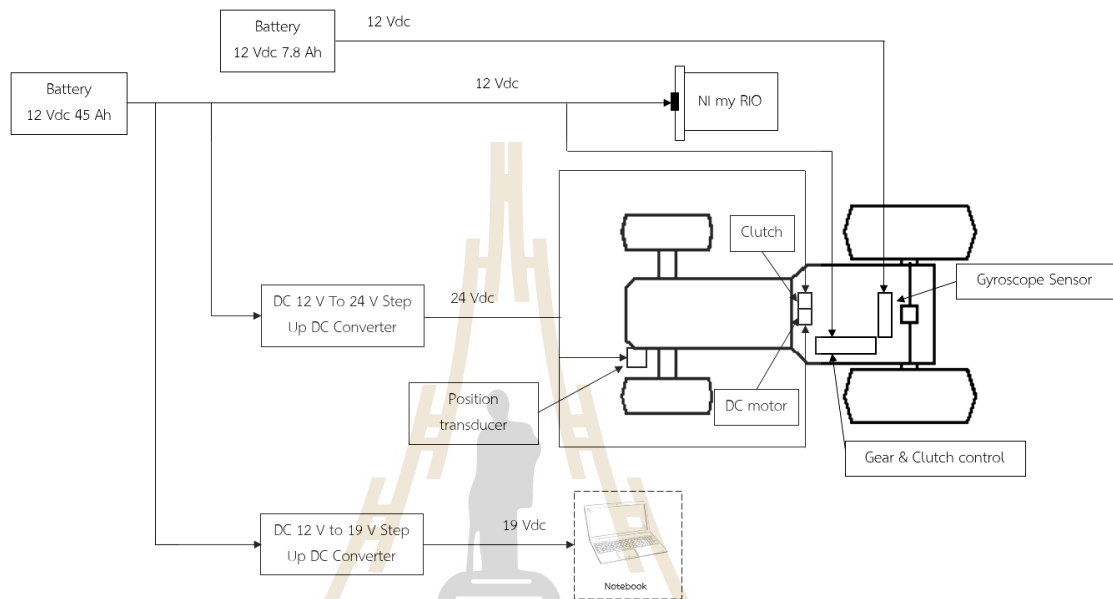
การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติถูกกระทำโดยการป้อนคำสั่งสั่งการแล้วบันทึกเวลาการตอบสนองของระบบ การทดสอบจะทดสอบขณะรถแทรกเตอร์ติดเครื่องยนต์ โดยทำการทดสอบบนพื้นคอนกรีต รูปที่ 4.34 แสดงการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ



รูปที่ 4.34 การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

4.3.4 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเลี้ยงอุปกรณ์วัดคুমมีแผนผังการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายสู่อุปกรณ์วัดคুমแสดงดังรูปที่ 4.35 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้กับอุปกรณ์วัดคুমมีขนาด 12 V 19 V และ 24 V



รูปที่ 4.35 แผนผังการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายสู่อุปกรณ์วัดคুম

4.3.5 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้และส่วนควบคุมการเคลื่อนที่

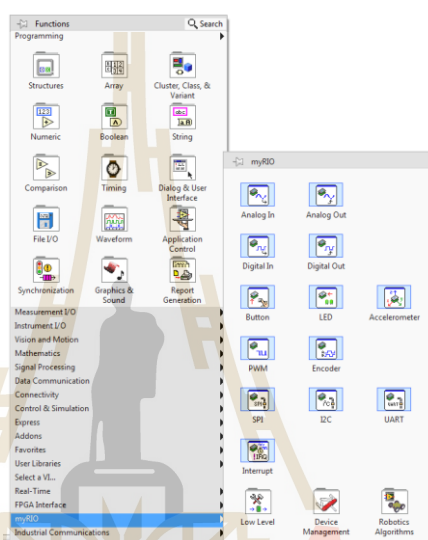
การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผล ติดต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุม แสดงผลและรับค่าข้อมูลจากผู้ใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป LabVIEW ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาโปรแกรม เพราะโปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมเชิงกราฟฟิก จึงทำให้ง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรมและมีการแสดงผลที่เข้าใจง่ายและสวยงาม โปรแกรมถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์วัดคুম ส่วนประมวลผล และส่วนแสดงผล บันทึกข้อมูลและรับข้อมูลจากผู้ใช้

1. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์วัดคুম เป็นส่วนของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นให้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดและอุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุม การรับส่งข้อมูลจะใช้ฟังก์ชันของ NI myRIO บนโปรแกรม LabVIEW การเลือกใช้ฟังก์ชันจะเลือกตามชนิดสัญญาณที่ทำการรับหรือส่งข้อมูล การเรียกใช้ฟังก์ชันที่ใช้งานจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.36

2. ส่วนประมวลผล เป็นส่วนที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าสัญญาณที่อุปกรณ์ตรวจวัด

ต่าง ๆ ส่งมาให้อยู่ในรูปแบบที่ใช้งาน โดยการใช้สมการจากการสอบเทียบหรือสมการจากการศึกษา และเป็นส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำการเขียนขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติเพื่อควบคุมรถให้เคลื่อนที่บนเส้นทางที่ผู้ใช้งานต้องการ

3. ส่วนแสดงผล บันทึกข้อมูลและรับข้อมูลจากผู้ใช้ เป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานสามารถดูผลการทำงาน สั่งการ ระบบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ ได้ ด้วยความสะดวก



รูปที่ 4.36 การเรียกใช้ฟังก์ชันที่ใช้งานของ NI myRIO บน โปรแกรม LabVIEW

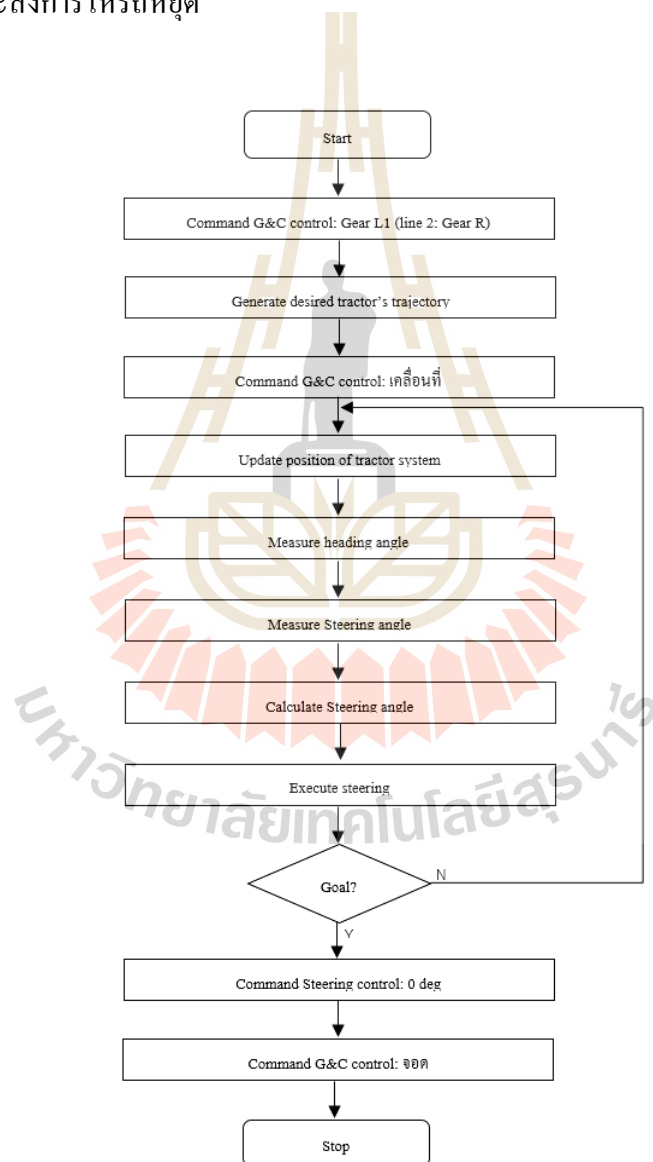
4.3.5.1 การพัฒนาโปรแกรมส่วนต่อประสานกับผู้ใช้และส่วนควบคุมการเคลื่อนที่

1. ลำดับการทำงาน

การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ได้ถูกออกแบบให้ง่ายต่อการใช้งาน

รูปที่ 4.37 แสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หลังจากผู้ใช้งานทำการกรอกข้อมูลที่จำเป็นในการสร้างเส้นทางและระบบควบคุมเสร็จแล้ว ผู้ใช้งานสามารถกดเริ่มโปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ เมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงานระบบจะตรวจสอบสถานะเกียร์ว่าอยู่ที่ตำแหน่งเกียร์ L1 (กรณีเส้นทางที่ 2 ตรวจสอบสถานะเกียร์ว่าอยู่ที่ตำแหน่งเกียร์ R) หรือไม่ถ้าไม่ระบบจะสั่งงานให้ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติทำการเปลี่ยนเกียร์ไปเกียร์ L1 (กรณีเส้นทางที่ 2 เปลี่ยนไปเกียร์ R) ต่อมาโปรแกรมจะทำการสร้างวิธีการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ตามที่ผู้ใช้งานระบุ หลังสร้างเส้นทางเสร็จโปรแกรมจะสั่งการระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติให้รถเคลื่อนที่ หลังรถเคลื่อนที่จะเข้าสู่ควบคุมรถให้เคลื่อนที่บน

เส้นทางที่ออกแบบ มีการทำงานดังนี้ โปรแกรมจะตรวจสอบตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ ตรวจสอบทิศทางหน้ารถ และตรวจสอบมุมเลี้ยว เพื่อป้อนให้กับระบบควบคุมการเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ออกแบบ หลังระบบควบคุมการเคลื่อนที่บนเส้นทางที่ออกแบบประมวลผลหามุมเลี้ยวปรับแก้แล้ว มุมเลี้ยวนี้จะถูกส่งไปยังระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวเพื่อหักเลี้ยวตามมุมเลี้ยวที่ส่งมา ระบบจะวนลูปแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตำแหน่งของรถถึงพิกัด X สุดท้ายของเส้นทาง(กรณีเส้นทางที่ 2 จะวนลูปแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งตำแหน่งของรถถึงพิกัด Y สุดท้ายของเส้นทาง) จะออกจากลูปควบคุมรถให้เคลื่อนที่บนเส้นทางที่ออกแบบ โปรแกรมจะสั่งการให้ระบบบังคับเลี้ยวหักเลี้ยวมาที่มุม 0 deg และสั่งการให้รถหยุด



รูปที่ 4.37 แผนภาพลำดับการทำงานของโปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ

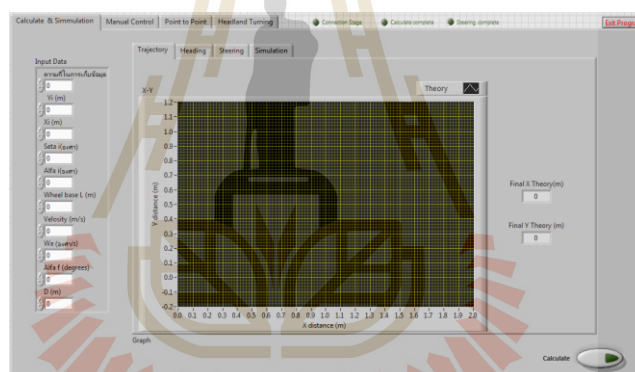
2. หน้าจอแสดงผลและสั่งการ

โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัตินี้ สร้างจากโปรแกรม LABVIEW[®] ประกอบด้วยสามหน้าจอหลัก

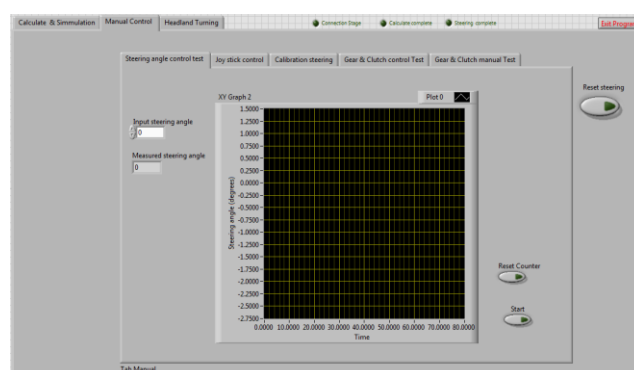
(1) หน้าจอ Calculation & Simulation สำหรับป้อนค่าที่จำเป็นในการสร้างเส้นทาง หน้าจอจะแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ ทิศทางหน้ารถ มุมเลี้ยว และสามารถจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ ตามรูปที่ 4.38

(2) หน้าจอ Manual Control สำหรับทดสอบระบบบังคับเลี้ยว ระบบบังคับคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติและอื่นๆตามต้องการได้ ตามรูปที่ 4.39

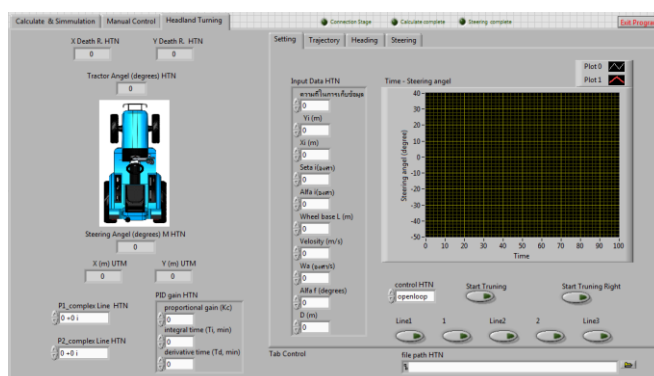
(3) หน้าจอ Headland turning สำหรับป้อนค่าโพลของชุดควบคุมรถ และป้อนค่าแกนของระบบบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ หน้าจอนี้เมื่อรถแทรกเตอร์ทำงานจะแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางหน้ารถ และมุมเลี้ยวตามทฤษฎีและที่ทำได้บนกราฟเดียวกัน ตามรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.38 โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Calculation & Simulation



รูปที่ 4.39 โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Manual Control



รูปที่ 4.40 โปรแกรมควบคุมรถแทรกเตอร์เกษตรอัตโนมัติ หน้าจอ Headland turning

4.3.6 การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง

การทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงที่พัฒนาขึ้นกระทำบนพื้นที่ปูนของศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 4.41 และกระทำในแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 4.42 ดินมีสมบัติดังนี้ sand 79.84% silt 14.00% clay 2.16% ประเภทเนื้อดินเป็นแบบ loamy sand มีดัชนีความแข็งดินที่ระดับ 5 cm 3.18 MPa มีค่าแรงเฉือนของหน้าดินเท่ากับ 9 kPa การเตรียมแปลงทดสอบใช้โรตารีตีดิน หน้าดินจึงละเอียดมีค่าแรงเฉือนน้อย ในการทดสอบใช้ตำแหน่งเกียร์ LOW และความเร็รรอบเดินเบา



รูปที่ 4.41 สภาพพื้นปูนของศูนย์ความเป็นเลิศทางชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.42 สภาพแปลงเกษตรของฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทดสอบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลงได้ทำการสมมติค่าพารามิเตอร์มีค่าดังตารางที่ 4.3 ค่าเกณฑ์ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวอัตโนมัติเท่ากับ $K_p = 0.161$ และสมมติค่าระยะห่างระหว่างแถวพืช (D) ตามการทำงานในแปลงเกษตร โดยสามารถแบ่งการกลับเลี้ยวหัวแปลงได้ 6 กรณีคือ

1. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m
2. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 0 m
3. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m
4. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ 1 m
5. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m
6. รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา จะสมมติค่าตัวแปรระยะห่างระหว่างแถวพืชเท่ากับ -1 m

ทั้ง 6 กรณีมีกรณีย่อย 2 กรณีดังนี้

1. open loop คือป้อนมุมเลี้ยวตามทฤษฎีที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg ให้แก่ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

2. pole placement คือปรับมุมเลี้ยวปรับแก้(มุมเลี้ยวใหม่ที่ได้จากระบบควบคุมการเคลื่อนที่)ที่มีข้อจำกัดของมุมเลี้ยวไม่เกินมุมเลี้ยวสูงสุดหรือไม่เกิน 45 deg ให้แก่ระบบควบคุมบังคับเลี้ยวอัตโนมัติโดยกำหนดค่าโพลให้กับระบบควบคุมเท่ากับ $p_1, p_2 = -3 \pm 3i$

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขในการทดสอบขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับหัวแปลง

Parameters	Value
ΔT_t	0.05 s
X_i	0 m
Y_i	0 m
θ_i	0 deg
α_i	0 deg
L	1.5 m
V_t	0.2 m s^{-1}
ω_a	20 deg s^{-1}
α_f	30 deg

การทดสอบบนแปลงเกษตรจะทดสอบกรณีข้อย่อย pole placement กรณีเดียวเพราะสภาพแปลงไม่สามารถกำหนดพื้นผิวให้มีสภาพแวดล้อมเดียวกันได้ทำให้ไม่สามารถนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบได้

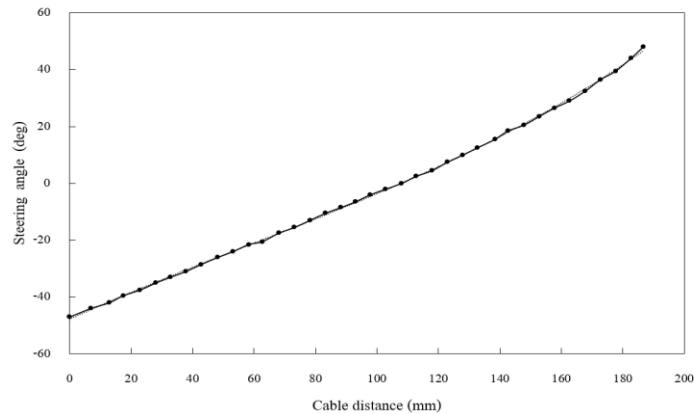
4.4 ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

4.4.1 ผลการสอบเทียบมุมเลี้ยว

รูปที่ 4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์และระยะของสายเคเบิล สมการพหุนามกำลังสามถูกนำมาสร้างเส้นแนวโน้ม ดังแสดงสมการที่ 4.7

$$\alpha_{PT} = (7 \times 10^{-6})(L_{PT})^3 - 0.0012(L_{PT})^2 + 0.4935L_{PT} - 47.776 \quad (4.7)$$

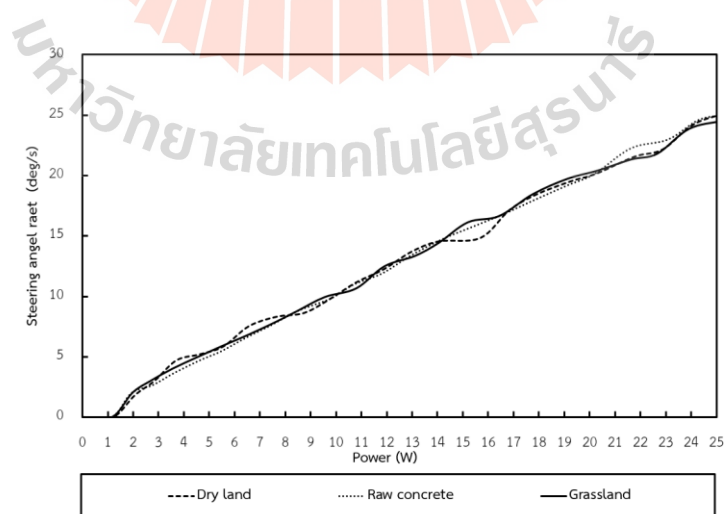
โดยที่ L_{PT} คือ ระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง (mm)



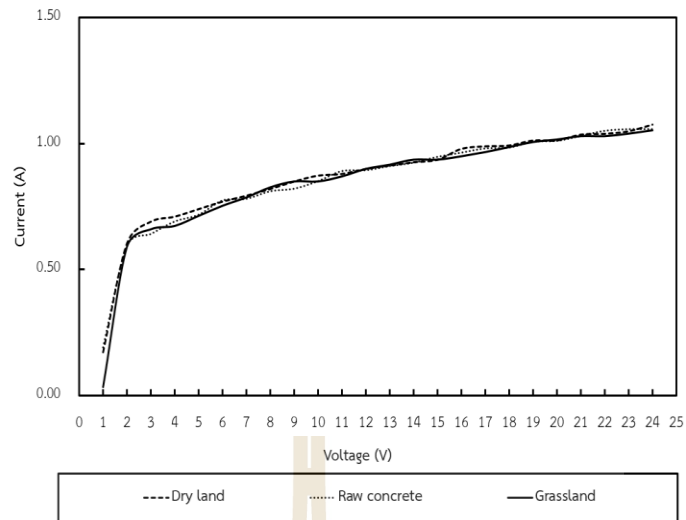
รูปที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวและระยะสายเคเบิลของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง

4.4.2 ผลการทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก

จากการทดสอบสมรรถนะของชุดบังคับเลี้ยวโดยทำการทดสอบบนพื้นคอนกรีต พื้นดิน และพื้นหญ้า พบว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 1 และ 2 V ให้กับมอเตอร์ของชุดบังคับเลี้ยว มอเตอร์ของชุดบังคับเลี้ยวไม่มีกำลังพอที่จะทำให้ชุดบังคับเลี้ยวหมุนได้ แต่เมื่อเพิ่มแรงดันเป็น 3 V มอเตอร์สามารถบังคับชุดบังคับเลี้ยวให้หมุนแกนพวงมาลัยได้ทำให้มุมเลี้ยวเกิดการเปลี่ยนแปลง ด้วยอัตราประมาณ 2 deg/s โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวสูงสุดอยู่ที่ 25 deg/s เมื่อใช้กำลังมอเตอร์เท่ากับ 24 W และเมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.44 และรูปที่ 4.45



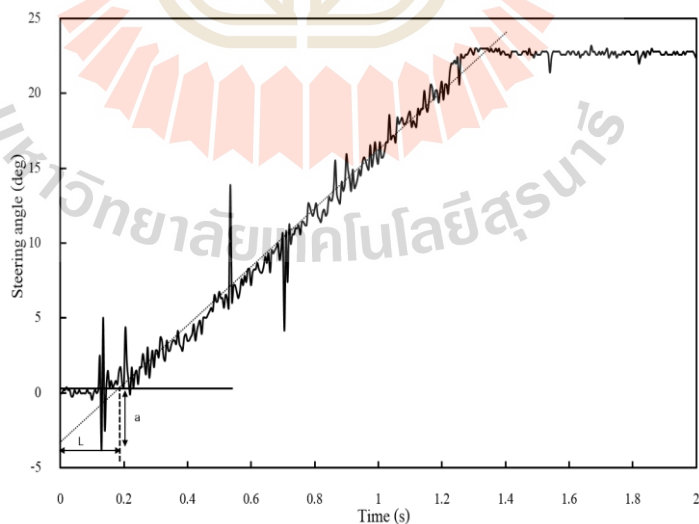
รูปที่ 4.44 อัตราการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวสูงสุด



รูปที่ 4.45 ค่ากระแสไฟฟ้าเทียบกับแรงดันไฟฟ้า

4.4.3 ผลการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

รูปที่ 4.46 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได จากผลการทดสอบสามารถหาค่าคงที่ a และ L ได้เท่ากับ 4.0 deg และ 0.2 s ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 4.4



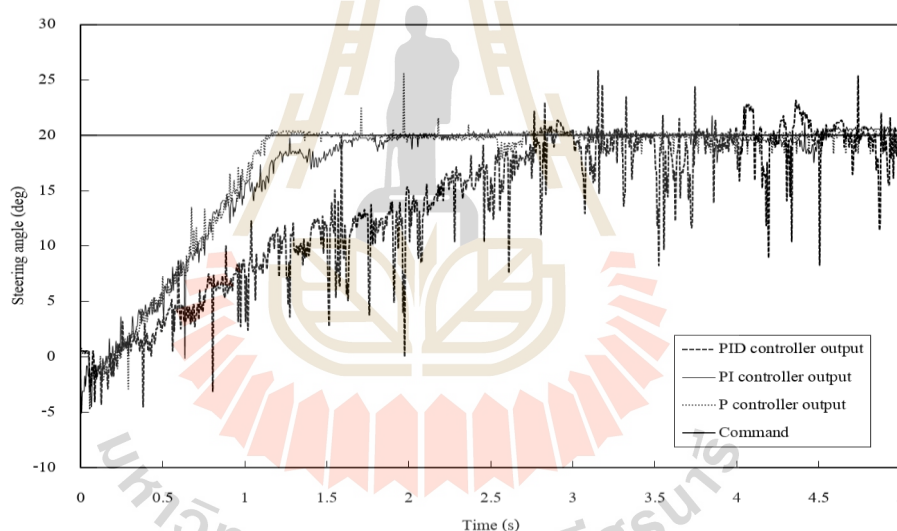
รูปที่ 4.46 ผลการตอบสนองของระบบแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติ

Controller	K_p	T_i (min)	T_d (min)
P	0.25	-	-
PI	0.225	0.01	-
PID	0.3	0.00667	0.001667

4.4.4 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

รูปที่ 4.47 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได จากรูปพบว่าตัวควบคุม P มีช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่เร็วที่สุด ตัวควบคุม PI มีความผิดพลาดน้อยที่สุด ส่วนตัวควบคุม PID ทำให้ระบบควบคุมตอบสนองช้าที่สุดและเกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยวอย่างรุนแรง จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.5

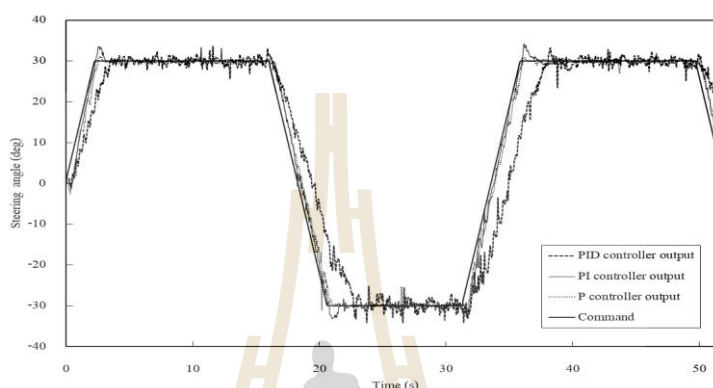


รูปที่ 4.47 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

ตารางที่ 4.5 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

Controller	T_r (s)	e_{ss} (deg)
P	1.175	5.56
PI	2.025	2.45
PID	2.845	11.68

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 4.48 จากรูปจะเห็นว่า ตัวควบคุม P และ PI มีการตอบสนองใกล้เคียงกัน แต่ตัวควบคุม PI มีการพุ่งเกินมากกว่า ส่วนตัวควบคุม PID ทำให้ระบบควบคุมตอบสนองช้าและเกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยว จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบพบว่า ตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น



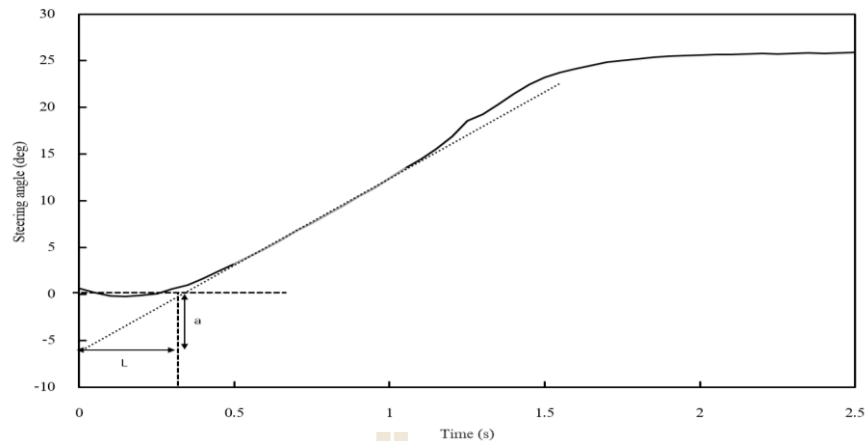
รูปที่ 4.48 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่อง

