



ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับสำหรับการติดตามเส้นด้วยตัวควบคุมแบบ
PID-FUZZY Self-Tuning

MOVEMENT CONTROL OF UNMANNED AUTONOMOUS TRACTOR FOR PATH TRACKING
USING PID-FUZZY SELF-TUNING CONTROLLER

วิชา อุปถัมภ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2561

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับสำหรับการติดตามเส้นด้วยตัว
ควบคุมแบบ PID-FUZZY Self-Tuning



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

MOVEMENT CONTROL OF UNMANNED AUTONOMOUS TRACTOR FOR PATH
TRACKING USING PID-FUZZY SELF-TUNING CONTROLLER



A Dissertation Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for DOCTOR OF PHILOSOPHY (Mechanical Engineering)
Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
2018

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาานิพนธ์
เรื่อง
ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับสำหรับการติดตามเส้นด้วยตัวควบคุมแบบ
PID-FUZZY Self-Tuning
ของ
วิชา อุปกัย

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ แสง
ประดิษฐ์)

..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมมาส แก้วล้วน)

ชื่อเรื่อง	ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับสำหรับการติดตามเส้นด้วยตัวควบคุมแบบ PID-FUZZY Self-Tuning
ผู้วิจัย	วิชา อุภักย์
ปริญญา	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประชา บุญยวานิชกุล

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบระบบเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับด้วยตัวควบคุมพีไอดี-ฟัซซีแบบปรับตัวได้ (PID-FUZZY Self-Tuning) เพื่อควบคุมให้รถไถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด โดยทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถด้วยโมเดลทางพลศาสตร์ (Dynamic model) ที่มีลักษณะการบังคับเลี้ยวแบบสแตเดียริง (Steering) และขับเคลื่อนสองล้อหลังด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการทำงานจริงจากนั้นจึงทำการสร้างรถไถจริงเพื่อทดสอบการติดตามเส้นด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยในการทดสอบการติดตามเส้นของรถไถนั้นจะแบ่งเส้นทางออกเป็น 3 แบบ คือ 1. การติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง 2. การติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง 3. การติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งจากผลการทดลอง พบว่า ตัวควบคุมพีไอดี-ฟัซซีแบบปรับตัวได้มีความสามารถที่จะควบคุมให้รถไถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดทั้งสามแบบได้ โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดในส่วนของการจำลองการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้งโดยมีค่าความผิดพลาดทางด้านระยะทางในแนวแกน X,Y สูงสุดอยู่ที่ 4.19 เมตรที่เวลา 42.9 วินาที และ -3.72 เมตร ที่เวลา 67.3 วินาทีตามลำดับ และ ในส่วนของการติดตามเส้นในส่วนของรถไถจริงมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดในส่วนของการควบคุมมุมหันเหของรถไถ (Heading Error) คือการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ระหว่าง -28 ถึง 23 องศา และ ค่าความผิดพลาดมากที่สุดในส่วนของระยะทางของรถไถ (Distance Error) คือการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้งซึ่งมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 7.8 เมตร

คำสำคัญ : รถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ, แบบจำลองทางพลศาสตร์, ตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี, ตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี – ฟัซซี, เส้นทางการเคลื่อนที่

Title	MOVEMENT CONTROL OF UNMANNED AUTONOMOUS TRACTOR FOR PATH TRACKING USING PID-FUZZY SELF-TUNING CONTROLLER
Author	WITCHA UPAPHAI
Degree	DOCTOR OF PHILOSOPHY
Academic Year	2018
Thesis Advisor	Assistant Professor Pracha Bunyawanichakul , Ph.D.

This study presented the design of a movement control system for an unmanned autonomous tractor using PID-FUZZY Self-Tuning to control the tractor on a prescribed path. At first, the simulation of tractor movement using a dynamic model of front-wheel steering and rear-wheel driving was created via the MATLAB-Simulink Program to test the possibility of real-time action. Then, an actual autonomous tractor using the dynamic model was constructed to test its tracking along a prescribed path. The testing was conducted using the LabVIEW program. With regard to the path tracking experiment with the tractor, three different types of tracking paths were tested: strange line, curve line and N-shaped paths. The results of the experiment revealed that the PID-FUZZY Self-Tuning was able to control the tractor on all three types of paths. The most errors appeared during the curve line movement simulation, with a maximum distance error on the X and Y coordinates was 4.19 meters at 42.9 seconds, and -3.72 meters at 67.3 seconds, respectively. With respect to the tracking of the actual tractor, the most errors occurred in the heading control of the tractor (an angle of refraction control). The heading errors appeared at the connection of the strange and curve line movement with an error value between -28 to 23 degrees. In terms of distance, the most frequent distance errors occurred in the curve line movement, with an error value of 7.8 meters.

Keyword : Autonomous tractor, Dynamic model, PID Controller, Self-tuning fuzzy logic controller, Trajectory

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญวานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง อาจารย์ที่ปรึกษาการทำปริญญานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำปริญญานิพนธ์เรื่องนี้ สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยความกรุณาในการให้ความรู้ คำแนะนำและแนวทางวิธีแก้ปัญหาตลอดจน การดำเนินการวิจัยตั้งแต่ต้นจนสำเร็จ

ขอขอบคุณคณาจารย์จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี ที่อนุเคราะห์ รถไถ และ วัสดุอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนสถานที่ทำงานวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำ ปริญญานิพนธ์เป็นอย่างมาก

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอนและให้กำลังใจตลอดจนสนับสนุน การศึกษา รวมไปถึงญาติพี่น้อง เพื่อนๆที่ ให้กำลังใจ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และให้ความ ร่วมมือเป็นอย่างดีในการทำวิจัยนี้

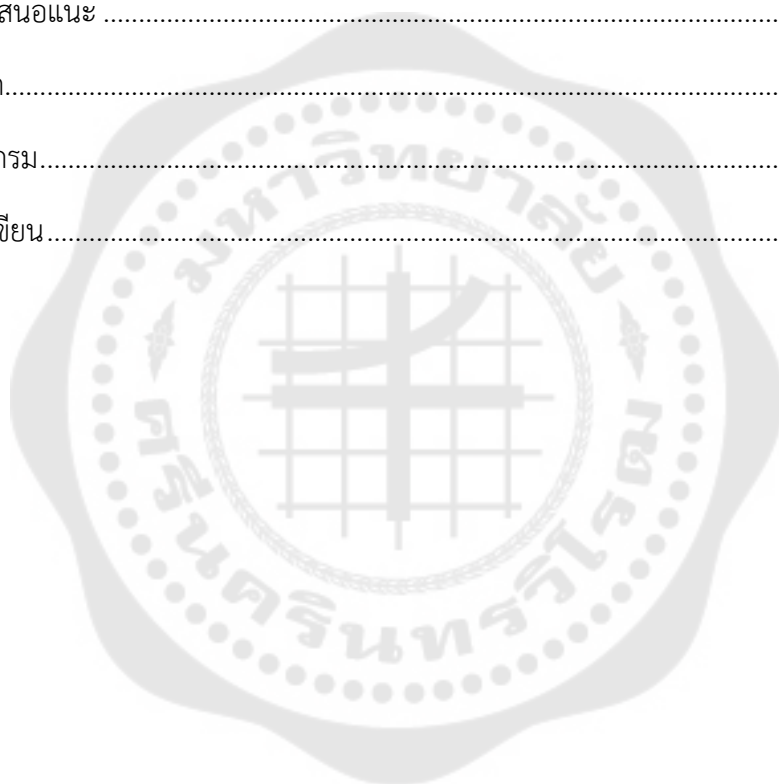
วิชา อุปลักษณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	2
ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	7
1. การสร้างแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ (Trajectory Planning) (A. D. Luca, 2015).....	7
1.1 แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง	8
1.2 แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง (A. D. Luca, 2015).....	9
2. การออกแบบระบบควบคุมรถไถ (Controller System) (สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, 2555).....	10
3. ตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดีแบบปรับตัวได้ (PID - Fuzzy Self Tuning) (Xu, Kan, Chen, & Yan, August, 2014)	11
3.1 การทำฟัซซี (Fuzzication) ("ฟัซซีลอจิก Fuzzy Logic," 2015).....	13
3.2 การวินิจฉัย (Fuzzy Inference system) หรือ FIS.....	14

3.3	ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) (Kraisak Phothongkum, 2016).....	15
4.	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถไถ.....	15
4.1	แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถไถ (Kinematics Model).....	16
บทที่ 3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	24
1.	การออกแบบตัวควบคุม.....	24
2.	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ (Simulation).....	24
2.1	การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ (Dynamic Model).....	24
2.2	การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดี (Fuzzy-PID Self Tuning).....	26
2.3	การควบคุมการทำงานของรถไถ.....	31
2.4	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ (Trajectory).....	32
3.	โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของรถไถสำหรับการทำงานจริง.....	35
3.1.	อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.2	ส่วนของตัวรถไถ (Tractor).....	42
3.3	ส่วนของระบบควบคุม (The Controller).....	45
บทที่ 4	ผลและการวิเคราะห์.....	51
1.	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถไถในส่วนของการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อทดสอบความ เป็นไปได้ในการใช้งานจริง.....	51
1.1	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง....	52
1.2	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง.....	53
1.3	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้น โค้ง.....	54
2.	ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถไถในส่วนของการติดตามเส้นในส่วนจริง.....	56
2.1	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง.....	56
2.2	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง.....	58

2.3 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้น โค้ง.....	61
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	64
1. สรุปผลการวิจัย.....	64
1.1 ผลการทดลองในส่วนของ การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ (Simulation).....	64
1.2 ผลการทดลองในส่วนของ การควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับในส่วนของรถไถจริง..	64
2. ข้อเสนอแนะ	65
ภาคผนวก.....	66
บรรณานุกรม.....	72
ประวัติผู้เขียน	75



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ค่าตัวแปรต่างๆ ของรถไถ	24
ตาราง 2 ตารางกฎของฟิชชี	30



สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 รถไฮโดรอลิก DEDALO (Martin et al., 2010).....	3
ภาพประกอบ 2 รถไฮและเทลเลอร์แบบไร้คนขับโดยตัวควบคุมแบบ Nonlinear PI.....	4
ภาพประกอบ 3 รถไฮแบบไร้คนขับโดยตัวควบคุมการเลี้ยวแบบ CDGPS (O'Connor et al., 2000)..	4
ภาพประกอบ 4 แบบจำลองรถไฮที่ใช้ในการทดลองโดยมีเงื่อนไขการลื่นไถลของล้อ	5
ภาพประกอบ 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์ (Lo et al., 2014)	6
ภาพประกอบ 6 การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในพิกัด XYZ	7
ภาพประกอบ 7 การเคลื่อนที่ในในฟังก์ชันของเวลา ($\sigma(t)$).....	8
ภาพประกอบ 8 เส้นโค้งที่เกิดจากการเชื่อมต่อโดยเส้นตรง	9
ภาพประกอบ 9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, 2555)	11
ภาพประกอบ 10 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของการขับเคลื่อน (สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, 2555). 11	
ภาพประกอบ 11 ไดอะแกรมการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติด้วย	12
ภาพประกอบ 12 ควบคุมค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติด้วยฟัซซี	13
ภาพประกอบ 13 การทำฟัซซีฟิเคชันแปลงอินพุตเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก	13
ภาพประกอบ 14 ฟัซซีเซทของสัญญาณเอาท์พุต ("ฟัซซีลอจิก Fuzzy Logic," 2015)	14
ภาพประกอบ 15 กฎความสัมพันธ์ของฟัซซี ("Fuzzy Logic," 2014).....	15
ภาพประกอบ 16 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฮที่เปรียบเสมือนเป็นรถจักรยาน.....	16
ภาพประกอบ 17 ไดอะแกรมแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฮ	18
ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมของสมการสมการพลศาสตร์ของรถไฮโดย MATLAB/Simulink.....	26
ภาพประกอบ 19 ไดอะแกรมการทำงานของตัวควบคุมแบบ ฟัซซี-พีไอดี ในส่วน.....	27
ภาพประกอบ 20 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ ส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Heading)	28
ภาพประกอบ 21 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ ส่วนควบคุมระยะการขับเคลื่อน (Distance) 28	

ภาพประกอบ 22	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของ ส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Heading)....	29
ภาพประกอบ 23	ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Distance).....	29
ภาพประกอบ 24	การสร้างเงื่อนไขของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ในรูปแบบ “If, And, Then”	31
ภาพประกอบ 25	ไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของรถไถ.....	32
ภาพประกอบ 26	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ	33
ภาพประกอบ 27	ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง	33
ภาพประกอบ 28	ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง	34
ภาพประกอบ 29	รถไถที่ใช้ในการทำงานจริง	35
ภาพประกอบ 30	แผนผังส่วนประกอบละการทำงานจของรถไถ	36
ภาพประกอบ 31	มอเตอร์ไฮดรอลิก (DONGGUAN BLINCE MACHINERY AND ELECTRONICS CO., 2015).....	36
ภาพประกอบ 32	วาล์วแบบสัดส่วน	37
ภาพประกอบ 33	ปั๊มไฮดรอลิก	38
ภาพประกอบ 34	วาล์วสลับทิศทางการไหล	38
ภาพประกอบ 35	การ์ดควบคุมการทำงานของวาล์วสัดส่วน.....	39
ภาพประกอบ 36	เกียร์ทด	40
ภาพประกอบ 37	เซ็นเซอร์โอเอ็มยู (CHRobotics, 2015).....	40
ภาพประกอบ 38	ตัวระบุตำแหน่งของรถไถ	41
ภาพประกอบ 39	การ์ด DAQ (National Instruments, 2015).....	41
ภาพประกอบ 40	เอซี เซอร์โว มอเตอร์ (Panasonic, 2009).....	42
ภาพประกอบ 41	เสารับ-ส่งสัญญาณ เป็นของบริษัท Bullet รุ่น Bullet M2	42
ภาพประกอบ 42	การรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์หลัก และ คอมพิวเตอร์เป้าหมาย	43
ภาพประกอบ 43	ระบบบังคับเลี้ยวของรถไถอัตโนมัติ.....	44
ภาพประกอบ 44	ระบบขับเคลื่อนของรถไถอัตโนมัติ	45

ภาพประกอบ 45	หน้าจอควบคุมและแสดงการทำงานของรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ.....	45
ภาพประกอบ 46	ไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของรถไถ	46
ภาพประกอบ 47	การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงด้วยโปรแกรม LabVIEW.....	46
ภาพประกอบ 48	การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง.....	47
ภาพประกอบ 49	การแปลงค่าสตริงจาก จีพีเอส ให้อยู่ในรูปแบบของตำแหน่ง Latitude และ Longitude	47
ภาพประกอบ 50	การแปลงค่าสตริงของโอเอเอ็มยูให้อยู่ในรูปแบบของมุม YAW ของรถไถ	48
ภาพประกอบ 51	การประเมินค่าความผิดพลาดที่เกิดระหว่างรถไถกับเส้นทางการเคลื่อนที่	49
ภาพประกอบ 52	ตัวควบคุมพีซี-พีไอที ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LabView.....	49
ภาพประกอบ 53	แบบจำลองโมเดลจลนศาสตร์และตัวควบคุมของรถไถด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink.....	51
ภาพประกอบ 54	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง.	52
ภาพประกอบ 55	ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถเป็นเส้นตรงในแนวแกน X และ Y	52
ภาพประกอบ 56	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง .	53
ภาพประกอบ 57	ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถเป็นเส้นโค้งในแนวแกน X และ Y.....	54
ภาพประกอบ 58	ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง.....	55
ภาพประกอบ 59	ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งตัวเอ็น (N) ในแนวแกน X และ Y	55
ภาพประกอบ 60	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรง	56
ภาพประกอบ 61	ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นตรง	57
ภาพประกอบ 62	ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไถขณะติดตามเส้นตรง.....	57
ภาพประกอบ 63	ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถในขณะที่ติดตามเส้นตรง (Distance Error).....	58
ภาพประกอบ 64	เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นโค้ง	59

ภาพประกอบ 65 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นโค้ง.....	59
ภาพประกอบ 66 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไถขณะติดตามเส้นโค้ง	60
ภาพประกอบ 67 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถในขณะที่ติดตามเส้นโค้ง (Distance Error).....	60
ภาพประกอบ 68 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง (N).....	61
ภาพประกอบ 69 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง(N).....	62
ภาพประกอบ 70 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไถขณะติดตามเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง (N) (Heading Error).....	62
ภาพประกอบ 71 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถในขณะที่ติดตามเส้นตรงต่อกับ เส้นโค้ง (N) (Distance Error).....	63



บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยตั้งอยู่ในพื้นที่ที่อุดมสมบูรณ์และมีภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน ทำให้ประเทศไทยมีความเหมาะสมด้วยภูมิประเทศที่ค่อนข้างแบนราบเป็นส่วนใหญ่ และมีแหล่งน้ำมากมายจึงทำให้ประเทศไทยนั้นเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรรมเช่นการทำนา ("ความรู้รอบตัวเกี่ยวกับประเทศไทย," 2558) จนได้รับการขนานนามว่า "อู่ข้าวอู่น้ำ" ตั้งแต่อาณาจักรสุโขทัยสืบเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน โดยการทำเกษตรในสมัยก่อนนั้นจะใช้แรงงานของคนและสัตว์เป็นส่วนใหญ่ และมีข้อจำกัดด้านผลผลิต แต่ในปัจจุบันประเทศไทยมีความเจริญไปมาก และก้าวเข้าสู่สังคมโลกอย่างรวดเร็วจึงทำให้มีความต้องการผลผลิตเพิ่มขึ้น ทำให้เกษตรกรต้องอาศัยเทคโนโลยีในยุคใหม่ โดยมีการนำเครื่องจักรกลการเกษตร และสารเคมีต่างๆ มาใช้งาน เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพและปริมาณเพียงพอต่อความต้องการของสังคมโลก แต่ก็ทำให้มีผลกระทบด้านอื่นเกิดขึ้นมา เช่น ผู้ควบคุมเครื่องจักรกลการเกษตร นั้นมีความเสี่ยงที่จะได้รับอันตรายจากการสัมผัสสารเคมี หรือการใช้เครื่องจักร ทำให้เกิดปัญหาด้านสุขภาพกับตัวเกษตรกรเอง เช่น ปัญหาโรคน้ำกัดเท้า โรคฉี่หนู โรคแบคทีเรียกินเนื้อ (เนคโครไทซิง แฟลชีเอติส) โรคเมลิออยโดสิส โดยในแต่ละปีคนไทยเสียชีวิตด้วย "โรคเมลิออยด์" ไม่ต่ำกว่า 1,000 คน โดยโรคนี้นับสาเหตุของการตายจากการติดเชื้ออันดับ 3 (รองจากโรคเอดส์และวัณโรค) ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยให้ผู้จัดการเกิดแนวคิดที่จะหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวต่อไป (ณรงค์ สหเมธาพัฒน์, 2558)

ในการทำเกษตรสมัยใหม่นั้น รถไถหรือรถ (แทรกเตอร์) เข้ามามีบทบาทในการทำเกษตรเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุที่ว่ารถไถหนึ่งคันนั้นสามารถนำมาใช้ในการทำเกษตรกรรมได้มากมาย เช่น การเตรียมดิน การให้ปุ๋ยหรือยา การเก็บเกี่ยว การขนส่งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร จะเห็นได้ว่าประโยชน์ของรถไถนั้นมีค่อนข้างมาก เนื่องจากทำงานได้เร็ว ได้ผลผลิตมากกว่า ดังนั้นรถไถหรือรถ (แทรกเตอร์) จึงนับได้ว่าเป็นมีความสำคัญต่ออาชีพเกษตรกรรมอย่างมาก (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, 2555)

ด้วยเหตุนี้ ทางผู้จัดทำได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของรถไถ โดยการควบคุมรถไถอัตโนมัติ แบบไร้คนขับ โดยมีการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี-พีซีซี สำหรับการติดตามเส้น เพื่อเป็นส่วนช่วยในการ ตัดขั้นตอนในการสัมผัส เครื่องจักรกล สารเคมีและสิ่งสกปรก ซึ่งทำให้เกิดโรคที่เกิดจากการทำการเกษตรแบบดั้งเดิม และเป็นการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมามีส่วนร่วมในการพัฒนาการเกษตรให้มีศักยภาพที่ดียิ่งขึ้นไป

วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบ และสร้างต้นแบบ รถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติในการติดตามเส้น พร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทาง และระบบขับเคลื่อน
2. ออกแบบระบบอัลกอริทึม และ พร้อมสร้างแบบจำลองในขับเคลื่อนของรถไถ
3. ออกแบบและสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมการติดตามเส้นของรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ
4. ทดลองประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบ พีไอดี-ฟัซซี (PID-FUZZY Self-tuning) ในการควบคุมการติดตามเส้นของรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับ

ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบและสร้างรถไถที่ใช้ทำงานวิจัยโดยตัวรถไถมีระบบขับเคลื่อนล้อหลังด้วยวงจรไฮดรอลิก และ มีการบังคับเลี้ยวของล้อหน้าแบบ Steering
2. ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี-ฟัซซี (PID-FUZZY Self-tuning) ในการควบคุมการขับเคลื่อนของรถไถ
3. ใช้โปรแกรมแมทแลบในส่วนของการทำแบบจำลอง
4. ในการทดลองการติดตามเส้นของรถไถจะทำการทดลองเส้นทางการเคลื่อน ทั้งหมดสามลักษณะคือ เส้นตรง, เส้นโค้ง และเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบ รถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับที่ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี-ฟัซซี (PID-FUZZY Self-tuning) สำหรับการติดตามเส้น
2. ได้ระบบอัลกอริทึม และระบบซอฟต์แวร์ ของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับด้วยตัวควบคุมแบบ พีไอดี-ฟัซซี (PID-FUZZY Self-tuning) สำหรับการติดตามเส้น
3. ลดปัญหาและความเสี่ยงเกี่ยวกับโรคที่เกิดขึ้นจากการได้รับอันตรายจากการสัมผัสสารเคมี หรือการใช้เครื่องจักร
4. เป็นฐานงานวิจัยสำหรับนำไปขยายผล และพัฒนา ประสิทธิภาพในการทำงานของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับสำหรับการติดตามเส้นได้

การทบทวนวรรณกรรมและสารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

ในการควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับด้วย พีไอดี-พีซีซี สำหรับการติดตามเส้น ต้องมีองค์ประกอบต่างๆ ที่นำมารวมกันเพื่อให้ได้ตามจุดมุ่งหมาย โดยเริ่มจากการหาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อที่จะได้รับรู้ทฤษฎีการทำงานของรถไถ เช่น การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับรถไถ การออกแบบระบบควบคุมรถไถและการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของรถไถ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับด้วย พีไอดี-พีซีซี สำหรับการติดตามเส้น ดังนี้ D. Martín และคณะ (Martín, Guinea, García-Alegre, Villanueva, & Guinea, 2010) ทำการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับรถไถไร้คนขับ ในการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วย Fuzzy Logic Toolbox ของโปรแกรม MATLAB โดยจะใช้ตัวควบคุมฟัซซีในการควบคุมมุมเลี้ยวล้อด้านหน้าของตัวรถ มีการตรวจจับตำแหน่งของสิ่งกีดขวางด้วยเซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ และบอกตำแหน่งของรถไถด้วยเซ็นเซอร์จีพีเอส ควบคุมการทำงานของรถไถด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 1 รถไถไฮดรอลิก DEDALO (Martín et al., 2010)

Van T. Huynh และคณะ (Huynh, Smith, Kwok, & Katupitiya, 2012) ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบ Nonlinear PI สำหรับควบคุมรถไถและแทรคเตอร์แบบไร้คนขับเพื่อหาประสิทธิภาพความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของรถไถด้วยเซ็นเซอร์จีพีเอสและ ควบคุมการทำงานของรถไถด้วยคอมพิวเตอร์



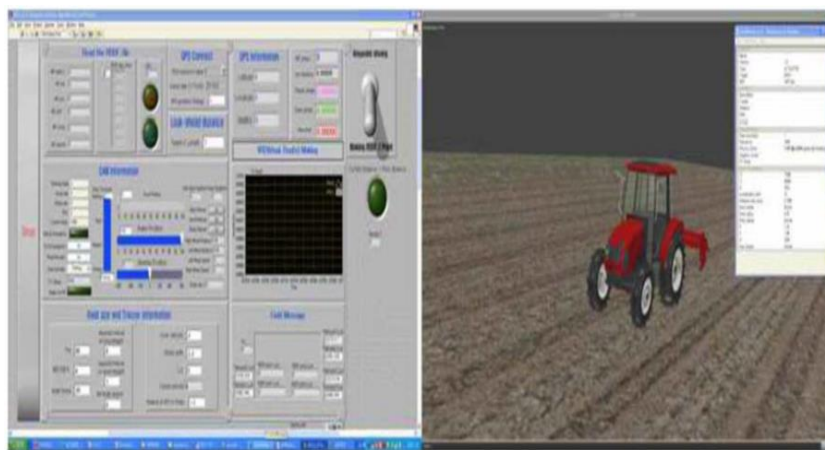
ภาพประกอบ 2 รถไถและเทลเลอร์แบบไร้คนขับโดยตัวควบคุมแบบ Nonlinear PI
(Huynh et al., 2012)

Dr. Bradford Parkinson และคณะ (O'Connor, Bell, Elkaim, & Parkinson, 2000) ได้ทำการออกแบบรถไถโดยใช้เซ็นเซอร์จีพีเอส ในการควบคุมตำแหน่งของรถไถและในส่วนของการทำงานแบบจำลองใช้ควบคุมการเลี้ยวแบบ CDGPS



ภาพประกอบ 3 รถไถแบบไร้คนขับโดยตัวควบคุมการเลี้ยวแบบ CDGPS (O'Connor et al., 2000)

Hee-Chang-Moon และคณะ (Kim et al., 2013) ได้สร้างแบบจำลองรถไถโดยประกอบด้วย การสร้างสมการ คิเนเมติกส์ และ ไดนามิกส์ ที่มีเงื่อนไข การสิ้นเปลืองของล้อในขณะที่รถเคลื่อนที่ โดยการทดลองจะสร้างสมการเส้นทางเป็นทางโค้งและทางตรงสลับกันเพื่อให้แบบจำลองของรถไถทำการติดตามเส้นดังกล่าว



ภาพประกอบ 4 แบบจำลองรถไถที่ใช้ในการทดลองโดยมีเงื่อนไขการสิ้นเปลืองของล้อ
(Kim et al., 2013)

Chi-Wen Lo และคณะ (Lo, Wu, Lin, & Liu, 2014) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีลอจิก ทำงานร่วมกับ Q-learning Algorithm โดยตัวมันจะทำหน้าที่เลือกใช้กฎการควบคุมของฟัซซีที่เหมาะสม สำหรับควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่สำรวจภายในบ้านแบบอัตโนมัติ โดยที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้เองแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้เซ็นเซอร์เลเซอร์สแกนเนอร์ติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์เพื่อใช้สำหรับตรวจจับสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่



ภาพประกอบ 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์ (Lo et al., 2014)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเป็นการออกแบบรถเคลื่อนที่อัตโนมัติในลักษณะต่างๆกัน เช่น การออกแบบระบบควบคุมรถไถหรือหุ่นยนต์สำรวจในร่ม ด้วยตัวควบคุม พีซี ลอจิก การออกแบบระบบบังคับเลี้ยวของรถไถด้วยการใช้จีพีเอส การสร้างแบบจำลองและเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ จาก การค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้เห็นว่าควรมีการนำข้อดีมารวมเข้าด้วยกันในการทำงานวิจัยเช่น การ วิธีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ หรือการใช้ จีพีเอส เพื่อบอกตำแหน่งค่าคลาดเคลื่อนของรถไถ และเพิ่ม ตัว ควบคุม พีไอดี-พีซี เข้ามาช่วยในการควบคุมตำแหน่งของรถไถสำหรับงานวิจัยนี้

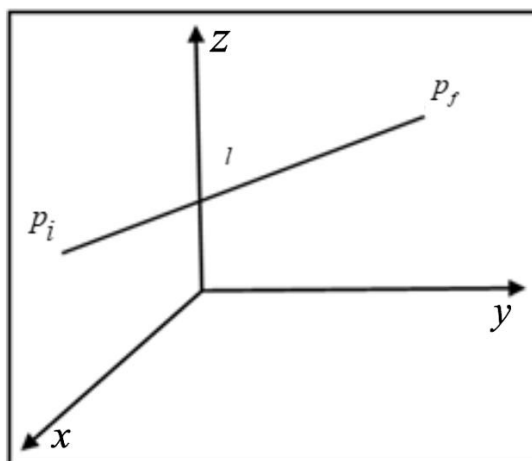
บทที่ 2

ทฤษฎี

ในการที่จะสร้างรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยปราศจากคนขับ จำเป็นต้องทำการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ (simulation tractor) เพื่อเป็นการทดสอบความเป็นไปได้ในการสร้างรถไถจริง โดยในการสร้างแบบจำลองของรถไถต้องมีองค์ประกอบต่างๆ ที่จะทำให้รถไถเคลื่อนที่ได้อย่างสมบูรณ์ เช่น การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ การออกแบบระบบควบคุมรถไถ ตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถไถ และเมื่อมีองค์ประกอบต่างๆ ของรถไถครบถ้วนแล้ว จึงนำองค์ประกอบนั้นมารวมกันเพื่อให้เกิดเป็นรถไถที่สามารถขับเคลื่อนได้อย่างอัตโนมัติโดยปราศจากคนขับ

1. การสร้างแนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ (Trajectory Planning) (A. D. Luca, 2015)

การที่จะทำให้รถไถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการนั้นจะทำการสร้างสมการเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับรถไถ โดยมีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่ แนวเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ 1. แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและ 2. แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง



ภาพประกอบ 6 การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในพิกัด XYZ

1.1 แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

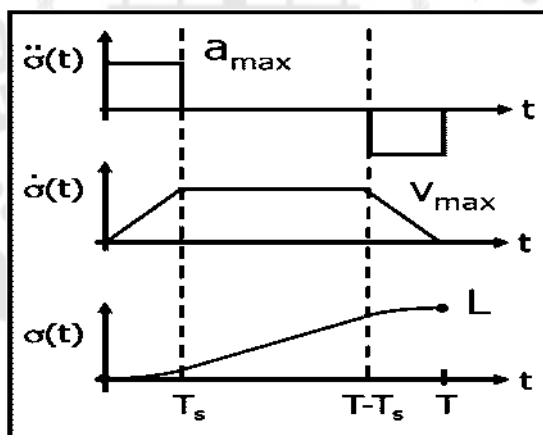
คือการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในพิกัด XYZ โดยมีการกำหนดให้รถไถเริ่มต้นเคลื่อนที่จากจุด p_i ไปยังจุด p_f โดยที่สมการของเส้นตรงสามารถเขียนได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$p_s = p_i + s(p_f - p_i) \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 นั้นจะเห็นได้ว่ามีพารามิเตอร์ s ซึ่งเป็นอัตราส่วนของตำแหน่งกับระยะทางที่รถไถเคลื่อนที่ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$s = \frac{\sigma}{L} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 σ ทำหน้าที่เปรียบเสมือนการเคลื่อนที่ในฟังก์ชันของเวลาดังแสดงในภาพประกอบ 7 โดยจะมีรูปแบบของสมการตามช่วงของเวลาดังแสดงในสมการที่ 2.3



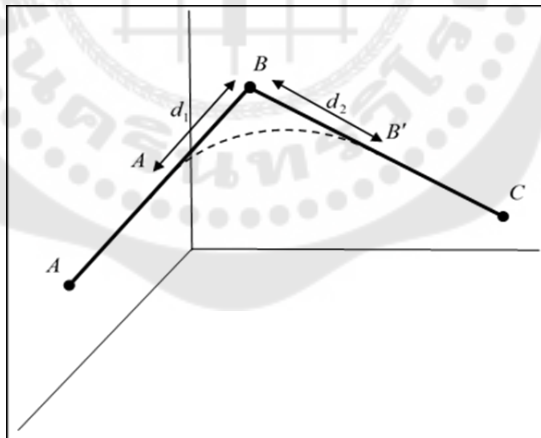
ภาพประกอบ 7 การเคลื่อนที่ในฟังก์ชันของเวลา ($\sigma(t)$)

$$\sigma(t) = \begin{cases} a_{\max} \frac{t^2}{2} & ; t \in [0, T_s] \\ V_{\max} t - \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T_s, T - T_s] \\ -a_{\max} \frac{(t-T)^2}{2} + V_{\max} T - \frac{V_{\max}^2}{2a_{\max}} & ; t \in [T - T_s, T] \end{cases} \quad (2.3)$$

โดยจากในภาพประกอบ 7 แสดงให้เห็นว่า σ เป็นฟังก์ชันของเวลาโดยที่ t และ T คือ เวลาและเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุด P_i จนถึงจุด P_f ตามลำดับ (มีหน่วยเป็นวินาที ส่วน V_{\max} และ a_{\max} คือ ความเร็วสูงสุด (เมตรต่อวินาที) และความเร่งสูงสุด (เมตรต่อวินาที²) ของรถไถตามลำดับ

1.2 แนวเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง (A. D. Luca, 2015)

คือการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งในพิกัด XYZ โดยมีการเชื่อมต่อจุดของเส้นตรงสองเส้นและทำการประมาณค่า (Interpolate) เส้นตรงที่เชื่อมต่อกันจะทำให้เกิดเป็นเส้นโค้งขึ้นมาดังแสดงในภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 เส้นโค้งที่เกิดจากการเชื่อมต่อโดยเส้นตรง

จากภาพประกอบ 8 เป็นการนำเส้นตรงสองเส้นมาต่อกันเพื่อให้เกิดเป็นเส้นโค้ง โดยมีจุด A เป็นจุดเริ่มต้น จุด B เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นตรง และจุด C เป็นจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ โดยที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของความโค้งที่เกิดจากการประมาณค่า (Interpolate) คือ A' ถึง B'

และ d_1, d_2 คือระยะของเส้นตรงที่สัมผัสกับเส้นโค้งโดยมีสมการหลักในการสร้างเส้นโค้งตั้งสมการที่ 2.4

$$p(t) = A' + v_1 K_{AB} t + t^2 / 2\Delta (v_2 K_{BC} - v_1 K_{AB}) \quad (2.4)$$

โดยที่

$$K_{AB} = \frac{B-A}{\|B-A\|} = \text{เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ของเส้นตรง } AB \quad (2.5)$$

$$K_{BC} = \frac{C-B}{\|C-B\|} = \text{เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ของเส้นตรง } BC \quad (2.6)$$

$$\Delta = \frac{2d_1}{v_1} = \text{ผลต่างการเปลี่ยนแปลงของเวลา} \quad (2.7)$$

$$B-A' = d_1 K_{AB} \quad (2.8)$$

$$B'-B = d_2 K_{BC} \quad (2.9)$$

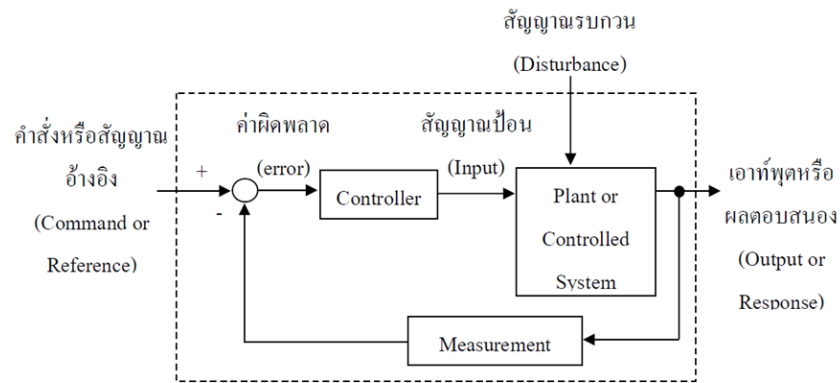
v_1 คือ ความเร็วคงที่บนเส้นตรง AB

v_2 คือ ความเร็วคงที่บนเส้นตรง BC

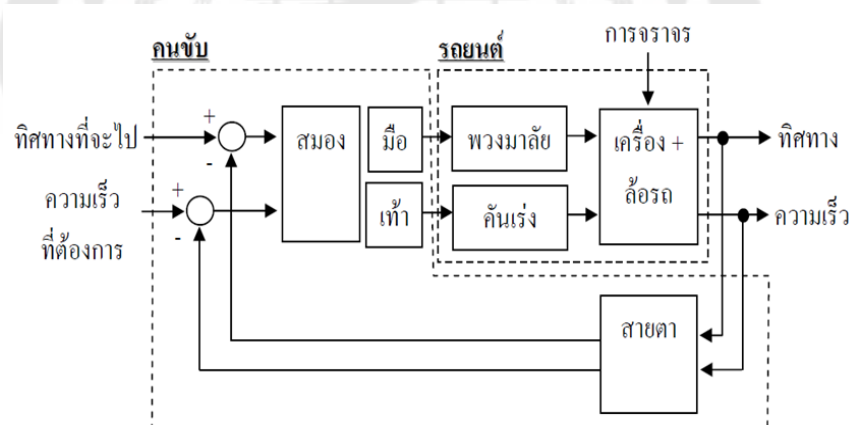
2. การออกแบบระบบควบคุมรถไถ (Controller System) (สุชาติ จันทรจรมานิตย์, 2555)

ระบบที่ใช้สำหรับควบคุมรถไถควรจะเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ดังแสดงในภาพประกอบ 9 เนื่องจากเป็นระบบที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง แล้วทำการหาค่าความผิดพลาด (Error) เพื่อที่จะนำไปใช้กับตัวควบคุม เพื่อให้ได้สัญญาณอินพุตส่งไปยังระบบที่ต้องการควบคุม เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น คนที่กำลังขับรถยนต์ (ดังแสดงในภาพประกอบ 10) โดยที่เป้าหมายและเวลาที่คนขับต้องการจะไปในั้นเปรียบได้กับคำสั่งอ้างอิง (Reference) จากนั้นสมองจึงทำการควบคุมมือและเท้าให้ไปควบคุมพวงมาลัยและเหยียบคันเร่ง โดยที่การควบคุมส่วนนี้เปรียบได้กับตัวควบคุมเพื่อส่งสัญญาณอินพุตที่เป็นความเร็วและทิศทางส่งไปยังระบบที่ผู้ขับขี่ต้องการควบคุม คือ คันเร่งและพวงมาลัย และเครื่องยนต์จึงส่งเอาต์พุตออกมาเป็นทิศทางและความเร็วที่

ต้องการ โดยที่มีสายตาเป็นเครื่องมือวัดเพื่อส่งค่าความผิดพลาดเป็นสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อให้รถไปสู่จุดต้องการได้



ภาพประกอบ 9 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, 2555)

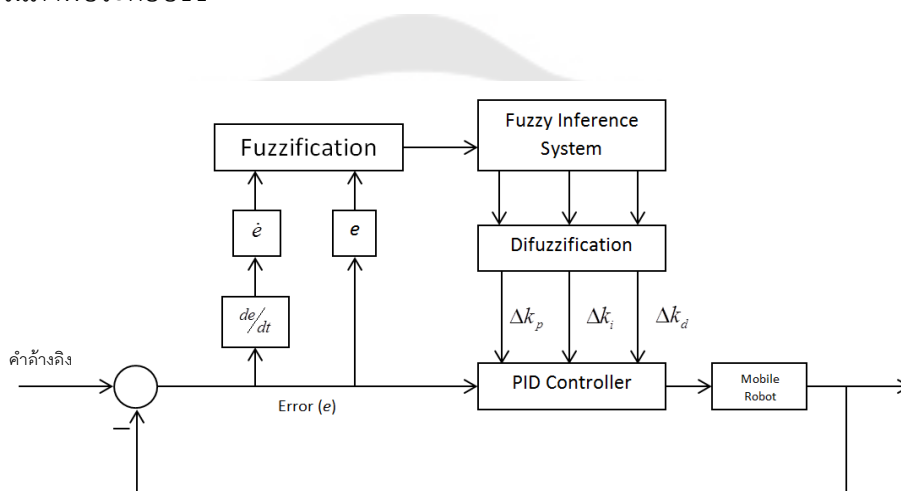


ภาพประกอบ 10 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับของการขับรถยนต์ (สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, 2555)

3. ตัวควบคุมฟัซซี-ฟิวอี้แบบปรับตัวได้ (PID - Fuzzy Self Tuning) (Xu, Kan, Chen, & Yan, August, 2014)

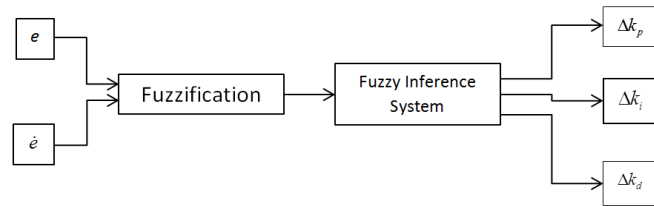
ตัวควบคุมฟัซซี-ฟิวอี้แบบปรับตัวได้คือ การรวมตัวกันระหว่างตัวควบคุม ฟิวอี้ และ ฟัซซี โดยที่ตัวควบคุมแบบฟัซซีนั่นจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบ

ควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional Integral Derivative) ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear) แต่เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของโมเดลที่ต้องการควบคุมอีกหลากหลายชนิด เช่น หุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ (Mobile Robot) ทำให้การควบคุมมักจะมีปัญหาอยู่เสมอกับการใช้ตัวควบคุมพีไอดี (PID) เพียงอย่างเดียว และเพื่อที่จะจัดการกับปัญหานี้ให้หมดไปได้ จึงเกิดแนวคิดโดยการนำตัวควบคุมแบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นมาชดเชยการทำงานโดยระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นอาจมีค่าอ้างอิงที่มีการปรับเปลี่ยนค่าไปตามระยะเวลา ดังนั้นตัวควบคุมแบบฟัซซี จะทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เหมาะสมกับค่าอ้างอิงที่เกิดขึ้นใหม่ได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ไดอะแกรมการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติด้วยตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดีแบบปรับตัวได้

จากภาพประกอบ 11 ระบบควบคุมแบบฟัซซีนี้นี้จะทำการปรับแต่งและควบคุมค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติโดยมีไดอะแกรมของระบบดังแสดงในภาพประกอบ 12 ซึ่งจะมีการรับค่าอินพุตเป็นตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ e และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดของตำแหน่ง \dot{e} โดยมีเอาต์พุตเป็นตัวแปร $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ เพื่อนำไปควบคุมค่าอัตราขยายของพีไอดีต่อไป



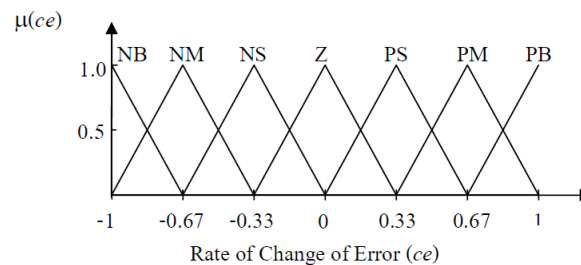
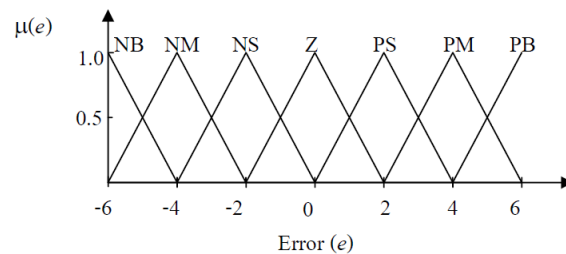
ภาพประกอบ 12 ควบคุมค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติด้วยฟuzzy

ภาพประกอบ 12 จะเห็นได้ว่าเป็นขั้นตอนและองค์ประกอบต่างๆ ของตัวควบคุมแบบฟuzzy เพื่อที่จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติให้กับตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยการควบคุมนั้นได้แบ่งเป็นส่วนประกอบใหญ่ๆ คือ