ผลการตอบสนองของระบบควบคุมต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดและแบบต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม P มีสมรรถนะที่ดีกว่าตัวควบคุมอื่น การกระตุกที่รุนแรงของชุดบังคับเลี้ยวที่สังเกตได้เมื่อใช้ตัวควบคุม PID เกิดขึ้นเพราะส่วนอนุพันธ์ (D) มีความไวต่อสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งตรงกับรายงานของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2556)

4.4.5 สมรรถนะของตัวควบคุม PID เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)

4.4.5.1 ผลการหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธี Ziegler-Nichols step response

รูปที่ 4.49 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได จากผลการทดสอบสามารถหาค่าคงที่ a และ L ได้เท่ากับ 6.2 deg และ 0.3 s ตามลำดับ ดังนั้นค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบต่างๆ สามารถคำนวณได้ตามตารางที่ 4.6 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน สามารถลดสัญญาณรบกวนจากทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้



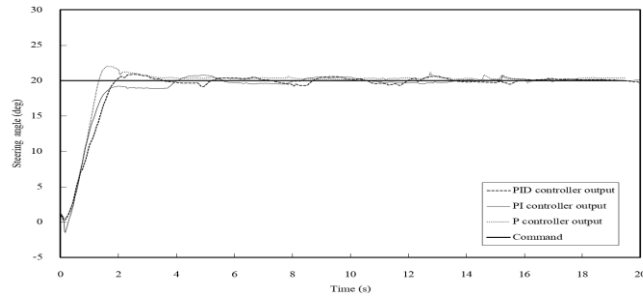
รูปที่ 4.49 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน โดยการเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 เป็น 20 deg

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรของตัวควบคุมของระบบควบคุมชุดบังคับเลี้ยวอัตโนมัติเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter)

Controller	K_p	T_i (min)	T_d (min)
P	0.161	-	-
PI	0.1446	0.01675	-
PID	0.193	0.0112	0.0028

4.4.5.2 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม

รูปที่ 4.50 แสดงผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงเปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได เมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน จากการเปรียบเทียบผลการตอบสนองพบว่า ตัวควบคุม P ทำให้ระบบมีการตอบสนองดีกว่าตัวควบคุมอื่น เพราะมีช่วงเวลานิ่งและความผิดพลาดน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.7

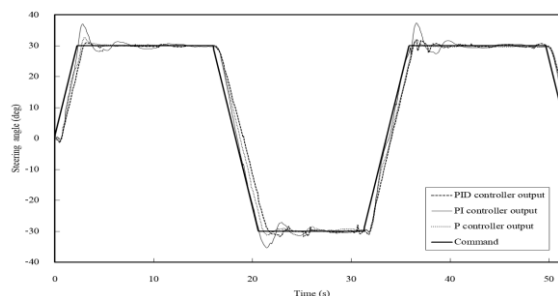


รูปที่ 4.50 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านเปลี่ยนค่ามุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์จาก 0 deg เป็น 20 deg

ตารางที่ 4.7 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได

Controller	T_r (s)	e_{ss} (deg)
P	1.3	0.74
PI	4.1	0.76
PID	1.95	1.035

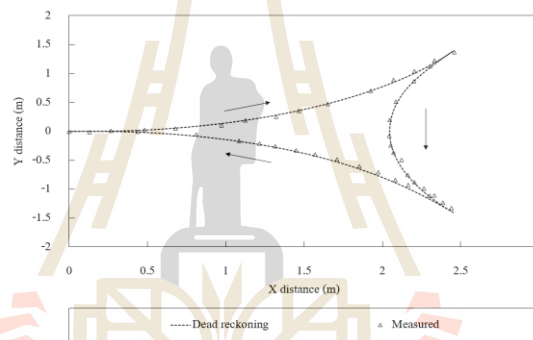
ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 4.51 จากรูปพบว่าตัวควบคุม PI ทำให้เกิดการฟุ้งเกินที่มากเกินไปและมีเวลาเข้าที่ช้า ตัวควบคุม P และ PID มีการตอบสนองที่ใกล้เคียงกัน แต่การกระตุกของชุดบังคับเลี้ยวยังสามารถสังเกตได้จากตัวควบคุม PID ดังนั้น ตัวควบคุม P จึงเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เพราะสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบโดยไม่เกิดการกระตุกของชุดบังคับเลี้ยว



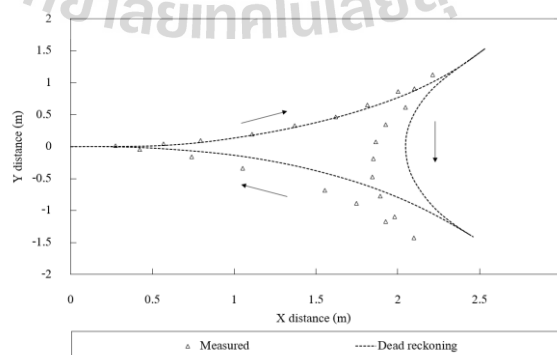
รูปที่ 4.51 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบวงปิดต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่าน

4.4.6 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์

จากรูปที่ 4.52 และรูปที่ 4.53 แสดงผลการเปรียบเทียบระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเกี่ยวไปทางซ้ายทดสอบบนพื้นปูนและทดสอบบนพื้นดินตามลำดับ จะพบว่าระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเกิดความผิดพลาดบ้างเล็กน้อยเมื่อเคลื่อนที่บนพื้นปูนเพราะเกิดจากการ drift ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เมื่อเคลื่อนที่บนแปลงเกษตรระบบระบุตำแหน่งเกิดความผิดพลาดมากเพราะสภาพแปลงที่ทดสอบชั้นหน้าดินมีความอ่อนตัวจึงเกิดการลื่นไถลได้ง่ายส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่จริงน้อยกว่าการเคลื่อนที่ที่วัดจากล้อหลังประกอบกับเกิดจากการ drift ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.53 ที่เส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากการวัดตามหลังเส้นทางที่ได้จาก Dead reckoning สามารถดูผลการทดสอบเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก จ



รูปที่ 4.52 การเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเกี่ยวไปทางซ้ายทดสอบบนพื้นปูน



รูปที่ 4.53 การเปรียบเทียบระบบติดตามตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเกี่ยวไปทางซ้ายทดสอบบนพื้นดิน

4.4.7 ผลการออกแบบระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

จากแนวคิดที่ออกแบบชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งมีมอเตอร์กระแสตรงขนาด 12 V เป็นต้นกำลัง ระยะชัก 200 mm. แรงดึง/แรงผลักสูงสุด 500 N ความเร็วสูงสุด 20mm/s ถูกเลือกใช้เป็นตัวผลัก/ดึง และใช้ลิมิตสวิทช์ยี่ห้อ Akela รุ่น CM-1308 และรุ่น CM-1703 เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 ชุดวัดมุมคันคลัตช์และคันเกียร์

4.4.8 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ จากตารางจะพบว่า เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดเท่ากับ 31.58 s เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งจากตำแหน่ง LMLOC ไปยังตำแหน่ง LMUPC และเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่งน้อยสุดเท่ากับ 8.39 s เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งจากตำแหน่ง LMUPC ไปยังตำแหน่ง LMLOC

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกัณฑ์และเกียร์อัตโนมัติ

คำสั่ง	ตำแหน่งเดิม	ตำแหน่งใหม่	เวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนตำแหน่ง(s)
L1	N	L1	16.37
	R	L1	27.93
N	L1	N	17.67
	R	N	15.48
R	L1	R	20.10
	N	R	15.89
จอด	LMUPC	LMLOC	8.39
เคลื่อนที่	LMLOC	LMUPC	31.58

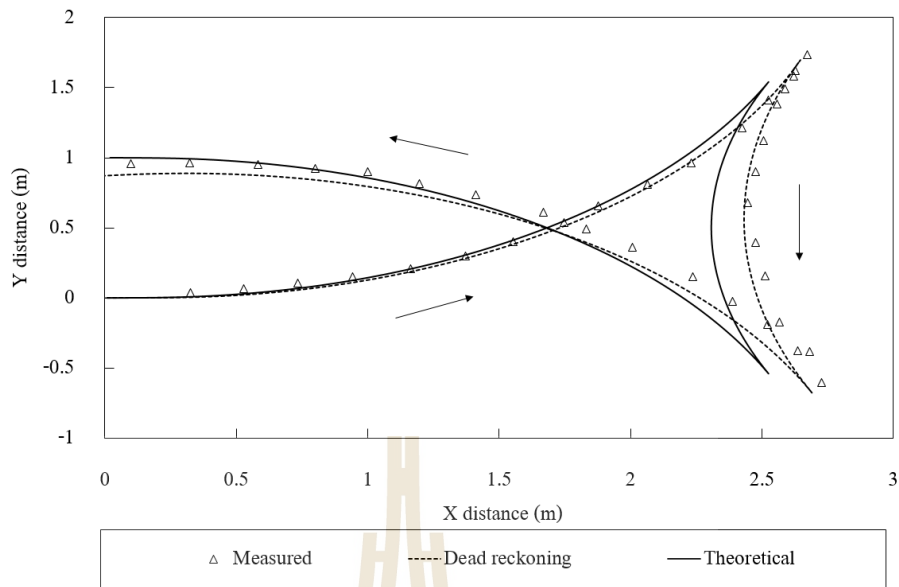
4.4.9 ผลการทดสอบสมรรถนะขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง

ตัวอย่างผลการทดสอบสมรรถนะขั้นตอนวิธีควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติสำหรับการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลงแสดงดังรูปที่ 4.55-4.59 สามารถดูผลการทดสอบสมรรถนะเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ฉ พฤติกรรมของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติบนเส้นทางการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.60 – 4.65

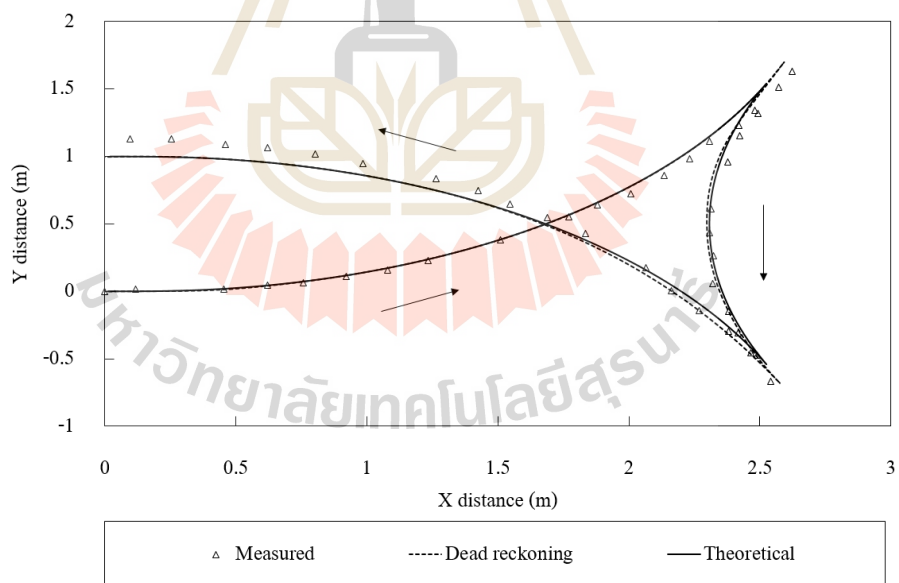
รูปที่ 4.55-4.59 แสดงการเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ และมุมเลี้ยว ขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D = 1 \text{ m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ และตารางที่ 4.9 รวมผลค่าความผิดพลาดในแกน Y และค่าความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ตำแหน่งสุดท้ายของการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมบนเส้นทางต่าง ๆ จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้อย่างแม่นยำแม้ในสภาพแปลง (ดูผลการระบุตำแหน่งแบบ Dead reckoning) แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับเส้นทางจริงที่ถูกระบุด้วยการวัดกลับพบว่าการระบุตำแหน่งแบบ Dead reckoning มีความผิดพลาดอยู่บ้างจึงทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมน้อยลง

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยวิธีการวางตำแหน่งโพล

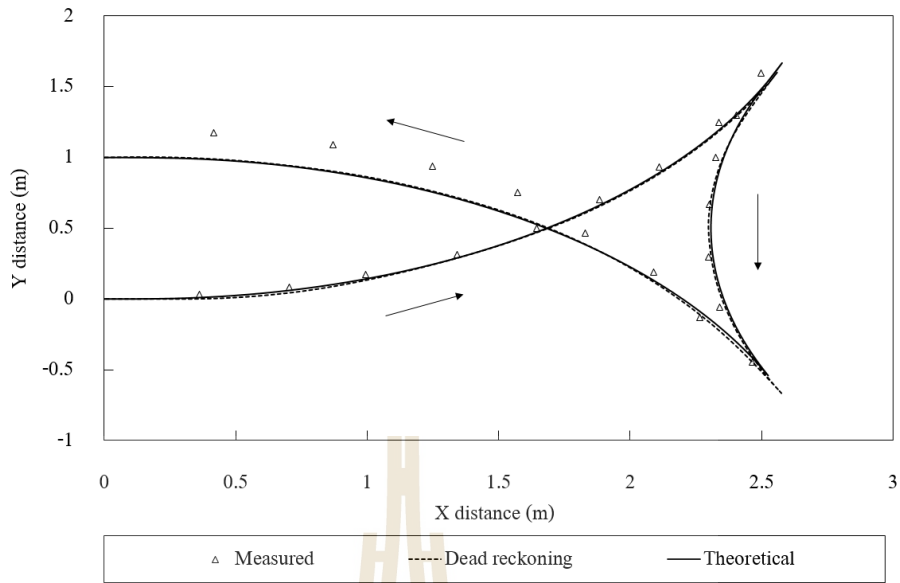
รูปแบบการเลียวกลับรอด	ตัวควบคุม	ค่าความผิดพลาดทางแกน Y ที่ตำแหน่งสุดท้าย(m)		ค่าความผิดพลาดของทิศทางการรถที่ตำแหน่งสุดท้าย (deg)
		ระบบระบุตำแหน่ง	วัดจริง	
เลียวกลับเข้าร่องเดิม (D=0) เลี้ยวทางซ้าย	Openloop (พื้นปูน)	0.55	0.47	-16.10
	Pole-placement (พื้นปูน)	0.005	0.014	2.13
	Pole-placement (พื้นดิน)	0.0006	0.018	1.93
เลียวกลับเข้าร่องเดิม (D=0) เลี้ยวทางขวา	Openloop (พื้นปูน)	-0.503	-0.42	18.61
	Pole-placement (พื้นปูน)	0.0002	-0.01	1.8
	Pole-placement (พื้นดิน)	0.0005	0.09	1.94
เลียวกลับเข้าร่องถัดไป (D=1) เลี้ยวเข้าร่องซ้าย	Openloop (พื้นปูน)	0.87	0.92	5.74
	Pole-placement (พื้นปูน)	-0.04	0.13	2.02
	Pole-placement (พื้นดิน)	0.0006	0.23	1.95
เลียวกลับเข้าร่องถัดไป (D=1) เลี้ยวเข้าร่องขวา	Openloop (พื้นปูน)	1.14	-23.37	1.13
	Pole-placement (พื้นปูน)	0.0004	-0.13	1.75
	Pole-placement (พื้นดิน)	-0.0001	0.12	1.46
เลียวกลับเข้าร่องถัดไป (D=-1) เลี้ยวเข้าร่องซ้าย	Openloop (พื้นปูน)	-0.12	-0.15	8.91
	Pole-placement (พื้นปูน)	0.002	0.15	1.54
	Pole-placement (พื้นดิน)	0.002	0.03	1.81
เลียวกลับเข้าร่องถัดไป (D=-1) เลี้ยวเข้าร่องขวา	Openloop (พื้นปูน)	0.5	0.45	17.33
	Pole-placement (พื้นปูน)	0.003	0.15	1.93
	Pole-placement (พื้นดิน)	0.0002	-0.25	1.79



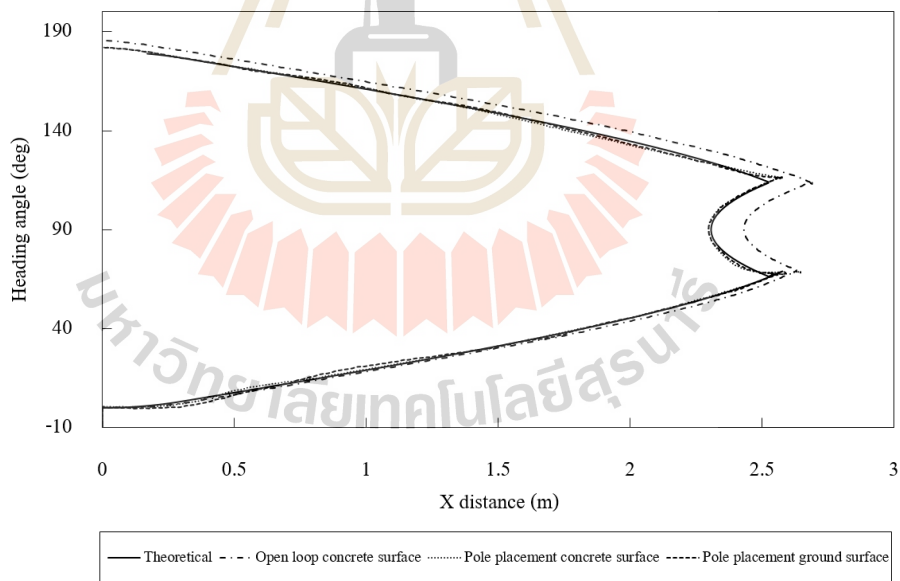
รูปที่ 4.55 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1)
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด



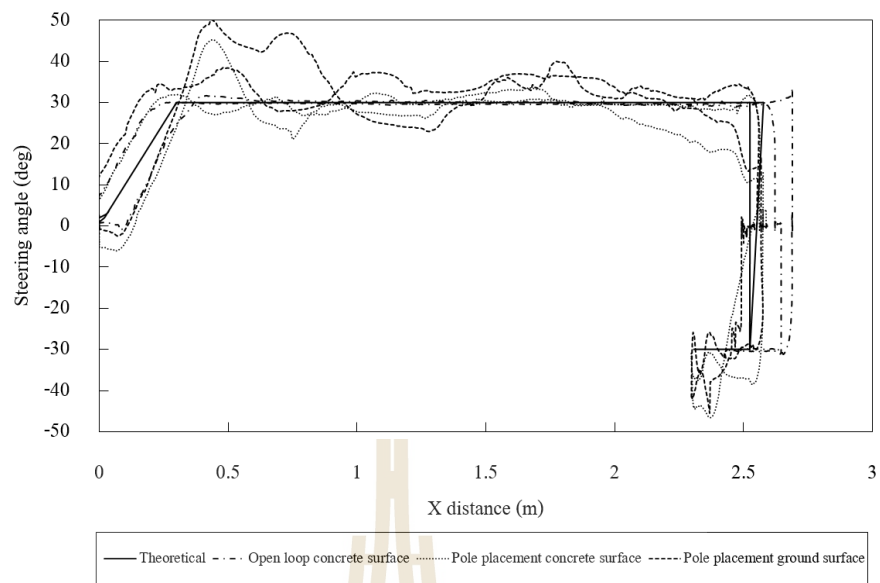
รูปที่ 4.56 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1)
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ 4.57 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเดี่ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



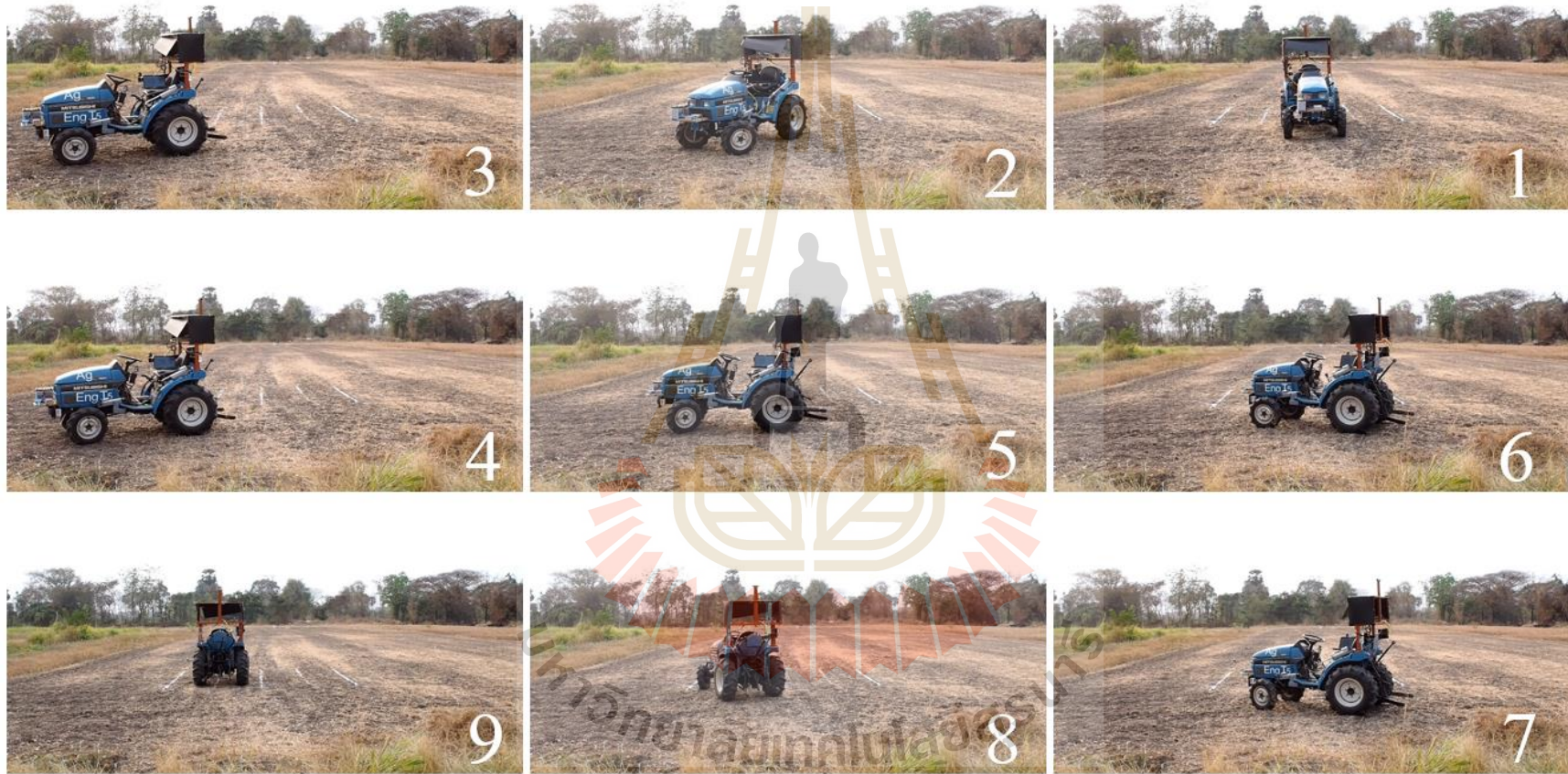
รูปที่ 4.58 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเดี่ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ 4.59 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลง
เข้าร่องถัดไป(D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ 4.60 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย



รูปที่ 4.61 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ 4.62 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย



รูปที่ 4.63 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ 4.64 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=0m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงแล้วไปทางซ้าย



รูปที่ 4.65 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=0m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเดี่ยวไปทางขวา

4.5 สรุปผลการวิจัย

1) ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว

ระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวถูกออกแบบให้สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D ได้อย่างอัตโนมัติ ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านสามารถลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้ การบังคับเลี้ยวด้วยตัวควบคุม P สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบ

2) ระบบระบุตำแหน่ง

ระบบระบุตำแหน่งถูกออกแบบให้สามารถติดตามตำแหน่งของรถแทรกเตอร์ได้ ฟังก์ชัน linear fit ถูกนำมาใช้หาความชันของสมการปรับแก้ หลังใช้สมการปรับแก้พบว่าสามารถลดการ drift ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมได้ จากการทดสอบบนพื้นปูนและพื้นดินพบว่าระบบระบุตำแหน่งรถแทรกเตอร์ที่พัฒนาขึ้นเกิดความผิดพลาดบ้างเล็กน้อยเมื่อเคลื่อนที่บนพื้นปูนเพราะเกิดจากการ drift ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เมื่อเคลื่อนที่บนแปลงเกษตรระบบระบุตำแหน่งเกิดความผิดพลาดมากเพราะสภาพแปลงที่ทดสอบชั้นหน้าดินมีความอ่อนตัวจึงเกิดการลื่นไถลได้ง่ายส่งผลให้ระยะการเคลื่อนที่จริงน้อยกว่าการเคลื่อนที่ที่วัดจากล้อหลังประกอบกับเกิดจากการ drift ของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

3) ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

ระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์ถูกออกแบบให้สามารถบังคับคลัตช์และเกียร์รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MT190D ได้อย่างอัตโนมัติ

4) การทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม

จากการทดสอบสมรรถนะบนพื้นปูนและพื้นดินพบว่าตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้ ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้แม้ในสภาพแปลง แต่เมื่อพิจารณารวมกับเส้นทางจริงที่ถูกระบุด้วยการวัดกลับพบว่าการระบุตำแหน่งแบบ Dead reckoning มีความผิดพลาดอยู่บ้างทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมน้อยลง

4.6 รายการอ้างอิง

กองพัน อารีรักษ์. (2560). ระบบควบคุม. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โคราช มาร์เก็ตติ้ง แอนด์ โปรดักชัน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
 ยุทธนา กันทะพะเยา และเฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์. (กันยายน 2559). การควบคุมของเหลวโดยใช้

โปรแกรม LabVIEW. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ ครั้งที่ 1.พระนครศรีอยุธยา.

กิจไพบูลย์ ชีวพันธุ์ศิริ. (2554). LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนาาระบบการวัดและควบคุม.
บริษัท วี.พรีนท์(1991)จำกัด:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัดมหาชน.

เกรียงไกร แซมสีม่วง, มนุศักดิ์ จานทอง, กระจวี ตรีอำนาจ และวิชา อุปภัย. (2560). การพัฒนารถ
แทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรรมสมัยใหม่. วารสาร
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย 23 (1): 39-54.

กองพัน อารีรักษ์. (2560). ระบบควบคุม. ห้างหุ้นส่วนจำกัด โคราช มาร์เก็ตติ้ง แอนด์ โปรดักชัน:
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

คชา วาทกิจ. (2559). เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมรถแทรกเตอร์เกษตร.สำนัก
วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร:มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

ฉัตริน เรื่องจอหอ, ชีรวัฒน์ เจเถื่อน, กมลชนน วงศ์สถาน, และพวงศักดิ์ จุลยุเสน. (2561). การ
ออกแบบชุดบังคับความเร็วสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์ม
และเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5 (หน้า 159-163). ขอนแก่น:กลุ่มวิจัยวิศวกรรม
ฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เดชฤทธิ์ มณีธรรม. (2560). คัมภีร์การใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino. บริษัท วี.พรีนท์
(1991)จำกัด:บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัดมหาชน.

ชีรวัฒน์ เจเถื่อน, พวงศักดิ์ จุลยุเสน, คชา วาทกิจ, และจรรยาศักดิ์ สมพงษ์. (มิถุนายน 2559). การ
จำลองระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยงกลับรถที่หัวแปลง.
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17.
กรุงเทพฯ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2556). เอกสารประกอบการเรียนการสอน
ลักษณะสมบัติของตัวควบคุม PID. [ออนไลน์]. ได้จาก: [jitkomut.eng.chula .ac.th/
ee331/lab6.pdf](http://jitkomut.eng.chula.ac.th/ee331/lab6.pdf)

ขงยุทธ์ เลียงดั่ง พวงศักดิ์ จุลยุเสน และชีรวัฒน์ เจเถื่อน. (พฤศจิกายน2559). เส้นทางที่เหมาะสม
ของแขนกลกรีดยางพารา. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการ
ควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3. ขอนแก่น.

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2556). การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัท วี.พรีนท์
(1991)จำกัด:สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์.

- ศูนย์ข้อมูลและการคาดการณ์เทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. รายงานการคาดการณ์ นวัตกรรมอุตสาหกรรม กลุ่มเกษตรแม่นยำ. [ออนไลน์]. ได้จาก: stiic.sti.or.th/wp-content/uploads/2018/01/PIO_precision-farming_10.pdf
- สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. (2551). Control System [ออนไลน์]. ได้จาก: <http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/Control.pdf>
- สมยศ เชิญอักษร. (2540). การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับระบบทางวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน
- อมรศรี กิจวงศ์วัฒน์. (2551). ระบบเพลย์แบ็กเพื่อใช้สำหรับนำทางในรถอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- Keicher, R., and Seufert, H.(2000). Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. **Computers and Electronics in Agriculture**. 25 (1-2): 169–194.
- Murayama, O., Oshima, H.and Nagai, T. (1994). Navigation Algorithm Based on Teaching Playback System for Unmaned Dumptrucks in Mines. **Intelligent Vehicles 1994 Symposium**,24-26 October 1994. Paris. Pp.25-31
- José E. Naranjo, Javier Vinuesa, Carlos González, Member, IEEE, Ricardo García, Teresa de Pedro and Ignacio Parra (April 2007). Hybrid steering control for intelligent vehicle navigation. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. :Roma, Italy.
- K. Åström, and T. Häggglund. (1995). **PID Controllers: Theory, Design andTuning**, 2nd ed., Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America.
- 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.
- Torii, T. (2000). Research in autonomous agriculturevehicles in Japan. **Computers and Electronics in Agriculture**. 25 (1-2): 133–153.

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากผลการศึกษาเรื่องการพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการ
เปลี่ยนหัวรถที่หัวแปลง สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) การจำลองสถานการณ์ของแบบจำลองทางคิเนเมติกส์

เส้นทางเปลี่ยนหัวรถแบบทางปลาประกอบด้วยเส้นทางย่อย 5 เส้นทาง คือส่วนโค้ง
เปลี่ยนขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมขาเข้า ส่วนโค้งวงกลมถอยหลัง ส่วนโค้งวงกลมขาออก และส่วนโค้ง
เปลี่ยนขาออก ส่วนโค้งเหล่านี้ถูกออกแบบโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง เรขาคณิตของรถ
แทรกเตอร์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และระยะห่างระหว่างร่องพื้ ซึ่งสามารถสร้างเส้นทาง
เปลี่ยนหัวแปลงแบบทางปลาได้ 6 รูปแบบ ครอบคลุมภาระงานเปลี่ยนหัวแปลงไปร่องทางซ้าย ร่อง
ทางขวา และเปลี่ยนหัวแปลงเข้าร่องเดิม ถูกตรวจสอบโดยใช้การจำลองสถานการณ์ด้วย
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW จากการจำลองสถานการณ์พบว่าระบบออกแบบ
เส้นทางเปลี่ยนหัวแปลงสามารถสร้างเส้นทางได้อย่างถูกต้อง ตัวควบคุมแบบป้อนกลับด้วย
เทคนิคการวางตำแหน่งโพลถูกนำมาใช้ชดเชยค่าความผิดพลาดทางตำแหน่งและทิศทางนำรถ การ
จำลองสถานการณ์ถูกกระทำภายใต้สภาวะที่มีสิ่งรบกวนต่อระบบควบคุมเพื่อทดสอบสมรรถนะ
ของตัวควบคุมแบบวงเปิดและตัวควบคุมแบบป้อนกลับ สิ่งรบกวนของระบบควบคุมถูกกำหนดจาก
ความคลาดเคลื่อนของมุมเลี้ยวขณะบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ถูกตรวจสอบโดยใช้การจำลอง
สถานการณ์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม LabVIEW จากการจำลองสถานการณ์พบว่าตัว
ควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้ ตัว
ควบคุมแบบป้อนกลับ สามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางที่ออกแบบได้อย่างมี
ประสิทธิภาพ

2) การทดสอบสมรรถนะควบคุมรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ

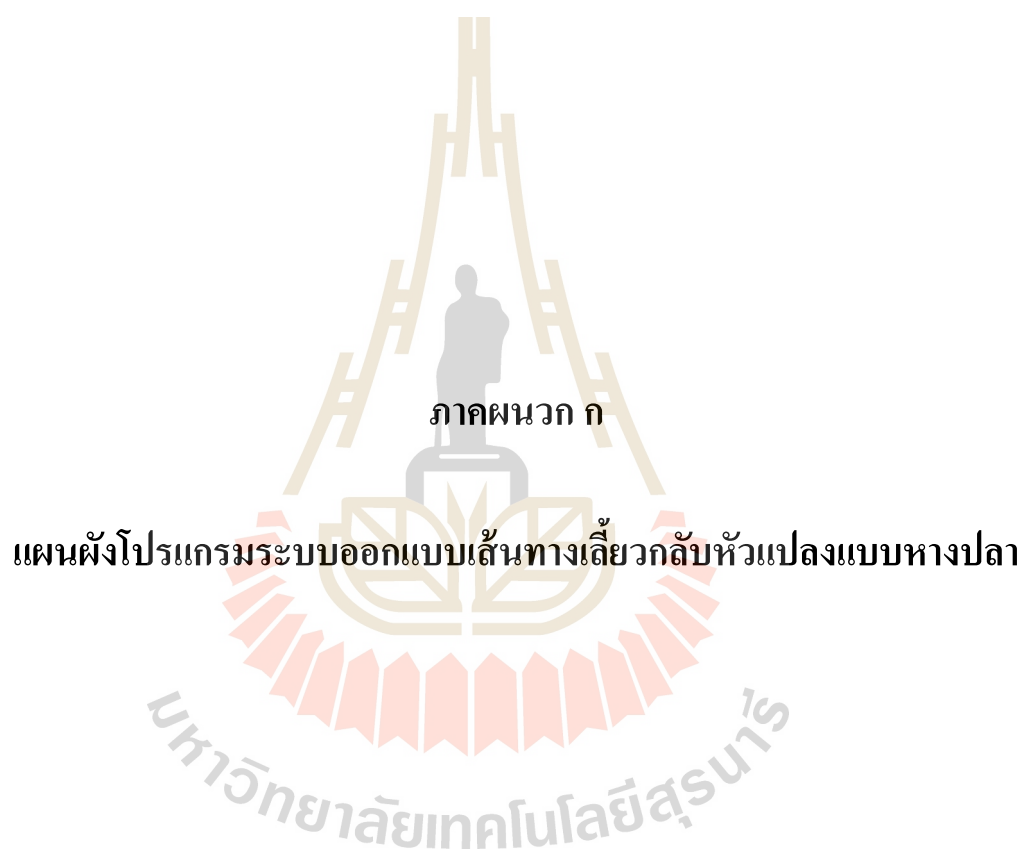
จากการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมด้วยรถแทรกเตอร์อัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นบนพื้น
ปูนและพื้นดินพบว่า ตัวควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถบังคับเลี้ยวรถแทรกเตอร์ไปยังตำแหน่ง
เป้าหมายได้ ส่วนตัวควบคุมแบบป้อนกลับสามารถควบคุมรถแทรกเตอร์ไปบนเส้นทางเปลี่ยนหัว
แปลงได้ด้วยระดับความถูกต้องที่ยอมรับได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมการเปลี่ยนหัว

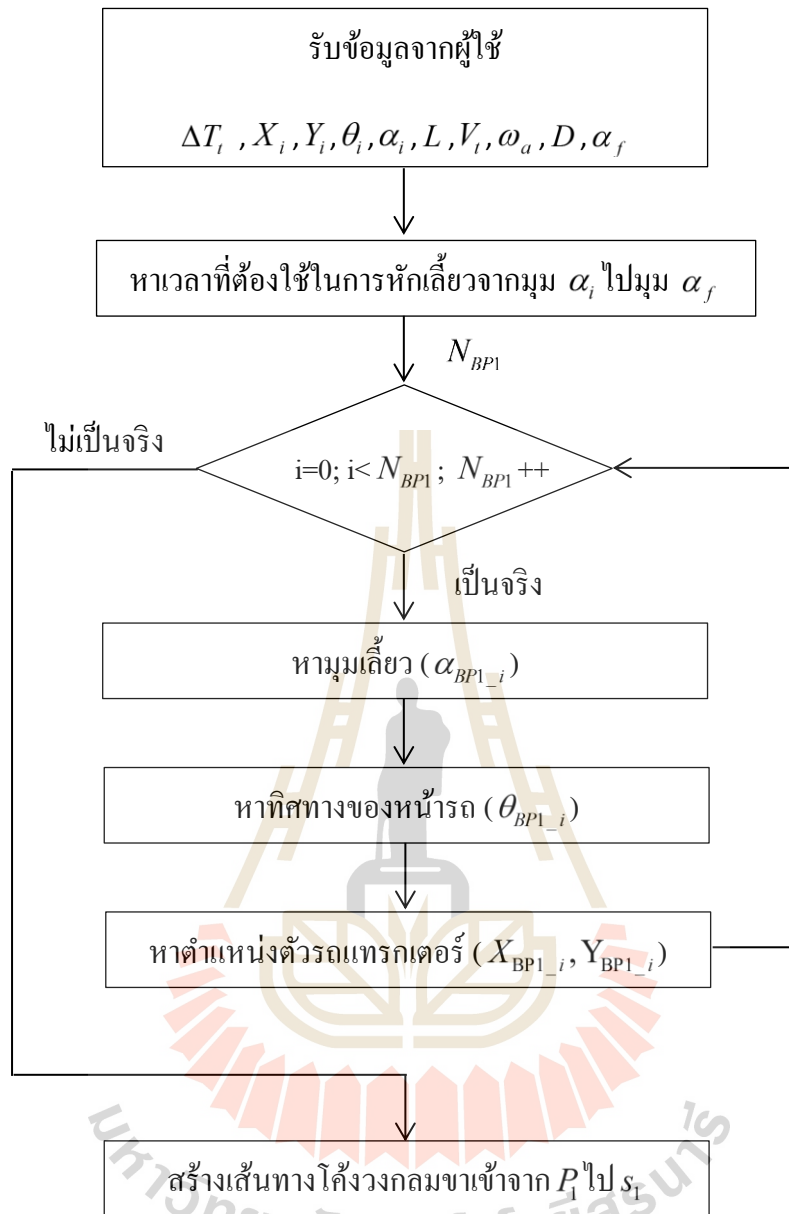
หัวแปลงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

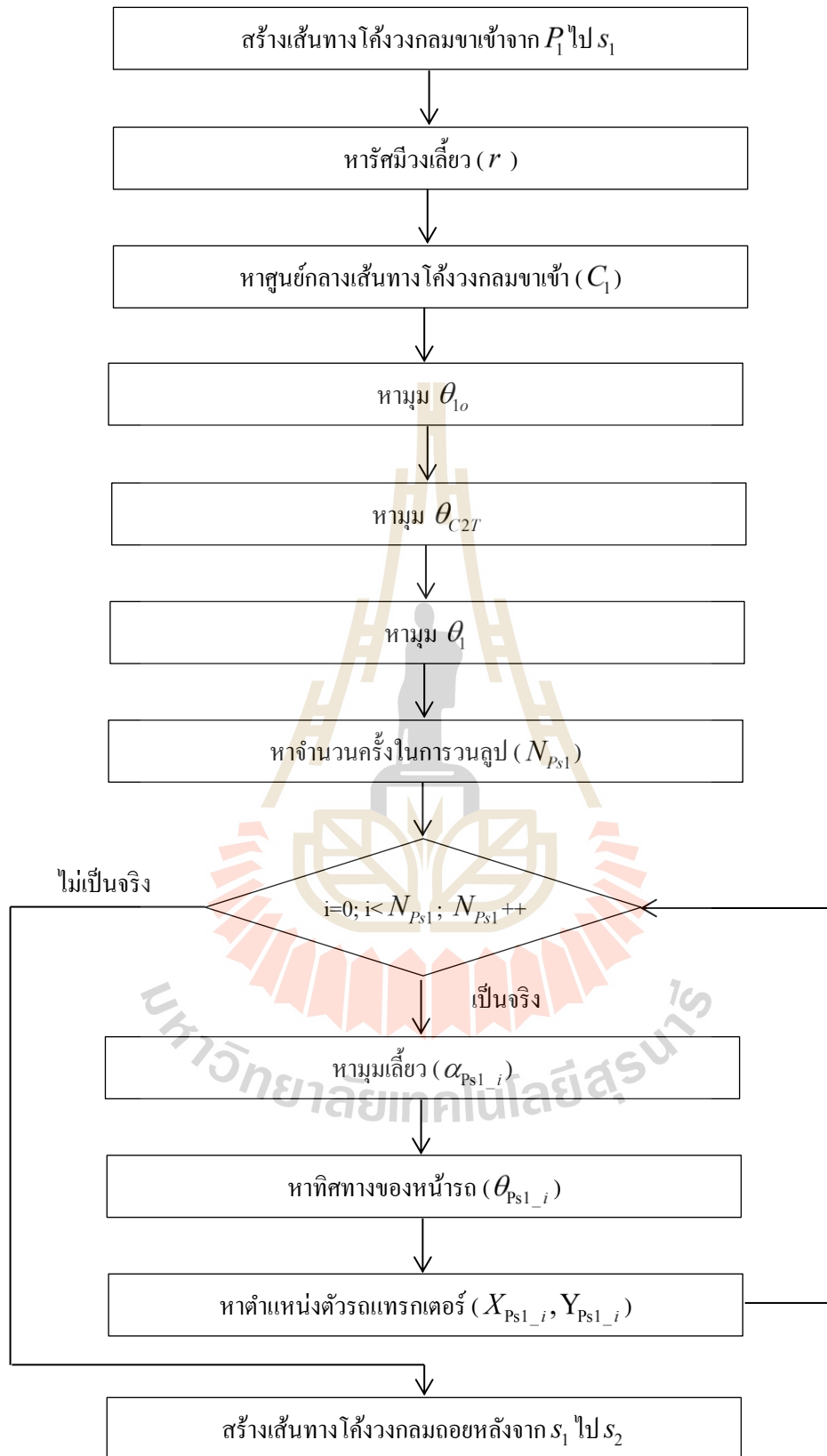
- 5.2.1 เปลี่ยนระบบระบุตำแหน่งเป็นระบบอื่นที่มีความแม่นยำสูงเช่น RTK GPS เป็นต้น
- 5.2.2 เพิ่มกลไกการเปลี่ยนความเร็วรอบเครื่องยนต์ เพื่อลดระยะเวลากลับเลี้ยวหัวแปลง
- 5.2.3 เพิ่มกลไกสำหรับเปลี่ยนเกียร์ 2 เกียร์ 3 และเพิ่มกลไกเปลี่ยนเกียร์ Low เป็น เกียร์ High เพื่อเพิ่มฟังก์ชันการทำงานให้หลากหลายมากขึ้น



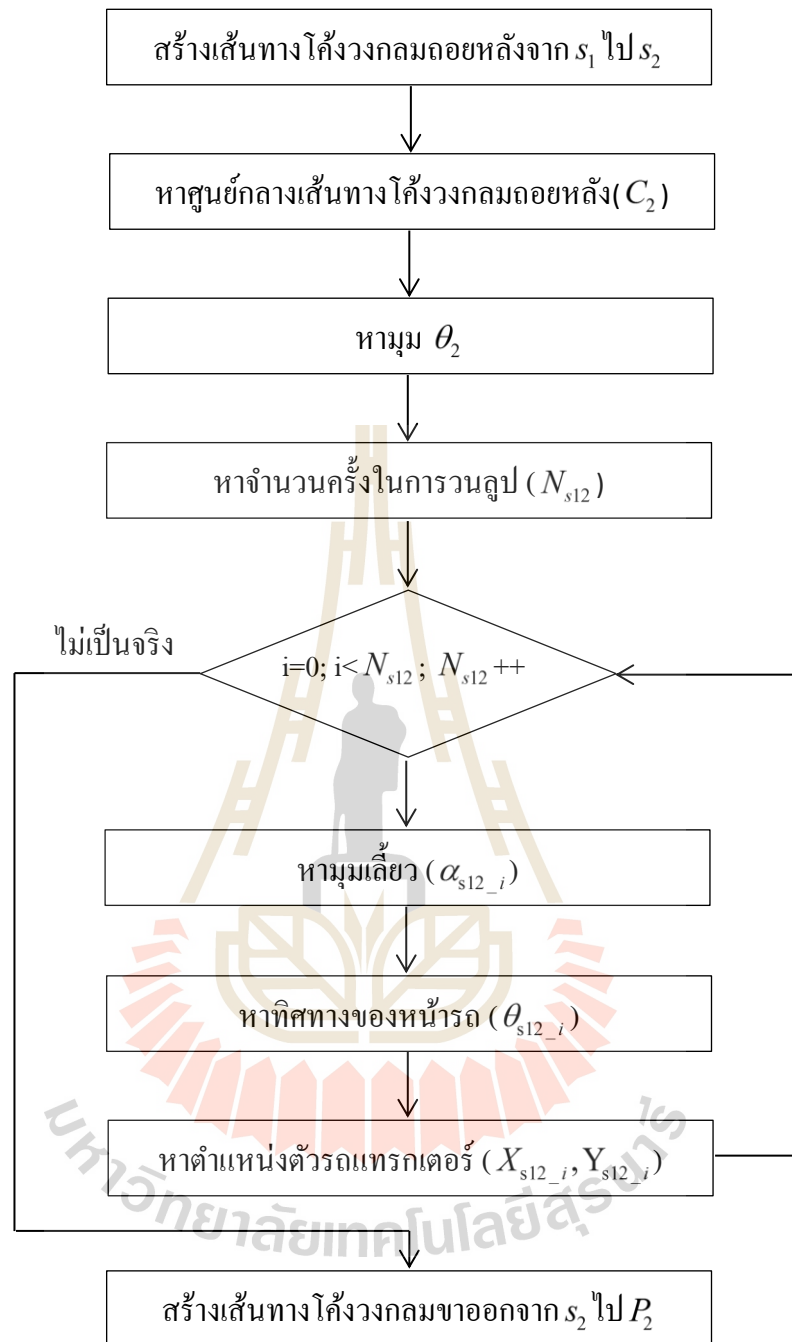




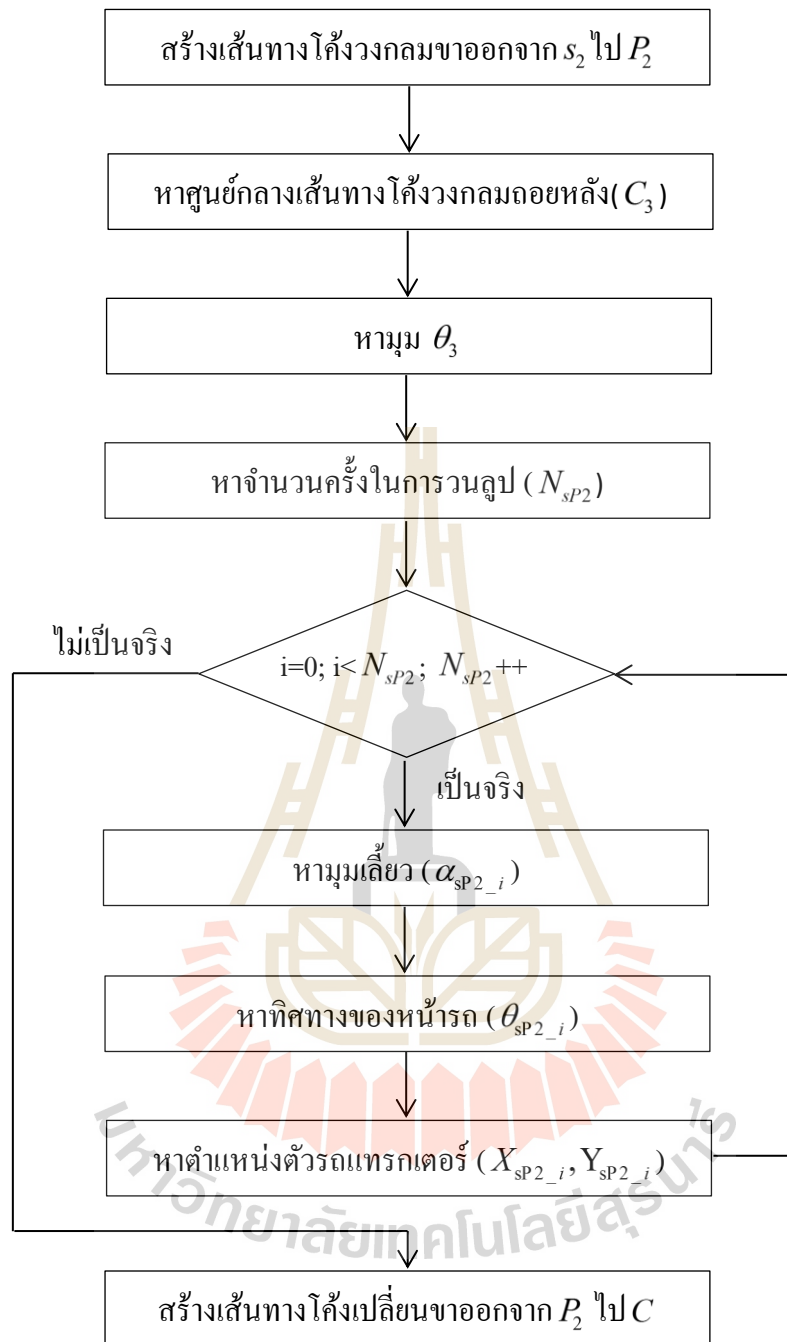
รูปที่ ก.1 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วน เส้นทางโค้งเปลี่ยนขาเข้าจาก B ไป P_1



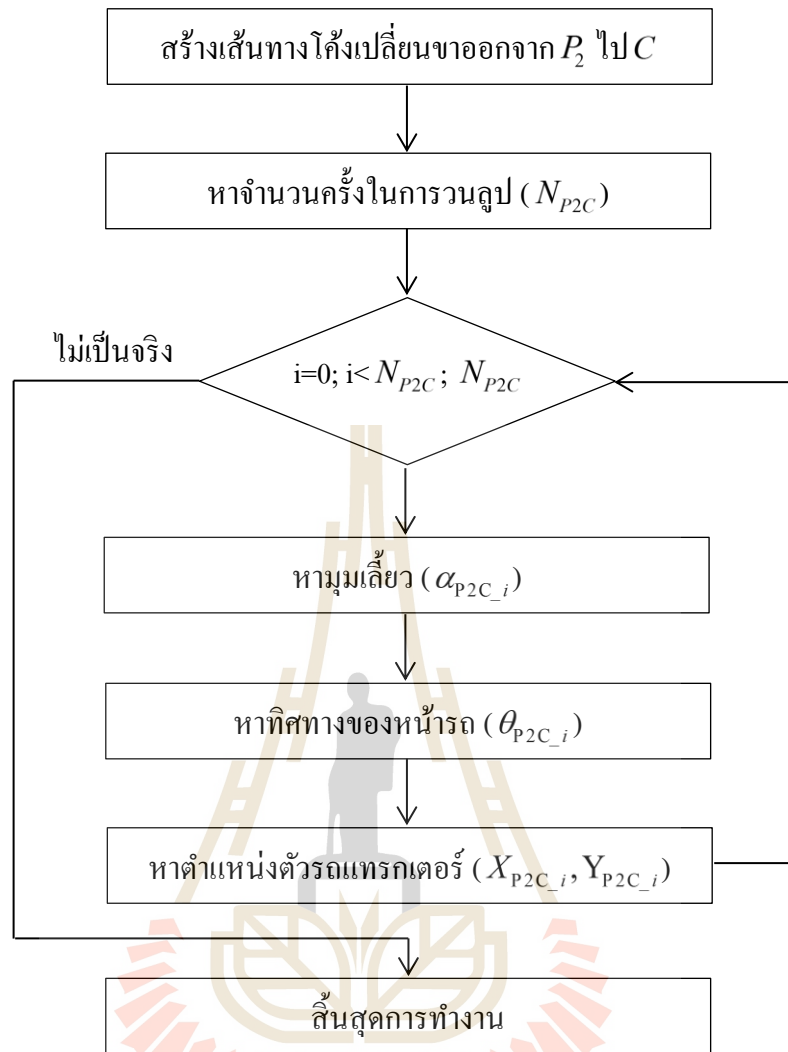
รูปที่ ก.2 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งวงกลมมาเข้าจาก P_1 ไป s_1



รูปที่ ก.3 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วน เส้นทางโค้งวงกลมถอยหลังจาก s_1 ไป s_2



รูปที่ ก.4 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วน เส้นทางโค้งวงกลมขาออกจาก s_2 ไป P_2



รูปที่ ก.5 ลำดับการทำงานของระบบสร้างเส้นทางส่วนเส้นทางโค้งเปลี่ยนขาออกจาก P_2 ไป C



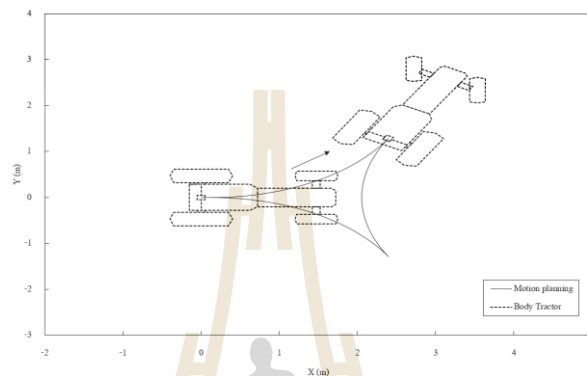
ภาคผนวก ข

ผลจำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์บนเส้นทางเลี้ยวกลับหัว
แปลงแบบหางปลา

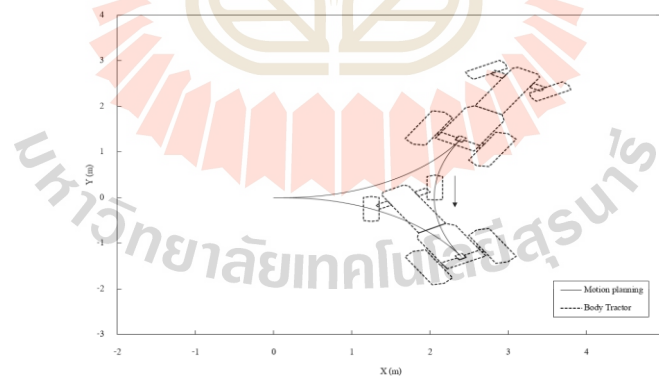
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข.1 รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวรองเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย

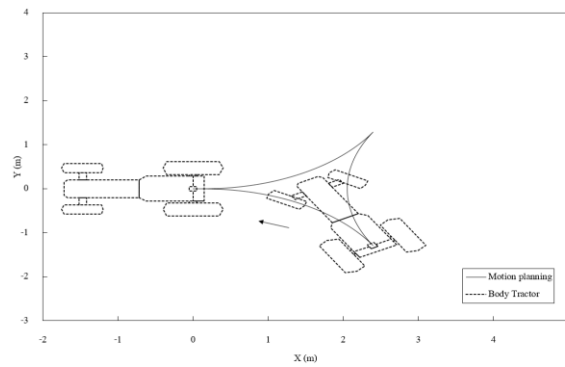
ข.1.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