3.1 การทำฟuzzy (Fuzzication) ("ฟuzzyลอจิก Fuzzy Logic," 2015)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการแปลงข้อมูลอินพุตที่ฟuzzyรับเข้ามา ในรูปแบบของค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต่างๆ ที่มีอยู่ในระบบ แล้วทำการรวมอินพุตซึ่งจะแทนด้วยตัวแปรภาษา โดยจะเป็นการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิก จากอินพุตที่เป็นค่าเชิงตัวเลข

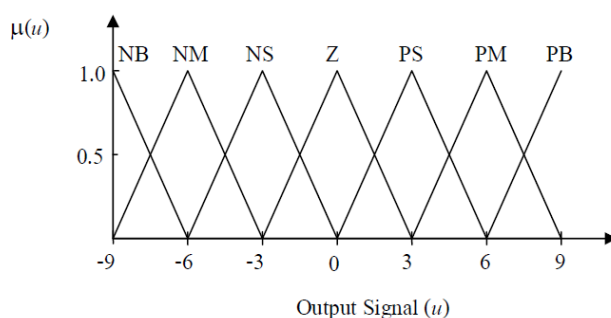
ความเป็นสมาชิก



ภาพประกอบ 13 การทำฟuzzyพีเคซึ่งแปลงอินพุตเป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก

("ฟuzzyลอจิก Fuzzy Logic," 2015)

จากภาพประกอบ 13 จะประกอบด้วยเซตอินพุต ที่เป็นตัวแปลเชิงภาษา เป็น ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกทั้งหมด 7 ฟังก์ชันได้แก่ Negative Big, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small Positive Medium, และ Positive Big โดยกำหนดให้มีเซตอินพุตจำนวนสองคือ e ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดของตำแหน่ง \dot{e} และมีเซตเอาต์พุต คือ e_{out} ดังแสดงในภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 ฟัซซีเซตของสัญญาณเอาต์พุต ("ฟัซซีลอจิก Fuzzy Logic," 2015)

ภาพประกอบ 13 แสดงสถานะของอินพุตขึ้นอยู่กับค่าความเป็นสมาชิก ยกตัวอย่างเช่น ถ้าระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อยู่ในช่วง 5 เมตร ก็จะอยู่ในสถานะ Positive Medium, และ Positive Big

3.2 การวินิจฉัย (Fuzzy Inference system) หรือ FIS

เป็นส่วนของการประเมินค่าของตัวแปรโดยใช้เงื่อนไขการตัดสินใจแบบฟัซซี คือ “ถ้าอินพุตเป็นเช่นนี้ แล้ว เอาต์พุต คือ” (IF, THEN) และถ้าหากมีตัวแปรของอินพุตมากกว่าหนึ่ง ก็จะมีตัวเชื่อมอินพุต คือ (AND, OR) โดยมีตารางกฎความสัมพันธ์ของฟัซซี ดังแสดงในภาพประกอบ 15

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NZ/ZO/ZO
NS	PB/NB/ZO	PB/NM/NS	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/ZO	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NM/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	PB/PB/PB

ภาพประกอบ 15 กฎความสัมพันธ์ของฟัซซี ("Fuzzy Logic," 2014)

จากภาพประกอบ 15 คือกฎความสัมพันธ์ของระบบที่มีสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุตโดยในตัวเอาต์พุตนั้นจะมีค่า $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ เพื่อนำไปปรับค่าเกนของพีไอดีต่อไป ยกตัวอย่าง เช่น ถ้า e คือ NB และ \dot{e} คือ ZO แล้ว Δk_p คือ PM, Δk_i คือ NM, Δk_d คือ NB

3.3 ดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification) (Kraisak Phothongkum, 2016)

คือขั้นตอนการแปลงค่าที่ได้จากกฎความสัมพันธ์ของฟัซซีให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้จริงได้โดยสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตที่ได้จากแต่ละกฎ และ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาต์พุต แสดงดังสมการที่ 2.10

$$Y = \frac{\sum \mu_n y_n}{\sum \mu_n} \quad (2.10)$$

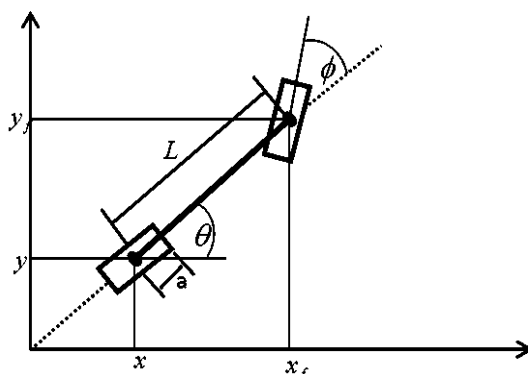
เมื่อ Y คือ เอาต์พุตของระบบ
 μ_n คือ เอาต์พุตที่ได้จากแต่ละกฎ
 y_n คือ ค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเอาต์พุต

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถไถ

แบบจำลองของรถไถสามารถจำแนกออกเป็น 2 ส่วน คือ แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถไถ (Kinematics Model) โดยการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์เป็นการพิจารณาถึง ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของรถไถแต่ไม่พิจารณาแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แรงที่เกี่ยวข้อง และแรงบิด ซึ่งจะถูกพิจารณาในส่วนของแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ

4.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถไถ (Kinematics Model)

Alessandro De Luca และ Giuseppe Oriolo ได้นำเสนอการทำแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ ดังแสดงในสมการที่ 2.15 (A. D. Luca, Oriolo, G. and Samson, C, 1998)



ภาพประกอบ 16 ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไถที่เปรียบเสมือนเป็นรถจักรยาน

จากภาพประกอบ 16 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของรถไถนั้นทำให้ง่ายขึ้นโดยสมมุติให้รถไถนั้นเปรียบเสมือนจักรยาน (ไม่มีความกว้างของฐานล้อซ้ายขวา) โดยที่ล้อหน้าทำหน้าที่เลี้ยวและล้อหลังเป็นล้อขับโดยมี ตัวแปรในพิกัดคือ $q=(x, y, \theta, \phi)$

เมื่อ

- x, y คือ ตำแหน่งของล้อหลังในพิกัดฉาก
- x_f, y_f คือ ตำแหน่งของล้อหน้าในพิกัดฉาก
- θ คือ ทิศทางหักเหของรถเมื่อเทียบแกน x
- ϕ คือ มุมเลี้ยวของล้อ
- v_1 คือ ความเร็วของล้อขับเคลื่อน (ล้อหลัง)
- v_2 คือ ความเร็วปรับมุมเลี้ยวของล้อหน้า

โดยที่ข้อกำหนดสมการทางจลนศาสตร์ของแต่ละล้อคือ

$$0 = \dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y}_f \cos(\theta + \phi) \quad (2.11)$$

$$0 = \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta \quad (2.12)$$

คือ
ขณะที่ x_f, y_f กำหนดให้เป็นตำแหน่งของล้อหน้าในพิกัด x, y โดยมีสมการข้อกำหนด

$$x_f = x + L \cos \theta \quad (2.13)$$

$$y_f = y + L \sin \theta \quad (2.14)$$

เมื่อ L คือระยะทางระหว่างล้อหลังและล้อหน้าจึงทำให้รูปแบบข้อกำหนดสมการทางจลนศาสตร์กลายเป็น

$$\dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) - \dot{\theta} L \cos \phi = 0 \quad (2.15)$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ \tan \phi / L \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2 \quad (2.16)$$

โดยที่มุมของล้อหน้าสามารถหาได้จาก เส้นทางโค้งของรถไถซึ่งหาได้จาก

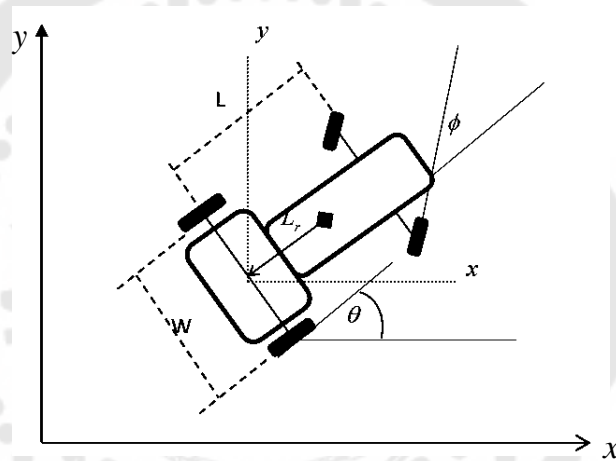
$$\sigma = \frac{\tan \phi}{L} \quad (2.17)$$

โดยสมการสมการทางจลนศาสตร์เขียนให้อยู่ในรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ \sigma & 0 \\ 0 & L \\ \frac{1}{a} & \frac{L}{1+L^2\sigma^2} \\ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \dot{\sigma}(t) \end{bmatrix} = J(q, V) \times V \quad (2.18)$$

เมื่อ $\dot{\sigma}$ คือความเร็วของรถไถขณะวิ่งในเส้นทางโค้งและกำหนดให้ $V = [v_1 \ \dot{\sigma}]^T$

4.2 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ (Dynamics Model) (Yeh, Li, & Chen, 2009)



ภาพประกอบ 17 ไตอะแกรมแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ

Ying-Chieh Yeh, Tzue-Hseng S. Li, and Chih-Yang Chen ได้นำเสนอการทำแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติ ด้วยการใช้สมการลากรางจ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.19

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E}{\partial q_i} = Z(q) \tau \quad (2.19)$$

เมื่อ

τ คือ ทอร์ค อินพุต

E คือ สมการพลังงานจลน์ของระบบ

q คือ ตัวแปรในพิกัด x, y

q_i คือ ตัวแปรในระบบพิกัดที่สนใจ

Z_q คือ เมทริกของค่าอินพุต

โดย i ถูกกำหนดให้เป็น

x = ตำแหน่งของรถเทียบพิกัดแกน x

y = ตำแหน่งของรถเทียบพิกัดแกน y

θ = มุมรถเทียบพิกัดแกน x

ϕ = มุมล้อเทียบกับตัวรถ

ω = มุมของล้อขับ

โดยที่สมการพลังงานจลน์ของรถยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติสามารถอธิบายได้ดังแสดงในสมการที่ 2.20

$$E = E_p + E_{f_w} + E_{r_w} \quad (2.20)$$

เมื่อ

E_p = พลังงานจลน์ของตัวรถ

E_{f_w} = พลังงานจลน์ของล้อหน้า

E_{r_w} = พลังงานจลน์ของล้อหลัง

จากสมการที่ 2.20 คือสมการพลังงานจลน์ของรถยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติซึ่งในการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์จะต้องทำการใส่เงื่อนไขต่างๆ ลงไปในสมการพลังงานจลน์ซึ่งจะมีรูปแบบดังสมการที่ 2.21

$$\begin{aligned} E = & \left(\frac{1}{2} m_p (\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2) + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}^2 \right) \\ & + \left(\frac{1}{2} m_w (\dot{x}_{rfw}^2 + \dot{y}_{rfw}^2) + \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_{lfw}^2 + \dot{y}_{lfw}^2) + I_w (\dot{\theta} + \dot{\phi})^2 + 2I_w \dot{\phi}^2 \right) \\ & + \left(\frac{1}{2} m_w (\dot{x}_{rrw}^2 + \dot{y}_{rrw}^2) + \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_{lrw}^2 + \dot{y}_{lrw}^2) + I_w \dot{\theta}^2 + 2I_w \dot{\phi}^2 \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

โดยที่

m_p = มวลของรถไถ

m_w = มวลของล้อ

I_w = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของล้อ

ด้าน

x_p, y_p = ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน X, Y ของจุดศูนย์กลางมวลของรถไถ
 x_r, y_r = ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน X, Y ของจุดกึ่งกลางระหว่างล้อขับทั้งสอง

x_{rfw}, y_{rfw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหน้าด้านขวาในแนวแกน X, Y

x_{rrw}, y_{rrw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหลังด้านขวาในแนวแกน X, Y

x_{lfw}, y_{lfw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหน้าด้านซ้ายในแนวแกน X, Y

x_{lrw}, y_{lrw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหลังด้านซ้ายในแนวแกน X, Y

จากสมการที่ 2.11 ทำการจัดรูปสมการใหม่ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบสมการที่ 2.22

$$E = \left(\frac{1}{2} m_p \left[\dot{x}_r - L_r \dot{\theta} \sin \theta \right]^2 + \left[\dot{y}_r + L_r \dot{\theta} \cos \theta \right]^2 + \frac{1}{2} I_p \dot{\theta}^2 \right) \quad (2.22)$$

$$+ \left(m_w \left[\dot{x}_{fw}^2 + \dot{y}_{fw}^2 + w^2 \dot{\theta}^2 \right] + I_w \dot{\theta}^2 + 2 I_w \dot{\theta} \dot{\phi} + I_w \dot{\phi}^2 + 2 I_w \dot{\phi}^2 \right)$$

$$+ \left(m_w \left[\dot{x}_{rw}^2 + \dot{y}_{rw}^2 + w^2 \dot{\theta}^2 \right] + I_w \dot{\theta}^2 + 2 I_w \dot{\phi}^2 \right)$$

โดยที่

I_p = โมเมนต์ความเฉื่อยของรถไถ

x_{fw}, y_{fw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหน้า

x_{rw}, y_{rw} = ความเร็วเชิงเส้นของล้อหลัง

L_r = ระยะจากศูนย์กลางล้อถึงจุด cg รถไถ

L = ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง

จากสมการที่ 2.22 ทำการจัดรูปสมการอีกครั้งจะได้ดังสมการที่ 2.23

$$E = \left(\frac{1}{2} m_p + 2 m_w \right) \left(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 \right) + 2 I_w \dot{\theta} \dot{\phi} + I_w \dot{\phi}^2 + 4 I_w \dot{\phi}^2 \quad (2.23)$$

$$+ \left(\frac{1}{2} I_p + \frac{1}{2} m_p L_r^2 + 2 m_w W^2 + m_w L^2 + 2 I_w \right) \dot{\theta}^2 + (2 m_w L + m_p \rho_r) (\dot{y}_r \cos \theta - \dot{x}_r \sin \theta) \dot{\theta}$$

โดยที่

จากสมการที่ 2.23 ทำการกำหนดสมการใหม่ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณต่อไปดังนี้

$$I_\theta = \frac{1}{2}I_p + \frac{1}{2}m_p L_r^2 + 2m_w w^2 + m_w L^2 + 2I_w \quad (2.24)$$

$$m = \frac{1}{2}m_p + 2m_w \quad (2.25)$$

$$m_u = m_p + L_r + 2m_w L \quad (2.26)$$

จากนั้นนำสมการที่ 2.24 ถึง 2.26 แทนลงในสมการที่ 2.23 ได้สมการใหม่เป็น

$$E = \frac{1}{2}m(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2) + \frac{1}{2}I_\theta \dot{\theta}^2 + m_u(\dot{y}_r \cos\theta + \dot{x}_r \sin\theta)\dot{\theta} + 2I_w \dot{\theta} \dot{\phi} + I_w \dot{\phi}^2 + 4I_w \dot{\omega}^2 \quad (2.27)$$

แทนค่าสมการที่ 2.27 ในสมการที่ 2.19 แล้วจัดเรียงเทอมใหม่ทำให้ได้สมการ

พลศาสตร์

$$S(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} = Z(q)\tau \quad (2.28)$$

เมื่อ

$S(q)$ คือ เมทริกซ์ของโมเมนต์ความเฉื่อย

$V_m(q, \dot{q})$ คือ เมทริกซ์ของ ความเร็วเข้าสู่จุดศูนย์กลาง Centripetal และ ความเบี่ยงเบนขณะที่รถเลี้ยว Coriolis

$Z(q)$ คือ เมทริกซ์ของค่าอินพุต

τ คือ ทอร์คอินพุต

หาอนุพันธ์ (\dot{q}) ของสมการพลังงานจลน์ในสมการที่ 2.27 จะได้

เมื่อเทียบ \dot{x} จะได้ $m\dot{x} - m_u \sin\theta \dot{\theta}$

เมื่อเทียบ \dot{y} จะได้ $m\dot{y} - m_u \cos\theta \dot{\theta}$

เมื่อเทียบ $\dot{\theta}$ จะได้ $I_\theta \dot{\theta} + m_u \dot{y} \cos\theta - m_u \dot{x} \sin\theta + 2I_w \dot{\phi}$

เมื่อเทียบ $\dot{\phi}$ จะได้ $2I_w \dot{\theta} + 2I_w \dot{\phi}$

เมื่อเทียบ $\dot{\omega}$ จะได้ $8I_w \dot{\omega}$

(2.29)

หาอนุพันธ์ (q) ของสมการพลังงานจลน์ในสมการที่ 2.27 จะได้

$$\left. \begin{array}{l} \text{เมื่อเทียบ } x \text{ จะได้ } 0 \\ \text{เมื่อเทียบ } y \text{ จะได้ } 0 \\ \text{เมื่อเทียบ } \theta \text{ จะได้ } -m_u \dot{y} \sin \theta - m_u \dot{x} \cos \theta \\ \text{เมื่อเทียบ } \phi \text{ จะได้ } 0 \\ \text{เมื่อเทียบ } \omega \text{ จะได้ } 0 \end{array} \right\} \quad (2.30)$$

หาอนุพันธ์เทียบเวลาของ (\dot{q}) ในสมการที่ 2.27 จะได้

$$\left. \begin{array}{l} \text{เมื่อเทียบ } \dot{x} \text{ จะได้ } m \ddot{x} - m_u \sin \theta \ddot{\theta} - m_u \cos \theta \dot{\theta}^2 \\ \text{เมื่อเทียบ } \dot{y} \text{ จะได้ } m \ddot{y} - m_u \cos \theta \ddot{\theta} - m_u \sin \theta \dot{\theta}^2 \\ \text{เมื่อเทียบ } \dot{\theta} \text{ จะได้ } I_\theta \ddot{\theta} - m_u \dot{y} \sin \theta - m_u \dot{x} \cos \theta - m_u \dot{x} \cos \theta - m_u \dot{x} \cos \theta \\ \text{เมื่อเทียบ } \dot{\phi} \text{ จะได้ } 2I_w \ddot{\phi} \\ \text{เมื่อเทียบ } \dot{\omega} \text{ จะได้ } 8I_w \ddot{\omega} \end{array} \right\} \quad (2.31)$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่าต่างๆ เพื่อแทนค่าในสมการลากรางจ์และทำให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์จะได้สมการโมเดลของรถไถดังสมการที่ 2.32 ถึง 2.35

$$s(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & -m_u \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & m & m_u \cos \theta & 0 & 0 \\ -m_u \sin \theta & m_u \cos \theta & I_\theta & 2I_w & 0 \\ 0 & 0 & 2I_w & 2I_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8I_w \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m_u \dot{\theta} \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_u \dot{\theta} \sin \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$Z(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \rho \sin \phi \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2.34)$$

จากนั้นทำการกำหนดเวกเตอร์ τ ดังสมการที่ 2.29

$$Z(q) = [\tau_v \quad \tau_\sigma]^T \quad (2.35)$$

โดยกำหนดให้

τ_v คือ อินพุตแรงบิดในส่วนล้อขับ

τ_σ คือ อินพุตแรงบิดในส่วนล้อบังคับเลี้ยว

จากสมการพลศาสตร์ที่ 2.28 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้นซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของความเร็วยาน V โดยการนำสมการพลศาสตร์ไปคูณกับเมทริกซ์ของสมการจลนศาสตร์ $J^T(q)$ ดังนั้นจะได้สมการ การเคลื่อนที่ของรถใหม่เป็น

$$S(q)\dot{V} + \nabla_m(q, \dot{q})V = Z(q)\tau \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$S = J^T S J \quad (2.37)$$

$$\nabla_m = J^T S J \quad (2.38)$$

$$Z = J^T Z \quad (2.39)$$

ทำสมการที่ 2.36 ให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้เป็น

$$S(q) = \begin{bmatrix} m + I_\theta \sigma^2 & \frac{2I_w L \sigma}{1 + L_2 \sigma^2} \\ \frac{2I_w L \sigma}{1 + L^2 \sigma^2} & \frac{2I_w L^2}{(1 + L^2 \sigma^2)^2} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$\nabla(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} I_\theta \sigma \dot{\sigma} & \frac{-4I_w L^3 \sigma^2 \dot{\sigma}}{(1 + L^2 \sigma^2)^2} \\ \frac{2I_w L \dot{\sigma}}{1 + L^2 \sigma^2} & \frac{-4I_w L^4 \sigma \dot{\sigma}}{(1 + L^2 \sigma^2)^3} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$Z(q) = \begin{bmatrix} \frac{1 + 2L^2 \sigma^2}{1 + L^2 \sigma^2} & 0 \\ 0 & \frac{L}{1 + L^2 \sigma^2} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. การออกแบบตัวควบคุม

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ผู้ทำการทดลองจะแบ่งขั้นตอนออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆ คือ 1.การเคลื่อนที่ของรถไถในแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และ 2.ส่วนของการทำงานจริงซึ่งจะเป็นการสร้างรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยมีการขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก และมีการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถด้วย อุปกรณ์ GPS, IMU โดยใช้โปรแกรมแลปวิว LabVIEW ในการปฏิบัติการ

2. การจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ (Simulation)

2.1 การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ (Dynamic Model)

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถนั้นเริ่มจากการวิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ และสร้างสมการการเคลื่อนที่ของรถไถ โดยมีตัวควบคุม ฟัซซี-พีไอดีแบบปรับตัวได้ (Fuzzy-PID Self Tuning) สำหรับควบคุมการขับเคลื่อน จากนั้นทำการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อให้รถไถวิ่งตามเส้นทางที่กำหนด โดยทำการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไถ (Dynamic Model) ในการวิเคราะห์โมเดลทางคณิตศาสตร์ของรถไถโดยจะต้องคำนึงถึงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นกับรถไถซึ่งทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการลากรางจ์ ซึ่งให้ผลดังสมการที่ 3.4 ถึง 3.6 แล้วจึงใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ

ตาราง 1 ค่าตัวแปรต่างๆ ของรถไถ

ตัวแปร	คำอธิบาย	ขนาด	หน่วย
m_p	มวลของรถไถ	595	kg
m_w	มวลล้อของรถไถ	90	kg
I_w	โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนของล้อ	74.4	kg·m ²
I_p	โมเมนต์ความเฉื่อยของรถไถ	247.5	kg·m ²
L_1	ระยะจากศูนย์กลางระหว่างล้อถึงจุด CG ของรถไถ	1.5	m
W	ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อทั้ง 2 ข้าง	1	m
L	ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อหน้าและหลัง	2	m