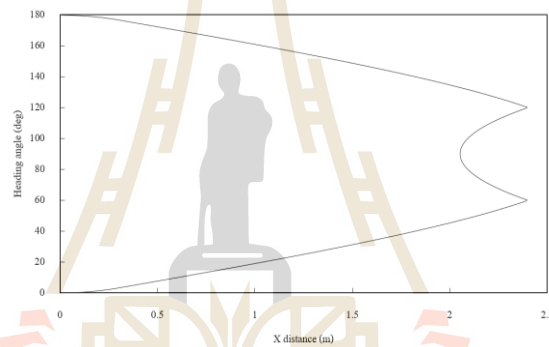
รูปที่ ข.1 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวรองเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



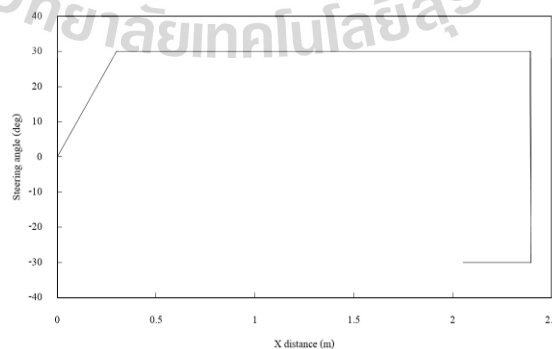
รูปที่ ข.2 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวรองเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



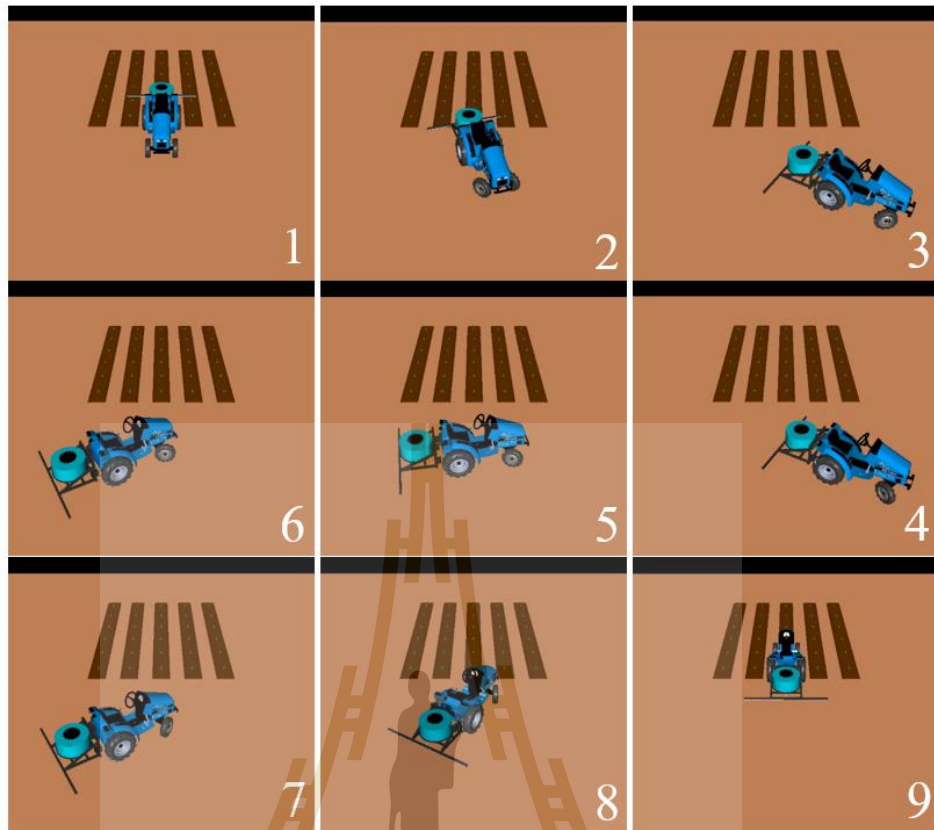
รูปที่ ข.3 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัว
แปลงเข้าร่องเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ ข.4 ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย

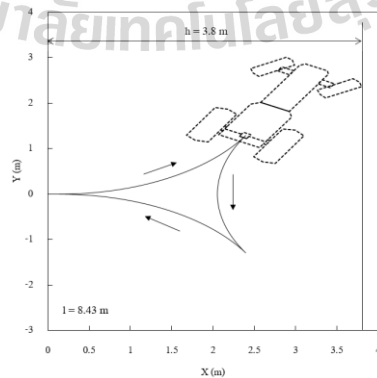


รูปที่ ข.5 มุมเลี้ยวเมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



รูปที่ ข.6 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม กรณีหักเลี้ยวไปทางซ้ายจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสามมิติ

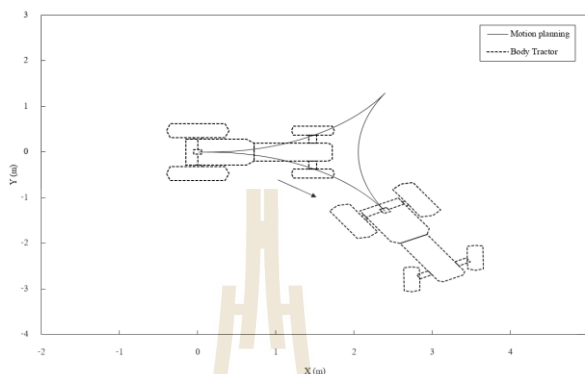
ข.1.2 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



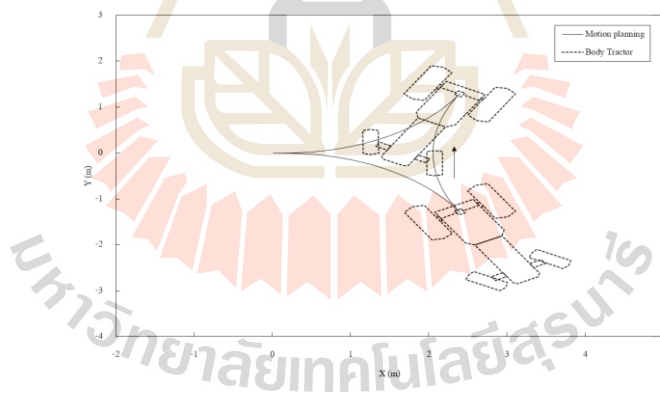
รูปที่ ข.7 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืชร่อง (D) เท่ากับ 0 m กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย

ข.2 รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวไร่เดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา

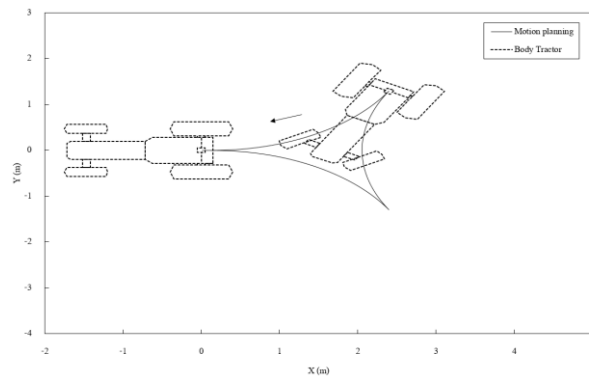
ข.2.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



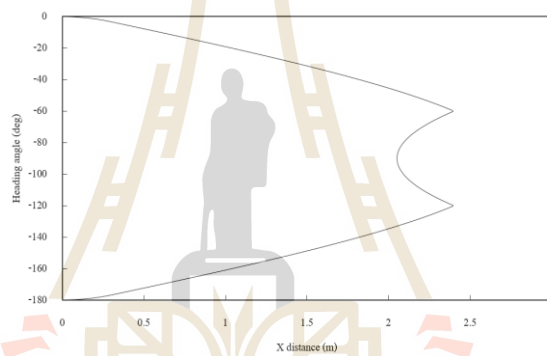
รูปที่ ข.8 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวไร่เดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



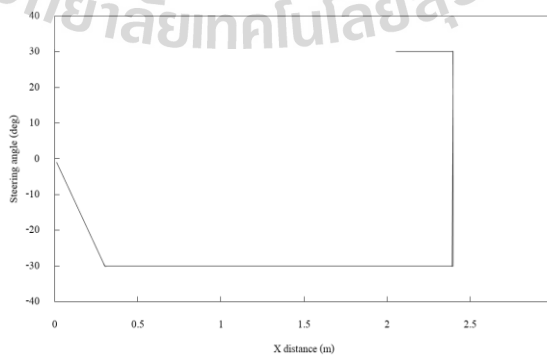
รูปที่ ข.9 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวไร่เดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



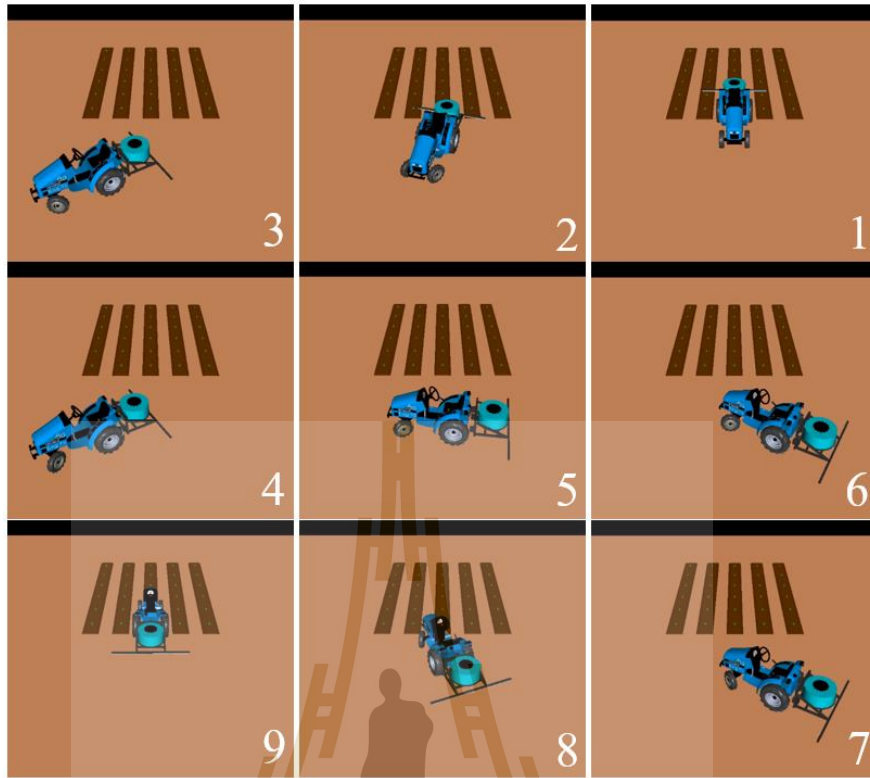
รูปที่ ข.10 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัว
แปลงข้าวรองเดิม กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



รูปที่ ข.11 ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวรองเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา

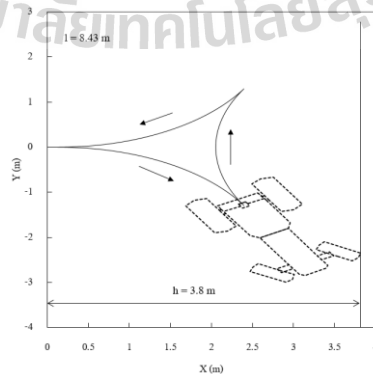


รูปที่ ข.12 มุมเลี้ยว เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวรองเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



รูปที่ ข.13 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง
เข้าร่องเดิม กรณีหักเลี้ยวไปทางขวา จำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะสาม-
มิติ

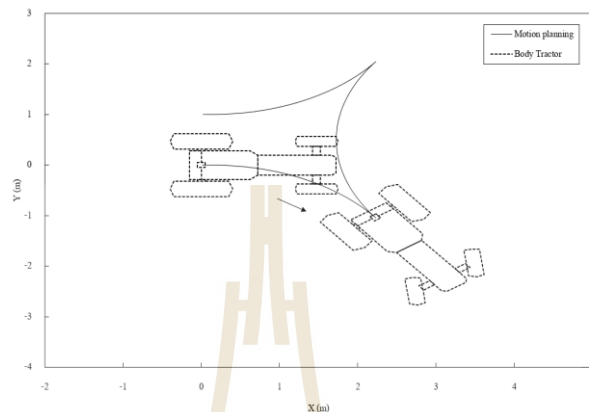
ข.2.2 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



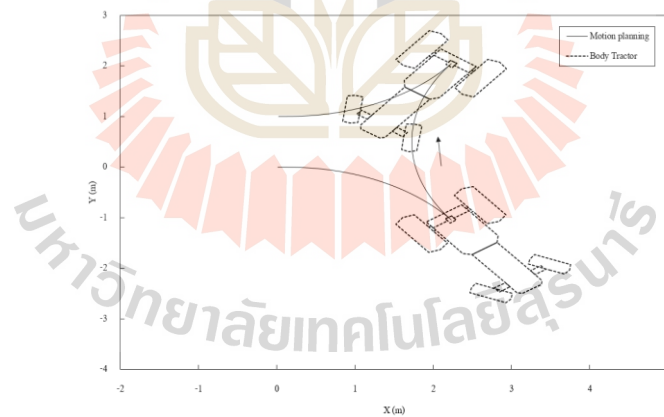
รูปที่ ข.14 เส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 0 m
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา

ข.3 รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องถัดไป(D= - 1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องทางซ้าย

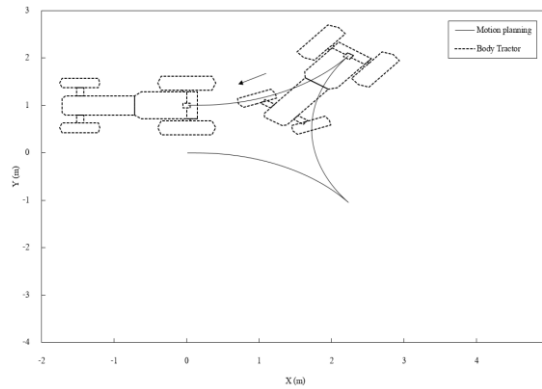
ข.3.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



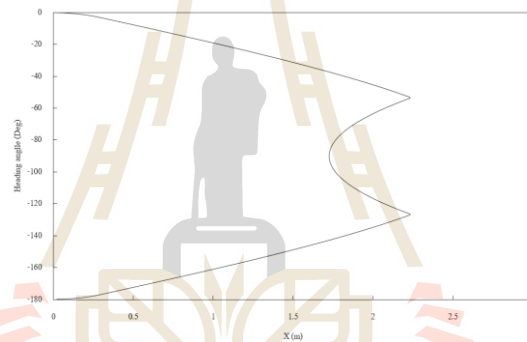
รูปที่ ข.15 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องทางซ้าย



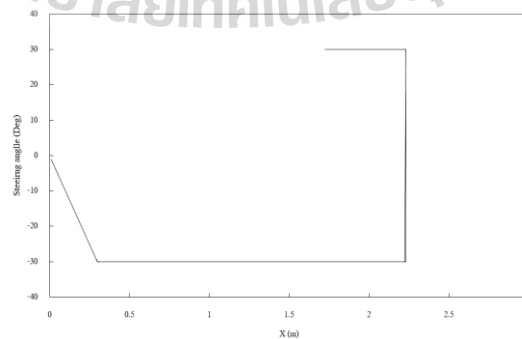
รูปที่ ข.16 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวร่องทางซ้าย



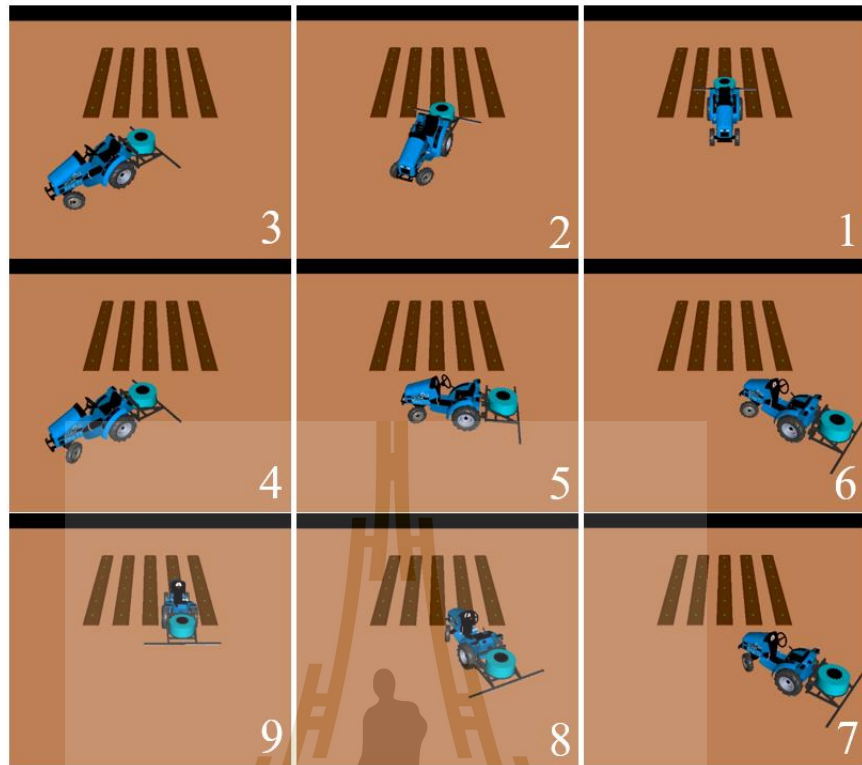
รูปที่ ข.17 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย



รูปที่ ข.18 ทิศทางหน้ารถของรถแทรกเตอร์เกษตร กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย

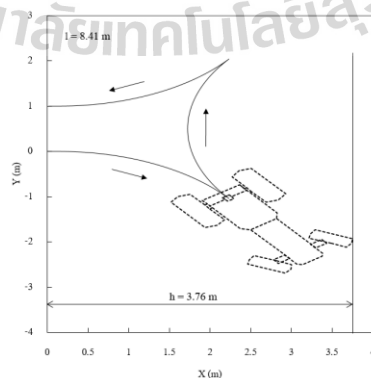


รูปที่ ข.19 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางซ้าย



รูปที่ ข.20 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง
 เข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีไปร่องทางซ้าย จำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง
 รูปลักษณะสามมิติ

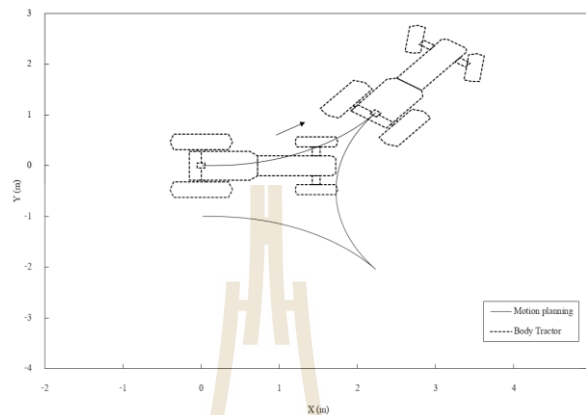
ข.3.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



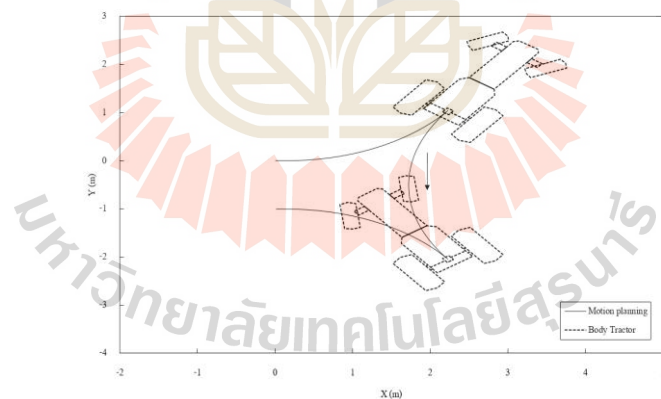
รูปที่ ข.21 เส้นทางการกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m
 กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย

ข.4 รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D= - 1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา

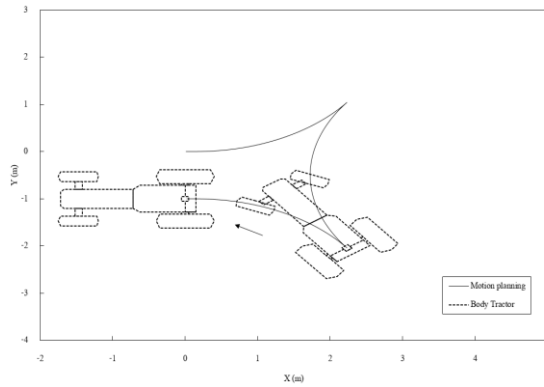
ข.4.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



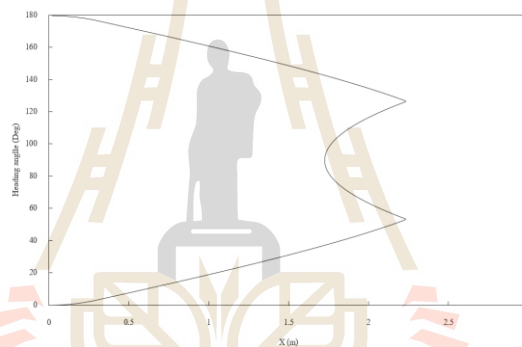
รูปที่ ข.22 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



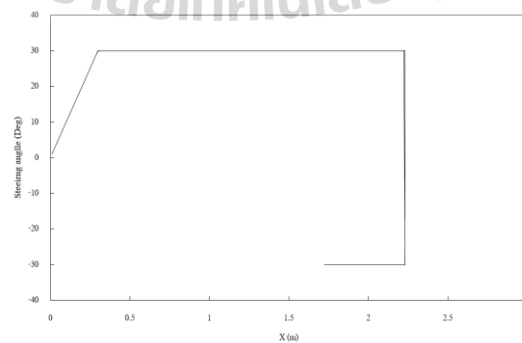
รูปที่ ข.23 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



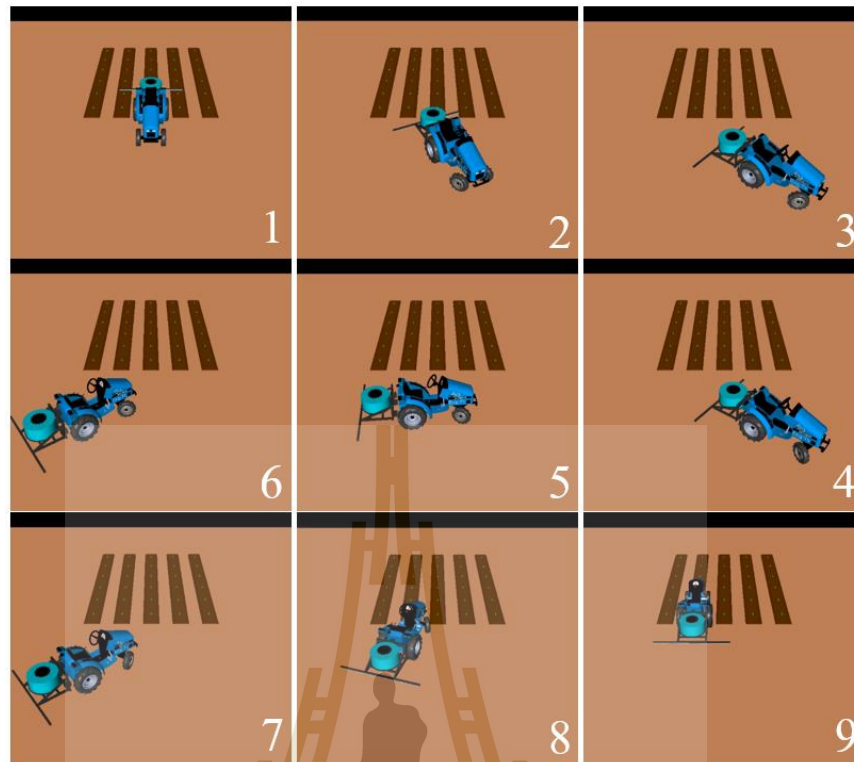
รูปที่ ข.24 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ ข.25 ทิศทางหน้ารถของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา

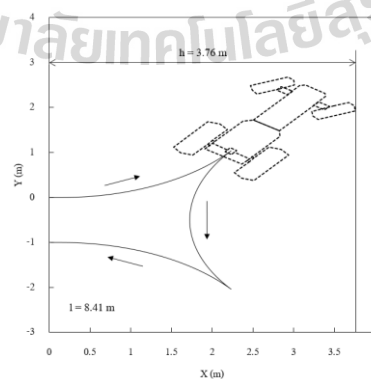


รูปที่ ข.26 มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=-1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ ข.27 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง
เข้าร่องถัดไป ($D=-1\text{m}$) กรณีไปร่องทางขวา จำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลอง
รูปลักษณะสามมิติ

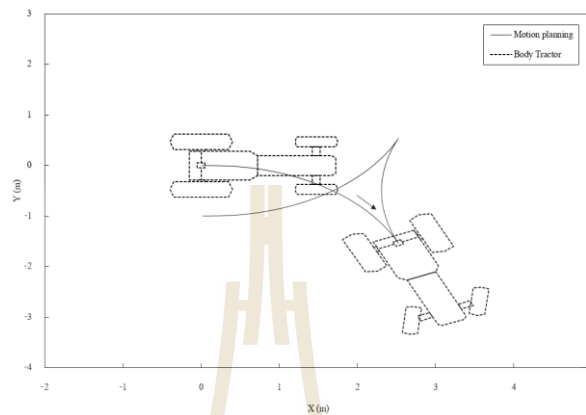
ข.4.2 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



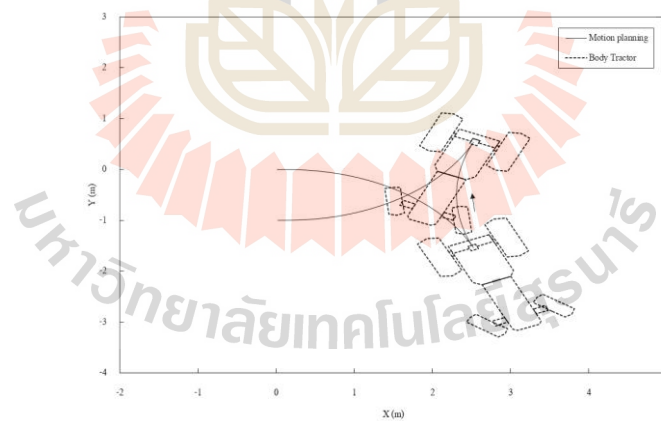
รูปที่ ข.28 เส้นทางกลับเคี้ยวหัวแปลงแบบทางปลาระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเคี้ยวไปร่องทางขวา

ข.5 รถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวองัดไป($D=1$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา

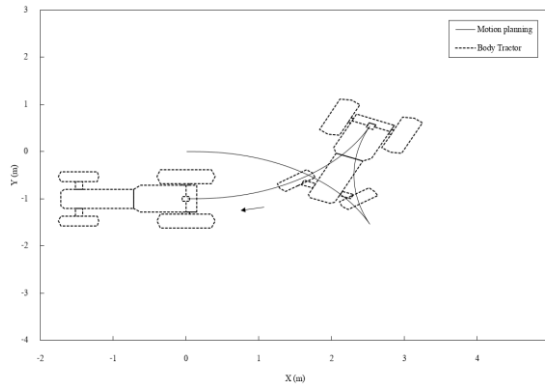
ข.5.1 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



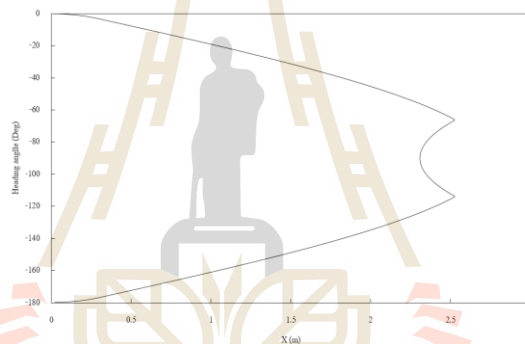
รูปที่ ข.29 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 1 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวองัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวองัดไปทางขวา



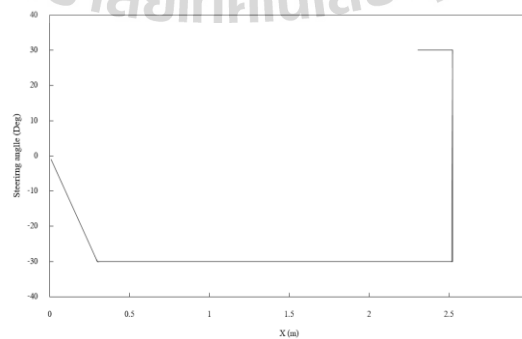
รูปที่ ข.30 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 2 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวองัดไป ($D=1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงข้าวองัดไปทางขวา



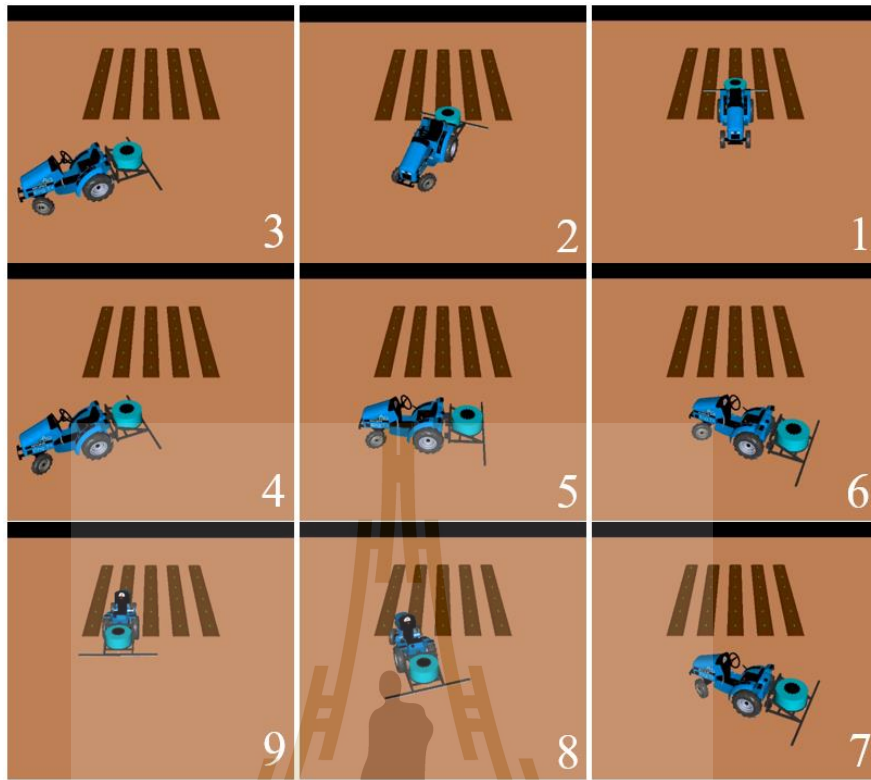
รูปที่ ข.31 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางที่ 3 เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ ข.32 ทิศทางหน้ารถ เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา

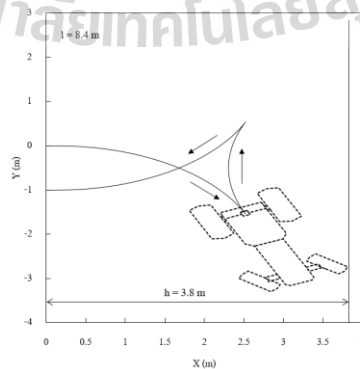


รูปที่ ข.33 มุมเลี้ยว เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D=1m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลงเข้าร่องทางขวา



รูปที่ ข.34 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตร เมื่อรถแทรกเตอร์เกษตรกลับหัวแปลง
 เข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีไปร่องทางขวาจำลองสถานการณ์ด้วยแบบจำลองรูปลักษณะ
 สามมิติ

ข.5.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์



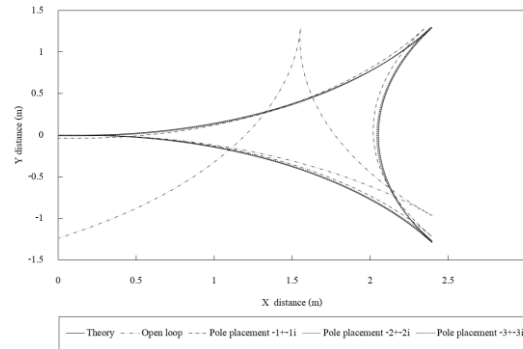
รูปที่ ข.35 เส้นทางการกลับเลี้ยวหัวแปลงแบบหางปลา ระยะห่างระหว่างร่องพืช (D) เท่ากับ 1 m
 กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา



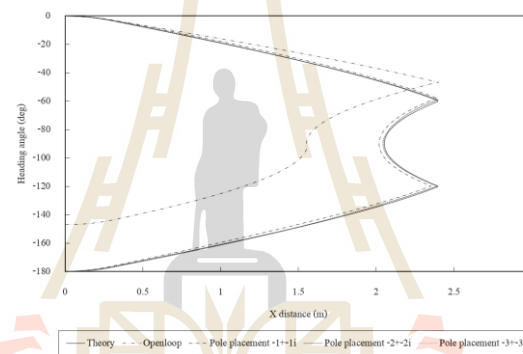
ภาคผนวก ค

ผลการจำลองสถานการณ์ทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนกลับ
ด้วยวิธีวางตำแหน่งโพล

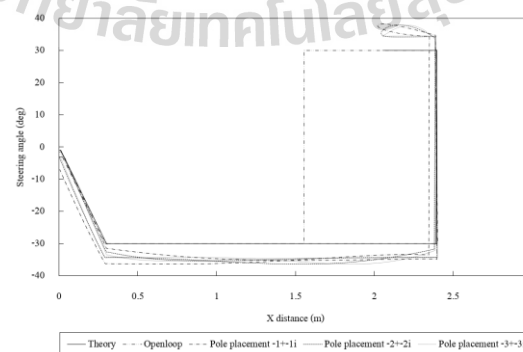
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



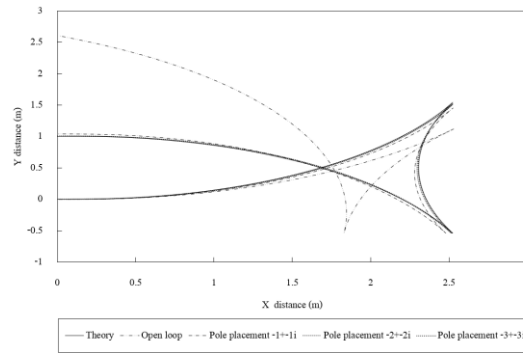
รูปที่ ค.1 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าง่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



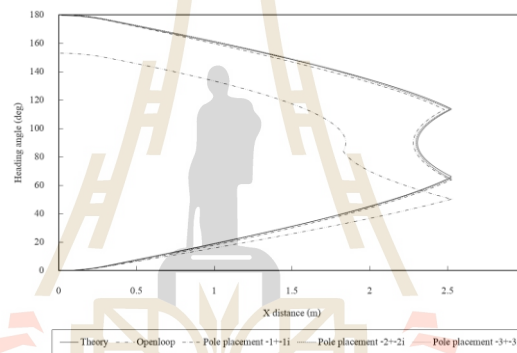
รูปที่ ค.2 การเปรียบเทียบทิศทางเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าง่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



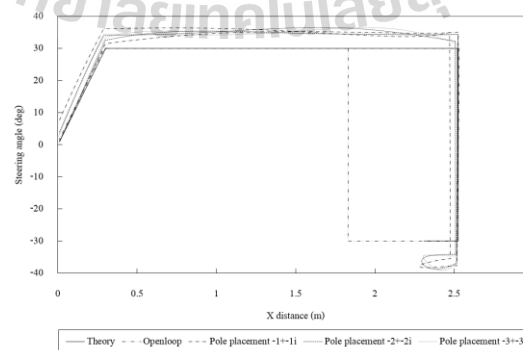
รูปที่ ค.3 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าง่องเดิมกรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



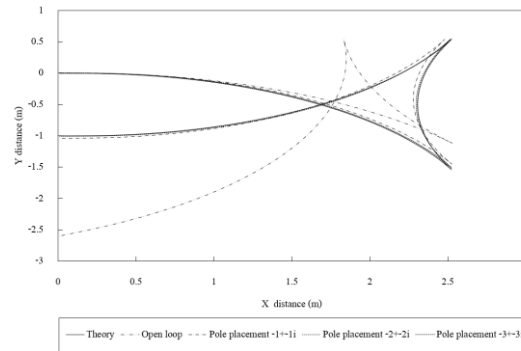
รูปที่ ค.4 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



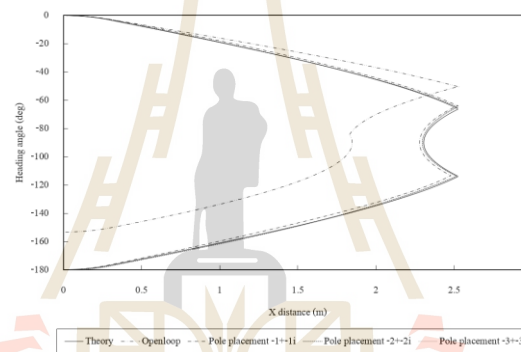
รูปที่ ค.5 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



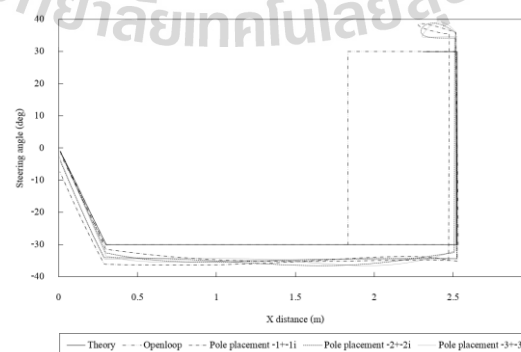
รูปที่ ค.6 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



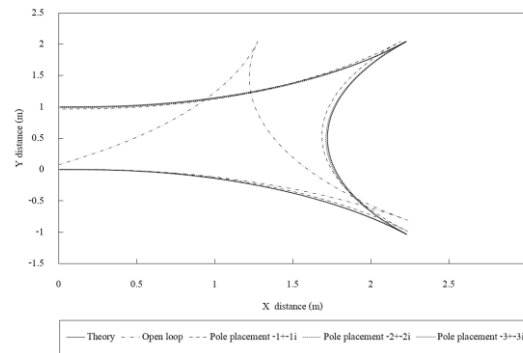
รูปที่ ค.7 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



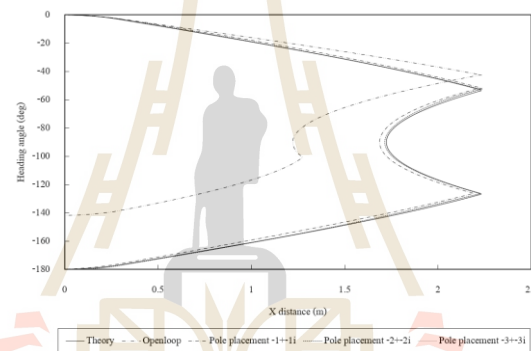
รูปที่ ค.8 การเปรียบเทียบทิศทางทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



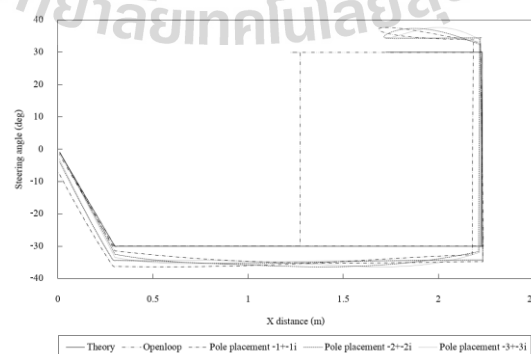
รูปที่ ค.9 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=1\text{m}$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



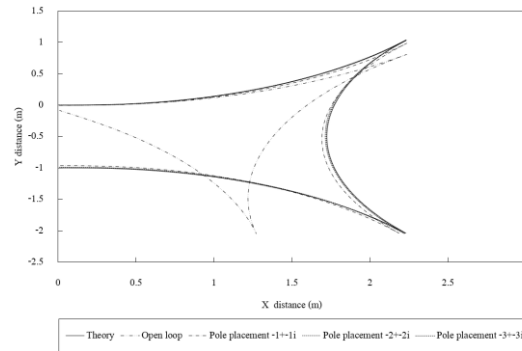
รูปที่ ค.10 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



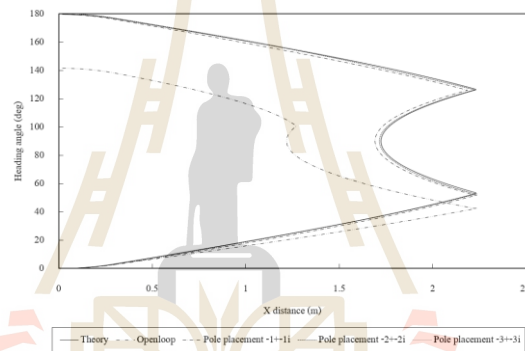
รูปที่ ค.11 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



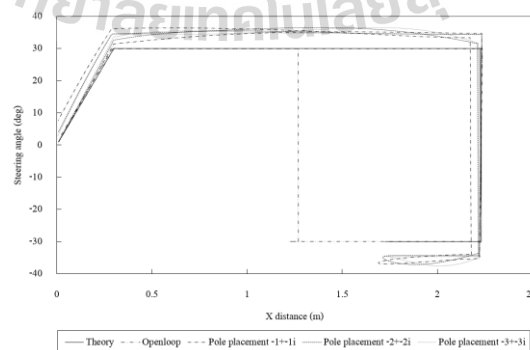
รูปที่ ค.12 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องซ้าย



รูปที่ ค.13 การเปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



รูปที่ ค.14 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



รูปที่ ค.15 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรขณะเคลื่อนที่บนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D=-1m$) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวเข้าร่องขวา



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

การพัฒนาโปรแกรมคลัสเตอร์และเครือข่ายอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ง.1 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

ง.1.1 การกำหนดสัญลักษณ์สำหรับการวัดคุม

ขั้นตอนนี้เป็นกรออกแบบสัญลักษณ์สำหรับการวัดคุมเพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรม สัญลักษณ์สำหรับการวัดคุมแสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 สัญลักษณ์สำหรับการวัดคุม

สัญลักษณ์	ความหมาย
CUP	คำสั่งปล่อยคลัตช์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่ออก)
CLO	คำสั่งเหยียบคลัตช์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่เข้า)
LMLOC	ลิมิตสวิทช์ตำแหน่งคันคลัตช์ต่ำสุด
LMUPC	ลิมิตสวิทช์ตำแหน่งคันคลัตช์สูงสุด
GUP	คำสั่งดึงคันเกียร์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่ออก)
GLO	คำสั่งผลักคันเกียร์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่เข้า)
LML1G	ลิมิตสวิทช์ตำแหน่งเกียร์เดินหน้าระดับ 1
LMNG	ลิมิตสวิทช์ตำแหน่งเกียร์ว่าง
LMRG	ลิมิตสวิทช์ตำแหน่งเกียร์ถอยหลัง
ON	กรณีเซนเซอร์ลิมิตสวิทช์ แสดงสถานะการสัมผัส โคนของคันเกียร์หรือก้านคลัตช์
OFF	กรณีเซนเซอร์ลิมิตสวิทช์ แสดงสถานะการไม่สัมผัส โคนของคันเกียร์หรือก้านคลัตช์
Error	เป็นข้อความแสดงความผิดพลาด/ไม่พร้อมทำงานของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ

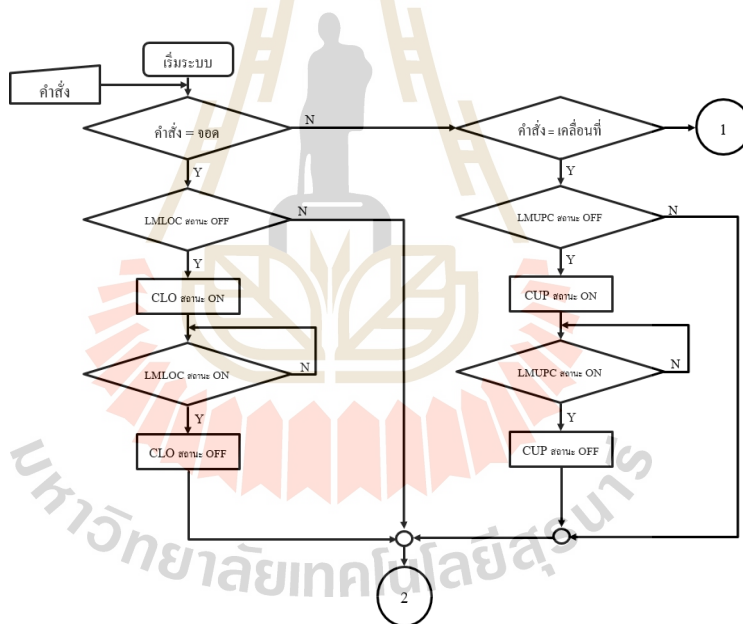
ง.1.2 ลำดับการทำงาน

จากรูปที่ ง.1 เป็นแผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 1 แสดงการทำงานของโปรแกรมส่วนตอบสนองต่อคำสั่งเคลื่อนที่และจอด จากรูปการทำงานเริ่มจากผู้ใช้งานป้อนคำสั่งแล้วกดเริ่มระบบ ระบบจะทำการตรวจสอบคำสั่งจากผู้ใช้

หากคำสั่งตรงกับจอตระบบจะทำการตรวจสอบสถานะลิมิตสวิทช์ตำแหน่งคัน
 คลัตช์ต่ำสุด(LMLOC) ถ้าสถานะ LMLOC ขึ้น ON ระบบจะเสร็จสิ้นการสั่งการ ถ้าสถานะ LMLOC
 ขึ้น OFF ระบบจะทำการสั่งให้เหยียบคลัตช์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่เข้า)เพื่อเคลื่อนคัน
 คลัตช์มาตำแหน่งคันคลัตช์ต่ำสุด พอถึงระบบจะสั่งให้ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้ง
 หยุดทำงาน แล้วระบบจะเสร็จสิ้นการสั่งการ

หากคำสั่งตรงกับเคลื่อนที่ระบบจะทำการตรวจสอบสถานะลิมิตสวิทช์ตำแหน่งคัน
 คลัตช์สูงสุด ถ้าสถานะ LMUPC ขึ้น ON ระบบจะเสร็จสิ้นการสั่งการ ถ้าสถานะ LMUPC ขึ้น OFF
 ระบบจะทำการสั่งให้ปล่อยคลัตช์(ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งเคลื่อนที่ออก)เพื่อเคลื่อนคันคลัตช์มา
 ตำแหน่งคันคลัตช์สูงสุด พอถึงระบบจะสั่งให้ชุดขับเคลื่อนแบบแนวตั้งหยุดทำงาน แล้วระบบจะ
 เสร็จสิ้นการสั่งการ

หากคำสั่งไม่ตรงกับจอตและเคลื่อนที่ ระบบจะทำงานตามรูปที่ ง.2



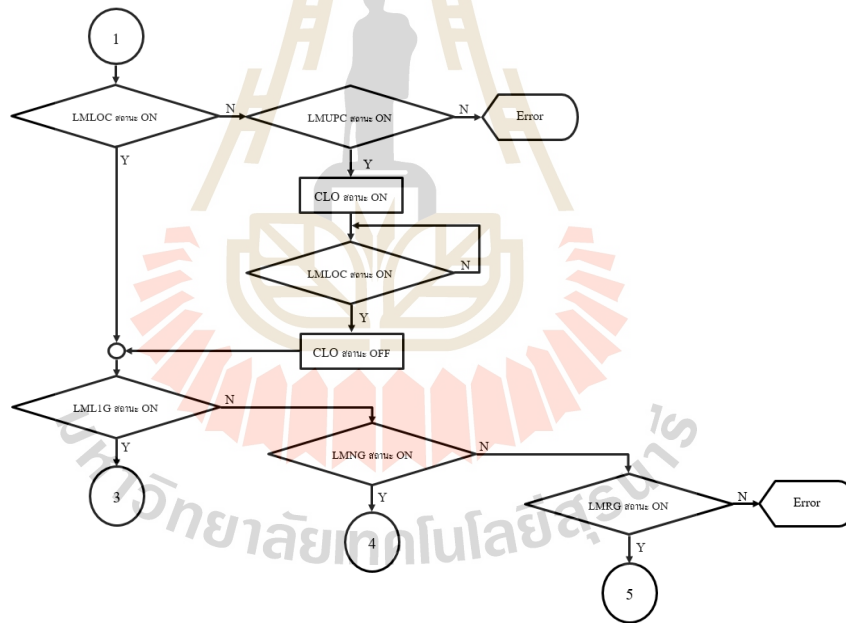
รูปที่ ง.1 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 1

รูปที่ ง.2 เป็นแผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 2
 แสดงการทำงานของโปรแกรมส่วนตอบสนองต่อคำสั่งเปลี่ยนเกียร์ส่วนที่ 1 ก่อนตรวจสอบคำสั่ง
 เปลี่ยนเกียร์ระบบจะตรวจสอบ 2 อย่างตามลำดับดังนี้

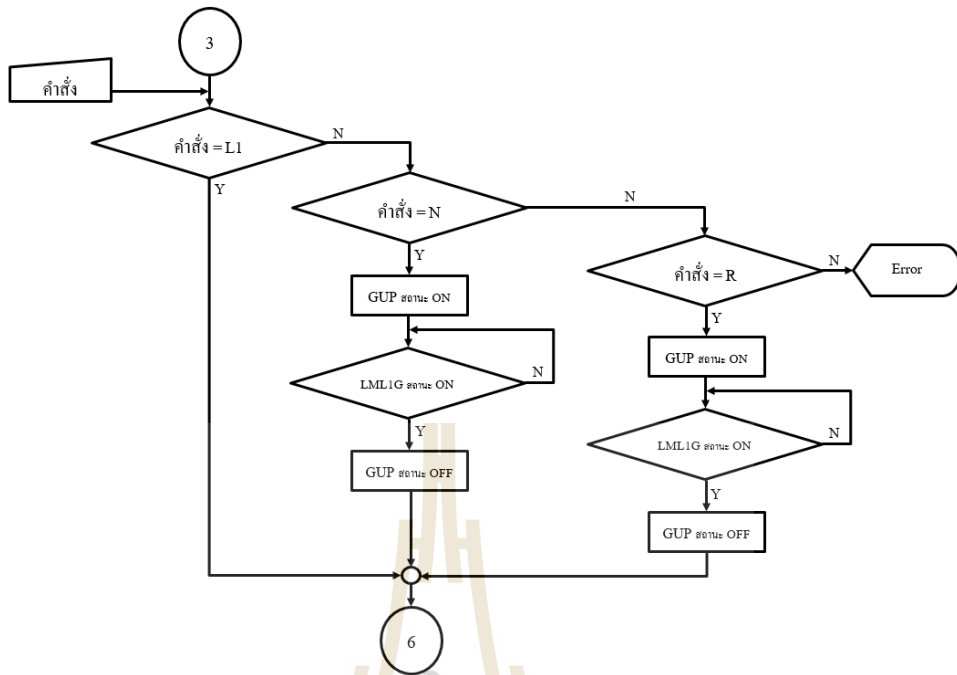
1. ระบบทำการตรวจสอบสถานะคันคลัตช์ว่าอยู่ตำแหน่งคันคลัตช์ต่ำสุด (LMLOC)หรือไม่ หากตรวจพบว่าไม่อยู่ระบบจะสั่งการให้เหยียบคลัตช์ ถ้าระบบตรวจพบว่า LMLOC และ LMUPC แสดงสถานะ OFF ทั้งคู่ระบบจะแสดงสถานะ Error

2. ระบบทำการตรวจสอบสถานะเกียร์ปัจจุบัน จากการตรวจสอบสถานะ ON ของ ลิ้มิตสวิทช์ที่ติดตั้งที่เป็นเกียร์ หากพบว่าสถานะ OFF ทั้งหมดระบบจะแสดงสถานะ Error หลังระบบตรวจสอบพบสถานะ ON ระบบจะส่งเข้าสู่ขั้นตอนเปลี่ยนเกียร์ตามรูปที่ ๓.3 – ๓.5

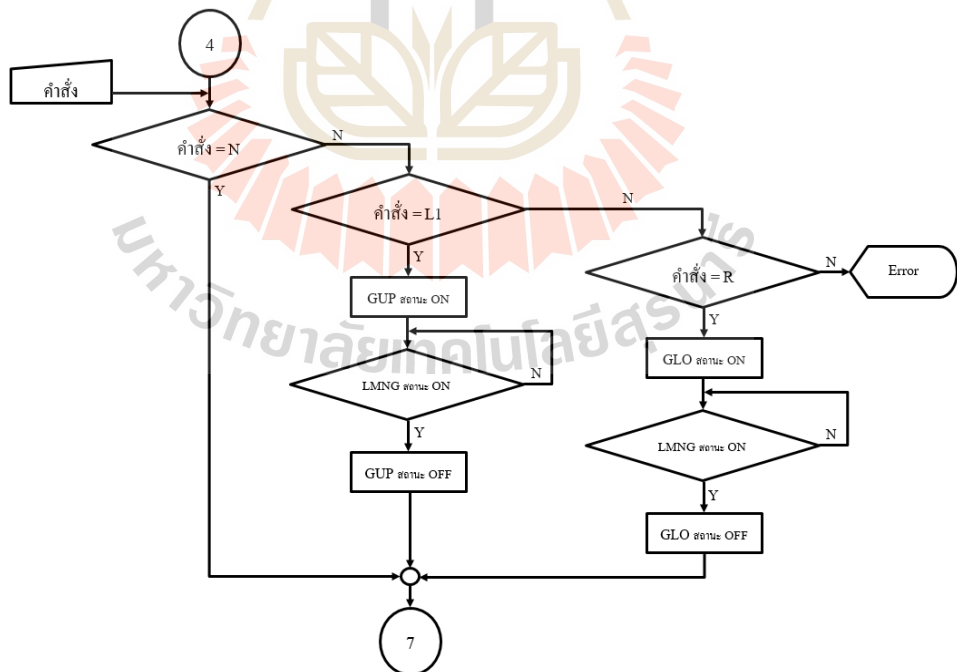
รูปที่ ๓.3 – ๓.5 เป็นแผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 3-5 แสดงการทำงานของโปรแกรมส่วนตอบสนองต่อคำสั่งเปลี่ยนเกียร์ส่วนที่ 2 การทำงานระบบจะตรวจสอบคำสั่งว่าสั่งการให้เปลี่ยนเกียร์ไปที่เกียร์ใด โดยระบบจะสั่งการชุดขับเคลื่อนแบบ แนวตั้งที่ติดตั้งที่คันเกียร์ เพื่อเปลี่ยนเกียร์ไปยังตำแหน่งที่ผู้ใช้งานต้องการ หลังเปลี่ยนเกียร์ตามคำสั่งแล้วระบบจะหยุดทำงาน แสดงดังรูปที่ ๓.6