จากสมการที่ 2.24 ถึง 2.26 จะได้

$$m = \frac{1}{2}595 + 2(90) = 4775 \quad (3.1)$$

$$I_o \frac{1}{2}2475 + \frac{1}{2}5951.5^2 + 2 \cdot 90(0.5^2) + 90(2^2) + 2(744) = 130192 \quad (3.2)$$

$$m_u = 595 + 1.5 + 2 \cdot 90 \cdot 2 = 9565 \quad (3.3)$$

หลังจากที่ได้คำนวณหาค่าอนุพันธ์ในสมการลากรางจ์รวมทั้งหาค่าความเร็วเชิงเส้นของล้อและจัดเรียงเทอมต่างๆ แล้วจะได้สมการโมเดลของรถไถดังสมการที่ 3.4 ถึง 3.7

$$s(q) = \begin{bmatrix} 4775 + 130.192\sigma^2 & \frac{2(744)2\sigma}{1+2^2\sigma^2} \\ \frac{2744(2)\sigma}{1+2^2\sigma^2} & \frac{2(744)2^2}{(1+2^2\sigma^2)^2} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 130.192\sigma\dot{\sigma} & \frac{-4(744)2^3\sigma^2\dot{\sigma}}{(1+2^2\sigma^2)^2} \\ \frac{2(744)2\dot{\sigma}}{1+(2)^2\sigma^2} & \frac{-4(744)2^4\sigma\dot{\sigma}}{(1+2^2\sigma^2)^3} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$Z(q) = \begin{bmatrix} \frac{1+2(2)^2\sigma^2}{1+(2)^2\sigma^2} & 0 \\ 0 & \frac{2}{1+2^2\sigma^2} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

โดยระบบมีค่าอินพุตที่อยู่ในรูปแรงบิดดังสมการที่

$$\tau = [\tau_v \quad \tau_\sigma]^T \quad (3.7)$$

โดยสามารถหาเอาต์พุตของรถไถได้เป็น

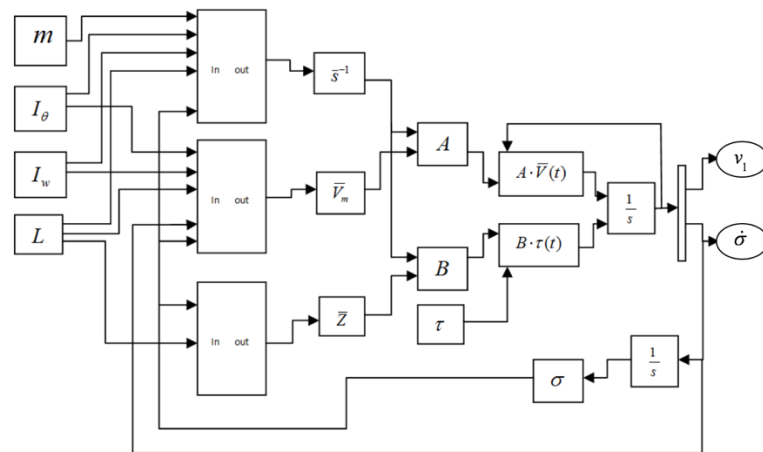
$$\dot{V} = [\dot{v}_1 \quad \dot{\sigma}]^T = -A \cdot V(t) + B \cdot \tau(t) \quad (3.8)$$

เมื่อ

$$A = S^{-1} \cdot V_m \quad (3.9)$$

$$B = S^{-1} \cdot Z \quad (3.10)$$

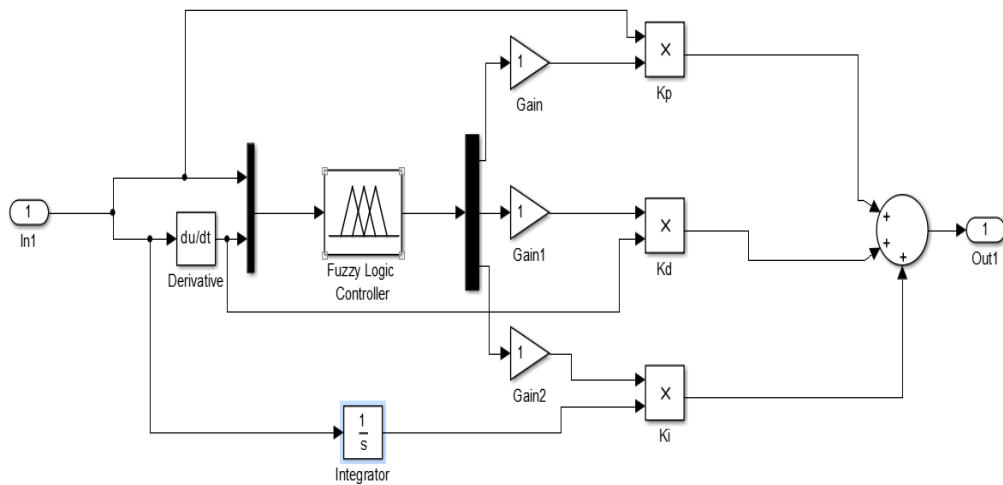
จากนั้นเมื่อได้สมการพลศาสตร์ของรถไถแล้วนำค่าที่ได้นำมาจำลองการเคลื่อนที่ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีไดอะแกรมของสมการสมการพลศาสตร์ของรถไถดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 ไดอะแกรมของสมการสมการพลศาสตร์ของรถไถโดย MATLAB/Simulink

2.2 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดี (Fuzzy-PID Self Tuning)

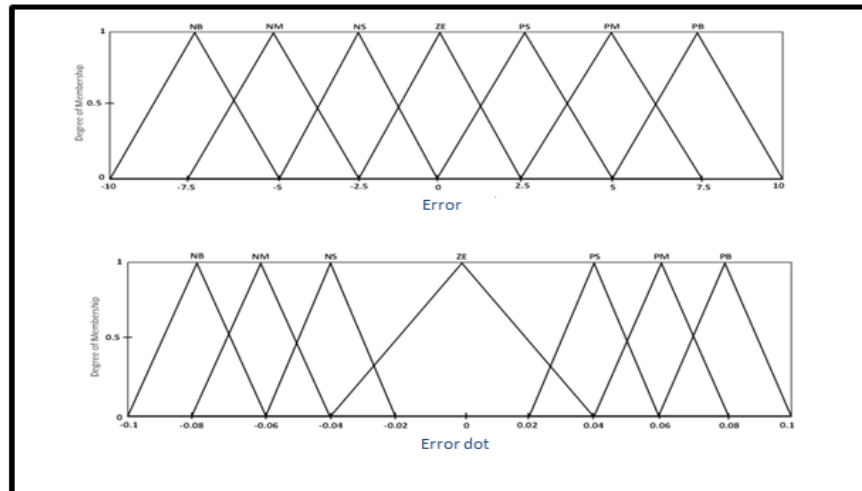
ตัวควบคุมแบบ ฟัซซี-พีไอดี นั้นได้ทำการออกแบบการควบคุม โดยแบ่งการควบคุมเป็นสองส่วนคือส่วนของระยะการขับเคลื่อน (Distance) และส่วนการบังคับเลี้ยวของรถ (Heading) โดยมีไดอะแกรมการทำงานของระบบทั้งสองดังภาพประกอบ 19



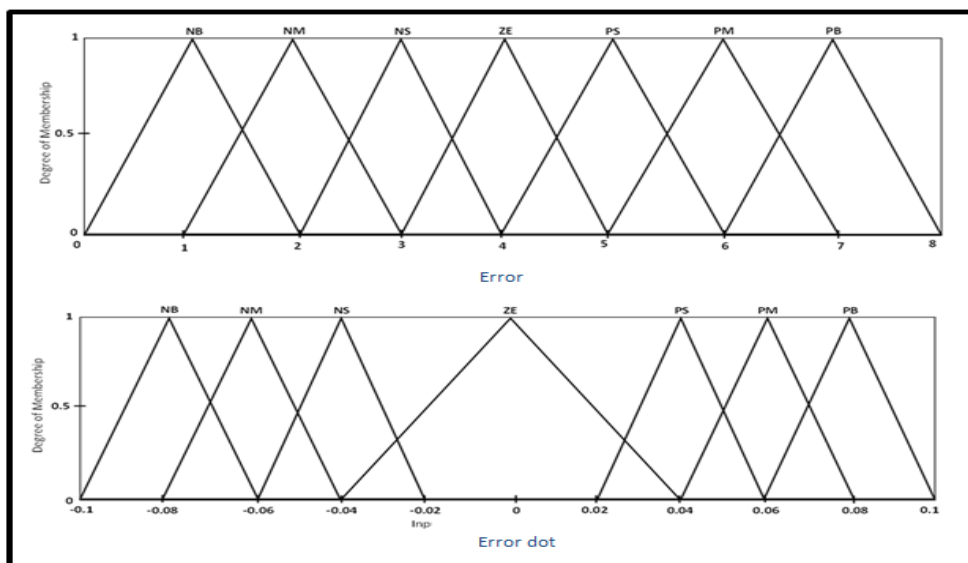
ภาพประกอบ 19 ไดอะแกรมการทำงานของตัวควบคุมแบบ ฟัชซี-พีไอดี ในส่วน ระยะขับเคลื่อน(Distance) และส่วนมุมหันเหของรถ (Heading)

โดยในภาพประกอบ 19 ตัวควบคุม ฟัชซี-พีไอดี รับค่าอินพุตเป็นตำแหน่งค่าคลาดเคลื่อนของรถไถ e และตำแหน่งค่าคลาดเคลื่อนที่ของรถไถที่เปลี่ยนแปลงไป \dot{e} เพื่อนำไปทำให้เป็นฟัชซีในขั้นตอนการทำฟัชซี

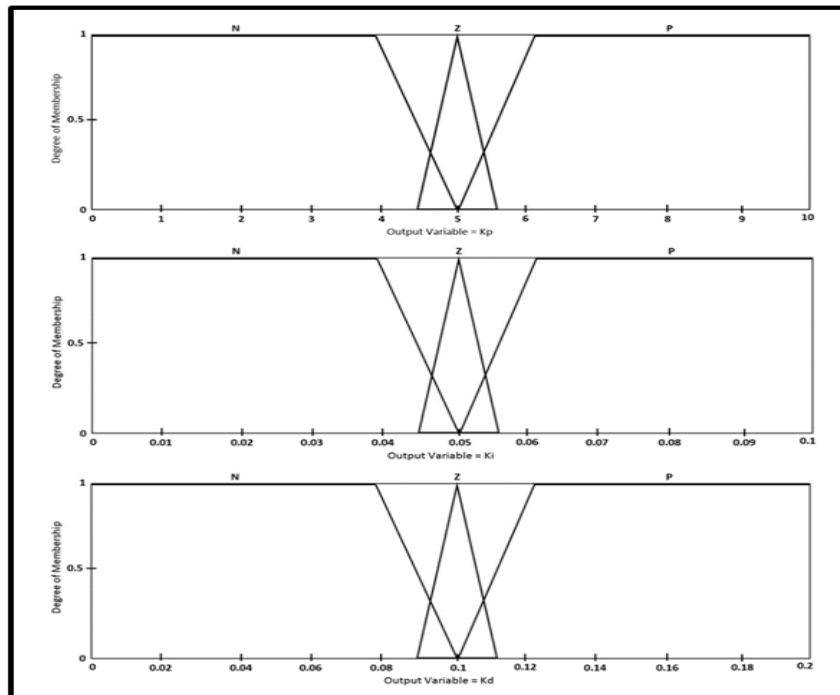
2.2.1 การทำฟัชซีของการควบคุมรถไถ (Tractor Fuzzification) สำหรับรถไถนั้น จะมี 2 ชุดเพื่อควบคุมการขับเคลื่อน (Distance) และ ส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Heading) โดยมี ค่าคลาดเคลื่อนของรถไถ e และตำแหน่งค่าคลาดเคลื่อนของรถไถที่เปลี่ยนแปลงไป \dot{e} โดยให้เป็นตัวแปรทางภาษาที่เป็นฟังก์ชันอยู่ 7 ตัวคือ NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB ดังแสดงในภาพประกอบ 20-22 และมีเซตเอาท์พุต คือ k_p, k_i, k_d ดังแสดงภาพประกอบ 22-23



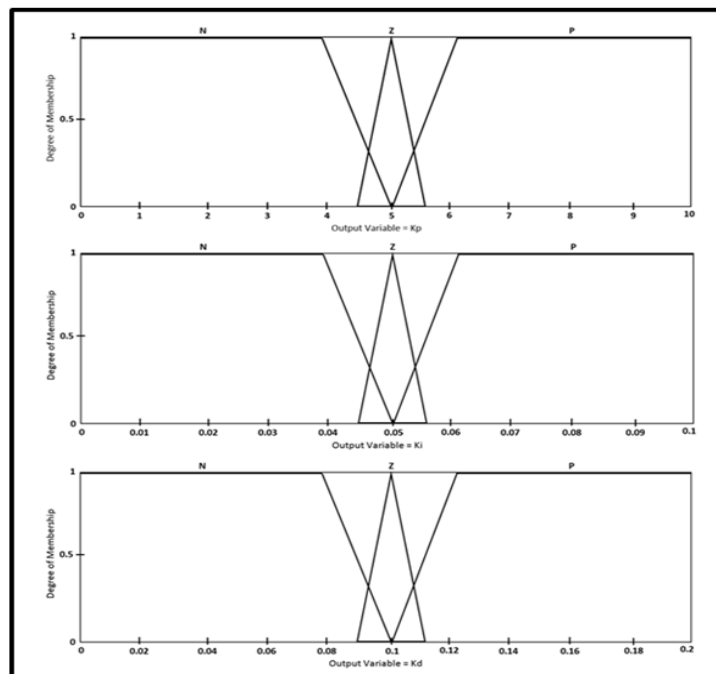
ภาพประกอบ 20 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ ส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Heading)



ภาพประกอบ 21 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุตของ ส่วนควบคุมระยะการขับเคลื่อน (Distance)



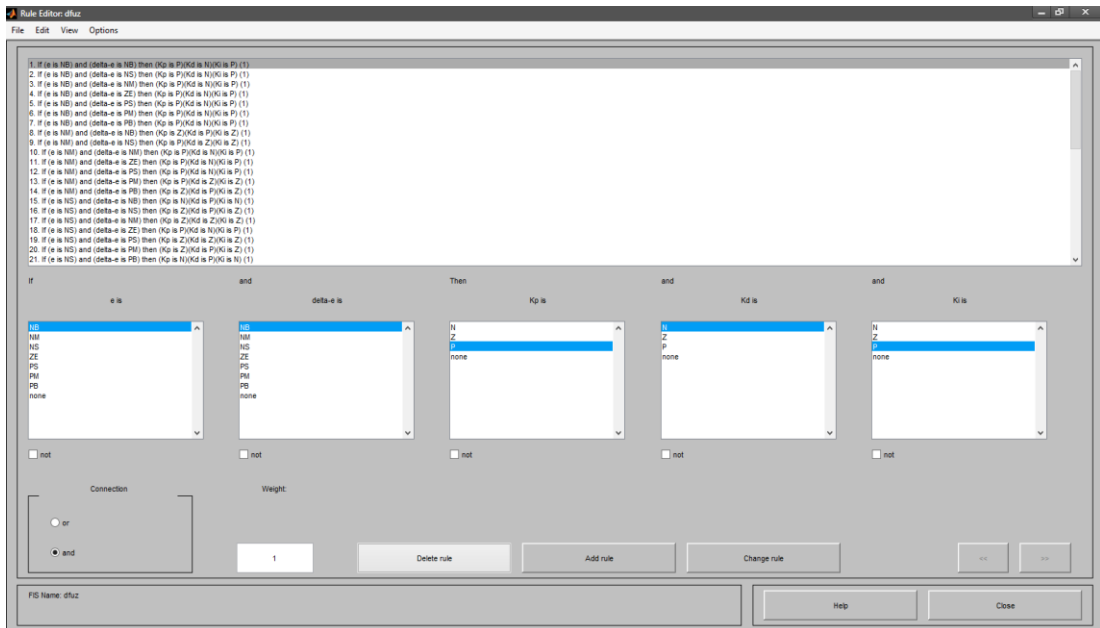
ภาพประกอบ 22 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของ ส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Heading)



ภาพประกอบ 23 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุตของส่วนควบคุมการบังคับเลี้ยว (Distance)

ตาราง 2 ตารางกฎของฟังก์ชัน

\dot{e}	e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
	Kp							
	Ki							
	Kd							
NB	P	P	Z	N	N	N	Z	P
	N	N	P	P	N	P	P	N
	P	P	Z	N	N	N	Z	P
NM	P	P	P	Z	N	Z	P	P
	N	N	Z	P	P	P	Z	N
	P	P	Z	Z	N	Z	Z	P
NS	P	P	P	Z	N	Z	P	P
	N	N	N	Z	P	Z	N	N
	P	P	P	Z	N	Z	P	P
ZE	P	P	P	P	Z	P	P	P
	N	N	N	N	Z	N	N	N
	P	P	P	P	Z	P	P	P
PS	P	P	P	Z	N	Z	P	P
	N	N	N	Z	P	Z	N	N
	P	P	P	Z	N	Z	P	P
PM	P	P	P	Z	N	Z	P	P
	N	N	Z	P	P	P	Z	N
	P	P	Z	Z	N	Z	Z	P
PB	P	P	P	Z	N	P	Z	P
	N	N	P	P	P	N	P	N
	P	P	Z	N	N	P	Z	P



ภาพประกอบ 24 การสร้างเงื่อนไขของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ในรูปแบบ “If, And, Then”

จากภาพประกอบ 24 คือการสร้างเงื่อนไขของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในโปรแกรม MATLAB/Simulink เช่น เมื่อค่าคลาดเคลื่อนของรถไถ (e) เป็น NS และคลาดเคลื่อนของรถไถที่เปลี่ยนแปลง (\dot{e}) เป็น NS จะได้เอาท์พุตคือ k_p เป็น P, k_i เป็น N, k_d เป็น P

2.3 การควบคุมการทำงานของรถไถ

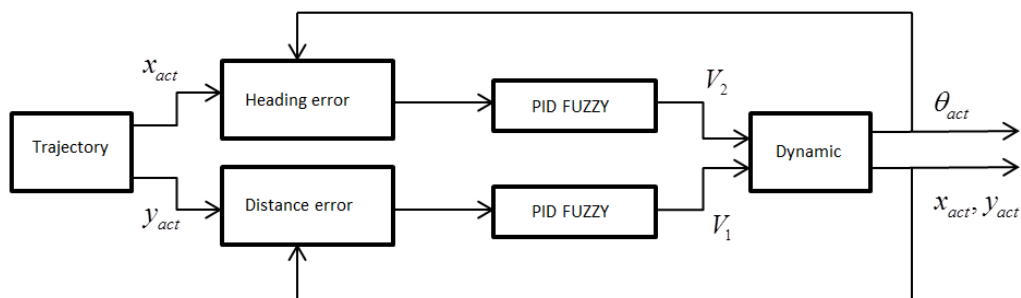
ในการควบคุมการทำงานของรถไถนั้นจำแนกรูปแบบการควบคุมเป็นสองลักษณะคือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถ และ มุมหันเหของรถไถ ดังนั้นวงรอบการควบคุมจึงถูกแบ่งออกให้มีสองวงรอบ การควบคุม คือการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของรถไถ และการควบคุมมุมหันเหในการหักเลี้ยวของรถไถโดยวงรอบการควบคุมทั้งสองได้ใช้สมการสำหรับคำนวณความผิดพลาดของระยะทาง (Distance Error) กับความผิดพลาดมุมหันเหในการหักเลี้ยว (Heading Error) คำนวณได้จากสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$\text{Distance Error} = \sqrt{(x_{ref} - x_{cur})^2 + (y_{ref} - y_{cur})^2} \quad (3.11)$$

$$\text{Heading Error} = \text{atan2}(y_{ref} - y_{cur}, x_{ref} - x_{cur}) - \theta_{cur} \quad (3.12)$$

เมื่อ x_{ref}, y_{ref} คือ ตำแหน่งอ้างอิงของเส้นทางการเคลื่อนที่
 $x_{cur}, y_{cur}, \theta_{cur}$ คือ ตำแหน่งและมุมหันเหปัจจุบันของรถไถ

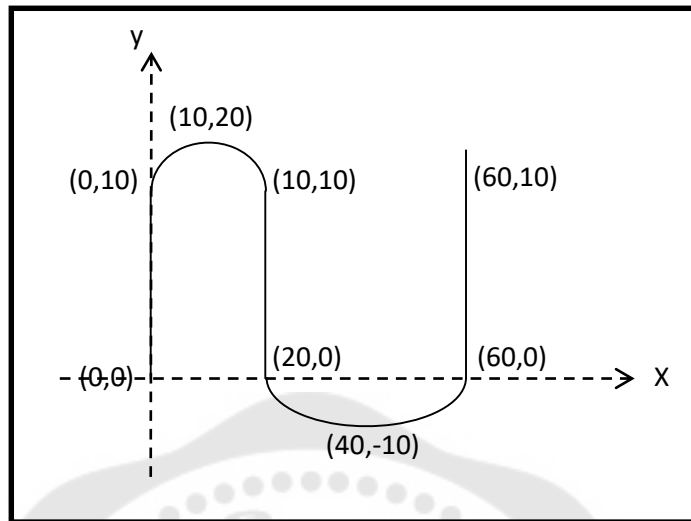
ค่าความผิดพลาดของระยะทางและมุมหันเหถูกนำไปใช้เป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี (Fuzzy Tracking) ซึ่งได้เอาท์พุตเป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนและมุมเลี้ยวของรถไถ และเมื่อได้ตำแหน่งและมุมหันเหอ้างอิงจากโมเดลพลศาสตร์ (Dynamic Model) แล้วนำไปคำนวณหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (Distance Error) และมุมหันเห (Heading Error) เทียบกับรถไถจริงอีกครั้ง จากนั้นนำค่าความผิดพลาดไปเป็นอินพุตของตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดี (Fuzzy-PID Self Tuning) จะได้เป็นความเร็วแบบเชิงเส้น v และเชิงมุมของรถไถ θ สุดท้ายทำการแปลงให้เป็นความเร็วของล้อขับเคลื่อนและความเร็วในการเลี้ยวเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้ในการควบคุมรถไถ โดยไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของรถไถแสดงภาพประกอบ 25



ภาพประกอบ 25 ไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของรถไถ

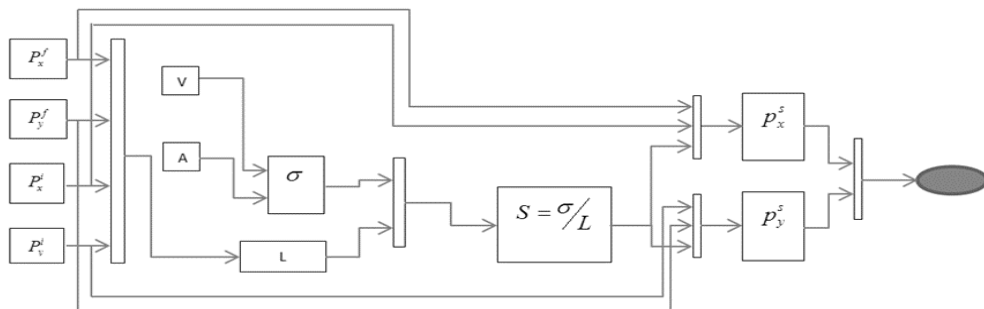
2.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถ (Trajectory)

เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถนั้นได้ออกแบบเป็นรูปตัวอักษร N เนื่องจากมีเส้นทางตรงและโค้งประกอบอยู่ด้วยกัน แสดงดังภาพประกอบ 26 โดยกำหนดให้รถไถเริ่มต้นวิ่งเป็นเส้นตรงเส้นที่หนึ่งที่พิกัด (0,0) และสิ้นสุดที่จุด (0,10) ต่อด้วยเส้นโค้งเส้นที่หนึ่ง โดยมีจุดเริ่มต้นเส้นโค้งที่พิกัด (0,10) มีจุดกึ่งกลางความโค้งที่ (10,20) และสิ้นสุดเส้นโค้งที่พิกัด (10, 10) ต่อด้วยเส้นตรงเส้นที่สอง โดยมีจุดเริ่มต้นเส้นตรงที่พิกัด (10,10) และสิ้นสุดที่จุด (20, 0) ต่อด้วยเส้นโค้งเส้นที่สอง โดยมีจุดเริ่มต้นเส้นโค้งที่พิกัด (20, 0) มีจุดกึ่งกลางความโค้งที่ (40, -10) และสิ้นสุดเส้นโค้งที่พิกัด (60, 0) ต่อด้วยเส้นตรงเส้นสุดท้ายมีจุดเริ่มต้นที่พิกัด (60, 0) และสิ้นสุดที่จุด (60, 10)



ภาพประกอบ 26 เส้นทางเคลื่อนที่ของรถไถ

2.4.1 การเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรงจะเห็นได้ว่าการสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ของรถไถนั้นจะแบ่งเส้นทางเคลื่อนที่เป็นสองแบบคือ การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง และการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง โดยการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงนั้นมีไดอะแกรมการเคลื่อนที่ดังภาพประกอบ 27

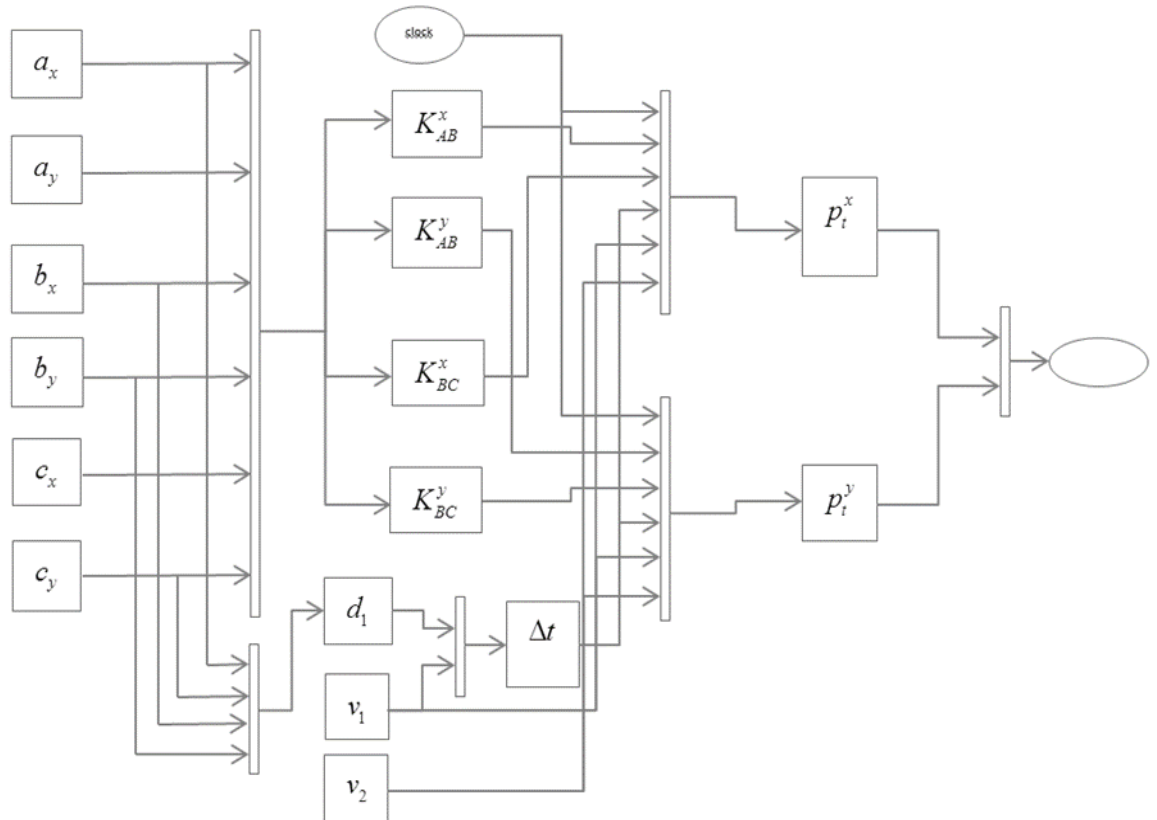


ภาพประกอบ 27 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

จากภาพประกอบ 27 เป็นไดอะแกรมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเพื่อทำให้รถไถเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง จำเป็นต้องมีการกำหนดความยาวของการเคลื่อนที่โดยมีจุดเริ่มต้น (p_x^i, p_y^i) และจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ คือ จุด (p_x^f, p_y^f) รวมทั้งมีความสัดส่วนของเร็ว V และความเร่ง A คือ σ

มาเป็นอินพุตของพารามิเตอร์ s ที่เป็นอัตราส่วนของตำแหน่งกับระยะทางที่รถไถเคลื่อนที่เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่เป็นตำแหน่งในพิกัด x, y ของรถไถ

2.4.2 การเคลื่อนที่ของรถไถในแนวเส้นโค้ง



ภาพประกอบ 28 ไดอะแกรมการเคลื่อนที่ในแนวเส้นโค้ง

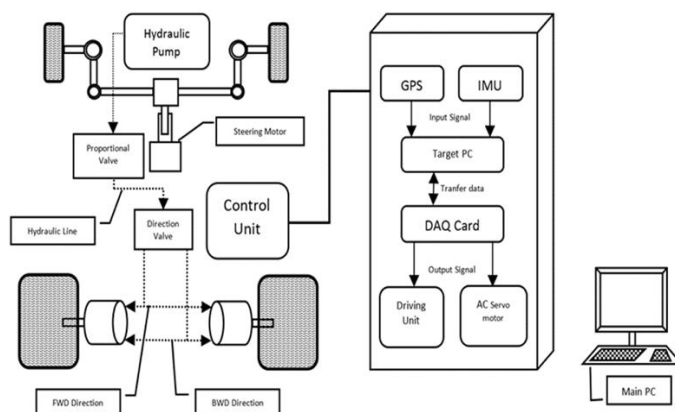
ในการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้งนั้นได้ใช้โปรแกรมMATLAB/Simulink โดยการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นเริ่มต้นโดยการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น (a_x, a_y) จุดกึ่งกลางรัศมีความโค้ง (b_x, b_y) จุดสิ้นสุดของเส้นโค้ง (c_x, c_y) และ ความเร็วในการเคลื่อนที่เข้าโค้งและออกจากโค้ง (v_1, v_2) ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นค่าอินพุตของเวกเตอร์ทิศทาง $(K_{AB}^{x,y}), (K_{BC}^{x,y})$ และผลต่างของเวลา Δt เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่เป็นตำแหน่งในพิกัด x, y ของรถไถ

3. โครงสร้างและอุปกรณ์ต่างๆ ของรถไถสำหรับการทำงานจริง



ภาพประกอบ 29 รถไถที่ใช้ในการทำงานจริง

ลักษณะโครงสร้างของรถไถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ คือ ส่วนของตัวรถไถ (Tractor) และ ส่วนของระบบควบคุม (Controller) ดังภาพประกอบ 30 โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้



ภาพประกอบ 30 แผนผังส่วนประกอบการทำงานของรถไถ

3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 มอเตอร์ไฮดรอลิก (Hydraulic motor) (DONGGUAN BLINCE MACHINERY AND ELECTRONICS CO., 2015) มอเตอร์ไฮดรอลิกเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนกำลังงานไฮดรอลิกให้เป็นกำลังกล สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น Blince omr 315 มีอัตราการไหล 75 (L/min) มีแรงดันสูงสุดที่ 17.5 (MPa) มีแรงบิดสูงสุดที่ 650 (Nm) มีความเร็วรอบใช้งานที่ 190 รอบต่อนาที



ภาพประกอบ 31 มอเตอร์ไฮดรอลิก (DONGGUAN BLINCE MACHINERY AND ELECTRONICS CO., 2015)

3.1.2 วาล์วแบบสัดส่วน (Proportional Valve) (SOLTECH, 2015) มีหน้าที่ในการใช้งานเพื่อ เพิ่มหรือลดแรงดัน (Pressure) และ อัตราการไหล (Flow) ของน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับการควบคุมแรงบิดและความเร็วของล้อให้ได้ตามต้องการโดย วาล์วแบบสัดส่วน สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น HNC: EDG 01 H ซึ่ง ควบคุมแรงดันได้ระหว่าง 0-250 บาร์ โดยรับค่าอินพุต เป็นกระแสไฟฟ้าระหว่าง 0-1000 มิลลิแอมป์



ภาพประกอบ 32 วาล์วแบบสัดส่วน

3.1.3. ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) (นิวแอนด์ไฮ, 2015) ปั๊มไฮดรอลิกมีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจากการหมุนซึ่งขับเคลื่อนโดยเครื่องยนต์เป็นแรงดันน้ำมันไฮดรอลิกเข้าสู่วงจรไฮดรอลิกโดยตรงซึ่งมีหน้าที่สร้างแรงดัน เพื่อส่งน้ำมันไฮดรอลิกไปยังวาล์วแบบสัดส่วน สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น HONOR 2series – 04 สามารถสร้างแรงดันใช้งานได้ที่ 250 บาร์ และ สามารถสร้างแรงดันสูงสุดที่ 300 บาร์ และมีอัตราการไหลที่ 4 ลูกบาศก์เซนติเมตร/รอบ



ภาพประกอบ 33 ปั๊มไฮดรอลิก

3.1.4 วาล์วสลับทิศทางการไหล (Direction Control Valve) (Flu-tech co., 2015) มีหน้าที่สลับทิศทางการไหลของน้ำมันไฮดรอลิก โดยมีผลทำให้ควบคุมทิศทางการขับของรถไถให้เคลื่อนเดินหน้าหรือถอยหลังได้สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น TAICIN :KS0-602-6608-C ซึ่งเป็น วาล์วแบบ 4/3 สั่งการทำงานด้วยโซลินอยด์ที่มีแรงดันไฟฟ้า แบบ AC – 220 โวลต์



ภาพประกอบ 34 วาล์วสลับทิศทางการไหล

3.1.5. การ์ดควบคุมการทำงานของวาล์วสัดส่วน (Proportional Valve Control Board) (Hydro-tech, 2015) ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อแปลง แรงดันทางไฟฟ้าให้เป็น กระแสไฟฟ้า สำหรับนำไปควบคุมการทำงานของ วาล์วสัดส่วน สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น HNC-

4010 P/F โดยรับแรงดันทางไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0-9 โวลต์ และส่งกระแสไฟฟ้าไปใช้งานที่ 0-850 มิลลิแอมป์ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าเลี้ยงวงจร 40 โวลต์



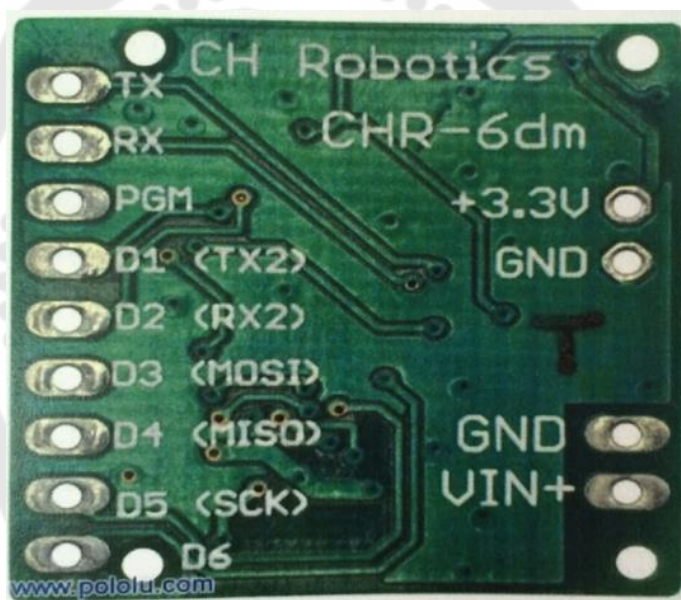
ภาพประกอบ 35 การ์ดควบคุมการทำงานของวาล์วสัดส่วน

3.1.6. เกียร์ทด (Gearbox) (MOTOVARIO, 2015) มีหน้าที่มีหน้าที่หลัก คือส่งต่อกำลังจากเซอร์โวมอเตอร์ไปยังเพลลาขับล้อ เพื่อ เปลี่ยนอัตราทดให้มีแรงบิดเพิ่มขึ้น สำหรับช่วยแรงในการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของล้อหน้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้เกียร์ทดของบริษัท Haitec รุ่น NMRV 050-20958 ซึ่งมีอัตราทดเพียงที่ 80:1 รอบ



ภาพประกอบ 36 เกียร์ทด

3.1.7. เซ็นเซอร์ไอเอ็มยู รุ่น Polulu CHR-6dm (CHRobotics, 2015) เป็นโมดูลที่รวมความสามารถของอุปกรณ์ 3 ตัวมารวมไว้ด้วยกัน คือ เซ็นเซอร์วัดความเร็ว (Accelerometer) เซ็นเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) และเข็มทิศ (Compass) สามารถวัดค่าได้ สาม แกนคือ X,Y,Z สัญญาณความถี่ที่ 300 Mhz มีระบบ EKF (Extended Kalman Filter) ในตัว เชื่อมต่อกันผ่าน UART ใช้กระแสในการเลี้ยงวงจร 3.3V เป็นเซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้มาก



ภาพประกอบ 37 เซ็นเซอร์ไอเอ็มยู (CHRobotics, 2015)

3.1.8. ตัวระบุตำแหน่งของรถไถ (GPS) (GARMIN, 2009) เป็นของบริษัท Garmin รุ่น GPS 72S โดยมีรายละเอียดคุณลักษณะคือ มีจำนวนช่องรับสัญญาณ 12 ช่อง แบบ High sensitivity GPS receiver by SiRF โดยที่ มีความคลาดเคลื่อนของการหาตำแหน่งไม่มากกว่า 10 เมตร RMS และสามารถแสดงตำแหน่งพิกัดทั้งระบบพิกัด UTM และ Latitude/Longitude อีกทั้ง แสดงค่าพิกัดบน Datum สากล (WGS84) และ Datum ที่ใช้กับประเทศไทยได้



ภาพประกอบ 38 ตัวระบุตำแหน่งของรถไถ

3.1.9. การ์ด DAQ (data acquisition) (National Instruments, 2015) เป็นของบริษัท NI รุ่น CB-68LPR มีหน้าที่เชื่อมต่อโปรแกรม LabVIEW กับฮาร์ดแวร์ภายนอกสามารถทำได้ผ่านทางการ์ด DAQ (data acquisition) การเชื่อมต่อสามารถเชื่อมต่อกับพอร์ต(Port) ได้หลายชนิด เช่น พอร์ตขนาน (Parallel Port), พอร์ตอนุกรม (serial port), GPIB, และHPIBเป็นต้น โดยมีคุณสมบัติให้เป็นบอร์ดแบบภายนอกเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางบอร์ดหลัก (Mainboard) มีจำนวนอินพุต-เอาต์พุต 64 ช่อง (channel) อินพุตทำงานได้ทั้งโหมดดิจิทัลอินพุตและอนาลอกอินพุต สำหรับเอาต์พุตกำหนด ให้เป็นแบบดิจิทัลเอาต์พุต ออกแบบให้สร้างง่ายและต้นทุนต้องไม่สูงมากจนเกินไป



ภาพประกอบ 39 การ์ด DAQ (National Instruments, 2015)

3.1.10. เอซี เซอร์โว มอเตอร์ (AC Servo Motor) (Panasonic, 2009) โดยลักษณะของ เอซี เซอร์โว มอเตอร์ ที่ใช้ในการควบคุมรถไถนั้นจะใช้โหมดการควบคุมอัตราเร็ว (Velocity Control Mode) โดย สำหรับงานวิจัยนี้ใช้รุ่น Panasonic Minas A5II MSMJ042G1U ซึ่งมี

คุณสมบัติความทนทานสูงโดยมี อินพุตเป็น แรงดันทางไฟฟ้า ± 10 โวลต์ และกระแส 2.6 แอมป์ มีความละเอียดของเอ็นโค้ดเดอร์ 20 บิตต่อการหมุน 1 รอบ มีความเร็วสูงสุด 3,000 รอบ/นาที และมีการตอบสนองการสั่งงาน 2.0 KHz



ภาพประกอบ 40 เอซี เซอร์โว มอเตอร์ (Panasonic, 2009)

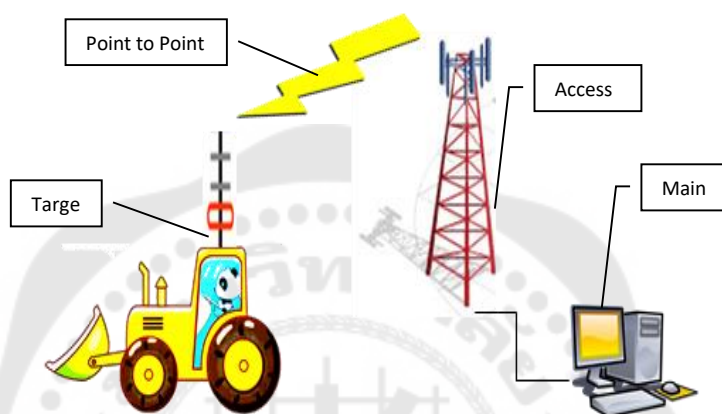
3.1.11 เสารับ-ส่งสัญญาณ (MyNetwork, 2013)เป็นของบริษัท Bullet รุ่น Bullet M2 ใช้สำหรับ รับ-ส่งสัญญาณของ Wifi Hotspot โดยจะเป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณระยะไกลโดยเมื่อมีกำลังส่ง 630 mw และเมื่อต่อกับเสาอากาศแล้ว จะทำหน้าที่เป็นจุดปล่อยสัญญาณ Hotspot หรือแบบ Point to Point และเมื่อต่อกับ Grid Antennas จะป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณระยะไกลได้



ภาพประกอบ 41 เสารับ-ส่งสัญญาณ เป็นของบริษัท Bullet รุ่น Bullet M2

3.2 ส่วนของตัวรถไถ (Tractor)

การที่จะทำให้รถไถนั้นสามารถ รับ-ส่ง ข้อมูลต่างๆที่ต้องการเช่น เส้นทางเคลื่อนที่ หรือ ตำแหน่งและมุม ของตัวรถไถเองในขณะที่ทำการติดตามเส้นทางนั้น สามารถทำได้โดย การ รับ-ส่ง สัญญาณแบบ Point to Point ดังแสดงในภาพประกอบ 41

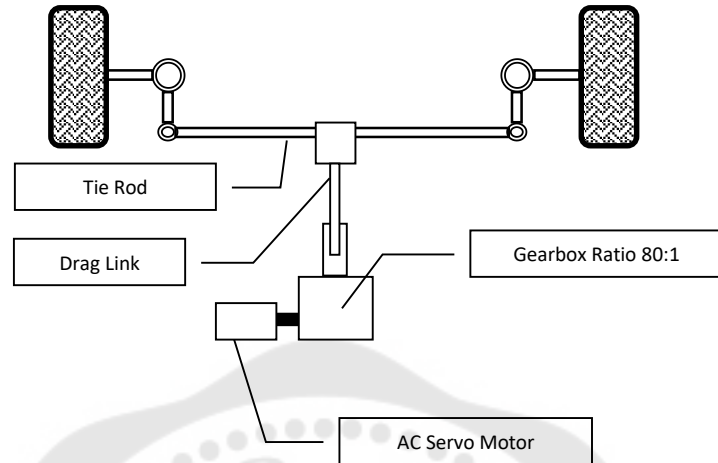


ภาพประกอบ 42 การรับส่งสัญญาณระหว่างคอมพิวเตอร์หลัก และ คอมพิวเตอร์เป้าหมาย

จากภาพประกอบ 42 แสดงถึงการทำงานของรถไถ โดยคอมพิวเตอร์หลัก และ คอมพิวเตอร์เป้าหมาย ผ่านตัวรับ-ส่งสัญญาณระยะไกลที่ทำหน้าที่เป็นจุดปล่อยสัญญาณแบบ Point to Point โดยคอมพิวเตอร์เป้าหมายจะรับข้อมูล จากอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS เพื่อเป็นเครื่องมือระบุตำแหน่งของรถไถในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ โดยการทำงานของอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS นั้นจะทำงานควบคู่ไปกับ เซ็นเซอร์IMU ที่นำมาประยุกต์ใช้งาน สำหรับควบคุมรถไถเพื่อเป็นเครื่องมือในการวัดค่ามุมยอ (yaw) ของรถไถ โดยทำหน้าที่บอกทิศทางของตัวรถในขณะนั้น ซึ่งจะแสดงผลเป็นมุมมองสามมิติเทียบกับทิศเหนือ เมื่อรู้ตำแหน่งและทิศทางของรถไถแล้วจะทำการส่งสัญญาณผ่านไปยังการ์ด DAQ (data acquisition) ซึ่งจะเชื่อมต่ออยู่กับอุปกรณ์ต่างๆ โดยการทำงานของ DAQ จะมีหน้าที่ วัดค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ต่างๆ แล้วจึงทำการวิเคราะห์และจัดเก็บ ข้อมูลไว้ในบอร์ดคอมพิวเตอร์เป้าหมาย เพื่อสร้างสัญญาณในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ บนรถไถ

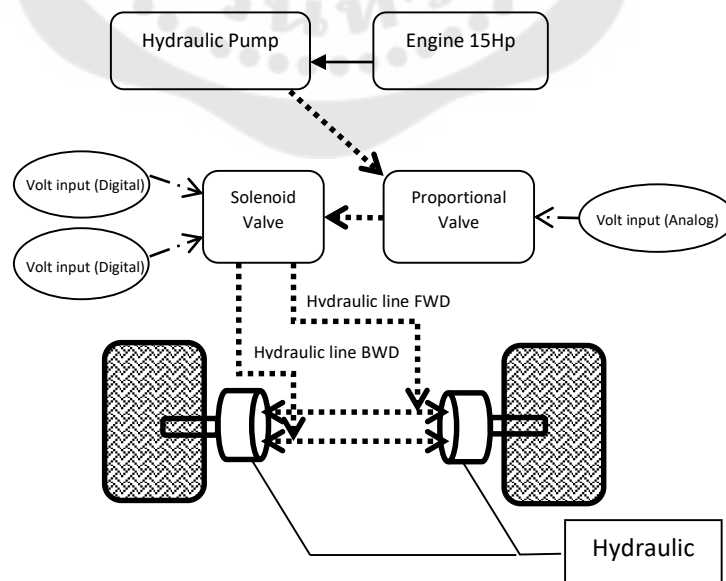
ในส่วนของระบบบังคับเลี้ยวนั้นใช้ AC Servo Motor ในลักษณะการควบคุมความเร็ว (velocity control) สำหรับควบคุมทิศทางของรถไถ โดยตัว AC Servo Motor จะรับค่าสัญญาณ

analog input ที่มีแรงดันทางไฟฟ้า ขนาด -10 v ถึง $+10\text{ v}$ เพื่อใช้เป็นต้นกำลังสำหรับส่งกำลังไปยังเกียร์ทดขนาด 80:10 สำหรับใช้ควบคุมทิศทางการรถไถ



ภาพประกอบ 43 ระบบบังคับเลี้ยวของรถไถอัตโนมัติ

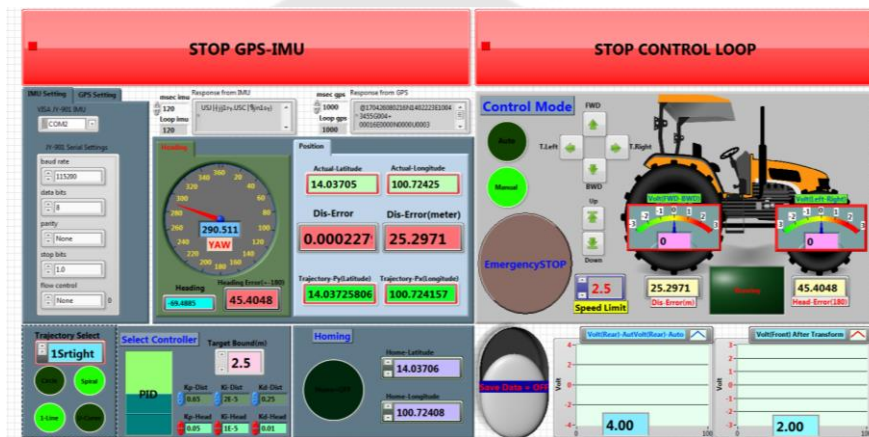
โดยในส่วนของระบบขับเคลื่อนมีลักษณะการขับเคลื่อนด้วยสองล้อหลัง โดยใช้ต้นกำลังเป็นเครื่องยนต์เบนซินขนาด 15 แรงม้า เพื่อขับ ปั๊มไฮดรอลิกส์ ที่มีหน้าที่สร้างแรงดัน สำหรับการส่งกำลังไปยังล้อขับเคลื่อน โดยมี Direction Valve 4/3 ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของล้อสำหรับเดินหน้าและถอยหลัง และมีการปรับความเร็วของล้อ ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับ Proportional Valve โดยมีค่าระหว่าง 0-9 โวลต์ สำหรับความเร็ว 0-2 m/s ตามภาพประกอบ 44



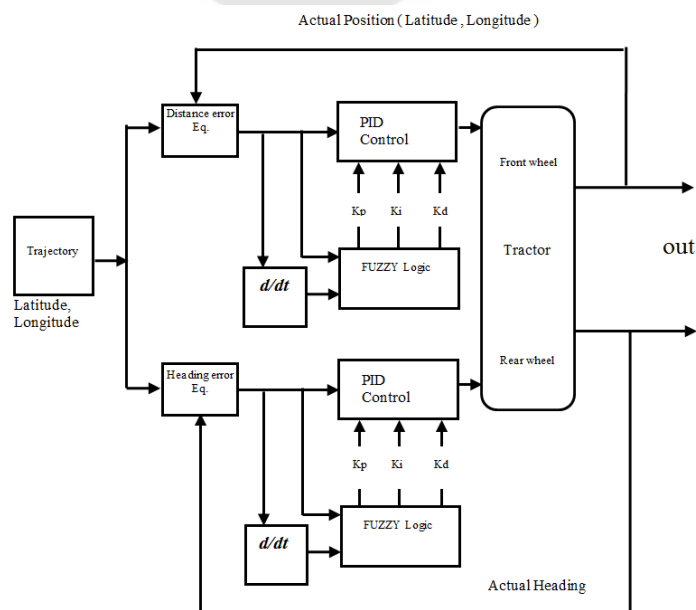
ภาพประกอบ 44 ระบบขับเคลื่อนของรถไถอัตโนมัติ

3.3 ส่วนของระบบควบคุม (The Controller)

ในส่วน of ระบบควบคุมนั้นจะใช้ โปรแกรม LabVIEW สำหรับการประมวลผลข้อมูล และรับส่งสัญญาณต่าง เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถให้สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดได้ โดยมีหน้าจอแสดงผล ระหว่างการทำงาน of รถไถตาม ภาพประกอบ 45 และมีไดอะแกรมการทำงานสำหรับการควบคุมรถไถตาม ภาพประกอบ 46

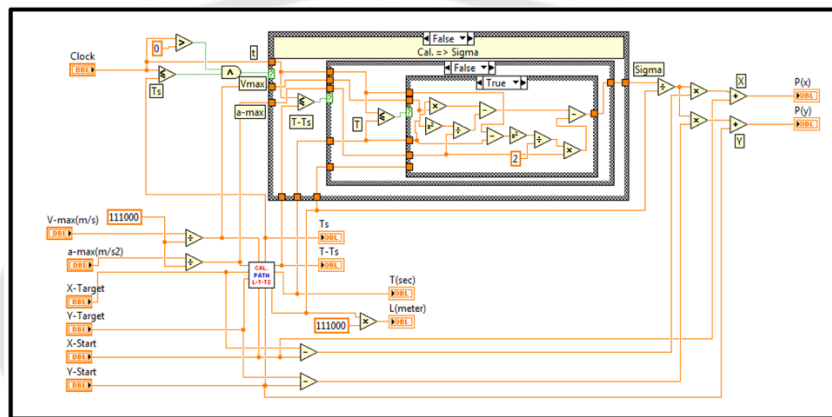


ภาพประกอบ 45 หน้าจอควบคุมและแสดงการทำงานของรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม LabVIEW



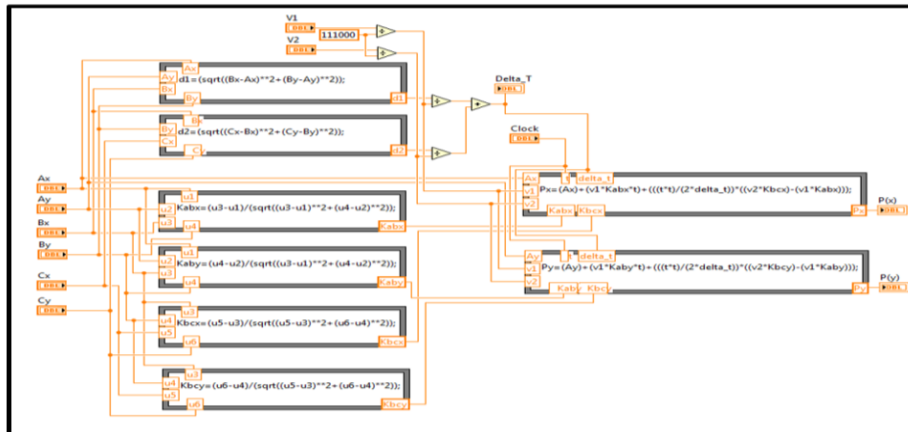
ภาพประกอบ 46 ไดอะแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของรถไถ
จาก ภาพประกอบ 46 แสดงการควบคุมและแสดงการทำงานของรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ
ด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยมีส่วนของการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีส่วนทำให้รถไถวิ่งไปยังตำแหน่ง
ที่ต้องการได้ดังนี้

3.3.1 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่



ภาพประกอบ 47 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงด้วยโปรแกรม LabVIEW

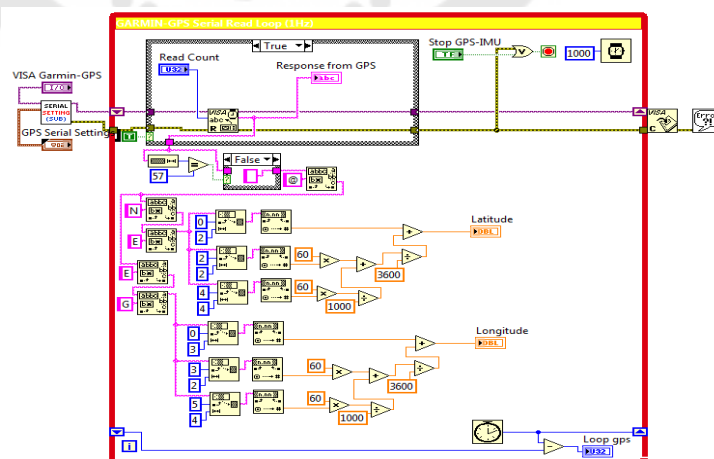
จาก ภาพประกอบ 47 เป็นการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยมี กำหนด
จุดเริ่มต้นในการเคลื่อนที่คือ X-Start ,Y-Start และจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ คือ X-Target, Y-Target
เพื่อเป็นข้อมูลส่วนอินพุตที่เราต้องการสำหรับส่งไปยังสมการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรง (ตาม
สมการที่ 2.1) โดยมีความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนที่ของเส้นทางการเคลื่อนที่เป็น V-max และ
A-max แล้วจึงทำการส่งเอาท์พุท (P(x), P(y)) เพื่อเป็นข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับการติดตาม
เส้นของรถไถ



ภาพประกอบ 48 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

จาก ภาพประกอบ 48 เป็นการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง โดยกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของเส้นโค้ง (Ax, AY) จุดกึ่งกลางรัศมีความโค้ง (Bx, By) และจุดสิ้นสุดของเส้นโค้งคือ (Cx, CY), เพื่อเป็นข้อมูลส่วนอินพุตที่เราต้องการสำหรับส่งไปยังสมการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นโค้ง (ตามสมการที่ 2.4) และ กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของเส้นโค้งในช่วงต้นจากจุด Ax, AY ถึงจุด Bx, By ให้เป็นความเร็วของเส้นโค้ง (V1) และกำหนดความเร็วในช่วงปลายของเส้นโค้งจากจุด Bx, By ถึงจุด Cx, Cy ให้เป็น (V2) ตามลำดับ

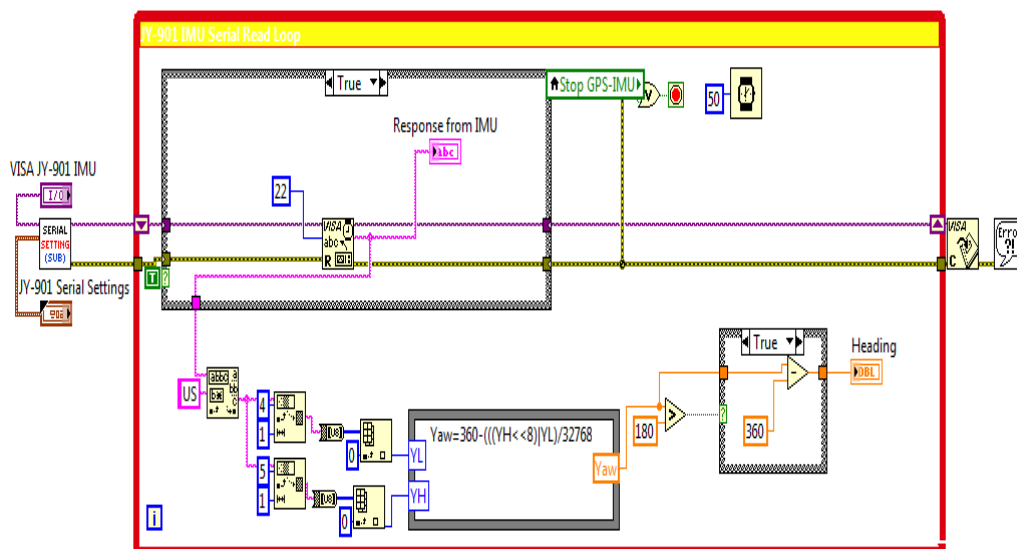
3.3.2 อุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS



ภาพประกอบ 49 การแปลงค่าสตริงจาก จีพีเอส ให้อยู่ในรูปแบบของตำแหน่ง Latitude และ Longitude

จากภาพประกอบ 49 การนำอุปกรณ์บอกตำแหน่ง (GPS) มาทำการบอกตำแหน่งของรถไถ ในขณะที่เคลื่อนที่ซึ่งคุณลักษณะของ GPS จะส่งสัญญาณเอาต์พุตมาในรูปแบบ กลุ่มอักขระหลายๆตัว นำมาเชื่อมต่อกันเป็นชุดข้อมูล (String) จากนั้นทำการตัดชุดข้อมูล String ให้เหลือแต่อักขระที่ใช้บอกตำแหน่งในลักษณะพิกัด องศา ลิปดา และ พิลิปดา (DMS) จึงจำเป็นต้องทำการแปลงค่าพิกัดให้อยู่ในลักษณะ Latitude และ Longitude เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับการบอกตำแหน่งของรถไถ ในขณะนั้น

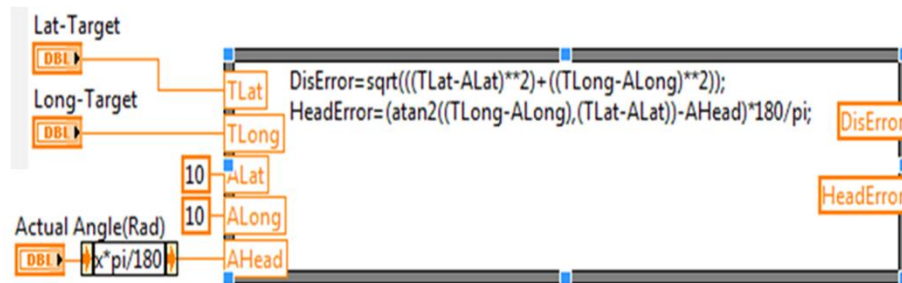
3.3.3 อุปกรณ์บอกมุมหันเห IMU



ภาพประกอบ 50 การแปลงค่าสตริงของไอเอ็มยูให้อยู่ในรูปแบบของมุม YAW ของรถไถ

จากภาพประกอบ 50 เป็นการนำอุปกรณ์บอกบอกทิศทาง เซนเซอร์ ไอเอ็มยู มาใช้งานเพื่อบอกทิศทางมุมยอ (YAW) ของรถไถในขณะที่เคลื่อนที่ โดยลักษณะของเอาต์พุตที่ได้มาจากเซนเซอร์ ไอเอ็มยู นั้นจะมาในรูปแบบ กลุ่มอักขระหลายๆตัว คล้ายกับอุปกรณ์บอกตำแหน่ง (GPS) โดยการตัดชุดข้อมูล String ให้เหลือแต่อักขระที่ใช้บอกมุมให้อยู่ในรูปแบบของหน่วยองศา (Degree) เพื่อใช้เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับการบอกองศาของรถไถในขณะนั้น

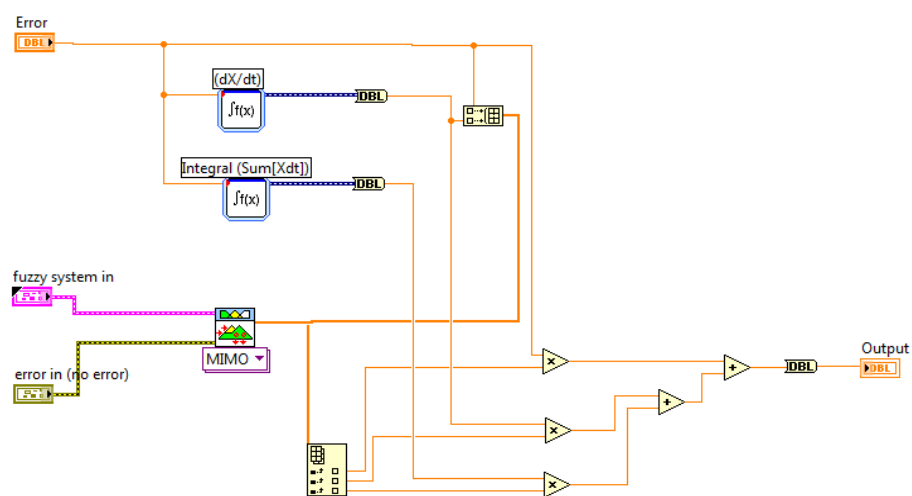
3.3.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไถ



ภาพประกอบ 51 การประเมินค่าความผิดพลาดที่เกิดระหว่างรถไถกับเส้นทางการเคลื่อนที่

จาก ภาพประกอบ 51 จะแบ่งชนิดของการควบคุมออกเป็นสองส่วนคือ การควบคุมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถ (Dis Error) และการควบคุมค่าความผิดพลาดของการหันเหรถไถ (Head Error) โดยใช้สมการที่ 3.11 และ 3.12 ซึ่งสมการทั้งสองจะทำการการรับข้อมูลอินพุตที่เป็นตำแหน่งและมุมหันเหของรถไถในขณะนั้นมาจากอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS และ เซนเซอร์ IMU แล้วจึงทำการประเมินค่าความผิดพลาดที่เกิดระหว่างรถไถกับเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อทำการส่งข้อมูลเอาต์พุตต่อไป

3.3.5 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดีด้วย LabVIEW (Fuzzy-PID Self Tuning)



ภาพประกอบ 52 ตัวควบคุมฟัซซี-พีไอดี ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LabView

จากภาพประกอบ 52 ตัวควบคุมพีซี-พีไอดี จะมีบล็อก (MIMO) ซึ่งมีหน้าที่ประมวลผลตามกฎของพีซีที่ได้กำหนดไว้ ตามตาราง 2 เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่เป็นข้อมูล Array ทั้งหมดสามชนิดสำหรับนำไปปรับค่าเกน (K_p , K_d , K_i) ของตัวควบคุม PID โดยที่ ตัวควบคุม พีไอดี จะรับค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่รถไถ (Dis Error) หรือ การหันเหรถไถ (Head Error) นำไปคูณกับข้อมูล Array ของ K_p เพื่อให้ได้เอาต์พุตในส่วนของ K_p และ นำค่าความผิดพลาดของรถไถจะมาทำการอนุพันธ์ $\left(\frac{dx}{dt}\right)$ แล้วจึงนำไปคูณกับค่าข้อมูล Array ของ K_d เพื่อให้ได้เอาต์พุตในส่วนของ K_d และ นำค่าความผิดพลาดของรถไถจะมาทำการปริพันธ์ $\left(\int \frac{dx}{dt}\right)$ แล้วจึงนำไปคูณกับค่าข้อมูล Array ของ K_i เพื่อให้ได้เอาต์พุตในส่วนของ K_i

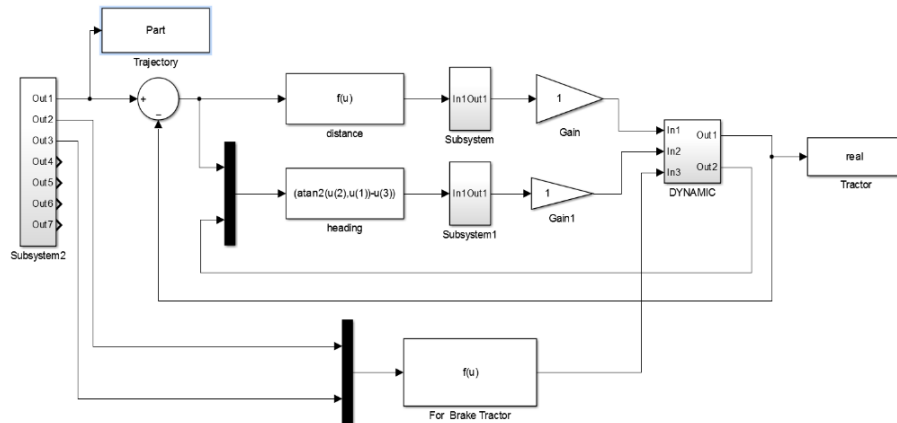


บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์

1. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถไถในส่วนของการจำลองการเคลื่อนที่เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

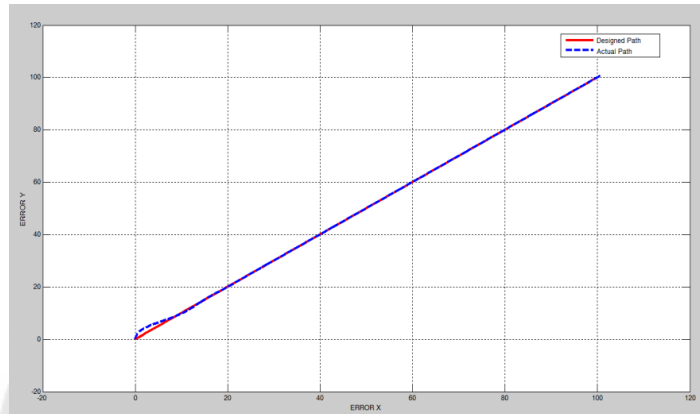
ในการทดลองได้จำลองโมเดลพลศาสตร์ศาสตร์ของรถไถตามสมการที่ (3.4) ถึง (3.6) ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และทำการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy-พีไอดีภาพประกอบ 53 ในการจำลองรถไถได้กำหนดให้ค่าระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังเท่ากับ 1 เมตร ได้มีการกำหนดความเร็วและความเร่งสูงสุดในการเคลื่อนที่ของรถไถที่ 1 m/s และ 1 m/s^2 ตามลำดับโดยมีการกำหนดตัวแปรต่างๆ ของรถไถดังตาราง 1 และมีการกำหนดเงื่อนไขฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyตามตาราง 2 ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง 2. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง 3. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและเส้นโค้ง



ภาพประกอบ 53 แบบจำลองโมเดลจลนศาสตร์และตัวควบคุมของรถไถด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

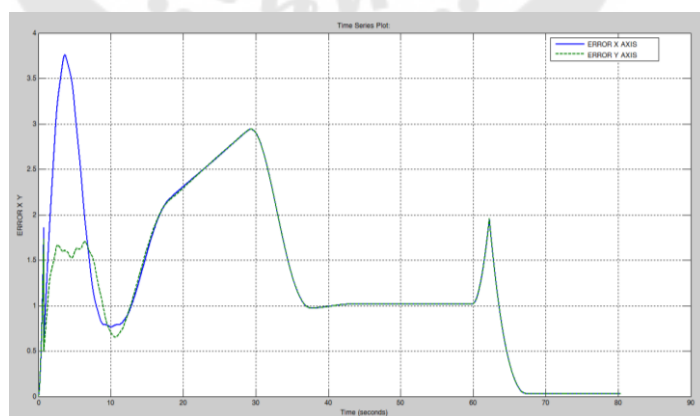
1.1 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง (เส้นทึบสีแดง) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (0,0) และมีจุดสิ้นสุดอยู่ที่พิกัด (100,100) โดยที่รถไถมีมุมหันเหเริ่มต้นของรถไถ $\theta = 0$ องศาเมื่อเทียบกับแกน Y โดยผลการทดลองได้แสดงตามภาพประกอบ 54 และ 55



ภาพประกอบ 54 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

ในภาพประกอบ 54 แสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถ (เส้นปะสีน้ำเงิน) กับเส้นทางเดินแบบเส้นตรงที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถไถสามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดให้ได้โดยเกิดความผิดพลาดเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการติดตามเส้นเนื่องจากมุมหันเหเริ่มต้นของตัวรถไถอยู่ที่ $\theta = 0$ องศาเทียบกับแกน Y

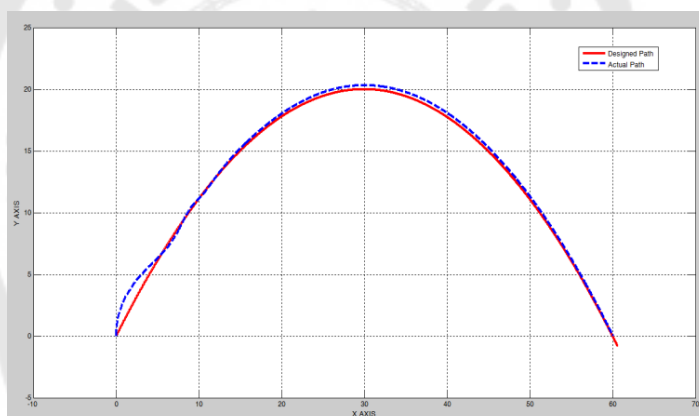


ภาพประกอบ 55 ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถเป็นเส้นตรงในแนวแกน X และ Y

ในภาพประกอบ 55 แสดงผลการเคลื่อนที่ของรถไถในการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง ในแนวแกน X,Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดความผิดพลาดทางด้านระยะทางระหว่างรถไถและเส้นทางการเคลื่อนที่เนื่องจากผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ที่กำหนดให้รถไถในตาราง 1 โดยมีค่าความผิดพลาดทางด้านระยะทางในแนวแกน X,Y สูงสุดอยู่ที่ 3.75 เมตรที่เวลา 3.67 วินาที และ 2.94 เมตร ที่เวลา 29.4 วินาทีตามลำดับ

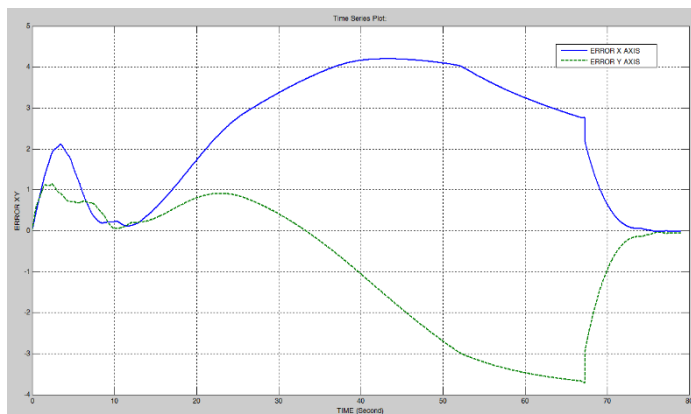
1.2 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นโค้ง (เส้นทึบสีแดง) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (0,0) มีจุดกึ่งกลางความโค้งอยู่ที่พิกัด (30,20) และมีจุดสิ้นสุดอยู่ที่พิกัด (60,0) โดยที่รถไถมีมุมหันเหเริ่มต้นของรถไถ $\theta = 0$ องศาเมื่อเทียบกับแกน Y โดยผลการทดลองได้แสดงตามภาพประกอบ 56 และ 57



ภาพประกอบ 56 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

ในภาพประกอบ 56 แสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถ (เส้นปะสีน้ำเงิน) กับเส้นทางเดินแบบเส้นตรงที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถไถสามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดให้ได้โดยเกิดความผิดพลาดเล็กน้อยในช่วงเริ่มต้นของการติดตามเส้นเนื่องจากมุมหันเหเริ่มต้นของตัวรถไถอยู่ที่ $\theta = 0$ องศาเทียบกับแกน Y

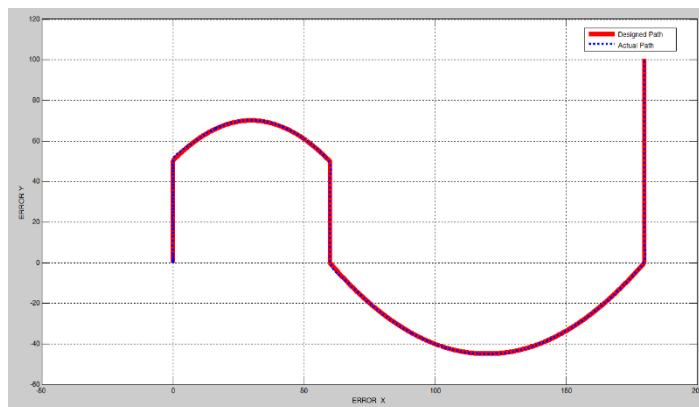


ภาพประกอบ 57 ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถเป็นเส้นโค้งในแนวแกน X และ Y

ในภาพประกอบ 57 แสดงผลการเคลื่อนที่ของรถไถในการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง ในแนวแกน X,Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดความผิดพลาดทางด้านระยะทางระหว่างรถไถและเส้นทางการเคลื่อนที่เนื่องจากผลกระทบจากตัวแปรต่างๆที่กำหนดให้รถไถในตาราง 1 โดยมีค่าความผิดพลาดทางด้านระยะทางในแนวแกน X,Y สูงสุดอยู่ที่ 4.19 เมตรที่เวลา 42.9 วินาที และ -3.72 เมตร ที่เวลา 67.3 วินาทีตามลำดับ

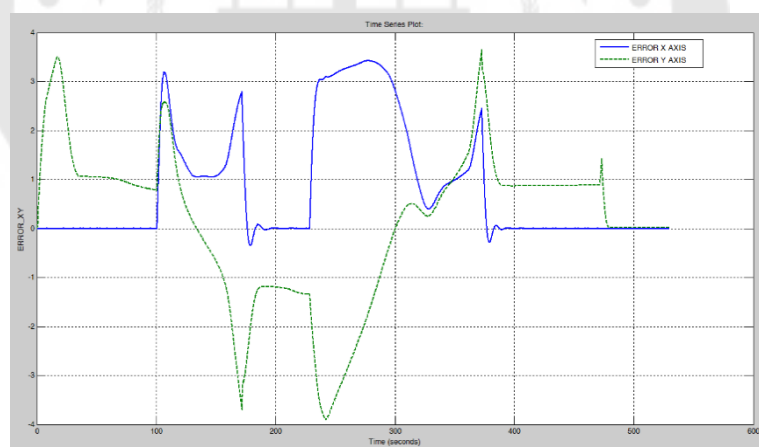
1.3 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง

ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเป็นเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งคล้ายรูปตัว (N) (เส้นที่สีแดง) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่พิกัด (0,0) และมีจุดสิ้นสุดอยู่ที่พิกัด (180,0) โดยที่รถไถมีมุมหันเหเริ่มต้นของรถไถ $\theta = 0$ องศาเมื่อเทียบกับแกน Y โดยผลการทดลองได้แสดงตามภาพประกอบ 58 และ 59



ภาพประกอบ 58 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง

ในภาพประกอบ 58 แสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถ (เส้นปะสีน้ำเงิน) กับเส้นทางเดินแบบเส้นตรงที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารถไถสามารถติดตามเส้นทางที่กำหนดให้ได้โดยไม่เกิดความผิดพลาดในช่วงเริ่มต้นของการติดตามเส้นเนื่องจากมุมหันเหเริ่มต้นของตัวรถไถอยู่ที่ $\theta = 0$ องศาเทียบกับแกน Y



ภาพประกอบ 59 ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งตัวเอ็น (N) ในแนวแกน X และ Y

ในภาพประกอบ 59 แสดงผลการเคลื่อนที่ของรถไถในการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้งตัวเอ็น (N) ในแนวแกน X,Y ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดความผิดพลาดทางด้านระยะทางระหว่างรถไถและเส้นทางการเคลื่อนที่เนื่องจากผลกระทบจากตัวแปรต่างๆที่กำหนดให้รถไถในตาราง 1 โดยมีค่าความผิดพลาดทางด้านระยะทางในแนวแกน X,Y สูงสุดอยู่ที่ 3.405 เมตรที่เวลา 282.4 วินาที และ -3.905 เมตร ที่เวลา 242.1 วินาทีตามลำดับ

2. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถไถในส่วนของการติดตามเส้นในส่วนจของรถไถจริง

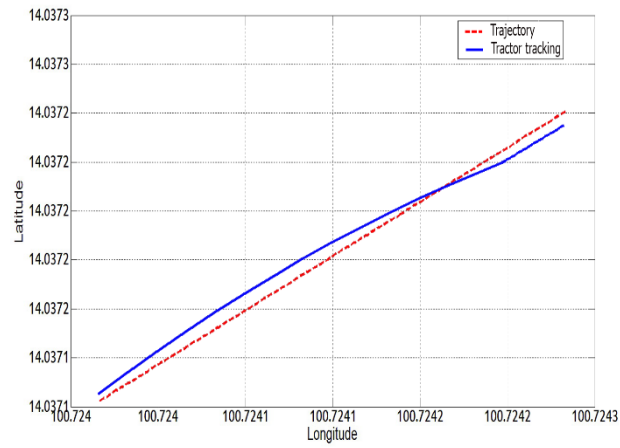
ในการทดลองการเคลื่อนที่ติดตามเส้นของรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับ PID-FUZZY Self-Tuning นั้น ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 แบบ คือ 1. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง 2. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง 3. ควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงและเส้นโค้งต่อกัน โดยในการทดลองการติดตามเส้นทั้ง 3 แบบ โดยกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ 2.5 Volt เพื่อให้รถไถมีความเร็วสูงสุดที่ 1 เมตรต่อวินาที โดยมีผลการทดลองดังนี้

2.1 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

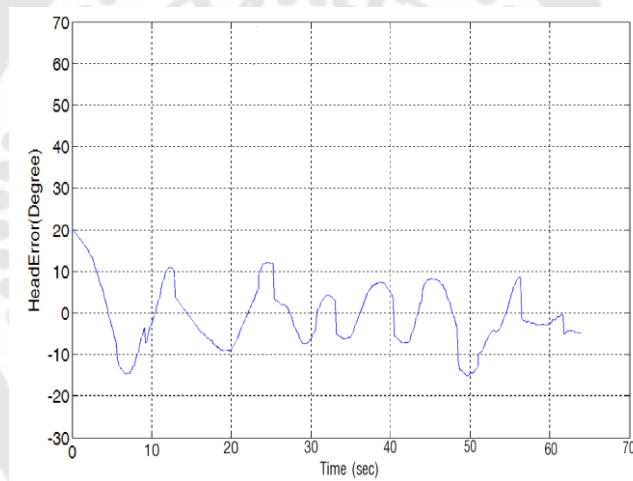
ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง 14.0371 Latitude, 100.724 Longitude และจุดสิ้นสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 14.0372 Latitude, 100.7243 Longitude ดังแสดงในภาพประกอบ 60



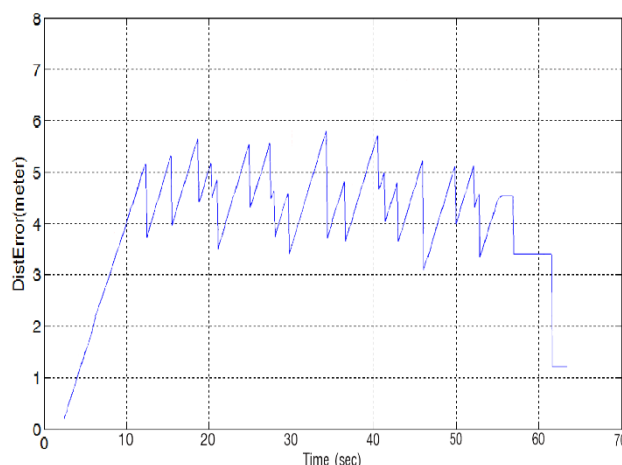
ภาพประกอบ 60 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรง



ภาพประกอบ 61 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นตรง



ภาพประกอบ 62 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนองมุมรถไถขณะติดตามเส้นตรง
(Heading Error)



ภาพประกอบ 63 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถในขณะที่ติดตามเส้นตรง
(Distance Error)

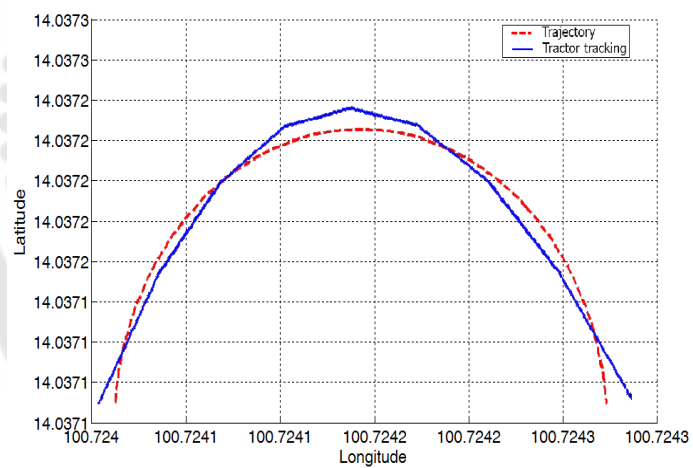
ภาพประกอบ 61 แสดงตำแหน่งเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) และ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นของรถไถ (เส้นทึบสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนั้นสามารถ ควบคุมรถไถติดตามเส้นไปในทิศทางที่กำหนดที่กำหนดให้ได้เป็นที่น่าพอใจโดยมีค่าผิดพลาดของ ตำแหน่งเล็กน้อยเนื่องจากความล่าช้าในการในการบอกตำแหน่ง และ ความแม่นยำในการบอก ตำแหน่งของรถไถจากอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 62 จะเห็นได้ว่า ค่า Heading error ของรถไถที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ ฟัชซี-พีไอดี มีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ ระหว่าง -14 ถึง 13 องศา และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 63 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของ ระยะทาง (Distance error) ระหว่างความเร็วในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และความเร็วของรถไถ ในการติดตามเส้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 5.9 เมตรที่เวลา 34 วินาที

2.2 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง

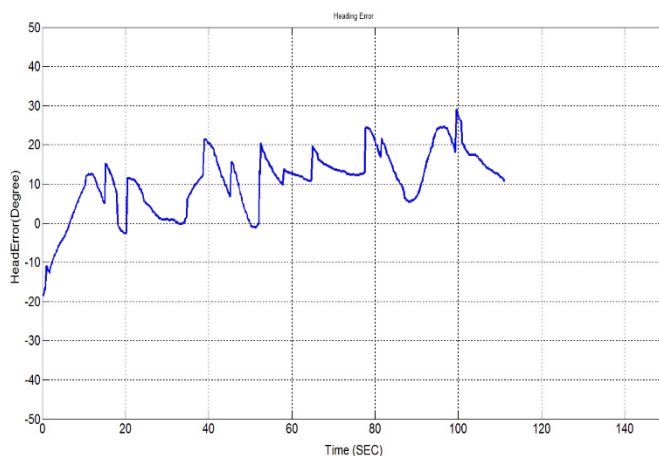
ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ ตำแหน่ง 14.0371 Latitude, 100.724 Longitude มีจุดกึ่งกลางโค้งอยู่ที่ 14.0372 Latitude, 100.7242 Longitude และจุดสิ้นสุดเส้นโค้งอยู่ที่ตำแหน่ง 14.0371 Latitude, 100.7243 Longitude ดังแสดงในภาพประกอบ 64



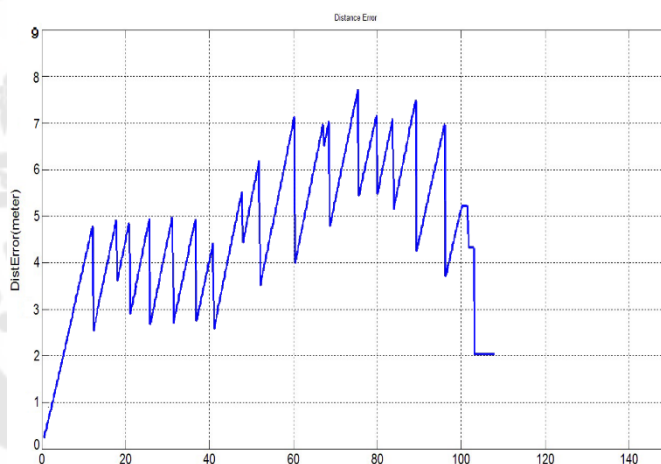
ภาพประกอบ 64 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นโค้ง



ภาพประกอบ 65 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นโค้ง



ภาพประกอบ 66 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไถขณะติดตามเส้นโค้ง
(Heading Error)



ภาพประกอบ 67 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถขณะติดตามเส้นโค้ง
(Distance Error)

ภาพประกอบ 65 แสดงตำแหน่งเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นของรถไถ (เส้นทึบสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนั้นสามารถควบคุมรถไถติดตามเส้นไปในทิศทางที่กำหนดที่กำหนดให้ได้เป็นที่น่าพอใจโดยมีค่าผิดพลาดของตำแหน่งเล็กน้อยเนื่องมาจากความล่าช้าในการบอกตำแหน่ง และ ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของรถไถจากอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 66 จะเห็นได้ว่าค่า Heading error ของรถไถที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ ฟัชซี-พีไอดี มีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่

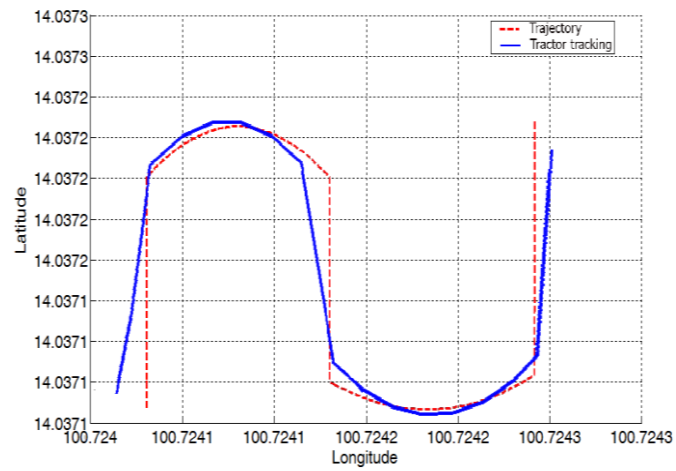
ระหว่าง -4 ถึง 29 องศา และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 67 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของระยะทาง (Distance error) ระหว่างความเร็วในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และความเร็วของรถไถในการติดตามเส้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 7.8 เมตรที่เวลา 76 วินาที

2.3 ผลการทดลองควบคุมตำแหน่งของรถไถให้ติดตามเส้นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง

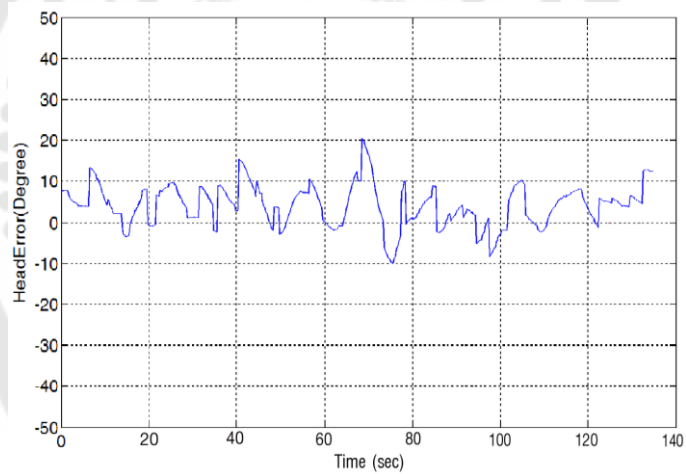
ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้เส้นการเคลื่อนที่เป็นแบบเส้นตรง ซึ่งมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ตำแหน่ง 14.0371 Latitude, 100.724 Longitude และจุดสิ้นสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 14.0372 Latitude, 100.7243 Longitude ดังแสดงในภาพประกอบ 68



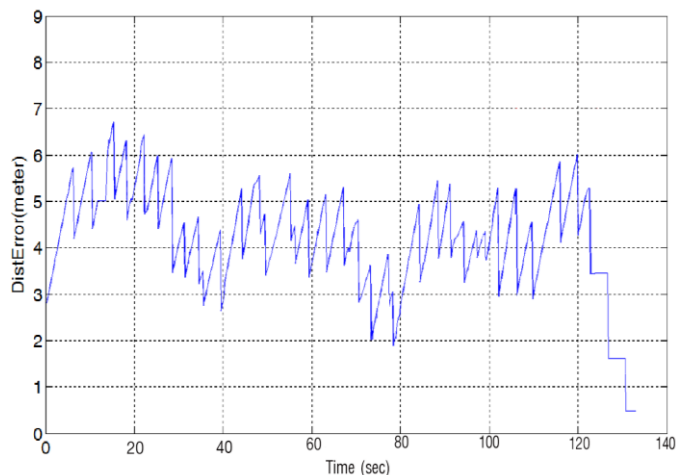
ภาพประกอบ 68 เส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง (N)



ภาพประกอบ 69 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถไถแบบเป็นเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง(N)



ภาพประกอบ 70 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไถขณะติดตามเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง (N)
(Heading Error)



ภาพประกอบ 71 ผลของค่าความผิดพลาดในส่วนระยะทางของรถไถในขณะที่ติดตามเส้นตรงต่อกับ
เส้นโค้ง (N) (Distance Error)

ภาพประกอบ 69 แสดงตำแหน่งเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้กำหนดขึ้น (เส้นทึบสีแดง) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ติดตามเส้นของรถไถ (เส้นทึบสีน้ำเงิน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมนั้นสามารถควบคุมรถไถติดตามเส้นไปในทิศทางที่กำหนดที่กำหนดให้ได้เป็นที่น่าพอใจโดยมีค่าผิดพลาดของตำแหน่งเล็กน้อยเนื่องมาจากความล่าช้าในการบอกตำแหน่ง และ ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของรถไถจากอุปกรณ์บอกตำแหน่ง GPS และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 70 จะเห็นได้ว่าค่า Heading error ของรถไถที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ ฟิชชี-พีไอดี มีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง -28 ถึง 23 องศา และเมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 71 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของระยะทาง (Distance error) ระหว่างความเร็วในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่และความเร็วของรถไถในการติดตามเส้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 6.8 เมตรที่เวลา 14 วินาที

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมกับการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่บนระบบพิกัดฉาก โดยเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับการทดลองมี 3 แบบ คือ เส้นตรงเส้นโค้ง, และ เส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง สำหรับตัวควบคุมที่ใช้คือ ตัวควบคุมแบบฟuzzy-พีไอดีแบบปรับตัวได้ (Fuzzy-PID Self Tuning) โดยมีลูบการควบคุม 2 ลูบ คือ ลูบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และลูบควบคุมมุมหันเหของรถไถ โดยผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1.1 ผลการทดลองในส่วนของการจำลองการเคลื่อนที่ของรถไถ (Simulation)

โดยในการทดลองนั้นใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการทำงานจริงของรถไถ โดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมฟuzzy-พีไอดีแบบปรับตัวได้มีความสามารถที่จะควบคุมให้รถไถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดทั้งสามแบบได้ แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้สูงในการที่จะนำระบบการเคลื่อนที่ของรถไถ และ อัลกอริทึมของตัวควบคุมฟuzzy-พีไอดีแบบปรับตัวได้ มาใช้สำหรับการควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับในส่วนของรถไถจริงได้ โดยจะเห็นได้ว่าขณะที่รถไถเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางนั้น (ภาพประกอบ 56 ภาพประกอบ 58 ภาพประกอบ 60) รถไถมีค่าความผิดพลาดจากผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่กำหนดไว้ในสมการพลศาสตร์ของรถไถ จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดระหว่างรถไถและเส้นทางการเคลื่อนที่ กล่าวคือรถไถเคลื่อนที่ช้ากว่าเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยในการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง โดยมีค่าความผิดพลาดทางด้านระยะทางในแนวแกน X,Y สูงสุดอยู่ที่ 3.75 เมตรที่เวลา 3.67 วินาที และ 2.94 เมตร ที่เวลา 29.4 วินาที ตามลำดับ มีค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้งสูงสุดอยู่ที่ 4.19 เมตรที่เวลา 42.9 วินาที และ -3.72 เมตร ที่เวลา 67.3 วินาทีตามลำดับ และ มีค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงต่อกับเส้นโค้ง สูงสุดอยู่ที่ 3.405 เมตรที่เวลา 282.4 วินาที และ -3.905 เมตร ที่เวลา 242.1 วินาทีตามลำดับ

1.2 ผลการทดลองในส่วนของการควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับในส่วนของรถไถ

จริง

โดยในการทดลองนั้นใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับทำการรับส่งข้อมูลของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการแสดงผลข้อมูลสถานะของบนรถไถระหว่างทำการติดตามเส้นโดยผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมของตัวควบคุมฟuzzy-พีไอดีแบบปรับตัวได้ นั้นมีความสามารถเพียงพอที่จะนำมาควบคุมรถไถอัตโนมัติแบบไร้คนขับให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดทั้งสามแบบ

ให้เป็นที่น่าสนใจ โดยในส่วนของค่าความผิดพลาดของมุมรถไฟพบว่าว่าขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ตามเส้นตรงนั้น จะมีค่าความผิดพลาดในส่วนของมุมรถไฟสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง -14 ถึง 13 องศา ส่วนของค่าความผิดพลาดของมุมรถไฟขณะติดตามเส้นโค้งสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง -4 ถึง 29 องศา และ การเคลื่อนที่ในแบบเส้นตรงต่อกับโค้งนั้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง -28 ถึง 23 องศา และ ในส่วนของค่าความผิดพลาดของระยะทางของรถไฟพบว่าว่าขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ติดตามเส้นตรงนั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 5.9 เมตร ส่วนค่าความผิดพลาดของรถไฟขณะติดตามเส้นโค้งสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง 7.8 เมตร และ การเคลื่อนที่ในแบบเส้นตรงต่อกับโค้งนั้นมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง 6.8 เมตร โดยในส่วนของค่าความผิดพลาดของมุมรถไฟ (Heading Error) ที่เกิดขึ้นนั้นทางผู้ทำงานวิจัยมีความเห็นว่าเป็นผลมาจากความล่าช้า และ ความแม่นยำในการบอกตำแหน่งของรถไฟจากอุปกรณ์นำทาง (GPS) รวมถึงการหลวมคลอนกลไกและจุดหมุนต่างๆในบางจุดบนตัวรถไฟเอง และในส่วนของค่าความผิดพลาดของระยะทางของรถไฟ (Distance Error) ที่เกิดขึ้นนั้นทางผู้ทำงานวิจัยมีความเห็นว่าเป็นผลมาจากเฟืองโซ่สำหรับขับเคลื่อนมีระยะการหลวมคลอนและขนาดของถังเก็บน้ำมันไฮดรอลิกส์ มีขนาดเล็กเกินไปทำให้เกิดอาการน้ำมันเดือดในระบบส่งกำลังซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันในระบบขับเคลื่อนลดลงไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วของรถไฟได้ดีเท่าที่ควรกล่าวคือ (ไม่ช้าไปก็เร็วไป)

2. ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองได้แสดงให้เห็นว่าขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นยังมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นอยู่ โดยแบ่งค่าความผิดพลาดได้เป็น สองประเภทคือ ค่าความผิดพลาดของมุมรถไฟ (Heading Error) และ ค่าความผิดพลาดของระยะทางของรถไฟ (Distance Error) ซึ่งมีแนวทางในการลดค่าความผิดพลาดคือ การลดค่าความผิดพลาดของมุมรถไฟ ต้องลดการหลวมคลอนของกลไกและจุดหมุนต่างๆของระบบให้ได้มากที่สุดและควรเลือกใช้อุปกรณ์นำทาง (GPS) ที่มีความเร็วและความแม่นยำในการบอกตำแหน่งสูงกล่าวคือ (ยังมีความแม่นยำมากก็จะลดค่าผิดพลาดได้มากเช่นกัน) และ แนวทางในการลดค่าความผิดพลาดของระยะทางของรถไฟ คือ ต้องรักษาแรงดันของน้ำมันไฮดรอลิก ในระบบขับเคลื่อนให้คงที่ด้วยการเพิ่มปริมาณการบรรจุน้ำมันในระบบเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอาการน้ำมันไฮดรอลิก เดือดเป็นสาเหตุทำให้แรงดันในระบบตกแบบไม่พึงประสงค์ โดยการใช้ถังบรรจุน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งน้ำมัน ก็จะเป็นการช่วยลดค่าความผิดพลาดของระยะทางของรถไฟได้

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

P_i	=	จุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่ของรถไฟ
P_f	=	จุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของรถไฟ
P_s	=	ตำแหน่งสมการเส้นตรงของรถไฟ
S	=	สัดส่วนระหว่างตำแหน่งกับระยะทางการเคลื่อนที่ของรถไฟ
σ	=	การเคลื่อนที่ของรถไฟในฟังก์ชันของเวลา
ℓ	=	ระยะทางที่รถไฟเคลื่อนที่
t	=	เวลาในการเคลื่อนที่ของรถไฟ
v_{\max}	=	ความเร็วสูงสุด m/s
a_{\max}	=	ความเร่งสูงสุด m/s^2
A'	=	จุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง
B	=	จุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง
d_1, d_2	=	ระยะของเส้นตรงที่สัมผัสกับเส้นโค้ง
$p(t)$	=	สมการเส้นโค้งหลัก
V_1	=	ความเร็วบนเส้นตรง AB
V_2	=	ความเร็วบนเส้นโค้ง BC
Δt	=	ผลต่างการเปลี่ยนแปลงของเวลา
K_{AB}	=	เวกเตอร์หน่วยของเส้นตรง AB
K_{BC}	=	เวกเตอร์หน่วยของเส้นตรง BC
A, B, C	=	ตำแหน่งบนเส้นทางการเคลื่อนที่แบบเส้นโค้ง
e	=	ค่าความผิดพลาดของรถไฟ
\dot{e}	=	ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนแปลงไปของรถไฟ

สัญลักษณ์

Δk_p	=	อัตราขยายแบบสัดส่วนของตัวควบคุม PID
Δk_i	=	อัตราขยายแบบปริพันธ์ของตัวควบคุม PID
Δk_d	=	อัตราขยายแบบอนุพันธ์ของตัวควบคุม PID
NE	=	ตัวแปลทางภาษา Negative big
NM	=	ตัวแปลทางภาษา Negative medium
NS	=	ตัวแปลทางภาษา Negative small
ZE	=	ตัวแปลทางภาษา Zero
PS	=	ตัวแปลทางภาษา Positive small
PM	=	ตัวแปลทางภาษา Positive medium
PB	=	ตัวแปลทางภาษา Positive big
P	=	Positive
N	=	Negative
Z	=	Zero
m_p	=	มวลของรถไถ
m_w	=	มวลล้อรถไถ
I_w	=	โมเมนต์ความเฉื่อยล้อรถไถ
I_p	=	โมเมนต์ความเฉื่อยรถไถ
L_r	=	ระยะจากศูนย์ล้อถึงจุด cg รถไถ
W	=	ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อซ้ายและล้อขวา
L	=	ระยะจากล้อถึงจุดศูนย์กลางระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง
Y	=	เอาต์พุตของการทำดีฟัซซี่พีเคชั่น
M_n	=	เอาต์พุตของกำการทำฟัซซี่
y_n	=	ค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่
x, y	=	ตำแหน่งของล้อหลังในพิกัดฉาก ของการทำคิเนแมติกในโมเดล
x_f, y_f	=	ตำแหน่งของล้อหน้าในพิกัดฉาก ของการทำคิเนแมติกในโมเดล

สัญลักษณ์

θ	=	การหักเหของรถไฟเมื่อเทียบกับแนก x ของการทำคเนเมติกส์โมเดล
ϕ	=	มุมเลี้ยวของล้อหน้า
v_1	=	ความเร็วของล้อขับเคลื่อน
v_2	=	ความเร็วในการปรับมุมเลี้ยวของล้อหน้า
τ	=	ทอร์คอินพุตของรถไฟ
E	=	พลังงานจลน์ของระบบ
ω	=	มุมของล้อขับเคลื่อน
E_p	=	พลังงานจลน์ของตัวรถ
E_{fw}	=	พลังงานจลน์ของล้อหน้า
E_{rw}	=	พลังงานจลน์ของล้อหลัง
x_p, y_p	=	ความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดฉากของรถไฟ(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
x_r, y_r	=	ความเร็วเชิงเส้นในระบบพิกัดฉากของจุดศูนย์กลางมวลของรถไฟ(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
x_{fhw}, y_{fhw}	=	ความเร็วเชิงเส้นของล้อหน้าด้านขวาในพิกัดฉาก(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
x_{rhw}, y_{rhw}	=	ความเร็วเชิงเส้นของล้อหลังด้านขวาในพิกัดฉาก(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
x_{fhw}, y_{fhw}	=	ความเร็วเชิงเส้นของล้อหน้าด้านซ้ายในพิกัดฉาก(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
x_{lrw}, y_{lrw}	=	ความเร็วเชิงเส้นของล้อหลังด้านซ้ายในพิกัดฉาก(ในการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของรถไฟ)
S_q	=	เมทริกโมเมนต์ความเฉื่อย
V_m	=	เมทริกของความเร็วเข้าสู่จุดศูนย์กลางและความเร็วขณะรถไฟเบี่ยงเบน
Z_q	=	เมทริกของค่าอินพุต
τ_v	=	อินพุตแรงบิดในส่วนล้อขับเคลื่อน

สัญลักษณ์

τ_{σ}	=	อินพุตแรงบิดในส่วนล้อบังคับเลี้ยว
<i>Distance error</i>	=	ค่าความผิดพลาดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถไถ
<i>Heading error</i>	=	ค่าความผิดพลาดด้านมุมเลี้ยวของรถไถ
x_{ref}, y_{ref}	=	ตำแหน่งอ้างอิงการเคลื่อนที่ของรถไถ
$x_{act}, y_{act}, \theta_{act}$	=	ตำแหน่งและมุมหันเหจริงของรถไถ



บรรณานุกรม

- CHRobotics. (2015). user manual. CHR-6dm Attitude and Heading Reference System Product datasheet - Rev. 1.0, Preliminary. Retrieved from https://www.pololu.com/file/0J340/chr6dm_datasheet.pdf
- DONGGUAN BLINCE MACHINERY AND ELECTRONICS CO., L. (2015). Retrieved from https://blince.en.alibaba.com/product/60257733842220884339/apply_in_multiple_saw_slasher_BLINCE_OMR_375_oil_orbit_low_speed_hydrmotor.html
- Flu-tech co., l. (2015). solenoid valve. Retrieved from <http://www.flutech.co.th/?gclid=CN2XxvqC1dACFdeJaAodGxMFPw>
- Fuzzy Logic. (2014). Retrieved from <http://alaska.reru.ac.th/text/fuzzylogic.pdf>
- GARMIN. (2009). GPS 72H owner's manual. Retrieved from http://static.garmincdn.com/pumac/GPS72H_OwnersManual.pdf
- Huynh, V. T., Smith, R. N., Kwok, N. M., & Katupitiya, J. (2012). *A nonlinear PI and backstepping-based controller for tractor-steerable trailers influenced by slip*. Paper presented at the Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation RiverCentre, Saint Paul, Minnesota, USA.
- Hydro-tech. (2015). Hydro-tech hnc-4010 manual, Proportional electro-hydraulic valve HNC 4010 Digital adjuster. 187-189.
- Kim, J., Moon, H., Woo, H., Zhe, H., Kim, H., Kim, Y., & Kye, J. (2013). *Auto-guidance system for tillage tractor*. Paper presented at the Control, Automation and Systems (ICCAS), 2013 13th International Conference on, Korea.
- Kraisak Phothongkum, M. J. (2016). PID+FUZZY Design For Obstacle Avoidance Of Indoor Mobile Robots. *Journal Science and Technology, Narasuan University*, 24.
- Lo, C.-W., Wu, K.-L., Lin, Y.-C., & Liu, J.-S. (2014). An intelligent control system for mobile robot navigation tasks in surveillance. In *Robot Intelligence Technology and Applications 2* (pp. 449-462): Springer.
- Luca, A. D. (2015). Trajectory "planning a Cartesian space". *Dipartimento Di Ingegneria Informatica Automatica E Gesteonale Antonio Lubati*. Retrieved from

<https://www.dis.uniroma1.it>

Luca, A. D., Oriolo, G. and Samson, C. (1998). Robot Motion Planning and Control. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 229.

Martín, D., Guinea, D., García-Alegre, M., Villanueva, E., & Guinea, D. (2010). FUZZY STEERING CONTROL OF A HYDRAULIC TRACTOR AND LASER PERCEPTION IN OBSTACLE AVOIDANCE STRATEGIES. 349-356.

MOTOVARIO. (2015). Heart of motion , WORM GEAR REDUCERS, COMBINED AND WITH PRE-STAGE REDUCTION UNIT.

MyNetwork. (2013). วิธีการตั้งค่าอุปกรณ์ Ubiquiti ในโหมด Access Point. Retrieved from <http://mycreate95.blogspot.com/2013/03/ubiquiti-access-point.html>

National Instruments, N. P. (2015). Retrieved from <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-15>

O'Connor, M., Bell, T., Elkaim, G., & Parkinson, B. (2000). Automatic steering of farm vehicles using GPS. *Precision Agriculture*, 25(1-2), 53-66.

Panasonic, O. i. (2009). (overall) AC Servo motor and Driver MINAS A5 II/A5 series. Retrieved from https://industrial.panasonic.com/content/data/MT/PDF/manual/en/acs/minas-a5-2_manu_e.pdf

SOLTECH. (2015). PROPORTIONAL CONTROLS. Manual PROPORTIONAL ELECTRO-HYDRAULIC PILOT RELIEF VALVES. Retrieved from <http://www.soltech.com.tw/files/edg-v200902.pdf>

Xu, Q., Kan, J., Chen, S., & Yan, S. (August, 2014). Fuzzy PID based trajectory tracking control of mobile robot and its simulation in Simulink. *International Journal of Control and Automation*, 236-238.

Yeh, Y.-C., Li, T.-H. S., & Chen, C.-Y. (2009). Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control of Dynamic Model Based Car-Like Mobile Robot. *International Journal of Fuzzy Systems*, 11(4), 273-275.

ความรู้รอบตัวเกี่ยวกับประเทศไทย. (2558). ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของประเทศไทย. Retrieved from <http://www.xn12cg1cxchd0a2gzc1c5d5a.net/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%A8%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%A2/#Topic2>

ณรงค์ สหเมธาพัฒน์. (2558). โครเมลิออยด์ - คุณหมอบอก. Retrieved from

<http://www.dailynews.co.th/article/1490/172361>

นิวแอนดีไฮ. (2015). แอร์เทค ออโตไฮดรอส ดิสทริบิวเตอร์,ปั๊มไฮดรอลิก แบบเฟืองนอก Retrieved from

http://www.pneuhyd.co.th/hydraulic-pumps_%E0%B9%84%E0%B8%AE%E0%B8%94%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B8%9B%E0%B8%B1%E0%B9%8A%E0%B8%A1/hydraulic_gear_pump%E0%B8%9B%E0%B8%B1%E0%B9%8A%E0%B8%A1%E0%B9%84%E0%B8%AE%E0%B8%94%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%A5%E0%B8%B4%E0%B8%81%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B9%80%E0%B8%9F%E0%B8%B7%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B8%99%E0%B8%AD%E0%B8%81.html

ฟัชชีลอจิก Fuzzy Logic. (2015). Retrieved from <http://www.academia.edu/7750667/> บทที่18

ฟัชชีลอจิกFuzzyLogic

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. (2555). การแข่งขันรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติ. Retrieved from

http://www.research.doae.go.th/webphp/webmaster/filepdf_news/Precision%Faaming.pdf

สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. (2555). ระบบควบคุม Control Systems. 1-6.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวิชา อุปภัย
วัน เดือน ปี เกิด	31 ธันวาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2550 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม พ.ศ. 2555 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
ที่อยู่ปัจจุบัน	232 หมู่ 2 ถนน พุทรมลทลสาย1 เขต ตลิ่งชัน แขวง บางระมาด จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10170
ผลงานตีพิมพ์	วิชา อุปภัย, ประชา บุญยวานิชกุล, มนุศักดิ์ งานทอง. การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่อัตโนมัติของรถไถยนต์สำหรับควบคุมการติดตามเส้นวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ปีที่ 10 (ฉบับที่ 2) (ประจำเดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2558) เกรียงไกร เขมสิมวง, มนุศักดิ์ งานทอง, วิชา อุปภัย. การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถไถอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ ราชธานีวิชาการ ครั้งที่ 1. หน้า 319 - 330

Upaphai, W., Bunyawanicakul, P., & Janthong, M. (2017).

Trajectory Tracking Control Design for an Autonomous Tractor Using Fuzzy PID Controller. Journal of Agricultural Technology, 13(4), 501-519.

Upaphai, W., Bunyawanicakul, P., & Janthong, M. (2019). Design of Self-tuning Fuzzy PID Controllers for Position Tracking Control of Autonomous Agricultural Tractor. Pertanika Journal of Science & Technology, 27(1).