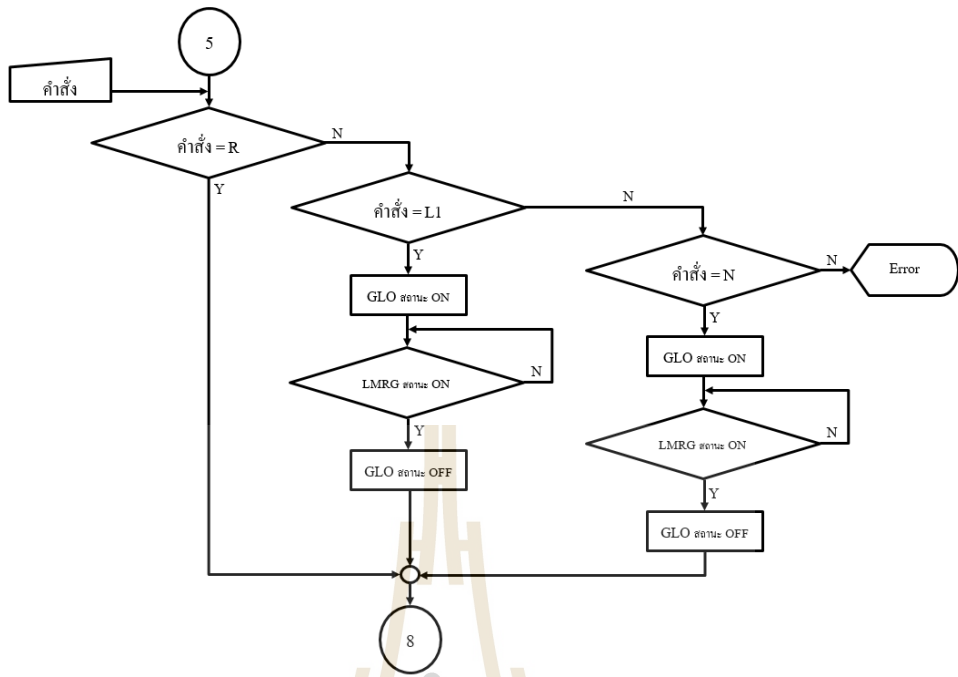
รูปที่ ๓.2 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 2



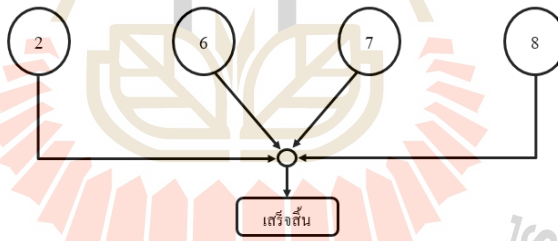
รูปที่ 3.3 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 3



รูปที่ 3.4 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 4

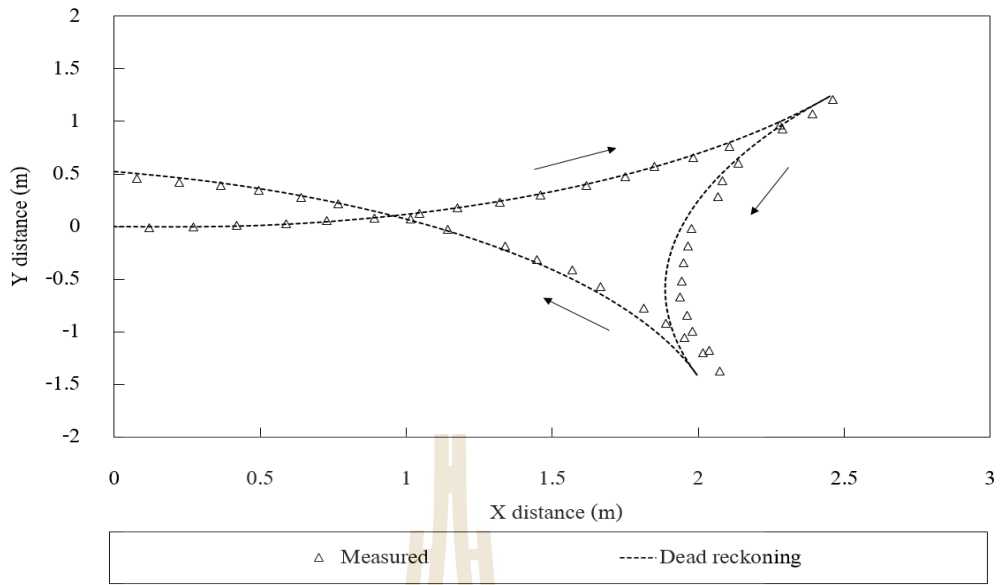


รูปที่ ๓.5 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 5

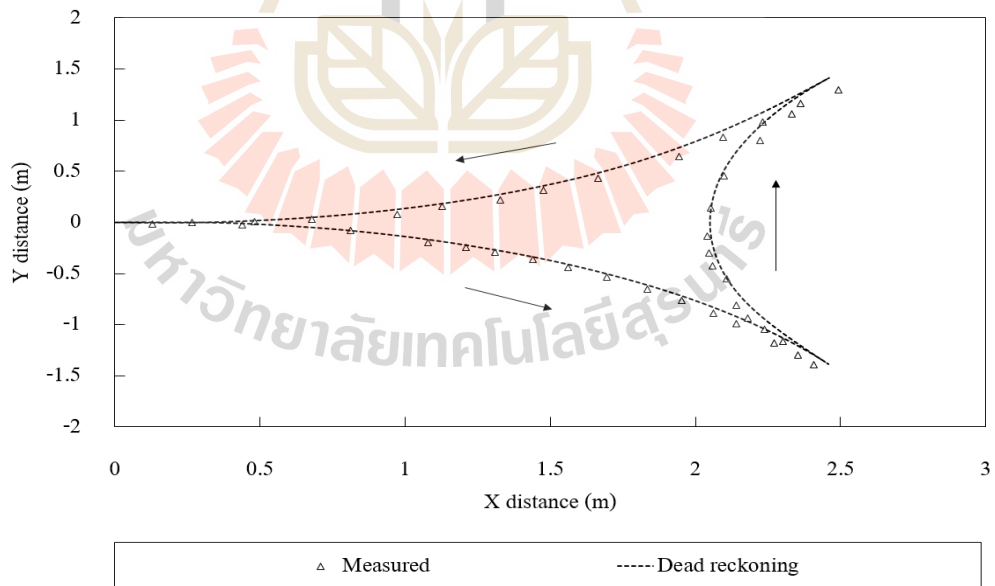


รูปที่ ๓.6 แผนผังโปรแกรมของระบบควบคุมคลัตช์และเกียร์อัตโนมัติ ส่วนที่ 6

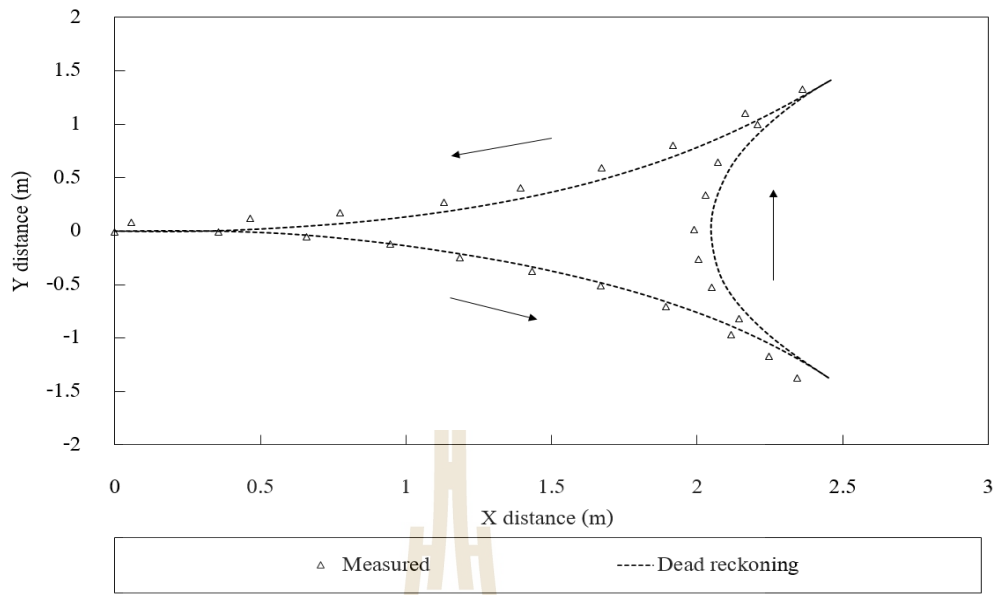




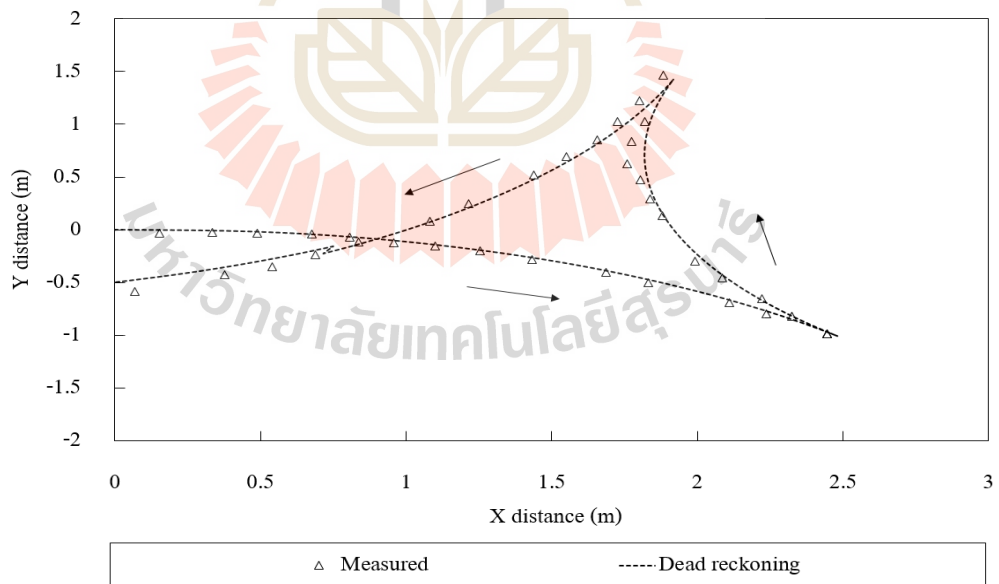
รูปที่ จ.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกศตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบบนพื้น
ปูน



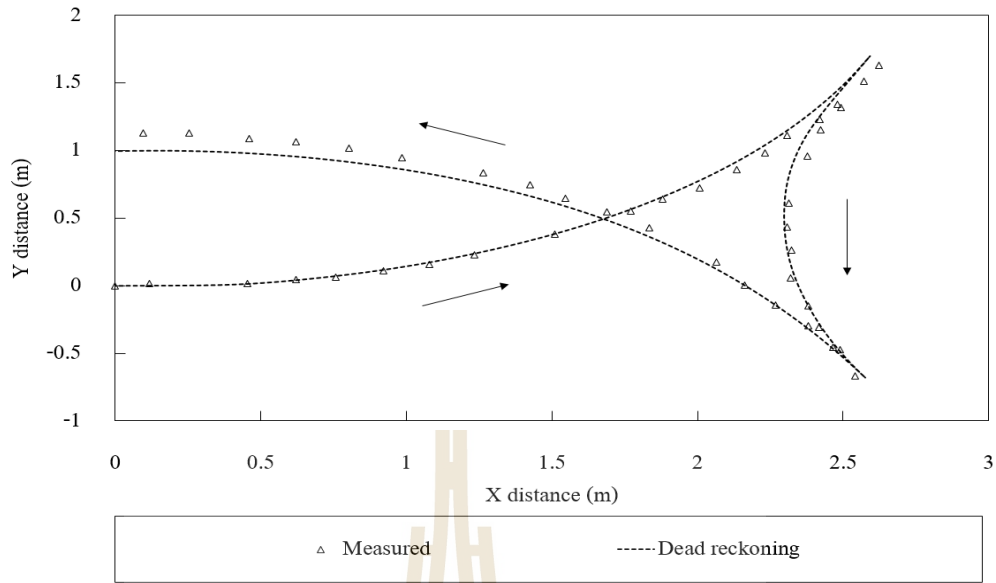
รูปที่ จ.2 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกศตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบนพื้น
ปูน



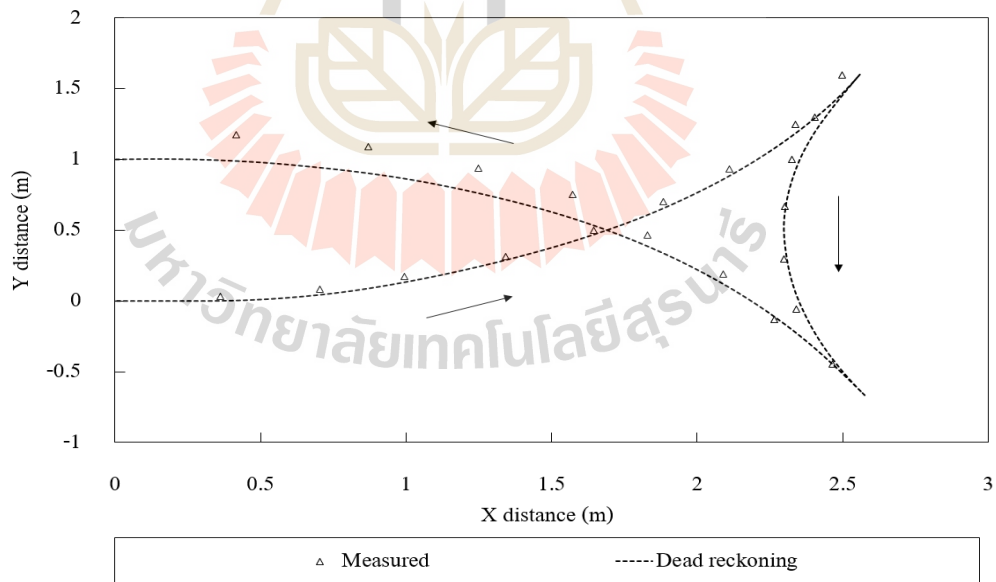
รูปที่ จ.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบน
พื้นดิน



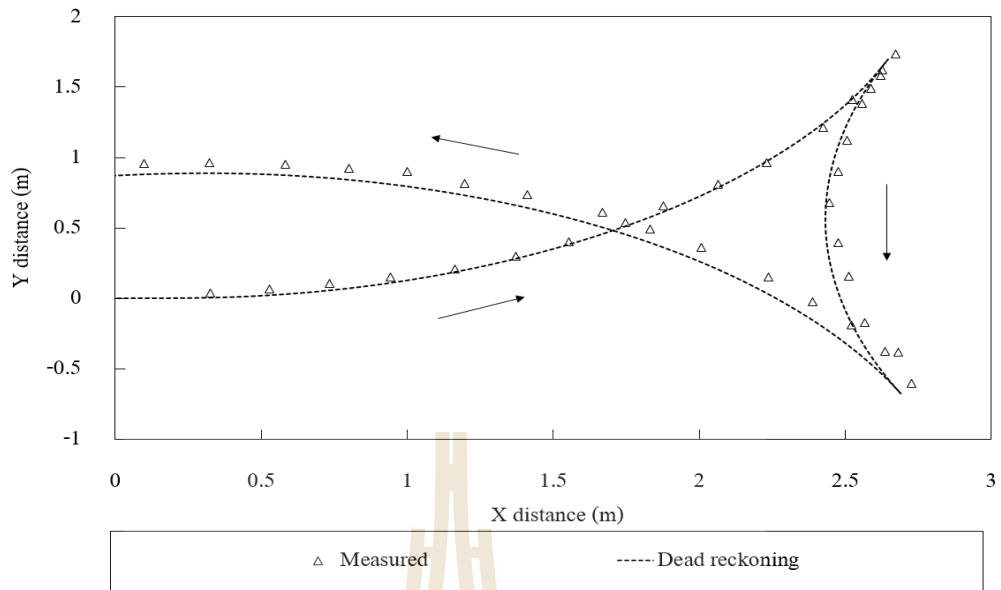
รูปที่ จ.4 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องเดิม
กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบบนพื้น
ปูน



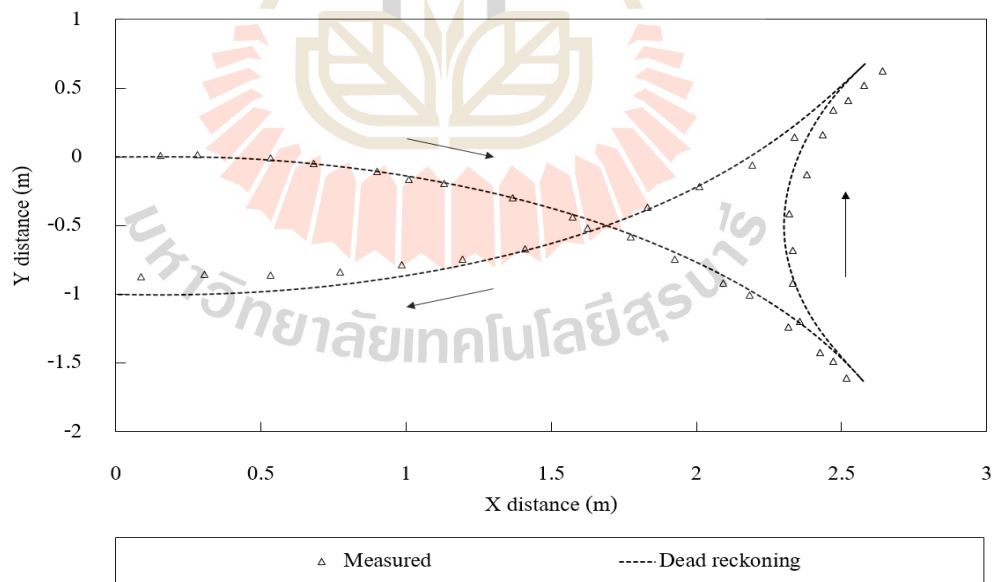
รูปที่ ๖.๕ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข่าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบนพื้นปูน



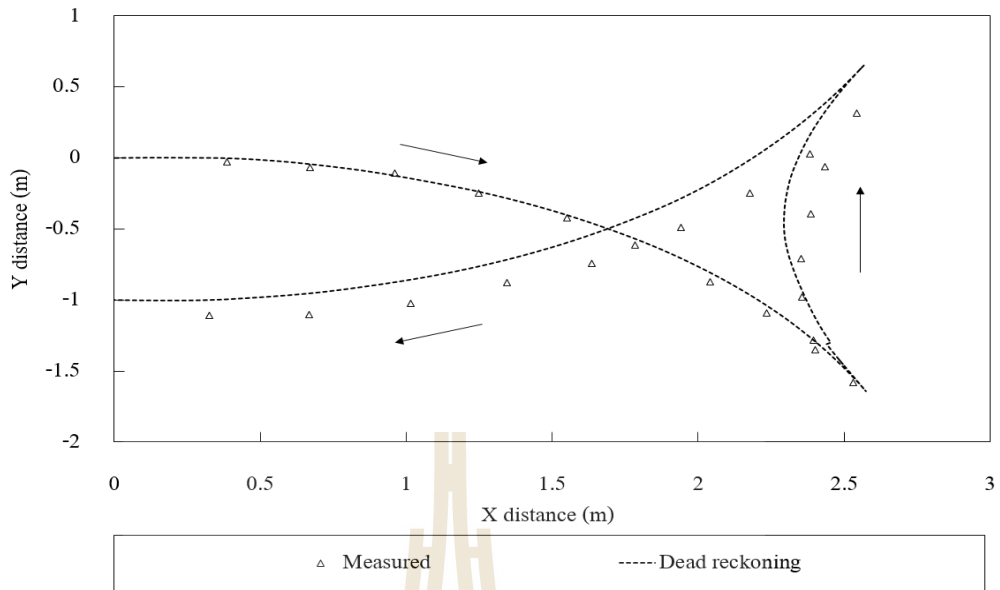
รูปที่ ๖.๖ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข่าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบนพื้นดิน



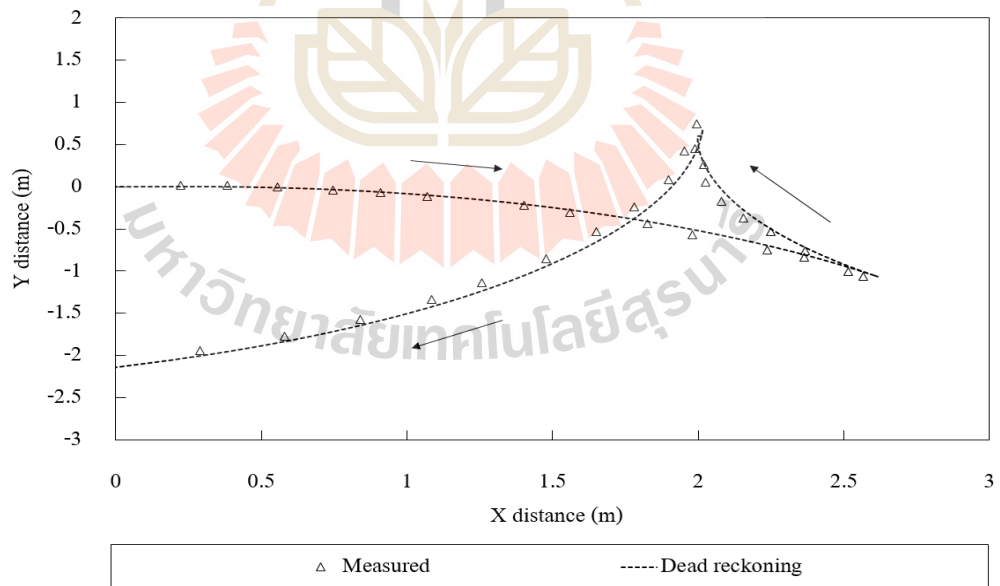
รูปที่ ๖.๗ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบบนพื้นปูน



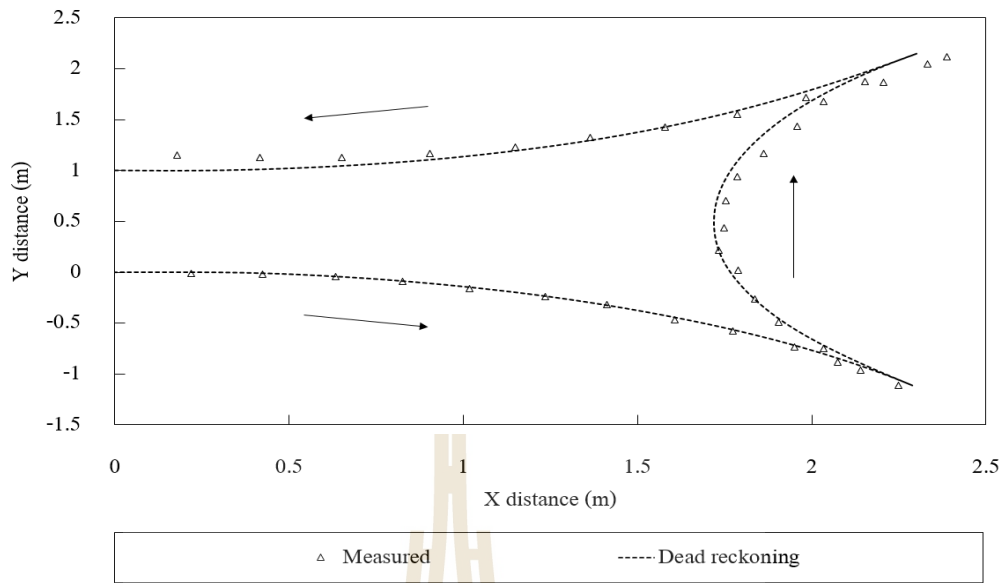
รูปที่ ๖.๘ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบนพื้นปูน



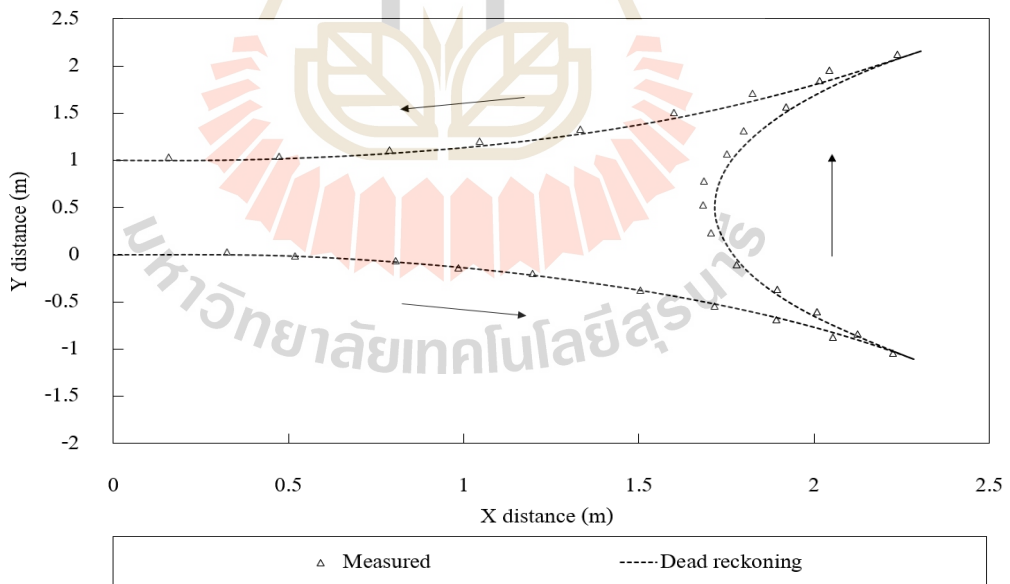
รูปที่ ๙.๙ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบป้อนกลับทดสอบบนพื้นดิน



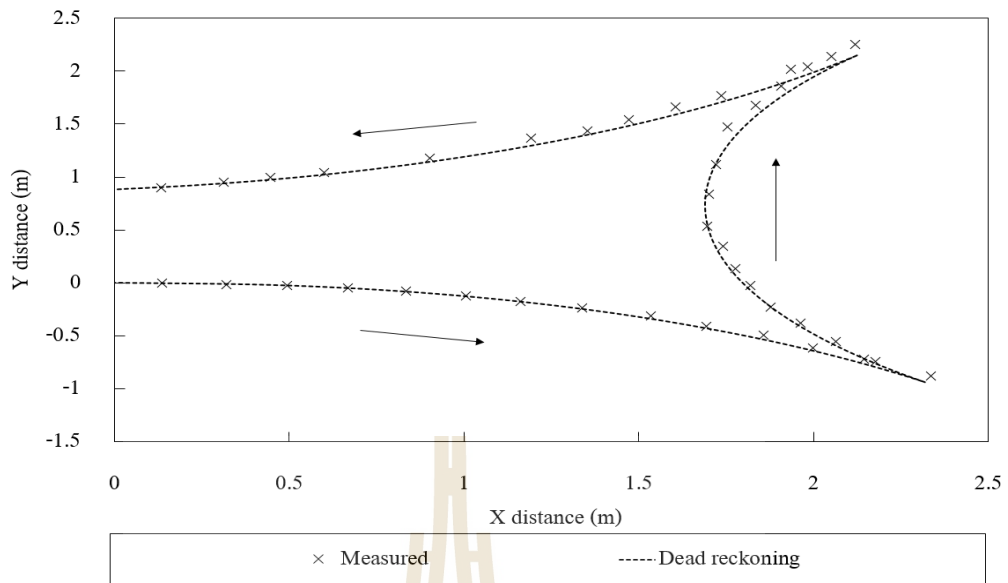
รูปที่ ๙.๑๐ การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D=1) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิดทดสอบบนพื้นปูน



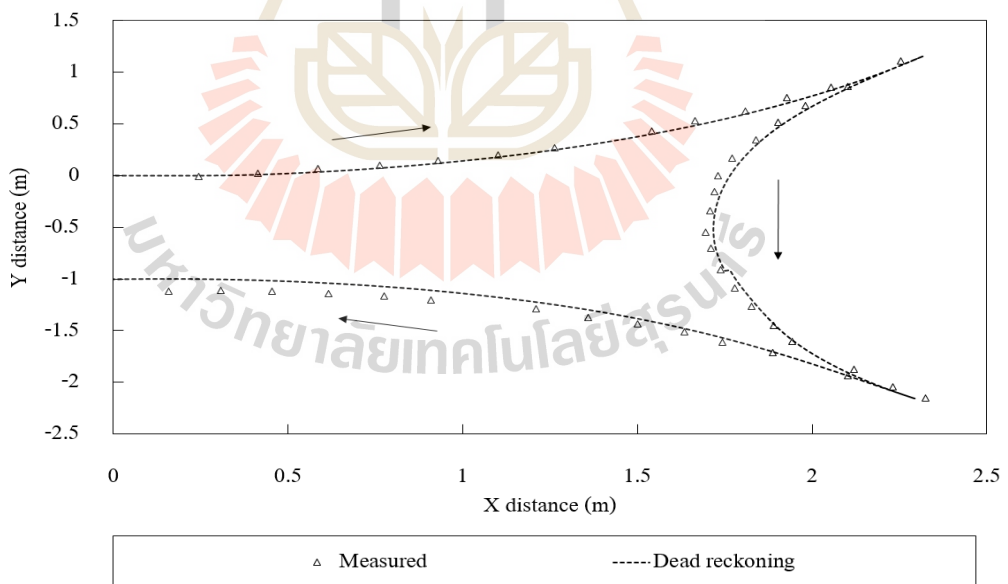
รูปที่ จ.11 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด ทดสอบบนพื้นปูน



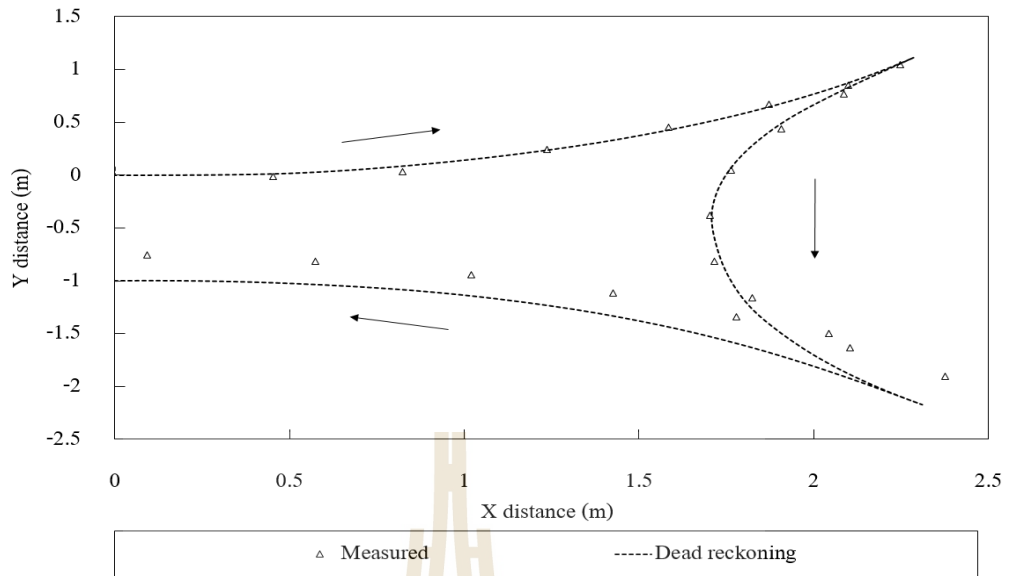
รูปที่ จ.12 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด ทดสอบบนพื้นดิน



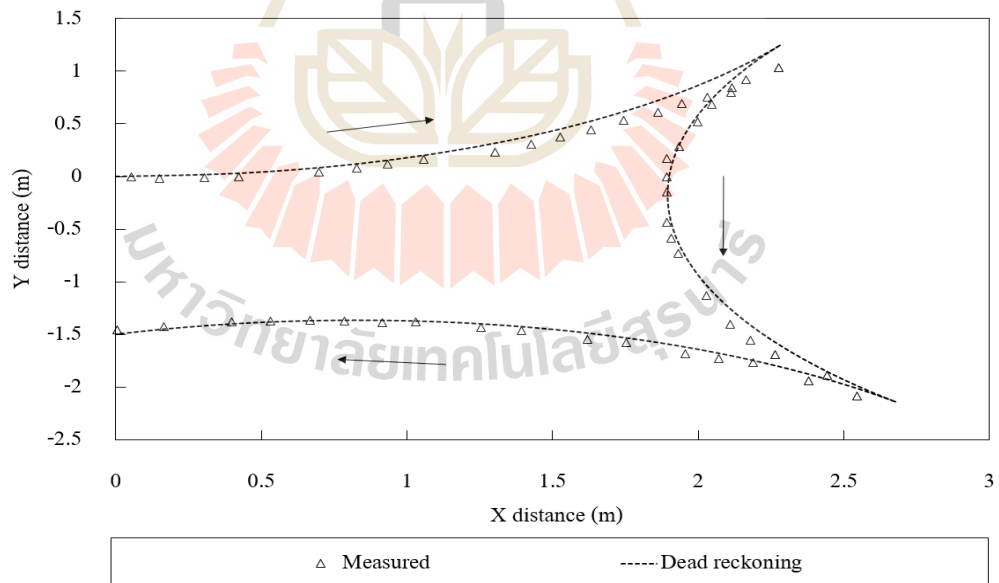
รูปที่ จ.13 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนเข้าร่องทางซ้ายด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด ทดสอบบนพื้นปูน



รูปที่ จ.14 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กลับหัวแปลงเข้าร่อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนเข้าร่องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด ทดสอบบนพื้นปูน

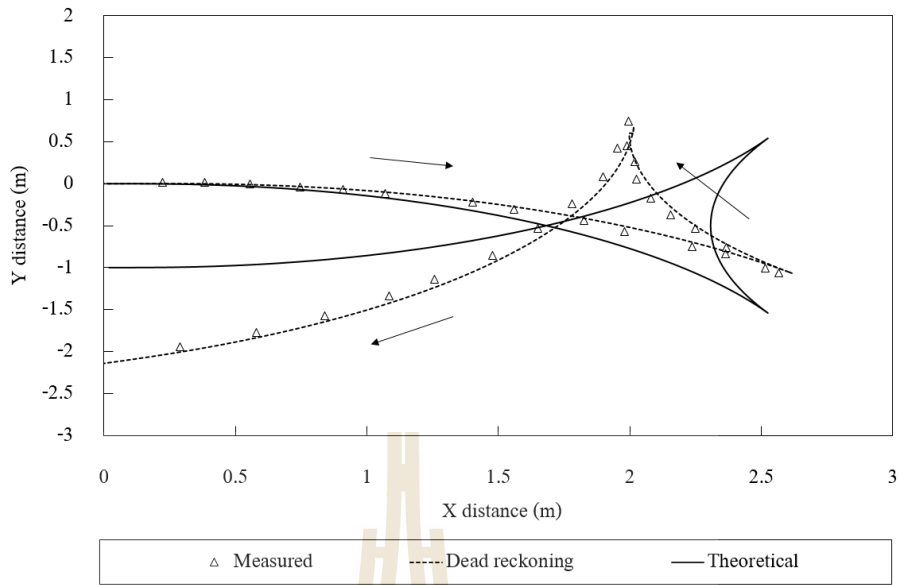


รูปที่ จ.15 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าห้อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนเข้าห้องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด ทดสอบบนพื้นดิน

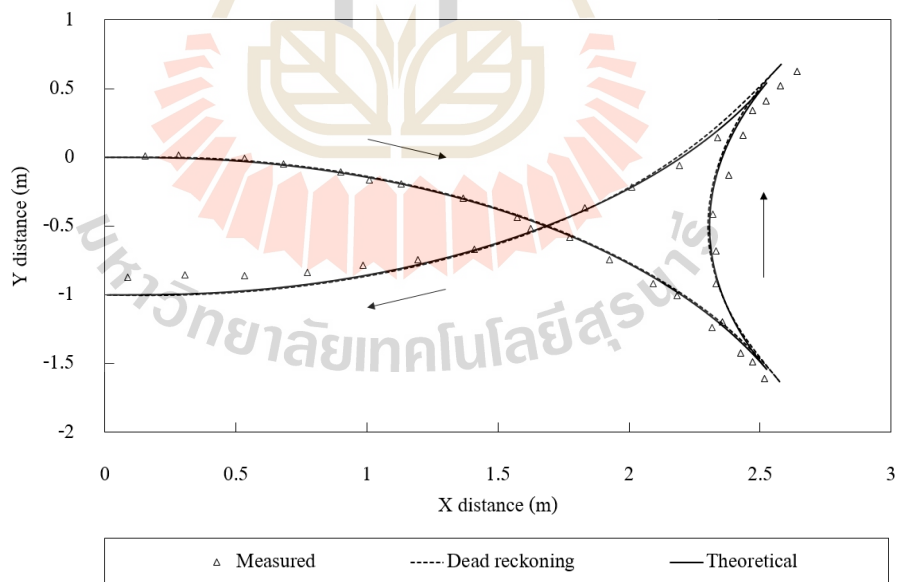


รูปที่ จ.16 การเปรียบเทียบตำแหน่งรถแทรกเตอร์บนเส้นทางการเคลื่อนที่กลับหัวแปลงเข้าห้อง ถัดไป(D=-1)กรณีรถแทรกเตอร์เคลื่อนเข้าห้องทางขวาด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด ทดสอบบนพื้นปูน

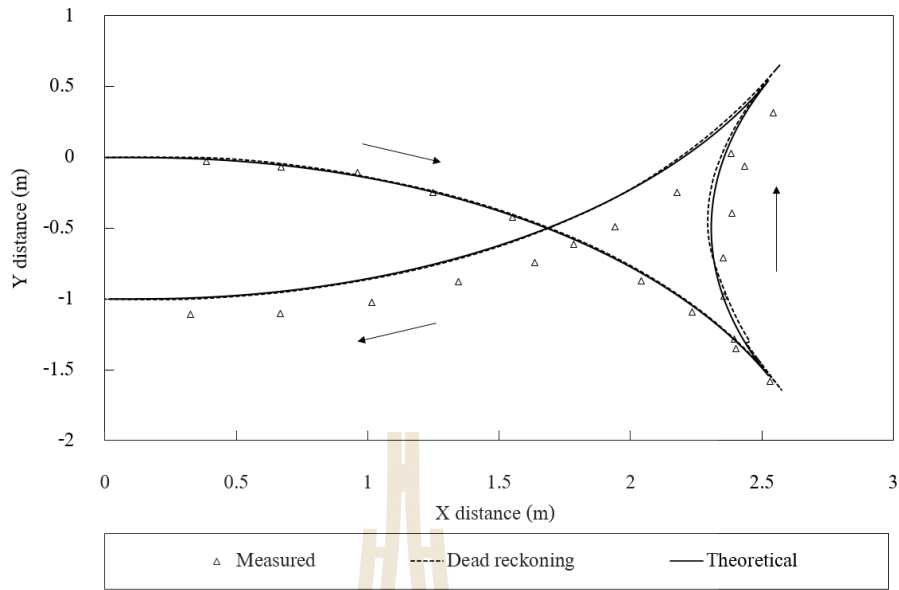




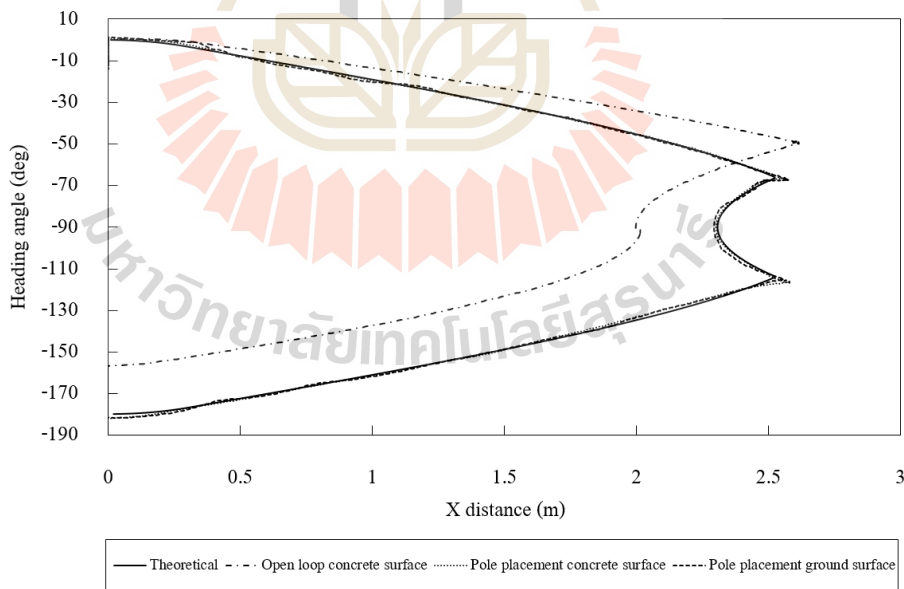
รูปที่ ๑.๑ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป
($D = 1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุม
แบบวงเปิด



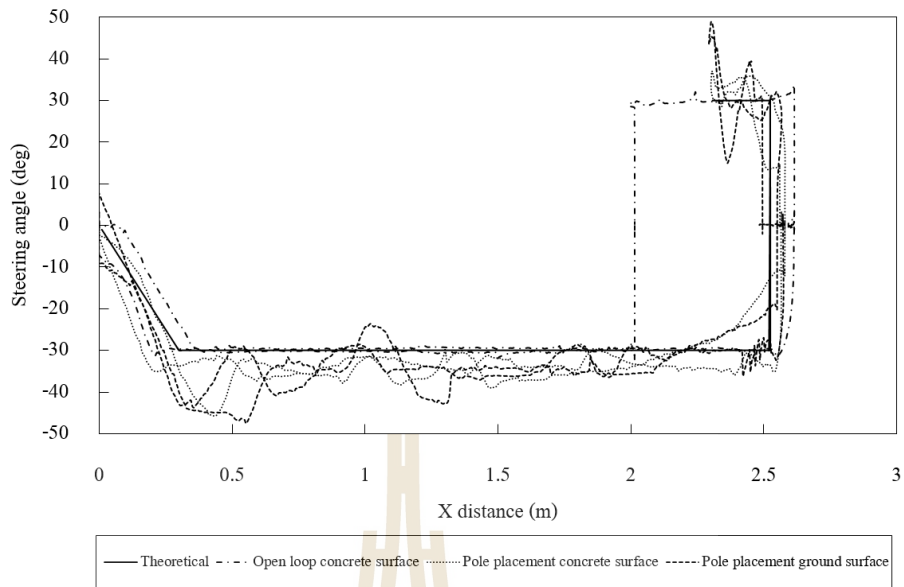
รูปที่ ๑.๒ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป
($D = 1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุม
แบบวงปิด



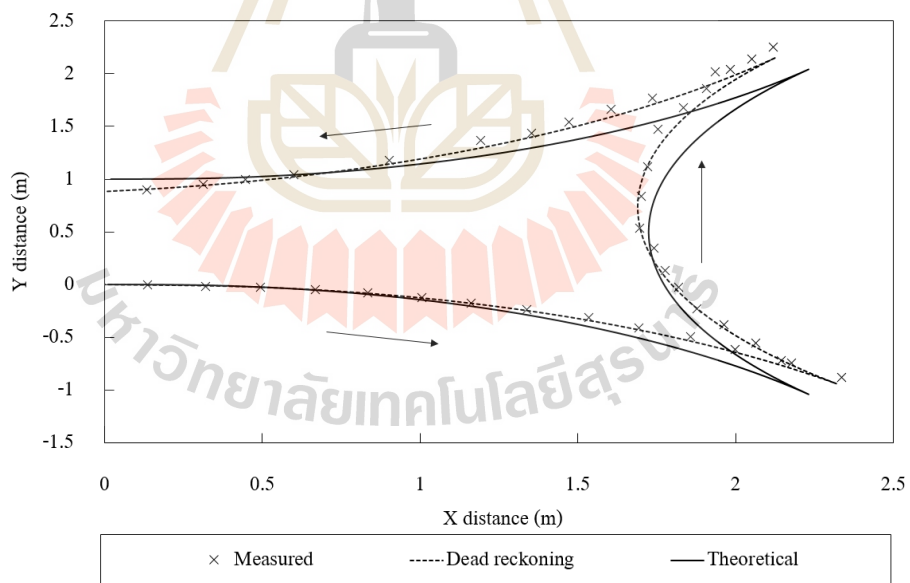
รูปที่ ๓.3 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



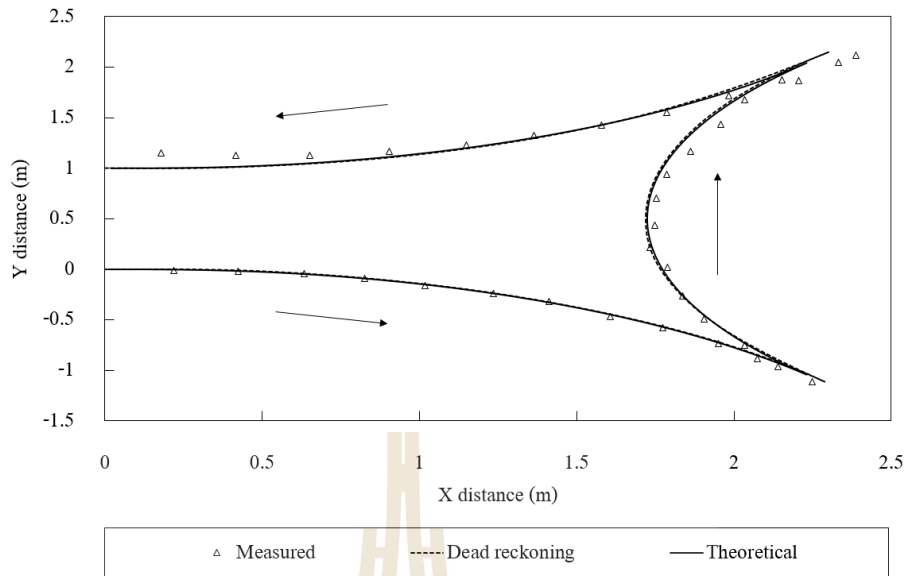
รูปที่ ๓.4 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป(D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา



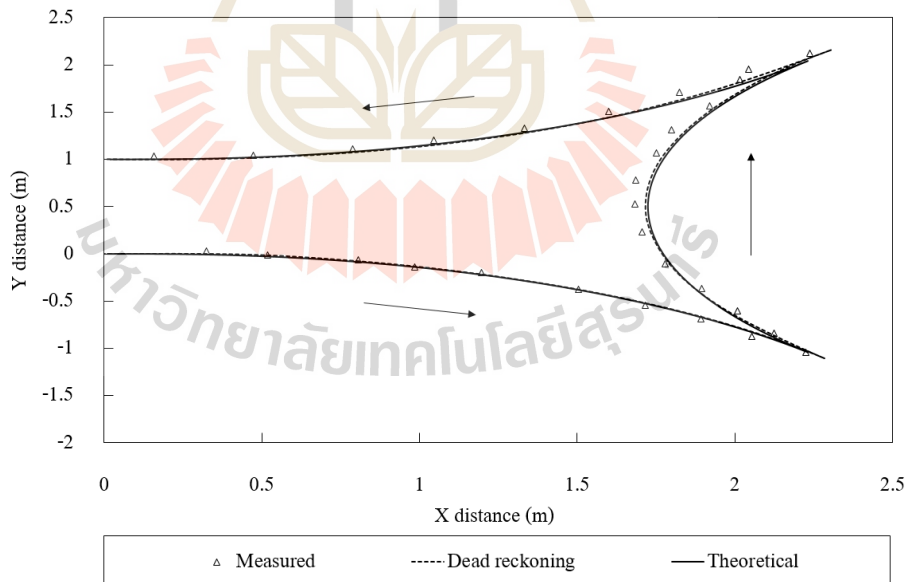
รูปที่ ๓.๕ การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = 1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา



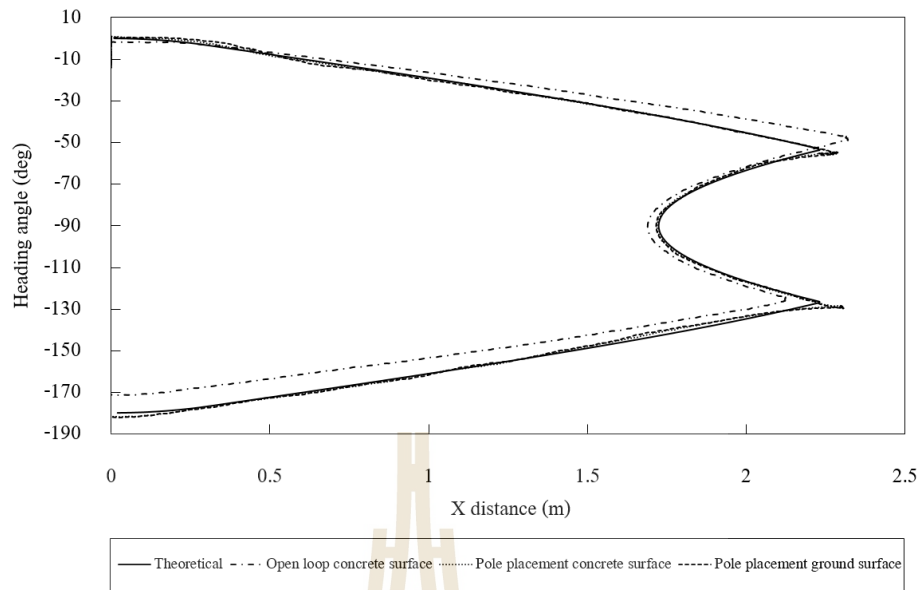
รูปที่ ๓.๖ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด



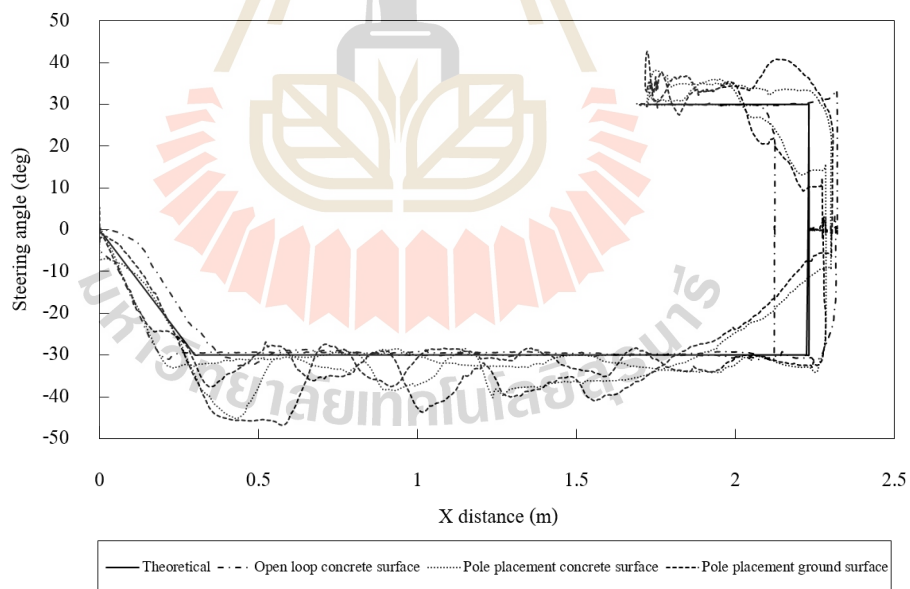
รูปที่ ๗.๗ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



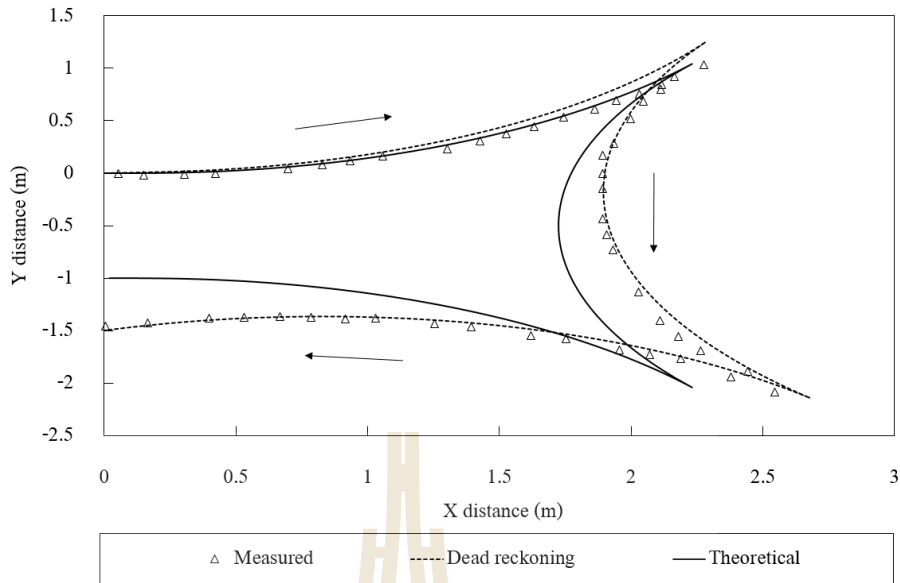
รูปที่ ๗.๘ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



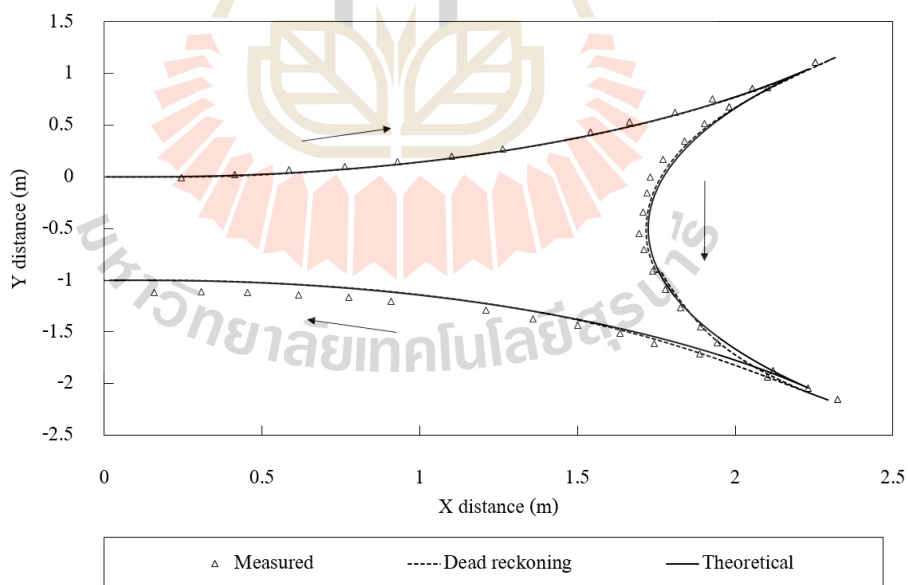
รูปที่ ๙.๙ การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย



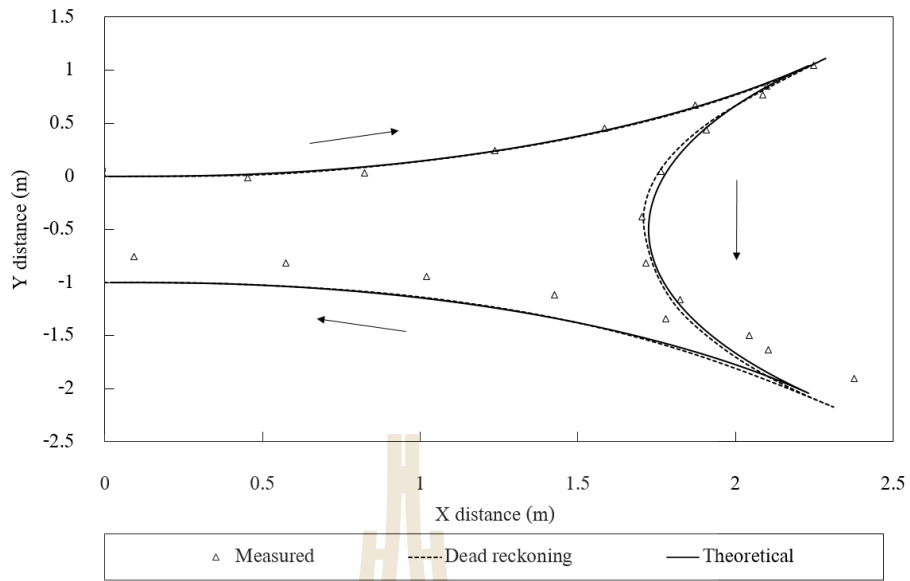
รูปที่ ๙.๑๐ การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางซ้าย



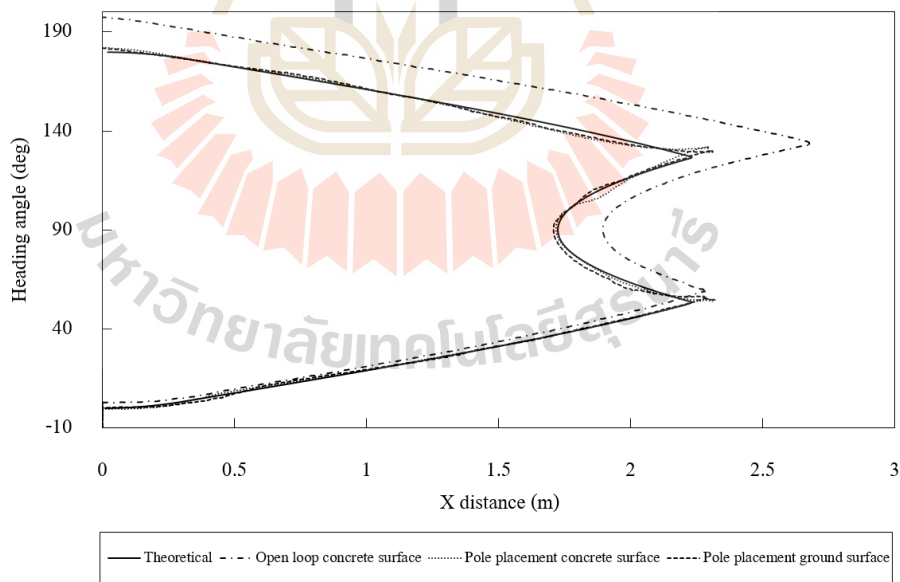
รูปที่ ๑.๑๑ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด



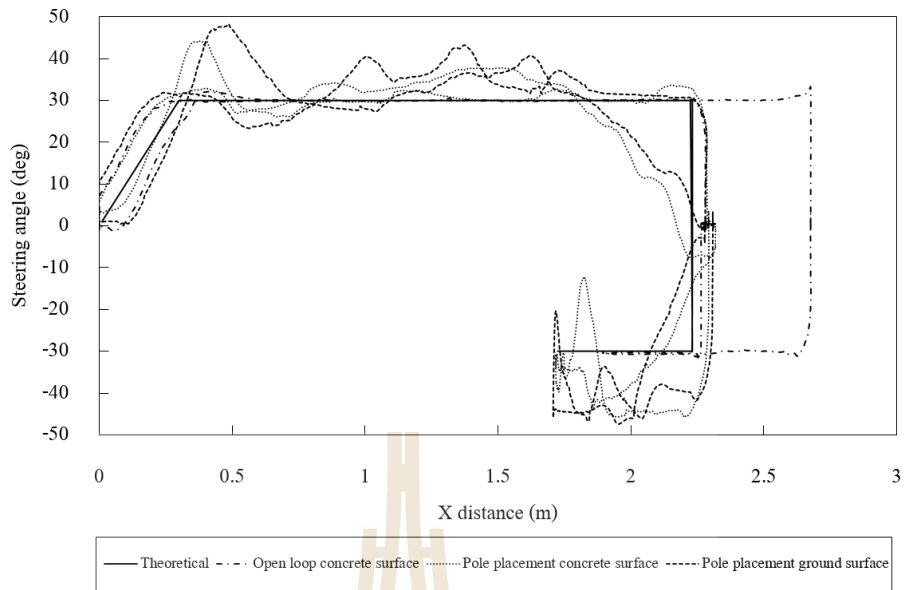
รูปที่ ๑.๑๒ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องถัดไป ($D = -1$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



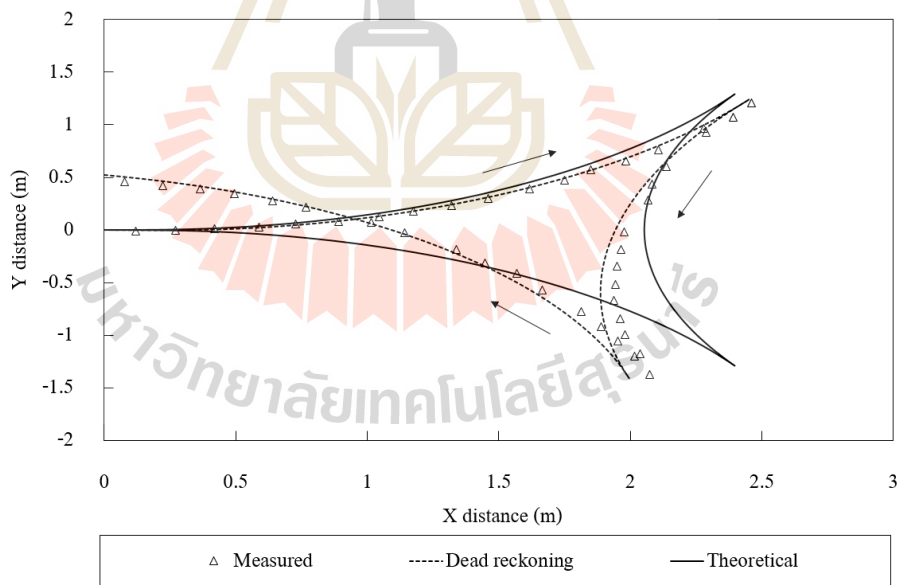
รูปที่ ๑.13 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องถัดไป (D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



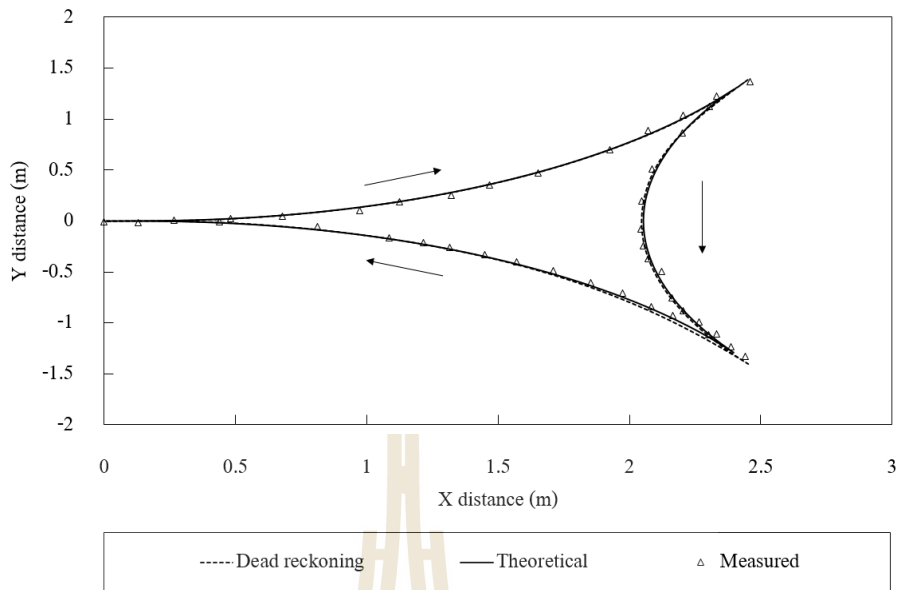
รูปที่ ๑.14 การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา



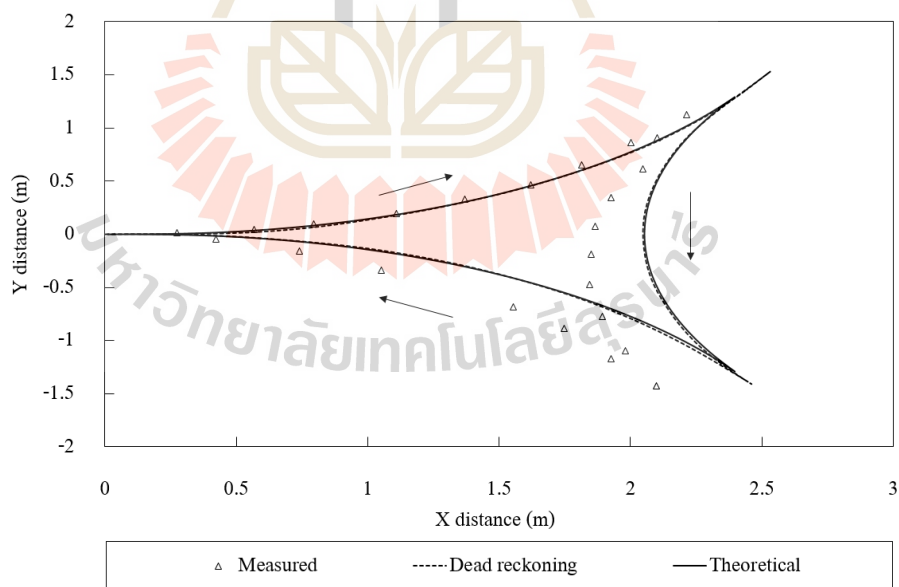
รูปที่ ๑.15 การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าง่อง ถัดไป(D = -1 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปร่องทางขวา



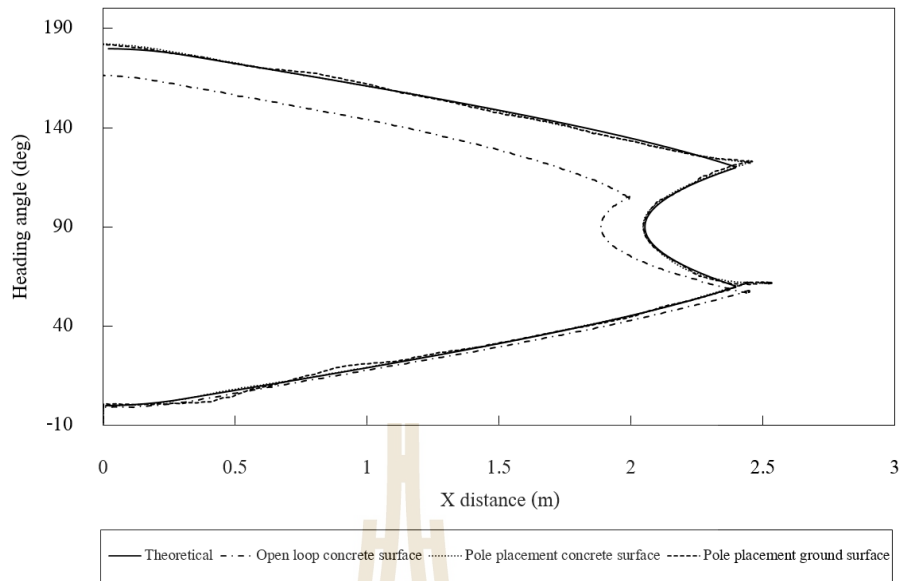
รูปที่ ๑.16 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าง่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด



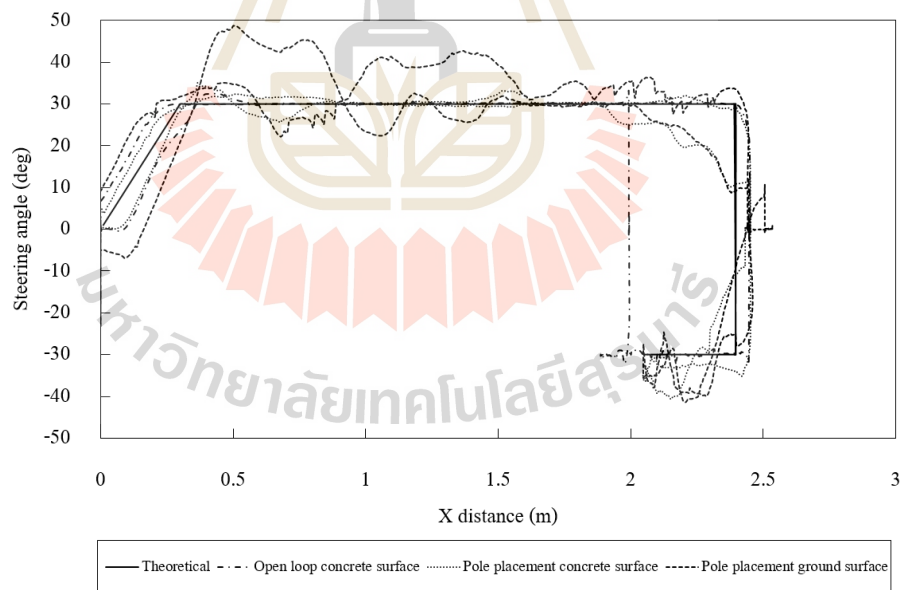
รูปที่ ๑๗.17 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



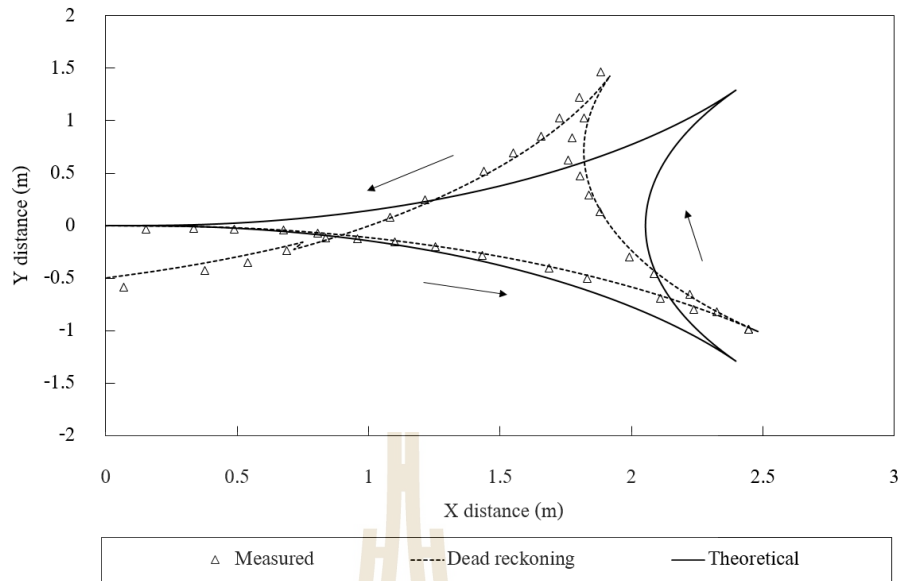
รูปที่ ๑๗.๑๘ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงเข้าร่องเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้ายบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



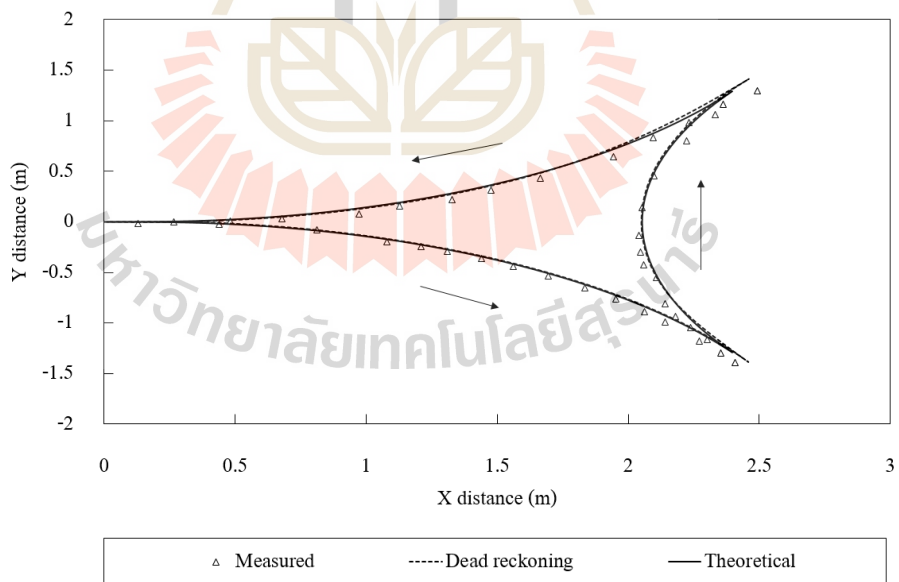
รูปที่ ๑๙.๑๙ การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัว
แปลงข้าวร่องเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



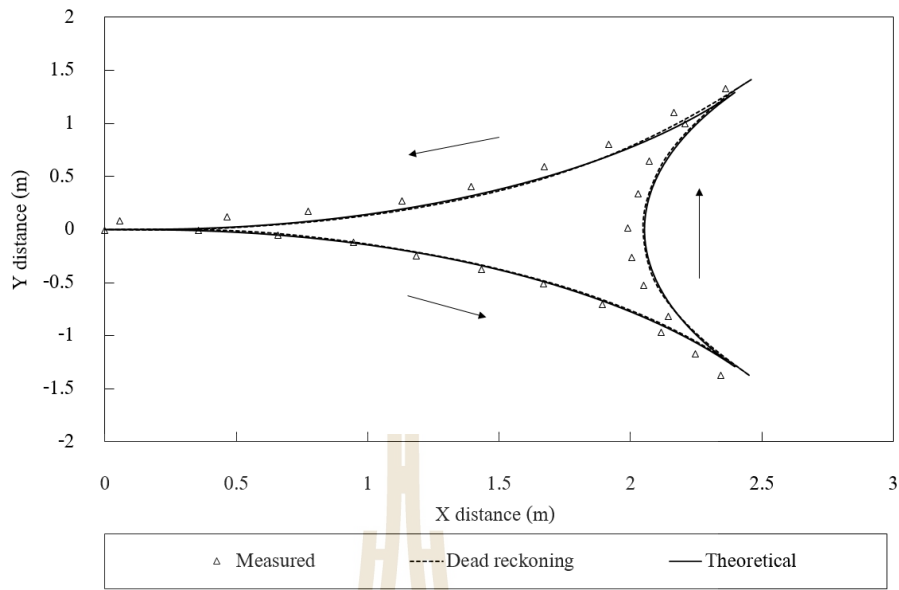
รูปที่ ๑๙.๒๐ การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลง
ข้าวร่องเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางซ้าย



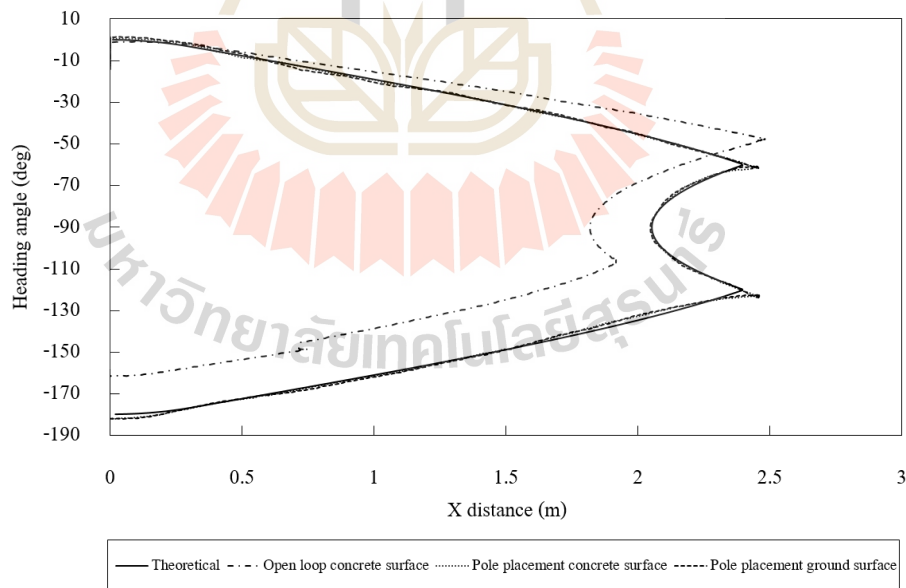
รูปที่ ๓.21 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวรวงเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงเปิด



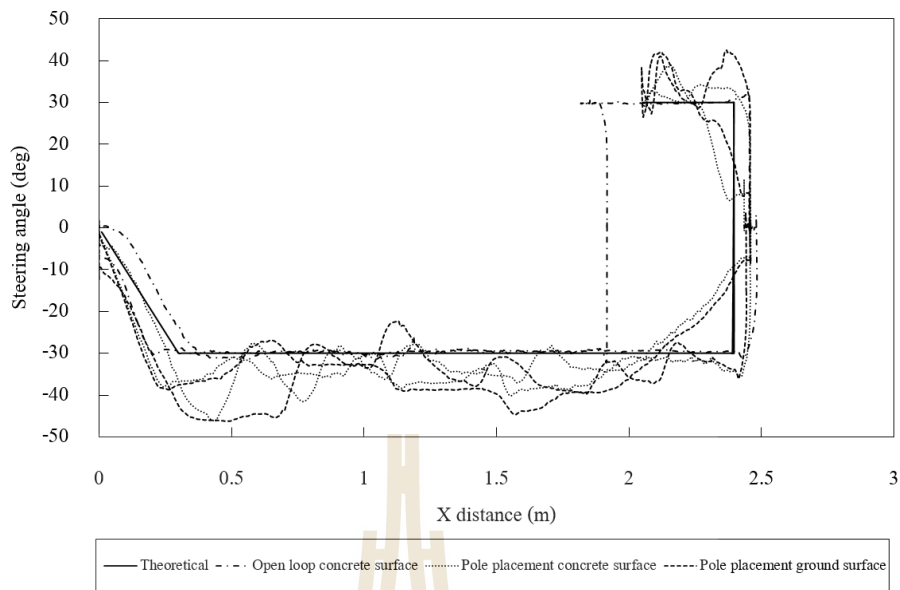
รูปที่ ๓.22 การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวรวงเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นปูนด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



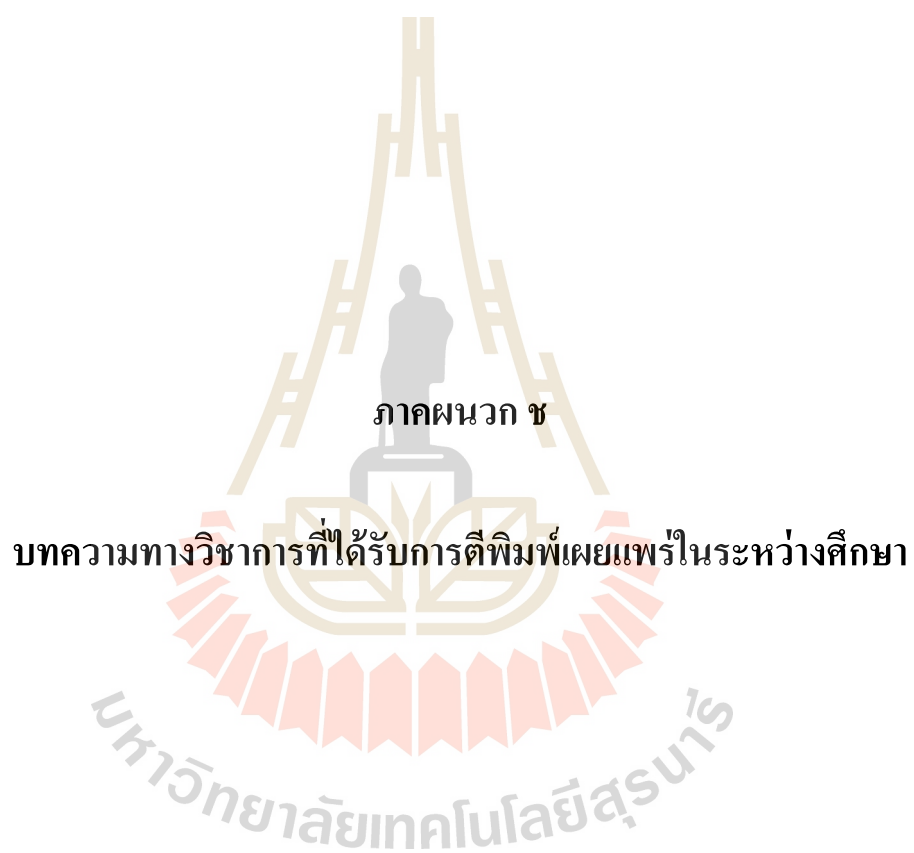
รูปที่ ๒.๒๓ การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องเดิม (D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวาบนพื้นดินด้วยตัวควบคุมแบบวงปิด



รูปที่ ๒.๒๔ การเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลงข้าวร่องเดิม(D = 0 m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



รูปที่ ๓.๒๕ การเปรียบเทียบมุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์เกษตรบนเส้นทางกลับเลี้ยวหัวแปลง
เข้าร่องเดิม ($D = 0$ m) กรณีรถแทรกเตอร์เกษตรหักเลี้ยวไปทางขวา



ภาคผนวก ช

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, คชา วาทกิจ, และจรรยาศักดิ์ สมพงษ์. (2559). การจำลองระบบ ออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยวกลับรถที่หัวแปลง. การประชุม วิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 17. วันที่ 8-10 กันยายน 2559. กรุงเทพฯ.

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, กวี คงมั่น และขงยุทธ เลียงคัง. (2559). การออกแบบเส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชัน โพลีโนเมียล. รายงานการประชุม วิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น.

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, กวี คงมั่น และขงยุทธ เลียงคัง. (2559). การออกแบบเส้นทาง การเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติด้วยฟังก์ชัน โพลีโนเมียล. วารสารวิศวกรรมฟาร์ม และเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ. หน้า 131-138

รายชื่อบทความที่เข้าร่วมวิจัยในระหว่างศึกษา

ฉัตริน เรืองจอหอ, ธีรวัฒน์ เจเถื่อน, กมลชนน วงศ์สถาน, และพยุงศักดิ์ จุลยุเสณ. (2561). การ ออกแบบชุดบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์ขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์ม และเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5 (หน้า 159-163). ขอนแก่น:กลุ่มวิจัยวิศวกรรม ฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ขงยุทธ เลียงคัง พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ และธีรวัฒน์ เจเถื่อน. (2559). เส้นทางที่เหมาะสมของแขนกล กรีดขางพารา. รายงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุม อัตโนมัติ ระดับชาติครั้งที่ 3. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2559. ขอนแก่น.

ประวัติผู้เขียน

นายธีรวัฒน์ เจเดือน เกิดเมื่อวันอังคาร ที่ 3 กันยายน 2534 ที่จังหวัดนครปฐม เริ่มเข้าศึกษา ระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 โรงเรียนประถมฐานบินกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ระดับมัธยมศึกษา ชั้นปีที่ 1-6 โรงเรียนมัธยมฐานบินกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรม เกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ การศึกษาเมื่อปีการศึกษา 2556 ภายหลังสำเร็จการศึกษาเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทที่สาขาเดิม โดยได้เข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างการศึกษาได้ปฏิบัติในตำแหน่ง ผู้ช่วยวิจัยด้านวิศวกรรมเกษตร โดยมีผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พยุงศักดิ์ จุลยุเสนา เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย และได้เป็นผู้ช่วยสอน ปฏิบัติการรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและอาหาร 1 และรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเกษตรและ อาหาร 2



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี