



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมยานพาหนะสองล้อด้วยตัวควบคุมฟัซซี่

Fuzzy Control of Two-Wheeled Vehicle

นามผู้วิจัย นายวัชรพล บิลหะยีหมัด

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต นัตร์รัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมยานพาหนะสองล้อด้วยตัวควบคุมฟัซซี่

Fuzzy Control of Two-Wheeled Vehicle

โดย

นายวัชรพล บิลหะยีหมัด

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วชิรพล บิลหะยีหมัด 2555: การควบคุมยานพาหนะสองล้อด้วยตัวควบคุมฟัซซี่
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 50 หน้า

การออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมการทรงตัวของพาหนะสองล้อในขณะหยุดนิ่ง และเมื่อเคลื่อนที่เป็นงานที่ซับซ้อนและท้าทาย โดยระบบพลศาสตร์ของยานพาหนะสองล้อมีความซับซ้อนเป็นระบบควบคุมแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุตและยังเป็นระบบแบบ Under-actuated จึงเป็นการยากที่จะออกแบบตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ให้มีประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุม

ในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยหลักการการออกแบบตัวควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control) เป็นการออกแบบโดยใช้เหตุผล ความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์ที่มีต่อการทำงานของระบบ และเป็นการควบคุมที่สามารถกำจัดสิ่งรบกวนระบบได้เป็นอย่างดี ทำงานได้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้นและระบบที่มีหลายสัญญาณป้อนเข้าและป้อนออก (multi-input multi-output) พาหนะสองล้อจะถูกสร้างขึ้น ซึ่งขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวตรวจจับ (sensor) ประเภทต่างๆ เพื่อประมวลสัญญาณย้อนกลับไปยังระบบควบคุม โดยระบบพาหนะสองล้อที่ควบคุมนี้ต้องการออกแบบให้ระบบมีการตอบสนองดี มีความไวของระบบเพียงพอ ความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวมีค่าต่ำ และสามารถทนทานต่อการรบกวนจากแรงภายนอกได้ จากการจำลองระบบและการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่สามารถรักษาเสถียรภาพของรถสองล้อ ขณะหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่และยังสามารถกำจัดสิ่งรบกวนจากภายนอกได้

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wacharapol Binhayihmat 2012: Fuzzy Control of Two-Wheeled Vehicle.

Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering,

Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor:

Assistant Professor Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 50 pages.

The design of two wheeled vehicle controller is complicate and challenge. The dynamic of two wheeled vehicle is a complicated, multi-input multi-output system, and it is under-actuated. Therefore it is difficult to develop the controller using a conventional controller

In this project we use fuzzy controller. The fuzzy controller is human reasoning by which we can control the system through our knowledge and experience of how the system works. Fuzzy controller can control nonlinear system, multi-input-multi output system, also fuzzy controller can reject plant output disturbance .The two wheeled vehicle consists of a aluminum platform, human, dc motor and several sensor that feedback output signal to the controller. We aim to design two wheeled vehicle that has good response, stability and robustness. Simulation and experimentation show that the fuzzy controller can stabilize the system, also can reject the disturbance due to external force.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิฑิต นัครัตน์กุลชัย ที่ได้ให้โอกาส ความรู้ ประสบการณ์ และคำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัยนี้ให้ประสบความสำเร็จไปด้วยอย่างดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและ ร่วมตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดที่ข้าพเจ้าได้เรียนมา

งานวิจัยนี้ได้ทำที่ห้อง ปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม (CRV Lab) ซึ่งตั้งอยู่ที่ ชั้น 9 อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 60 ปีมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสำหรับ โอกาส กำลังใจ และข้อคิดดีๆ จาก ครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคน

วัชรพล บิลหะยีหมัด

กรกฎาคม 2555

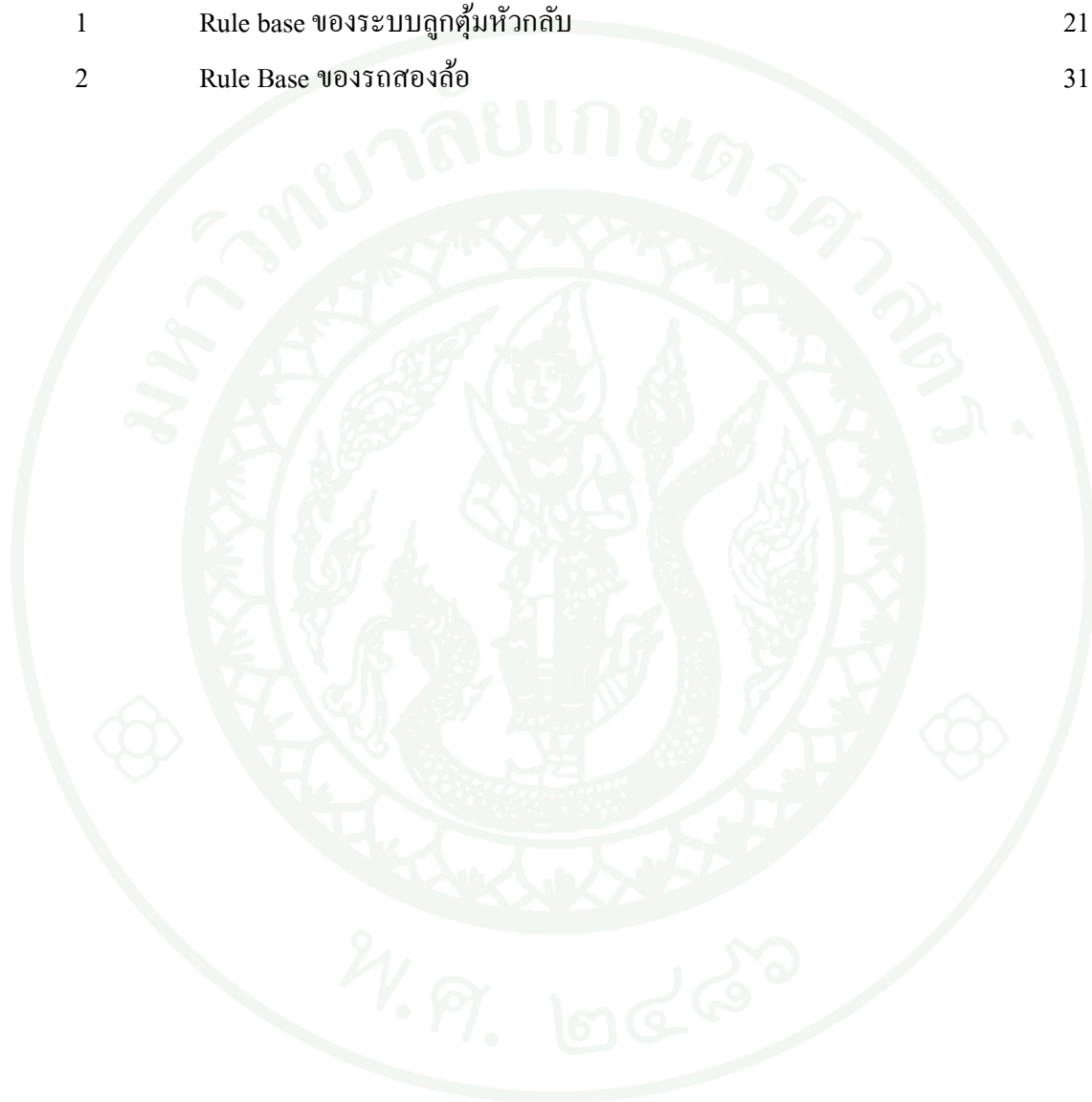
สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	9
อุปกรณ์	9
วิธีการ	12
ผลการทดลองและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	47
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	48
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	50

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	Rule base ของระบบลูกคู้มหัวกลับ	21
2	Rule Base ของรถสองล้อ	31



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การทดลองหุ่นยนต์สองล้อของ Shiroma <i>et al.</i>	3
2	หุ่นยนต์สองล้อ JOE: a mobile, inverted pendulum	4
3	พาหนะสองล้อ PMP-2 ของ Sasaki <i>et al.</i>	5
4	หุ่นยนต์สองล้อ ของ Chatrattanakulchai <i>et al.</i>	5
5	พาหนะสองล้อ ของ Ching - Chih Tsai <i>et al.</i>	6
6	รถสองล้อขนาดเล็ก	9
7	มอเตอร์กระแสตรงขนาด 250 watt 24volt	10
8	ตัวตรวจรู้วัดความเอียง (Inclinometer)	10
9	วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง	11
10	NI Single-Board RIO	11
11	แผนผังการต่อการทดลอง	12
12	Free body diagram ของรถสองล้อ	12
13	ตัวควบคุมฟัซซี่	20
14	สถานะต่างๆของลูกตุ้มหัวกลับ	21
15	Membership Function ของ possmall	22
16	แสดงรูปแบบต่างๆของ Membership Function	22
17	Membership Function สำหรับ crips set	23
18	Membership Function สำหรับระบบลูกตุ้มหัวกลับ	23
19	ไดอะแกรมแสดง กฎ(rule) ที่ทำงาน	24
20	$\mu_{premise}$ ของ single rule	25
21	Implied fuzzy set จาก rule 1	26
22	Implied fuzzy set จาก rule 2	27
23	COG method	28
24	การทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่	29
25	บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุม	30
26	Membership Function	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	Control surface	32
28	ระบบ inclinometer ชนิดลูกตุ้มภายใน	32
29	แสดงโครงสร้างระบบทดลอง	33
30	มุมเอียงที่ได้จาก Inclinometer และ Encoder	33
31	ความเร็วเชิงมุมจาก ไจโรสโคป และ Encoder	35
32	มุมเอียงจาก Encoder และจากอินทิเกรตสัญญาณไจโรสโคป	35
33	บล็อกไดอะแกรมการประมาณค่าสถานะ	36
34	แผนผังการต่อการทดลอง	39
35	มุมประมาณที่ความถี่ 0.5 Hz	39
36	มุมประมาณที่ความถี่ 1 Hz	40
37	มุมประมาณที่ความถี่ 1.5 Hz	40
38	ผลการจำลองระบบเมื่อให้มุมเริ่มต้นที่ค่า 10 องศา	41
39	ผลการจำลองตัวควบคุมรถสองล้อด้วย Matlab เมื่อมีสิ่งรบกวนระบบ	42
40	ผลการจำลองระบบเมื่อให้สิ่งรบกวนระบบเป็น Sine wave	43
41	การทรงตัวบนรถสองล้อ	44
42	มุมเอียงของรถสองล้อขณะทรงตัวอยู่กับที่	45
43	การเคลื่อนที่ไปข้างหน้า	46
44	การเคลื่อนที่เลี้ยวขวา	46

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T	คือ	พลังงานจลน์รวมของระบบ
τ	คือ	แรงบิด
U	คือ	พลังงานศักย์รวมของระบบ
q_i	คือ	ระบบพิกัด
Q_i	คือ	แรงในระบบพิกัดที่สนใจ
i	คือ	อันดับของระบบ
I_w	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ
I_b	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของคน
θ_w	คือ	มุมหมุนของล้อ
θ_b	คือ	มุมเอียงของคน
r_w	คือ	รัศมีล้อ
g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
m_b	คือ	มวลคน
m_w	คือ	มวลล้อ
$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$	คือ	การอนุพันธ์ตำแหน่งเทียบกับเวลา
b	คือ	สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ
u	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์
R_m	คือ	ความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์
k_b	คือ	ค่า Back Emf ของมอเตอร์
k_g	คือ	Gear ratio
k_m	คือ	Motor Torque Constant

การควบคุมยานพาหนะสองล้อด้วยตัวควบคุมฟัซซี่

Fuzzy Control of Two-Wheeled Vehicle

คำนำ

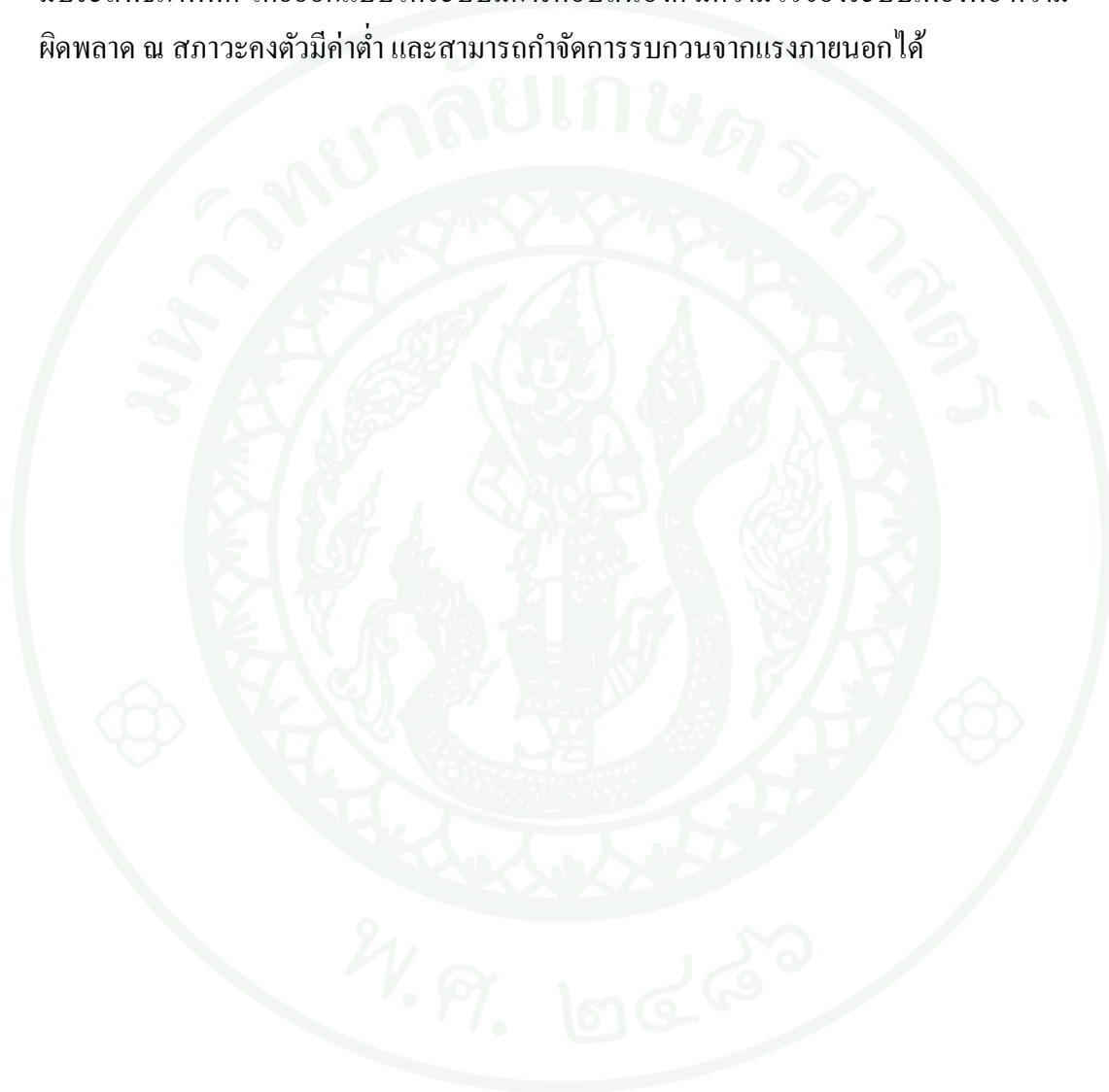
งานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์สองล้อมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการควบคุมการทรงตัวของยานพาหนะสองล้อ (two-wheeled) ที่มีลักษณะเป็นการทรงตัวประเภทลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว (inverted pendulum) และเป็นระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) งานวิจัยเหล่านี้ได้สร้างให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ถูกนำมาใช้งานจริง ได้แก่ ยานพาหนะสองล้อ SEGWAY ยานพาหนะเชิงพาณิชย์นี้นิยมในบางประเทศสำหรับการเดินทางในระยะใกล้หรือภายในบริเวณอาคารขนาดใหญ่ โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนจึงไม่ก่อเกิดมลพิษทางอากาศประกอบกับรูปทรงที่มีขนาดกะทัดรัดมีความคล่องตัวในการขับขี่ นอกจากนี้ยังถูกนำมาผลิตเป็นของเล่นวิทยุบังคับที่เป็นหุ่นยนต์สองล้อ

การออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมการทรงตัวของพาหนะสองล้อในขณะหยุดนิ่งและเมื่อเคลื่อนที่เป็นงานที่ซับซ้อนและท้าทาย โดยระบบพลศาสตร์ของยานพาหนะสองล้อที่ได้กล่าวแล้วว่าเป็นลูกตุ้มนาฬิกากลับหัวนั้นไม่สามารถใช้งานกับตัวควบคุมแบบดั้งเดิมได้ดี ในการออกแบบตัวควบคุมในงานวิจัยนี้จึงได้อาศัยหลักการการออกแบบตัวควบคุมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control) เป็นการออกแบบโดยใช้เหตุผล ความรู้และประสบการณ์ของมนุษย์ที่มีต่อการทำงาน of ระบบ และเป็นการควบคุมที่สามารถกำจัดสิ่งรบกวนระบบได้เป็นอย่างดี ทำงานได้กับระบบไม่เป็นเชิงเส้นและระบบที่มีหลายสัญญาณป้อนเข้าและป้อนออก (multi-input multi-output)

พาหนะสองล้อจะถูกสร้างขึ้น ซึ่งขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและตัวตรวจจับ (sensor) ประเภทต่างๆ เพื่อประมวลสัญญาณย้อนกลับไปยังระบบควบคุม โดยระบบพาหนะสองล้อที่ควบคุมนี้ต้องการออกแบบให้ระบบมีการตอบสนองดี มีความไวของระบบเพียงพอ ความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวมีค่าต่ำ และสามารถทนทานต่อการรบกวนจากแรงภายนอกได้

วัตถุประสงค์

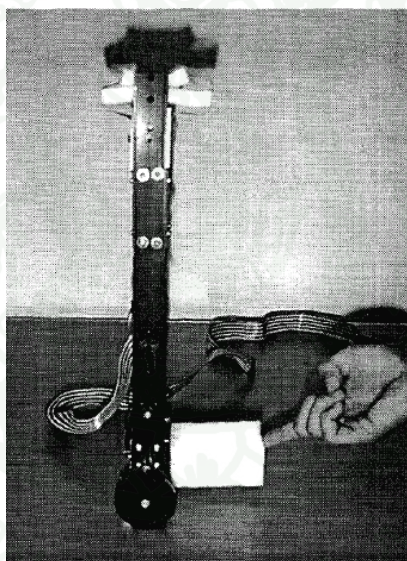
สร้างพหุชนะสองล้อและออกแบบระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีซี ในการพัฒนาตัวควบคุม สำหรับการควบคุมยานพาหนะสองล้อในการทรงตัวในขณะอยู่นิ่งและเคลื่อนที่และการบังคับเลี้ยว ให้มีประสิทธิภาพที่ดี โดยออกแบบให้ระบบมีการตอบสนองดี มีความไวของระบบเพียงพอ ความผิดพลาด ณ สภาวะคงตัวมีค่าต่ำ และสามารถกำจัดการรบกวนจากแรงภายนอกได้



การตรวจเอกสาร

ตรวจเอกสารเกี่ยวกับ Two-Wheeled Robot และ Two-Wheeled Vehicle

Shiroma *et al.* (1996) ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของหุ่นยนต์สองล้อที่เคลื่อนที่ร่วมกัน ตั้งแต่สองตัว เป็นการต่อยอดมาจากงานวิจัยเดิมสำหรับพฤติกรรมของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ร่วมกัน ของ Hashimoto and Oba (1993) ที่มีลักษณะเป็นรถสี่ล้อทำให้แรงภายนอกไม่ส่งผลต่อเสถียรภาพ แต่งานวิจัยเขานั้นพิจารณาความสมดุลของหุ่นยนต์สองล้อที่เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพจากแรงภายนอกสำหรับระบบเคลื่อนที่ร่วมกัน ใช้ระบบควบคุมจากการประมาณแรงภายนอกด้วยตัวสังเกต ในขณะที่ทรงตัวเพื่อชดเชยแรง จากการทดลองการประมาณแรงภายนอกสามารถทำให้ระบบทรงตัว และชดเชยแรงได้ และสามารถทำงานร่วมกันได้ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

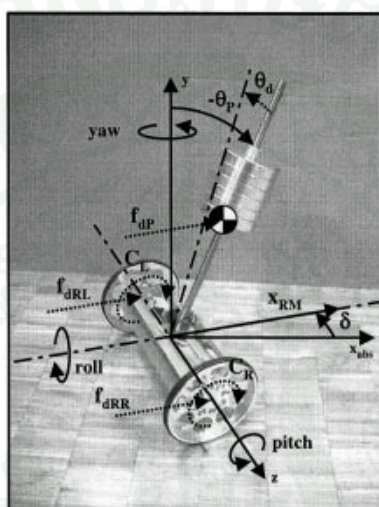


ภาพที่ 1 การทดลองหุ่นยนต์สองล้อของ Shiroma *et al.*

ที่มา: Shiroma *et al.* (1996)

Grasser *et al.* (2002) ได้ออกแบบหุ่นยนต์สองล้อดังภาพที่ 2 ขนาดความสูง 65 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 12 กิโลกรัม สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงสุด 1.5 เมตรต่อวินาที สามารถรักษาสมดุล และทนทานต่อแรงรบกวนภายนอกและตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงได้ โดย ได้กล่าวถึง

ปัญหาของ Planetary Gearbox ของมอเตอร์เมื่อ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ต่ำกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยล้อมากๆ สัญญาณรบกวนอาจจะทำให้เกิดการเสียหายกับมอเตอร์ได้ ซึ่งได้ แก้ไขด้วยการใช้ตัวกรองความถี่สูงที่ 10 เฮิร์ต ในการออกแบบนั้นเริ่มจากการสร้างสมการ คณิตศาสตร์จำลองพลศาสตร์ของระบบด้วยกฎข้อที่สองของนิวตันและประมาณระบบเป็นระบบ เชิงเส้นตรง จะได้สมการพลศาสตร์เป็นรูปแบบปริภูมิสถานะสองส่วน และออกแบบตัวควบคุมด้วย วิธีการวางโพลไว้หลายรูปแบบ ในแต่ละรูปแบบจะได้ผลตอบสนองดีในช่วงการทำงานแตกต่างกัน



ภาพที่ 2 หุ่นยนต์สองล้อคือ JOE: a mobile, inverted pendulum

ที่มา: Grasser *et al.* (2002)

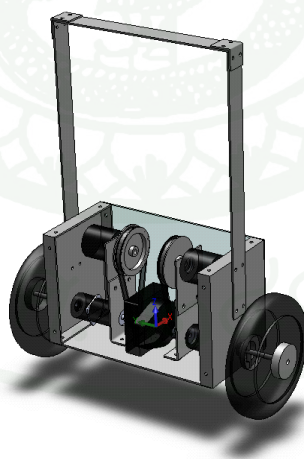
Sasaki *et al.* (2004) ได้ออกแบบและสร้างยานพนะสองล้อแบบไม่มีที่จับเป็นตัวต้นแบบ ตั้งชื่อว่า PMP-1 (Personal riding-type wheeled Mobile Platform) เป็นยานพนะสองล้อที่นำแนวคิดของลูกตุ้มหัวกลับมาใช้งาน ต้นแบบตัวแรกมีน้ำหนักประมาณ 36 กิโลกรัม สามารถวิ่งเดินหน้าและถอยหลังได้ เริ่มจากหาคณิตศาสตร์จำลองพลศาสตร์ของระบบด้วยกฎข้อที่สองของนิวตันและประมาณระบบเป็นระบบเชิงเส้นตรง จะได้สมการพลศาสตร์เป็นรูปแบบปริภูมิสถานะจากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีสเตป้อนกลับ ด้วยการวาง โพล เคลื่อนที่โดยการ โนม์เอียงของผู้ขับชี้ และในปีถัดมา Sasaki *et al.* (2005) ได้พัฒนาต้นแบบตัวที่สอง ชื่อ PMP-2 โดยได้ปรับปรุงโครงสร้างให้มีน้ำหนักเบาเพียง 12 กิโลกรัม และพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยว โดยใช้การถ่ายจุดศูนย์ถ่วงของผู้ขับชี้ และใช้ force sensor เป็นตัวตรวจรู้ที่พื้นรถ



ภาพที่ 3 พาหนะสองล้อ PMP-2 ของ Sasaki et al.

ที่มา: Sasaki et al. (2004)

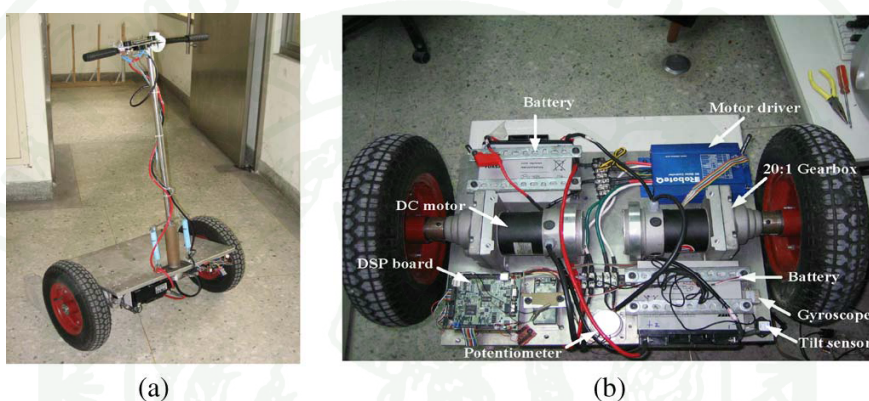
Chatlatanagulchai et al. (2008) ได้พัฒนาหุ่นยนต์สองล้อขนาดเล็ก สามารถเคลื่อนที่ เดินหน้า, ถอยหลัง และบังคับเลี้ยวได้ ตามสัญญาณอ้างอิง โดยเริ่มจากหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยวิธี ลากรานจ์ จากนั้นจัดรูปแบบเป็นปริภูมิสแตต ส่วนตัวควบคุมใช้วิธี LQR with Augment Integrators and Full-order Observer เป็นการควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด ที่มีตัวอินทิกรัล และใช้สเตป้อนกลับจากตัวสังเกตอันดับเต็ม ผลจากการทำSimulation และการทดลองจริงพบว่า หุ่นยนต์สามารถทรงตัวได้ดี และ สามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้



ภาพที่ 4 หุ่นยนต์สองล้อ ของ Chatlatanagulchai et al.

ที่มา: Chatlatanagulchai et al. (2008)

Ching-Chih *et al.* (2010) ได้พัฒนาพาหนะสองล้อ ใช้ชื่อว่า Self-Balancing Two-Wheeled Scooter โดยใช้เทคนิค Adaptive Neural Network Control ผลจากการทำ simulation เปรียบเทียบกับเทคนิค ปรภูมิสเตต ย้อนกลับ พบว่า เทคนิค Adaptive Neural Network Control สามารถตอบสนองได้รวดเร็วและเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วกว่า และจากการทดลองพบว่า ระบบสามารถรักษาสมดุลและตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามในอนาคตผู้วิจัยดังกล่าวได้เสนอให้ออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค Adaptive fuzzy controller สำหรับการวิ่งที่มีความเร็วสูง



ภาพที่ 5 พาหนะสองล้อ ของ Tsai *et al.* (a) ด้านหน้า. (b) ด้านล่าง

ที่มา: Ching-Chih *et al.* (2010)

ตรวจเอกสารเกี่ยวกับ Fuzzy Control

Kodagoda *et al.* (2002) ได้พัฒนาระบบควบคุมความเร็วและการบังคับเลี้ยว ของ AGV (autonomous guided vehicles) เป็นรถที่เคลื่อนที่ได้โดยอัตโนมัติ ประยุกต์ใช้ ตัวควบคุมฟัซซี่ กับ ระบบควบคุมรถ ระบบขับเคลื่อน ใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 2300 วัตต์ ควบคุมโดย ตัวควบคุมฟัซซี่ 2 อินพุตคือความเร็วและอินทิกัลของความเร็ว และ 1 เอาท์พุตคือ ความต่างศักย์ ที่จ่ายให้มอเตอร์ แต่ละอินพุตมี 11 linguistic value ทำให้มี rule base ทั้งหมด 121 rule ใช้ Triangular membership function ใช้ minimum operation เป็นตัวเชื่อม premise ใช้วิธี COG defuzzification ให้ effective universe of discourse เป็น $[-1 \ 1]$ ทำการทดลองเปรียบเทียบผลกับตัวควบคุม PID พบว่า ตัวควบคุมฟัซซี่ ให้ผลตอบสนองตามสัญญาณอ้างอิงได้ดีกว่า โดยมี rise time, over shoot และ steady state error น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ PID

Chatlatanagulchai *et al.* (2010) ได้ทำการวิจัยและพัฒนา ระบบควบคุม Common-Rail Pressure ในเครื่องยนต์ดีเซลที่ดัดแปลงเป็นเครื่องยนต์เชื้อเพลิงร่วมระหว่างก๊าซธรรมชาติ และ น้ำมันดีเซล โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซี่เรียนรู้ (Fuzzy Learning) ประกอบด้วยส่วนแรกคือตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรกติที่มี 2 อินพุต คือ error และ error integral ของ common rail pressure และมี 1 เอาท์พุตคือ feedback portion duty cycle แต่ละอินพุตประกอบด้วย 5 linguistic numeric value ทำให้มี rule base 25 rule ซึ่งออกแบบให้ ค่า Tracking error เข้าสู่อินพุต 0 ส่วนที่สองคือตัวควบคุมฟัซซี่เรียนรู้ มี 2 อินพุตคือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ และ IMEP (indicated mean effective pressure) มี 1 เอาท์พุต คือ feed-forward portion of duty cycle . เอาท์พุตจากตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรกติจะเป็นตัวปรับปรุงค่า membership function center ของตัวควบคุมแบบฟัซซี่เรียนรู้ เพื่อให้ได้เอาท์พุตเป็นค่า duty cycle ที่เหมาะสมที่จะลด Tracking error

Wang *et al.* (2010) ได้พัฒนาระบบควบคุม ลูกตุ้มนาฬิกาหัวกลับสองแกน ควบคุมโดยตัวควบคุมฟัซซี่ โดยใช้กฎของนิวตัน สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจัดให้อยู่ในรูปปริภูมิสแตต โดยมี 6 สแตต คือ ตำแหน่งและความเร็วของรถ, ตำแหน่งและความเร็วของมุมเอียงของลูกตุ้มตัวที่ 1, ตำแหน่งและความเร็วของลูกตุ้มตัวที่ 2 ดังนั้นจะทำให้ตัวควบคุมฟัซซี่มีอินพุตมากถึง 6 อินพุต Wang ได้กล่าวว่าเป็นการยากที่จะสร้าง rule base จากทั้งหมด 6 อินพุตนี้ จึงได้ใช้เทคนิค ฟิวชันฟังก์ชันที่ประกอบด้วยค่าอัตราขยายที่ได้จากวิธี Linear Quadratic Regulator ทำให้สามารถลดจำนวนอินพุตให้เหลือ 2 ตัวได้คือ error และ error rate ทำให้ง่ายแก่การออกแบบตัวควบคุม ผลจากการ Simulation แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมฟัซซี่ สามารถ รักษาเสถียรภาพ ของลูกตุ้มหัวกลับ 2 แกนไว้ได้อย่างดี

ตรวจเอกสารเกี่ยวกับการวัดมุมเอียง

Baerveldt and Klang (1996) ได้ออกแบบตัวตรวจรู้สำหรับวัดความเอียง โดยใช้หลักการของ Complementary Filter ระหว่างตัวตรวจรู้สองตัวคือ Pendulum Inclinator และ Rate Gyroscope โดยสามารถชดเชยการตอบสนองทางพลศาสตร์ที่ช้าของ Inclinator และการเบี่ยงเบนของสัญญาณของ Rate Gyroscope ได้ แต่พบว่าจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ Inclinator ด้วย First-Order Low-Pass filter ด้วยเวลาคงที่ ตัวตรวจรู้นี้จะตอบสนองต่อความถี่ได้ดีเฉพาะช่วง 0.15 ถึง 1.5 เฮิร์ต และต่อมา Rehbindler และ Hu (2004) พัฒนาการวัดความเอียงจาก Rate Gyroscope และ Accelerometer โดยอาศัย Switching State Estimators ที่สามารถแก้ปัญหาการ Drift ของสัญญาณ Rate Gyroscope ได้

Leavitt *et al.* (2006) ได้พัฒนาตัวตรวจรู้จาก Pendulum Inclinometer , Rate Gyroscope และ Accelerometer อาศัยความรู้ของ Linear optimal linear state estimator (Kalman filter) และจำลองสมการคณิตศาสตร์ของ Inclinometer เป็น Second-Order Transfer Function โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นได้มาจากการทดลองการจำลองการตอบสนองเชิงความถี่ วิธีการออกแบบตัวตรวจรู้ที่คล้ายเดิมคือ การจำกัด Gyro Bias ออก ตัวตรวจรู้ที่ถูกพัฒนาขึ้นนี้สามารถตอบสนองต่อแบนด์วิธสูงได้มากกว่า 4 เฮิรต ทั้งนี้ขึ้นกับความแม่นยำของแบบจำลอง Inclinometer และสามารถทำงานได้เมื่อระบบมีความเร่งในแนวแกนต่างๆ

Chatlatanagulchai *et al.* (2008) พัฒนาตัววัดมุมเอียง จาก Inclinometer และ Rate Gyroscope ทำ การสมการคณิตศาสตร์ ของ Inclinometer ในรูปปริภูมิสแตต และหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากวิธีพิสูจน์เอกลักษณ์จากนั้นใช้เทคนิค Luenberger observer เพื่อประมาณมุมเอียง ผลที่ได้สามารถตอบสนองความถี่ได้มากกว่า 2 เฮิรต

อุปกรณ์และวิธีการ

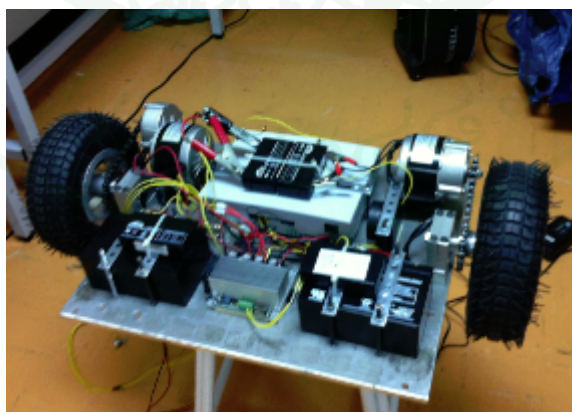
ในส่วนแรกจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมและวิธีการในการเชื่อมต่อข้อมูลในแต่ละอุปกรณ์ในระบบควบคุม สำหรับในส่วนที่สอง จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานพาหนะสองล้อ , การควบคุมแบบฟัซซี่

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของยานพาหนะสองล้อ

1. รถสองล้อ

ภาพที่ 6 แสดงถึงรถสองล้อขนาดเล็กที่ใช้ในห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่งระเหือน วัสดุโครงทำมาจากอลูมิเนียมทำให้น้ำหนักเบา ภายในหุ่นยนต์จะมีมอเตอร์กระแสตรงขนาด 250 watt ดังภาพที่ 7 จำนวน 2 ชุด ขับเคลื่อนโดย Motor driver ในภาพที่ 9 ขนาด 50Amp ยี่ห้อ Dimension Engineering เราใช้บอร์ดควบคุมของ NI ชนิด Single-Board RIO รุ่น sbRIO-9632 โดยใช้โซ่ขับล้อทั้งสองที่ทำงานอย่างอิสระต่อกันเพื่อควบคุมการทรงตัวและการเลี้ยวของรถสองล้อ



ภาพที่ 6 รถสองล้อขนาดเล็ก



ภาพที่ 7 มอเตอร์กระแสตรงขนาด 250 watt 24volt

2. ตัวตรวจรู้วัดความเอียง (Inclinometer)

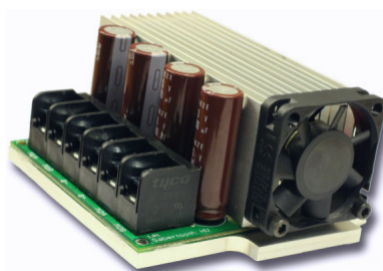
อุปกรณ์วัดมุมเอียงของของโครงหุ่นยนต์ลักษณะการทำงานเหมือน เอนโคเดอร์เช่น เซอร์ แต่อาศัยการแกว่งของลูกตุ้มที่อยู่ภายใน งานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจรู้ USDigital รุ่น EM1/HEDS T6 มีความละเอียดเท่ากับ 2500 ครั้งต่อรอบ (CPR)



ภาพที่ 8 ตัวตรวจรู้วัดความเอียง (Inclinometer)

3. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Motor Driver)

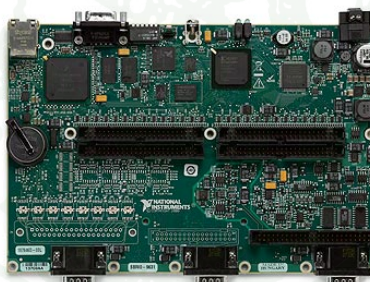
ใช้ของยี่ห้อ Dimension Engineering รุ่น Saber tooth 2X50 HV สามารถที่ขับมอเตอร์กระแสตรงได้ 2 ตัว Drive Motor โดยอุปกรณ์นี้ จะรับสัญญาณป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันต่ำ และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันที่สูงกว่า โดยใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังมอเตอร์กระแสตรงที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์



ภาพที่ 9 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

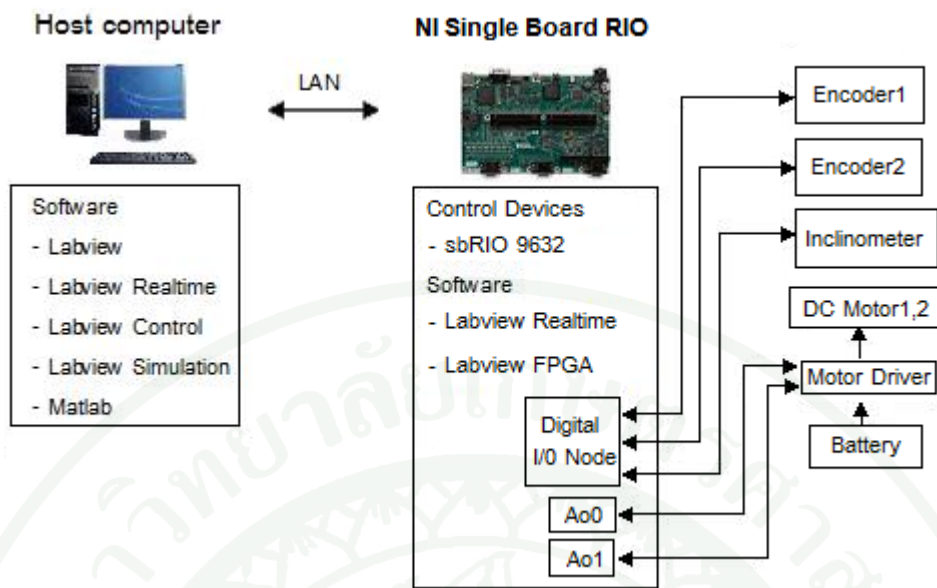
4. NI Single-Board RIO

ทำหน้าที่ เป็นอุปกรณ์ Embedded Control และ Acquisition สำหรับรถสองล้อ เราใช้รุ่น sbRIO-9632 มีโมดูล 16 บิต ADC , 16 บิต DAC และ 3.3v digital I/O รายละเอียดเพิ่มเติมที่ www.ni.com



ภาพที่ 10 NI Single-Board RIO

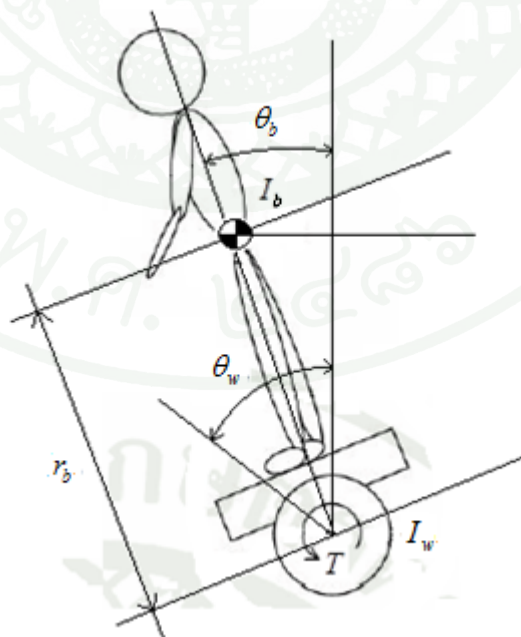
ภาพที่ 11 แสดงแผนผังการต่อการทดลอง ประกอบด้วย Host computer สำหรับเขียนโปรแกรมและบันทึกโปรแกรมลงในบอร์ดควบคุม NI Single Board RIO ซึ่งบอร์ดควบคุมจะรับสัญญาณจากตัวตรวจรู้ต่างๆ นำมาประมวลผล และส่งสัญญาณ ไปสั่ง Motor Driver เพื่อควบคุมรถสองล้อต่อไป



ภาพที่ 11 แผนผังการต่อการทดลอง

วิธีการ

สมการการเคลื่อนที่ของรถสองล้อ



ภาพที่ 12 Free body diagram ของรถสองล้อ

1. พลศาสตร์ลากรางจ์สำหรับหุ่นยนต์สองล้อ

วิธีการหาแบบจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้สมการลากรางจ์ จะคำนวณจากสมการพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ในรูปของตัวแปรพิกัด สมการลากรางจ์สำหรับหาแบบจำลองทางพลศาสตร์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

โดย T = พลังงานจลน์รวมของระบบ (Kinetic Energy)
 U = พลังงานศักย์รวมของระบบ (Potential Energy)
 q_i = ระบบพิกัด (generalized coordinates)
 Q_i = แรงในระบบพิกัดที่กำลังสนใจ (generalized force)
 i = อันดับของระบบ

พลังงานจลน์จากการเคลื่อนที่ T และพลังงานศักย์ U หาได้จากสมการ (2) และ (3)

$$T = \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_w^2 + \frac{1}{2} m_w r_w^2 \dot{\theta}_w^2 + \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_b^2 + \frac{1}{2} m_b (r_b \dot{\theta}_b + r_w \dot{\theta}_w)^2 \quad (2)$$

$$U = m_b g (r_b - r_b \cos \theta_b) \quad (3)$$

The work of the nonpotential force can be written as

$$\begin{aligned} dw_{np} &= \sum_{i=1}^n Q_i dq_i \\ &= Q_1 dq_1 + Q_2 dq_2 \\ &= 0 + (T d\theta_w - b \dot{\theta}_w d\theta_w) \\ &= (T - b \dot{\theta}_w) d\theta_w \end{aligned}$$

ให้ $q_1 = \theta_b$ และ $q_2 = \theta_w$

จากสมการที่ (2) และ(3) สำหรับ $i = 1$ เราจะได้

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_b} = I_b \dot{\theta}_b + m_b (r_b \dot{\theta}_b + r_w \dot{\theta}_w) r_b$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_1} = \frac{\partial T}{\partial \theta_b} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_1} = \frac{\partial U}{\partial \theta_b} = m_b g r_b \sin \theta_b$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) &= I_b \ddot{\theta}_b + m_b r_b^2 \ddot{\theta}_b + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_w \\ &= (I_b + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_b + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_w \end{aligned}$$

ดังนั้น จาก (1) เราจะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_1} + \frac{\partial U}{\partial q_1} = Q_1$$

$$(I_b + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_b + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_w + m_b g r_b \sin \theta_b = 0 \quad (4)$$

เมื่อ θ_b น้อยๆ ให้ $\sin \theta_b \approx \theta_b$

$$(I_b + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_b + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_w + m_b g r_b \theta_b = 0 \quad (5)$$

จากสมการที่ (2) และ (3) สำหรับ $i = 2$ เราจะได้

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_w} = I_w \dot{\theta}_w + m_w r_w^2 \dot{\theta}_w + m_b (r_b \dot{\theta}_b + r_w \dot{\theta}_w) r_w$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_2} = \frac{\partial T}{\partial \theta_w} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial q_2} = \frac{\partial U}{\partial \theta_w} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) &= I_w \ddot{\theta}_w + m_w r_w^2 \ddot{\theta}_w + m_b r_b \dot{\theta}_b + m_b r_w^2 \ddot{\theta}_w \\ &= (I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) \ddot{\theta}_w + m_b r_b r_w \dot{\theta}_b \end{aligned}$$

ดังนั้น จาก (1) เราจะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_2} + \frac{\partial U}{\partial q_2} &= Q_2 \\ (I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) \ddot{\theta}_w + m_b r_b r_w \dot{\theta}_b &= T - b \dot{\theta}_w \end{aligned} \quad (6)$$

จากสมการมอเตอร์กระแสตรง ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์กระแสตรงสามารถคำนวณได้จากสมการ (7)

$$u = IR_m + k_b k_g \dot{\theta} \quad (7)$$

- เมื่อ u คือ แรงดันไฟฟ้า
 I คือ กระแสไฟฟ้า
 R_m คือ ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์
 k_b คือ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับคงตัว (Back-emf constant)
 k_g คือ อัตราทดเฟือง

แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ สามารถหาได้จากสมการ(8)

$$\tau = k_g k_m I \quad (8)$$

เมื่อ k_m คือ ค่าคงตัวแรงบิดมอเตอร์ (Motor torque constant)

ดังนั้นแรงบิดมอเตอร์สร้างขึ้นสามารถหาได้จากสมการ

$$\tau = \frac{k_g k_m u}{R_m} - \frac{k_b k_m k_g^2}{R_m} \dot{\theta} \quad (9)$$

$$\text{กำหนดให้ } C_1 = \frac{k_g k_m u}{R_m} \text{ และ } C_2 = \frac{k_b k_m k_g^2}{R_m} \quad (10)$$

จากสมการ (10) เราจะได้

$$\tau = C_1 u - C_2 \dot{\theta}_w \quad (11)$$

แทนสมการ (11) ใน สมการ (6) จะได้

$$\begin{aligned} (I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_w + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_b &= c_1 u - c_2 \dot{\theta}_w - b \dot{\theta}_w \\ (I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_w + m_b r_b r_w \ddot{\theta}_b + (b + c_2) \dot{\theta}_w &= c_1 u \end{aligned} \quad (12)$$

จาก (12) เราจะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบคือ

$$\ddot{\theta}_w = \left(\frac{-m_b r_b r_w}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) \ddot{\theta}_b - \left(\frac{b + c_2}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) \dot{\theta}_w + \left(\frac{c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) u \quad (13)$$

แทนสมการ(13) ใน (5) จะได้

$$\begin{aligned} (I_b + m_b r_b^2) \ddot{\theta}_b - \left(\frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) \ddot{\theta}_b - \left(\frac{(m_b r_b r_w)(b + c_2)}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) \dot{\theta}_w + \\ \left(\frac{m_b r_b r_w c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) u + m_b g r_b \theta_b = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[(I_b + m_b r_b^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right] \ddot{\theta}_b - \left(\frac{(m_b r_b r_w)(b + c_2)}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) \dot{\theta}_w + \\ m_b g r_b \theta_b = \left(\frac{-m_b r_b r_w c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_b^2} \right) u \end{aligned} \quad (14)$$

จัดรูปสมการที่ (5) จะได้

$$\ddot{\theta}_b = \left(\frac{-m_b r_b r_w}{I_b + m_b r_b^2} \right) \ddot{\theta}_w - \left(\frac{m_b g r_b \theta_b}{I_b + m_b r_b^2} \right) \theta_b \quad (15)$$

แทนสมการ (15) ใน (12) จะได้

$$\begin{aligned} (I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) \ddot{\theta}_w - \left(\frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b r_b^2} \right) \ddot{\theta}_w - \left(\frac{m_b^2 r_b^2 r_w g}{I_b + m_b r_b^2} \right) \theta_b + (b + c_2) \dot{\theta}_w = c_1 u \\ \left[(I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b r_b^2} \right] \ddot{\theta}_w - \left(\frac{m_b^2 r_b^2 r_w g}{I_b + m_b r_b^2} \right) \theta_b + (b + c_2) \dot{\theta}_w = c_1 u \end{aligned} \quad (16)$$

จัดรูปสมการ (14) จะได้

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_b - \left[\frac{\frac{(m_b r_b r_w)(b + c_2)}{(I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2)}}{I_b + m_b r_b^2 - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2}} \right] \dot{\theta}_w + \left[\frac{m_b g r_b}{I_b + m_b r_b^2 - \frac{m_b r_b r_w}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2}} \right] \theta_b \\ = \left[\frac{\left(\frac{-m_b r_b r_w c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2} \right)}{I_b + m_b r_b^2 - \frac{m_b r_b r_w}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2}} \right] u \end{aligned} \quad (17)$$

จัดรูปสมการ (16) จะได้

$$\ddot{\theta}_w - \frac{\left[\frac{m_b^2 r_b^2 r_w g}{(I_b + m_b r_b^2)} \right]}{\left[(I_b + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2} \right]} \theta_b + \frac{(b+c_2)}{\left[(I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2} \right]} \dot{\theta}_w \quad (18)$$

$$= \frac{c_1}{\left[I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2 - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2} \right]} u$$

จากสมการ (17),(18) กำหนดให้ H1,H2,H3, H4 คือ

$$H1 = \frac{(b+c_2)}{\left[(I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2} \right]}$$

$$H2 = - \frac{\left[\frac{m_b^2 r_b^2 r_w g}{(I_b + m_b r_b^2)} \right]}{\left[(I_b + m_w r_w^2 + m_b r_w^2) - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2} \right]}$$

$$H3 = - \frac{\left[\frac{(m_b r_b r_w)(b+c_2)}{(I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2)} \right]}{\left[I_b + m_b r_b^2 - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2} \right]}$$

$$H4 = \frac{m_b g r_b}{\left[I_b + m_b r_b^2 - \frac{m_b r_b r_w}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2} \right]}$$

$$H5 = \left[\frac{c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2 - \frac{(m_b r_b r_w)^2}{I_b + m_b + r_b^2}} \right]$$

$$H6 = \left[\frac{\left(\frac{-m_b r_b r_w c_1}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2} \right)}{I_b + m_b r_b^2 - \frac{m_b r_b r_w}{I_w + m_w r_w^2 + m_b r_w^2}} \right]$$

จากสมการ (9), (10), เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปปริภูมิเวกเตอร์

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

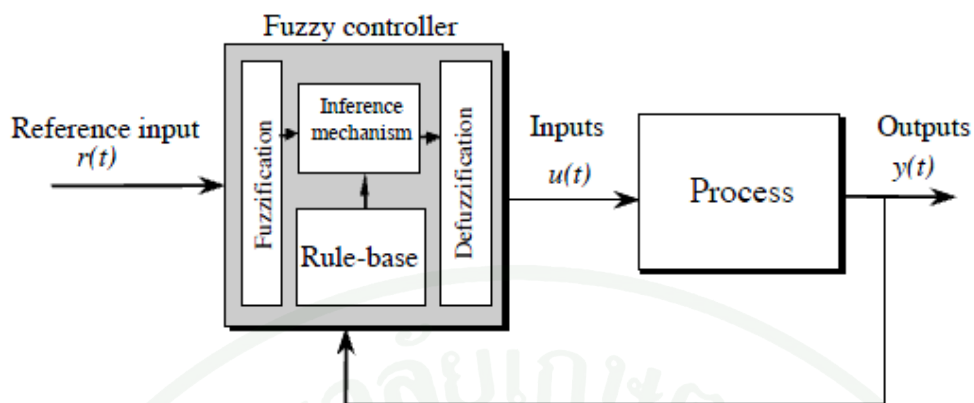
เราจะได้ ปริภูมิเวกเตอร์ของรถสองล้อ คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_w \\ \ddot{\theta}_w \\ \dot{\theta}_b \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & H1 & H2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & H3 & H4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_w \\ \dot{\theta}_w \\ \theta_b \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ H5 \\ 0 \\ H6 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_w \\ \dot{\theta}_w \\ \theta_b \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

การออกแบบระบบควบคุม

บทนี้แนะนำการออกแบบตัวควบคุม ในงานวิจัยนี้ระบบการควบคุมที่ใช้คือตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy control) ในบทนี้ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ Fuzzification, Inference mechanism, Rule base และ Defuzzication



ภาพที่ 13 ตัวควบคุมฟัซซี่

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

ภาพที่ 13 แสดงตัวควบคุมฟัซซี่ ซึ่งประกอบด้วย 4 ส่วน คือ

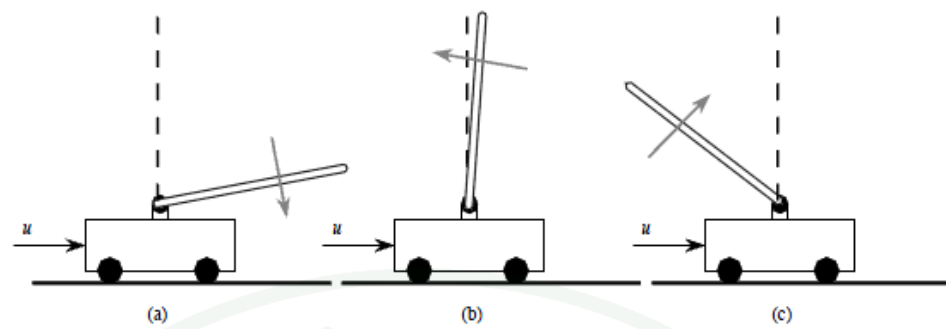
1. Rule Base

เซตของ กฎ If-Then ซึ่งสร้าง โดยความรู้และเหตุผลของผู้เชี่ยวชาญ(expert knowledge) ในการควบคุมระบบ อยู่ในรูปของ IF **Premise** THEN **Consequence** ตัวอย่างการควบคุมระบบ ลูกตุ้มหัวกลับ เช่น

IF error is neglarge and change-in-error is neglarge THEN force is poslarge

IF error is zero and change-in-error is possmall THEN force is neglarge

IF error is poslarge and change-in-error is negsmall THEN force is negsmall



ภาพที่ 14 สถานะต่างๆ ของลูกตุ้มหัวกลับ

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

ในกรณีลูกตุ้มหัวกลับ มี 2 input คือ error (e) และ change in error (\dot{e}) และ 5 linguistic value สำหรับแต่ละinput ดังนั้นจะมี กฎทั้งหมด $5^2 = 25$ rule ดังแสดงในตาราง xxx

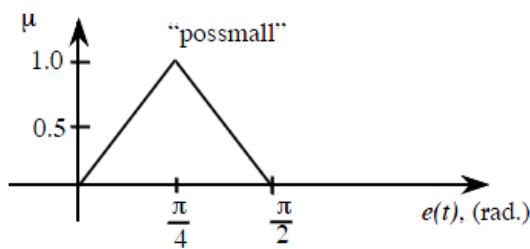
ตารางที่ 1 Rule base ของระบบลูกตุ้มหัวกลับ

		"change-in-error" \dot{e}				
		-2	-1	0	1	2
"force"	u					
	"error"					
	e	-2	-1	0	1	2
		2	2	1	0	-1
		2	1	0	-1	-2
		1	0	-1	-2	-2
		2	-1	-2	-2	-2

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

2. Fuzzication

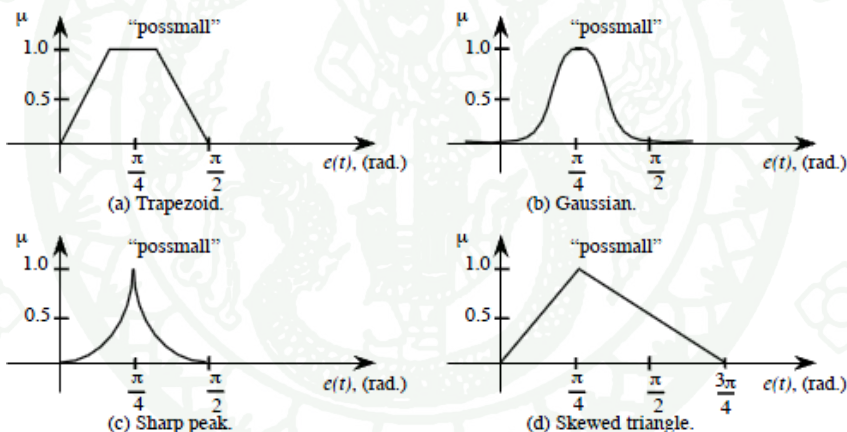
เราให้ความหมายของ linguistic value โดยใช้ "membership function"



ภาพที่ 15 membership function ของ possmall

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

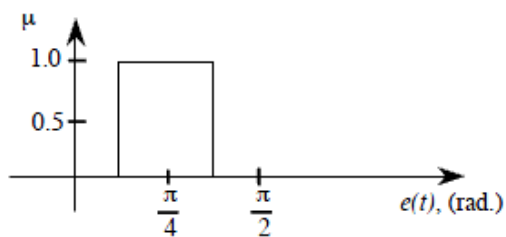
ฟังก์ชัน μ ในภาพที่ 15 แสดงความแน่นอนของ $e(t)$ ในการเป็น possmall รูปแบบของ membership function แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แสดงรูปแบบต่างๆ ของ membership function

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

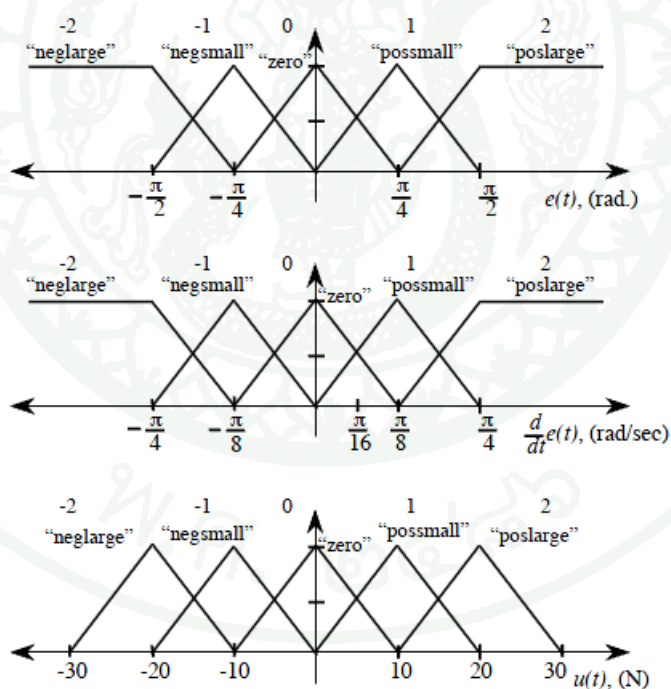
เราเรียกเซตของจำนวนใน membership function ที่กำหนดโดย μ ว่า fuzzy set. สำหรับ membership function ของ crisp set แสดงในภาพ 17



ภาพที่ 17 membership function สำหรับ craps set

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

Universe of discourse สำหรับ input และ output ของตัวควบคุมพีซีซี คือ ระยะจำกัดที่ค่าของ input และ output จะเป็นได้ Membership function ของระบบลูกตุ้มหัวกลับบนรางเคลื่อนที่ แสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 Membership function สำหรับระบบลูกตุ้มหัวกลับ

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

จากภาพที่ 18 สำหรับ input e , ค่า μ ของ $e > \pi/2$ และ $e < -\pi/2$ จะมีค่าเท่ากับ μ ของ $e = \pi/2$ และ $e = -\pi/2$, ค่า μ ของ $\frac{de}{dt} > \pi/4$ และ $\frac{de}{dt} < -\pi/4$ จะมีค่าเท่ากับ μ ของ $\frac{de}{dt} = \pi/4$ และ $\frac{de}{dt} = -\pi/4$. สามเหลี่ยมอันนอกสุดของ output u ทำให้ค่าจำกัดของ output คือ $\pm 20N$, จากภาพที่ xx ถ้าเราให้ $e(t) = \pi/4$ และ $\frac{de}{dt} = \pi/16$ เราจะได้

$$\mu_{\text{possmall}}(e) = 1$$

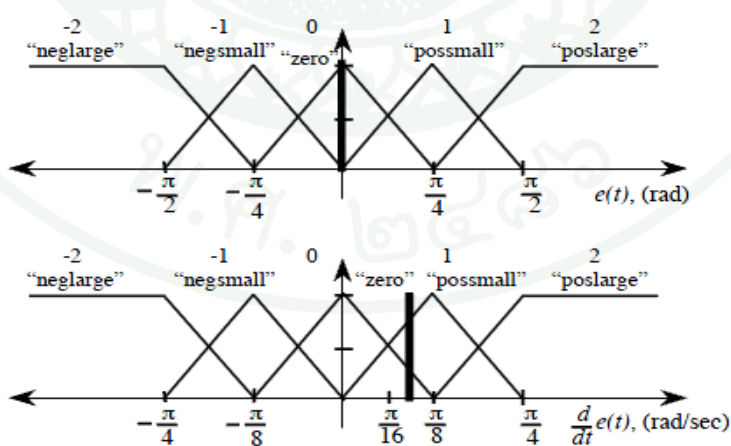
$$\mu_{\text{zero}}(de/dt) = \mu_{\text{possmall}}(de/dt) = 0.5$$

3. Inference mechanism

ในกระบวนการ Inference mechanism มีอยู่ 2 ขั้นตอนคือ 1. Matching step และ inference step

3.1 Matching step

หาว่า กฎ(rule) ข้อไหนที่เข้ากับ input e และ $\frac{de}{dt}$ เช่น $e(t) = 0$ และ $\frac{de}{dt} = \pi/8 - \pi/32 = 0.294$ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ไดอะแกรมแสดง กฎ(rule) ที่ทำงาน

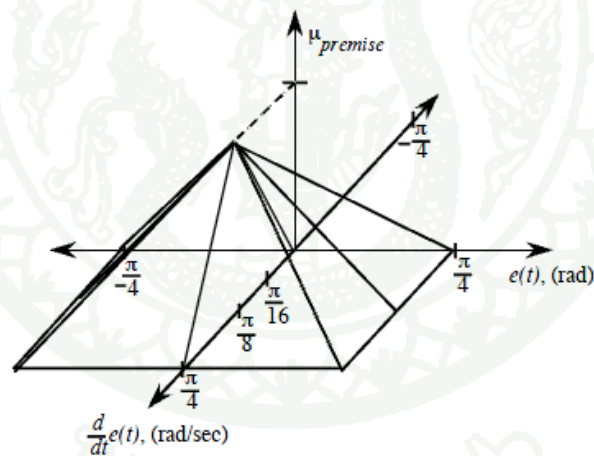
ที่มา: Passino and Stephen (1998)

จากภาพที่ 19 มี 2 rule ทำงาน คือ

1. IF error is zero and change-in-error is zero Then force is zero
2. IF error is zero and change-in-error is possmall Then force is negsmall

ดังนั้นในระบบนี้จะมี rule ทำงานได้มากที่สุดคือ 4 rule , ถ้ากำหนด $e = \pi / 8$ และ $\frac{de}{dt} = \pi / 32$ เราจะได้ $\mu_{zero}(e) = 0.5$ และ $\mu_{possmall}(de/dt) = 0.25$ เราหา $\mu_{premise}$ ได้จาก
 minimum : $\mu_{premise} = \min\{\mu_{zero}(e), \mu_{possmall}(de/dt)\} = \min\{0.5, 0.25\} = 0.25$ หรือ
 product : $\mu_{premise} = (0.5)(0.25) = 0.125$

สำหรับทุกค่า $e(t)$ และ $\frac{de}{dt}$ โดย วิธี minimum เราจะได้ $\mu_{premise}$ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 $\mu_{premise}$ ของ single rule

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

3.2 Inference step

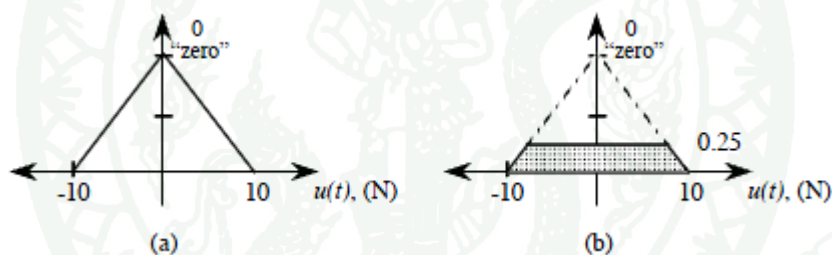
พิจารณา rule 1 : IF error is zero and change-in-error is zero Then force is zero
เราสามารถหา $\mu_{premise(1)}$ ได้จาก

$$\mu_{premise(1)} = \min \{0.25, 1\} = 0.25$$

Implied fuzzy set ที่ได้จาก rule 1 คือ

$$\mu_{(1)}(u) = \min \{0.25, \mu_{zero}(u)\}$$

พื้นที่แรเงาในภาพที่ 21 แสดง Implied fuzzy set



ภาพที่ 21 Implied fuzzy set จาก rule 1

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

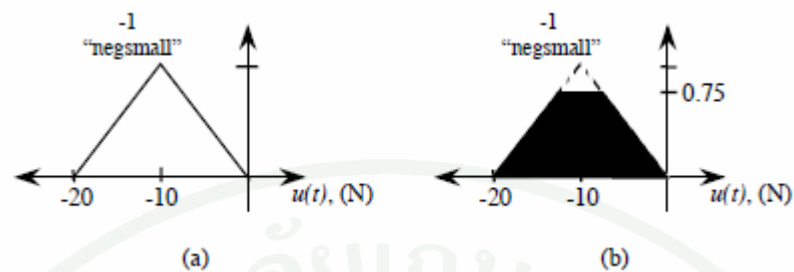
พิจารณา rule 2 : IF error is zero and change-in-error is possmall Then force is negsmall เราสามารถหา $\mu_{premise(2)}$ ได้จาก

$$\mu_{premise(2)} = \min \{0.75, 1\} = 0.75$$

Implied fuzzy set ที่ได้จาก rule 1 คือ

$$\mu_{(2)}(u) = \min \{0.75, \mu_{negsmall}(u)\}$$

พื้นที่แรเงาในภาพที่ 22 แสดง Implied fuzzy set



ภาพที่ 22 Implied fuzzy set จาก rule 2

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

4. Defuzzication

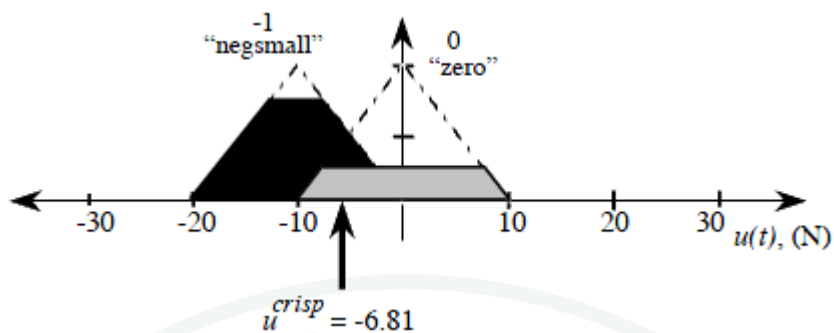
4.1 วิธี Center of gravity (COG)

ให้ b_i เป็นจุดกึ่งกลาง(center)ของแต่ละ membership function ของ consequence สำหรับแต่ละ rule i , ในตัวอย่างนี้ $b_1 = 0$, $b_2 = -10$, ให้ $\int \mu_{(i)}$ แทนพื้นที่ใต้ membership function $\mu_{(i)}$ และให้ μ^{crisp} แทน output ที่ได้จาก ตัวควบคุมฟัซซี่, เราหา μ^{crisp} ได้จาก

$$\mu^{crisp} = \frac{\sum_i b_i \int \mu_{(i)}}{\sum_i \int \mu_{(i)}}$$

ดังนั้น

$$\mu^{crisp} = \frac{(0)(4.375) + (-10)(9.375)}{4.375 + 9.375} = -6.81$$



ภาพที่ 23 COG method

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

4.2 วิธี Center average

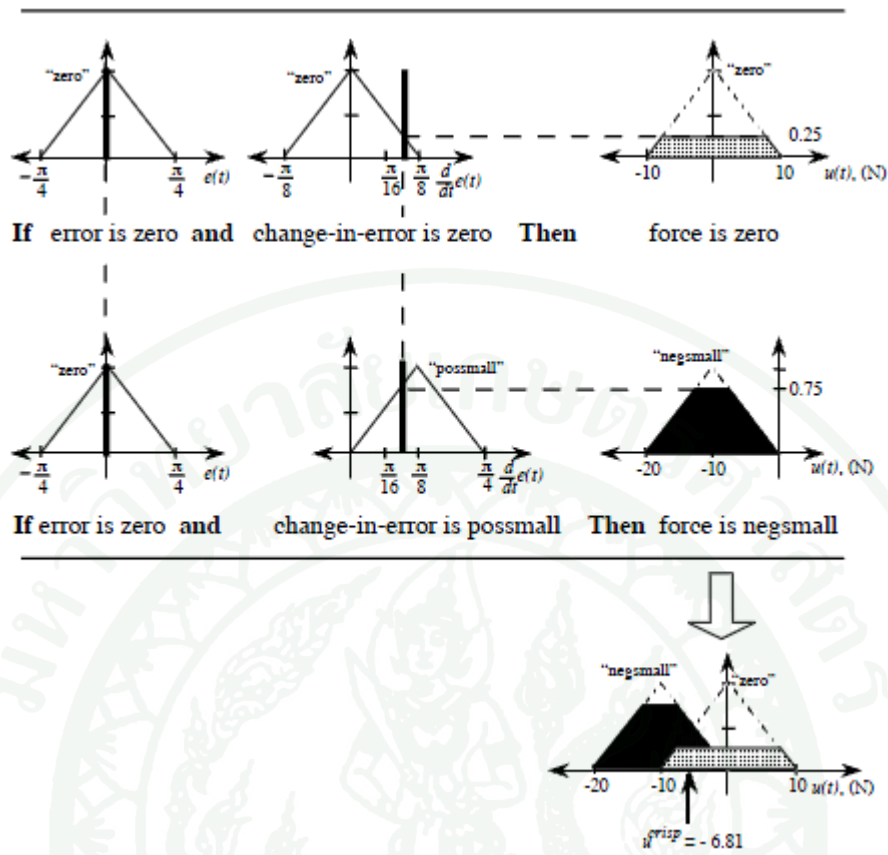
เราหา μ^{crisp} โดยวิธี Center average ได้จาก

$$\mu^{crisp} = \frac{\sum_i b_i \mu_{premise(i)}}{\sum_i \mu_{premise(i)}}$$

ดังนั้น

$$\mu^{crisp} = \frac{(0)(0.25) + (-10)(0.75)}{0.25 + 0.75} = -7.5$$

กระบวนการทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่แสดงดังภาพที่ 24

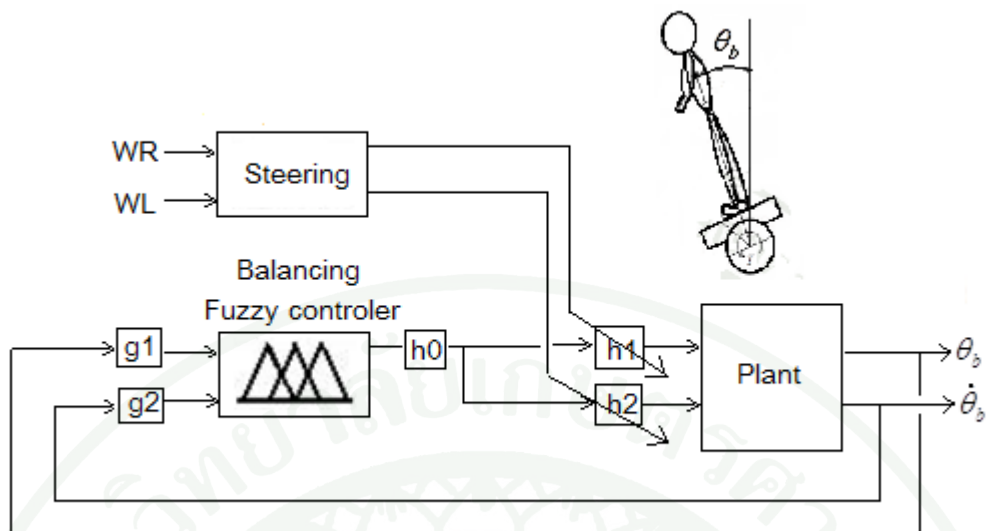


ภาพที่ 24 การทำงานของตัวควบคุมฟัซซี่

ที่มา: Passino and Stephen (1998)

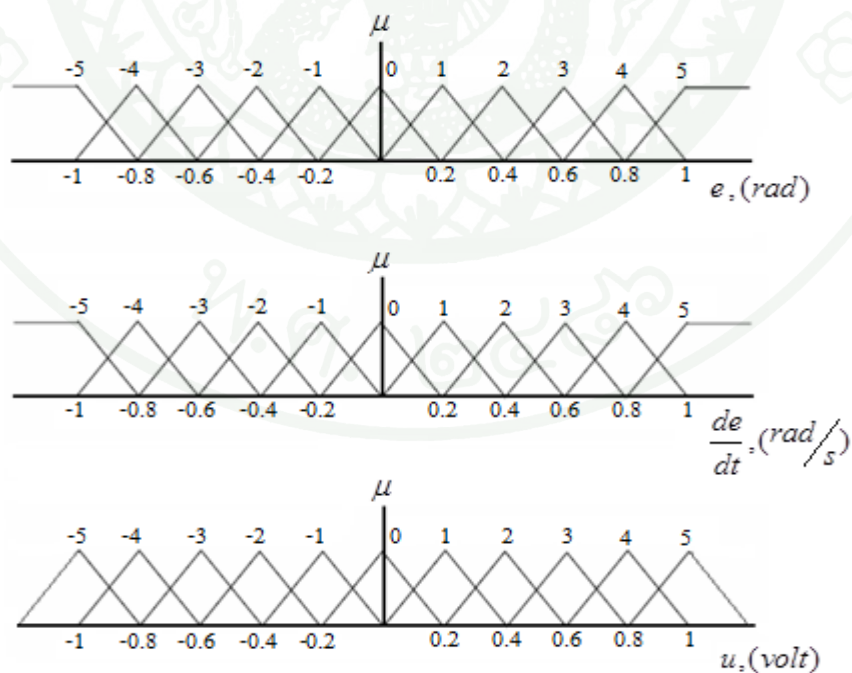
ตัวควบคุมฟัซซี่สำหรับรถสองล้อ

บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแสดงในภาพที่ 25 ด้านล่าง เราใช้ตัวควบคุมฟัซซี่แบบ 2 input 1 output โดยมี g_1 เป็น input scaling gain ของ error , g_2 เป็น input scaling gain ของ change in error และ h_0 เป็น output scaling gain , h_1 และ h_2 เป็น scaling gain ของมอเตอร์ซ้ายและขวาโดยมี WR และ WG เป็น weight ในการควบคุมการเลี้ยวผ่านทางผู้ขับขี่



ภาพที่ 25 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุม

กำหนดให้ linguistic variable $e(deg)$ และ $\dot{e}(deg/s)$ มี 11 linguistic numeric value คือ -5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5 เราใช้ minimum operator เป็นตัวเชื่อม premise และใช้วิธี COG defuzzication ให้ effective universe of discourse เป็น $[-1 \ 1]$ และเราใช้ triangular membership function ดังแสดง ในภาพที่ 26



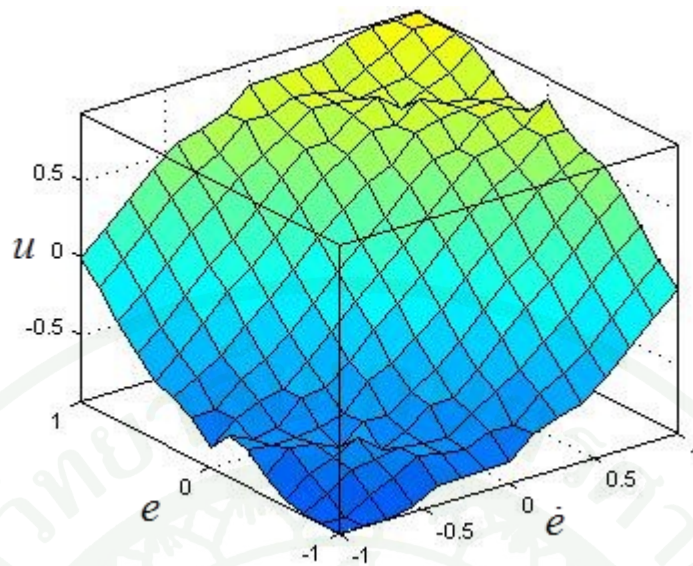
ภาพที่ 26 Membership Function

เนื่องจากเรามี 11 linguistic numeric value ของแต่ละอินพุต ทำให้มีจำนวน rule ทั้งหมด $121(11^2)$ rule ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 Rule Base

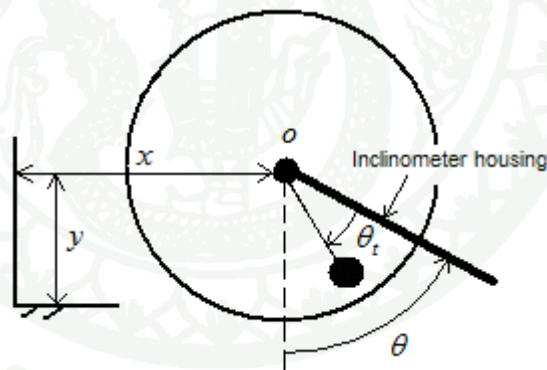
u	\dot{e}										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0
-4	-5	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1
-3	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2
-2	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3
-1	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3
e 0	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	4
1	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	4	4
2	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	4	4	4
3	-2	-1	0	1	2	3	3	4	4	4	5
4	-1	0	1	2	3	3	4	4	4	5	5
5	0	1	2	3	3	4	4	4	5	5	5

จากการออกแบบตัวควบคุมพีซีซี เราสามารถแสดงการทำงานของตัวควบคุม โดยใช้ Control surface ดังแสดงในภาพ 27 ด้านล่าง โดยมีแกนนอนเป็น input ของตัวควบคุม คือ e และ \dot{e} , แกนตั้งเป็น output ของตัวควบคุม คือ u และ อัตราขยาย g_1, g_2, h_0 ซึ่งหาได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.0665, 0.06, 24 ตามลำดับ



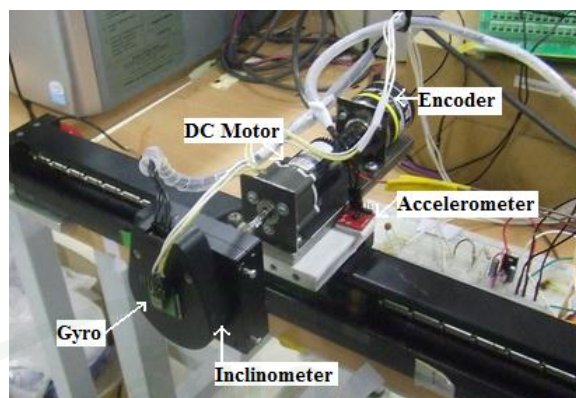
ภาพที่ 27 Control surface

การวัดมุมเอียง



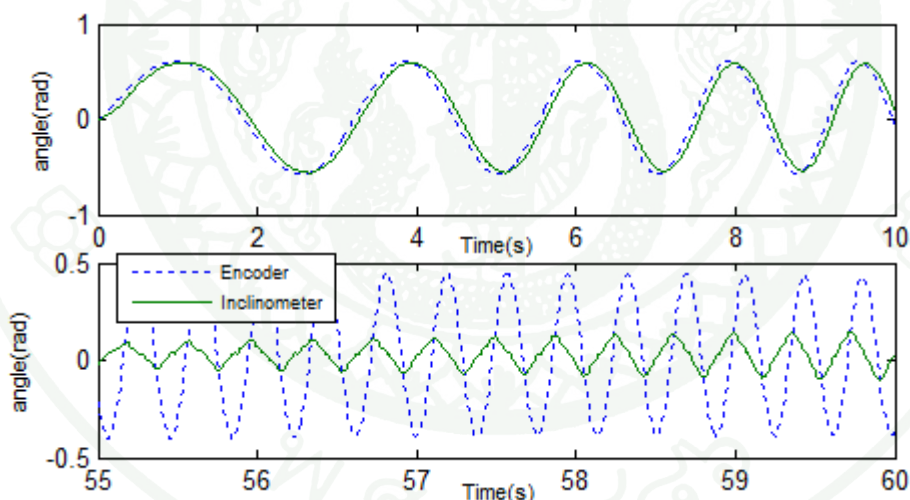
ภาพที่ 28 ระบบ inclinometer ชนิดลูกตุ้มภายใน

เราใช้ Optical inclinometer รุ่น US digital T6 ความละเอียด 2500 ครั้ง/รอบ วัดมุมเอียงของลูกตุ้มภายในเทียบกับตัวเรือนภายนอก ภาพที่ 28 แสดงระบบ Inclinometer จากการที่ลูกตุ้มมีความหน่วงในตัวมันเองมุมที่วัดได้ θ_t จึงมีความแม่นยำเฉพาะที่ความถี่ต่ำ ขณะที่มุมเอียงจริงคือ θ เพื่อที่จะสังเกตพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของ Inclinometer เราได้ติดตั้ง Inclinometer กับชุดทดลอง



ภาพที่ 29 แสดงโครงสร้างระบบทดลอง

ภาพที่ 29 แสดงโครงสร้างของระบบทดลองอุปกรณ์วัดมุมเอียง ซึ่งประกอบด้วย Inclinometer, ไจโรสโคป, ตัวตรวจรู้ความเร่ง, มอเตอร์กระแสตรง และ Encoder เพื่อวัดมุมที่ได้เทียบกับมุมเอียงที่แท้จริงที่มาจาก Encoder



ภาพที่ 30 มุมเอียงที่ได้จาก Inclinometer และ Encoder

ทำการป้อนสัญญาณ Sine wave ที่ความถี่แปรผันตั้งแต่ 0.25 Hz จนถึง 2 Hz ภายในเวลา 60 วินาที ภาพที่ 30 แสดงผลตอบสนองมุมเอียงเทียบกับเวลา ของ Inclinometer เอาต์พุต θ_i เทียบกับมุมเอียงจริงที่วัดได้จาก Encoder (θ) จากภาพที่ 30 ที่ความถี่สูงขึ้น Inclinometer ให้นมุมเอียงที่คลาดเคลื่อนทั้งขนาดและมุมเฟส

สมการการเคลื่อนที่ของระบบจากรูปที่ 28 โดยไม่คิดค่า y สามารถหาได้จากกฎของนิวตัน คือ

$$J(\ddot{\theta} - \ddot{\theta}_t) = c\dot{\theta} - mgl \sin(\theta - \theta_t) - ml\ddot{x} \cos(\theta - \theta_t) \quad (19)$$

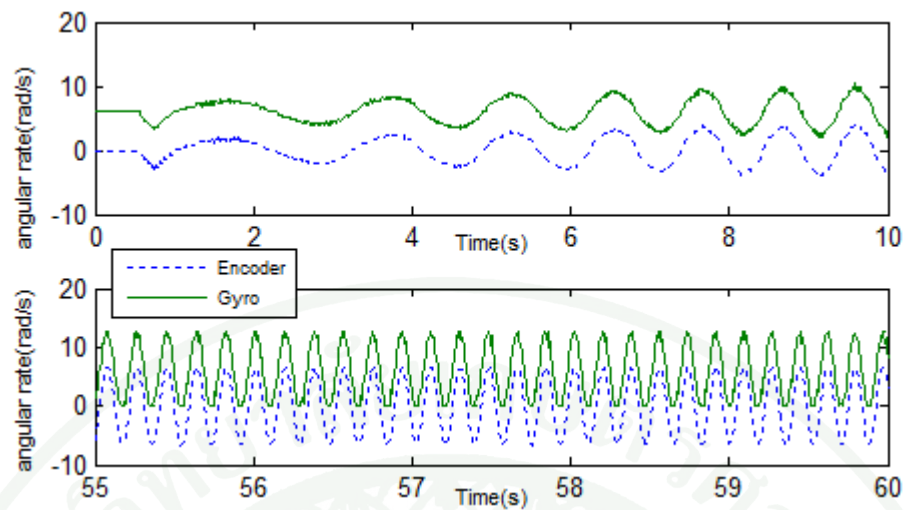
โดยที่ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, m คือ มวลของ pendulum, l คือ ระยะจากจุดหมุนถึงมวล pendulum และ c คือ ค่าคงที่ความหน่วง ทำให้เป็นเชิงเส้นรอบจุด zero equilibrium point และ แปลงลาปลาซ ก็จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการ

$$\Theta_t(s) = \frac{s^2 + (mgl/J)}{s^2 + (c/J)s + (mgl/J)} \Theta(s) + \frac{(ml/J)s^2}{s^2 + (c/J)s + (mgl/J)} X(s) \quad (20)$$

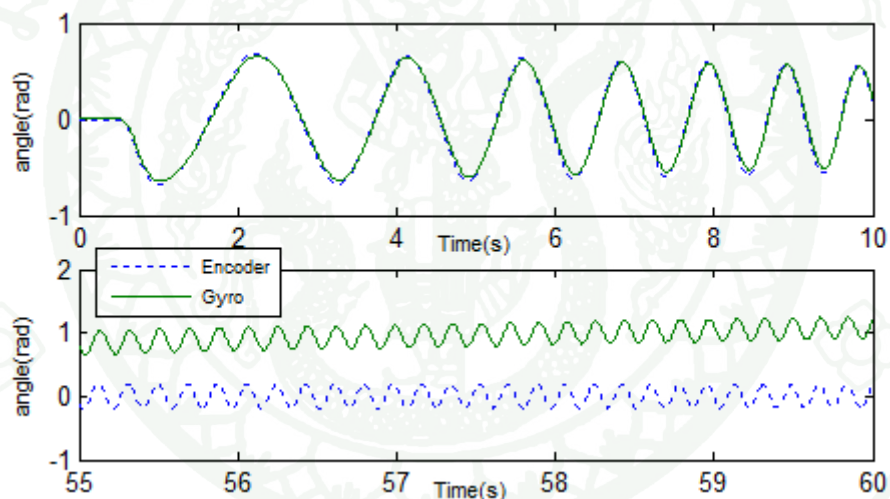
โดยที่ $\Theta_t(s)$, $\Theta(s)$, $X(s)$ คือ การแปลงลาปลาซของ $\theta_t(t)$, $\theta(t)$, $x(t)$ ตามลำดับ

Chatlatanagulchai *et al.* (2008) ได้หาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า J/c และ ml/c ของ Inclinator รุ่นนี้ โดยใส่สัญญาณแปรผันความถี่ให้กับมอเตอร์ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้จาก encoder และ inclinometer ไปคำนวณโดยเทคนิค Linear least square ได้ค่า $J/c = 0.0022$ และ $ml/c = 1.0314$

เราใช้อิเล็กทรอนิกส์ไจโรสโคปรุ่น IDG500 ในการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของไจโรสโคป เราติดตั้งที่ตำแหน่งเดียวกันกับ Inclinator และป้อนสัญญาณเดียวกันให้แก่มอเตอร์ ผลตอบสนองของไจโรสโคป ω_g เทียบกับความเร็วเชิงมุมที่ได้จาก Encoder แสดงในภาพที่ 31 จากภาพเอาต์พุตจากไจโรสโคปมี bias ประมาณ 5.9 rad/s หลังจากหักลบ bias ออกและจากการอินทิเกรตสัญญาณ จะได้มุมเอียงดังภาพที่ 32 แสดงถึงความผิดพลาดในขนาดของมุมเอียง (ไจโรดริฟ) ที่ได้จากอินทิเกรตเอาต์พุตจากไจโรสโคปทำให้เกิด bias ที่ไม่ทราบค่าและแปรผันกับเวลา สัญญาณ ความเร่งในแนวระดับ \ddot{x} ใน (19) สามารถวัดได้จาก ตัวตรวจรู้ความเร่ง

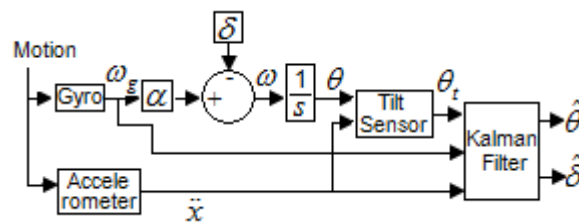


ภาพที่ 31 ความเร็วเชิงมุมจาก ไจโรสโคป และ Encoder



ภาพที่ 32 มุมเอียงจาก Encoder และจากอินทิเกรตสัญญาณไจโรสโคป

เราได้พัฒนาตัวสังเกตสถานะแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal observer) หรือ คาลมานฟิลเตอร์ เพื่อประมาณมุมเอียงที่แท้จริง θ ภาพที่ 33 แสดงบล็อก ไดอแกรม การประมาณค่าสถานะ โดยมีสัญญาณอินพุตคือ ω_x จากไจโรสโคป, θ_i จาก inclinometer และ \ddot{x} จากตัวตรวจรู้ความเร่ง



ภาพที่ 33 บล็อกไดอะแกรมการประมาณค่าสถานะ

จากสมการถ่ายโอนของระบบ (19) สามารถจัดให้อยู่ในปริภูมิสถานะแบบ observable-canonical-form

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -c/J & 1 \\ -mgl/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -c/J \\ 0 \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} 0 \\ ml/J \end{bmatrix} \ddot{x} \\ \theta_t &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \theta + v_t \end{aligned} \quad (21)$$

โดยที่ v_t คือ Inclinometer measurement noise แบบจำลองไจโรสโคปสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\omega_g = \frac{1}{\alpha} (\dot{\theta} + \delta) + v_g \quad (22)$$

โดยที่ ω_g คือความเร็วเชิงมุมที่ได้จากไจโรสโคป, $\dot{\theta}$ คือความเร็วเชิงมุมจริง, v_g คือ gyro measurement noise, δ และ α คือ bias และ scaling factor ตามลำดับสำหรับแบบจำลองไจโร bias เราใช้สมการ

$$\dot{\delta} = v_b \quad (23)$$

โดยที่ v_b คือ White noise

จาก (21) และ (22) เราจะได้สมการปริภูมิสถานะ

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\theta} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c/J & -c/J & 1 \\ 0 & 0 & -mgl/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \alpha & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & ml/J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_g \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & 0 & 0 \\ ml/J & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_b \\ v_g \end{bmatrix} \\
 \theta_t &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + v_t \quad (24)
 \end{aligned}$$

โดยที่ v_x คือ Accelerometer measurement noise

ซึ่งอยู่ในรูปแบบมาตรฐานของ

$$\begin{aligned}
 \dot{z} &= Az + Bu + Gv \\
 \theta_t &= Cz + v_t
 \end{aligned}$$

จาก Lewis and Syrmos (1995) เราได้คาลมานฟิลเตอร์จากสมการ

$$\dot{\hat{z}} = A\hat{z} + L(\theta_t - C\hat{z}) + Bu \quad (25)$$

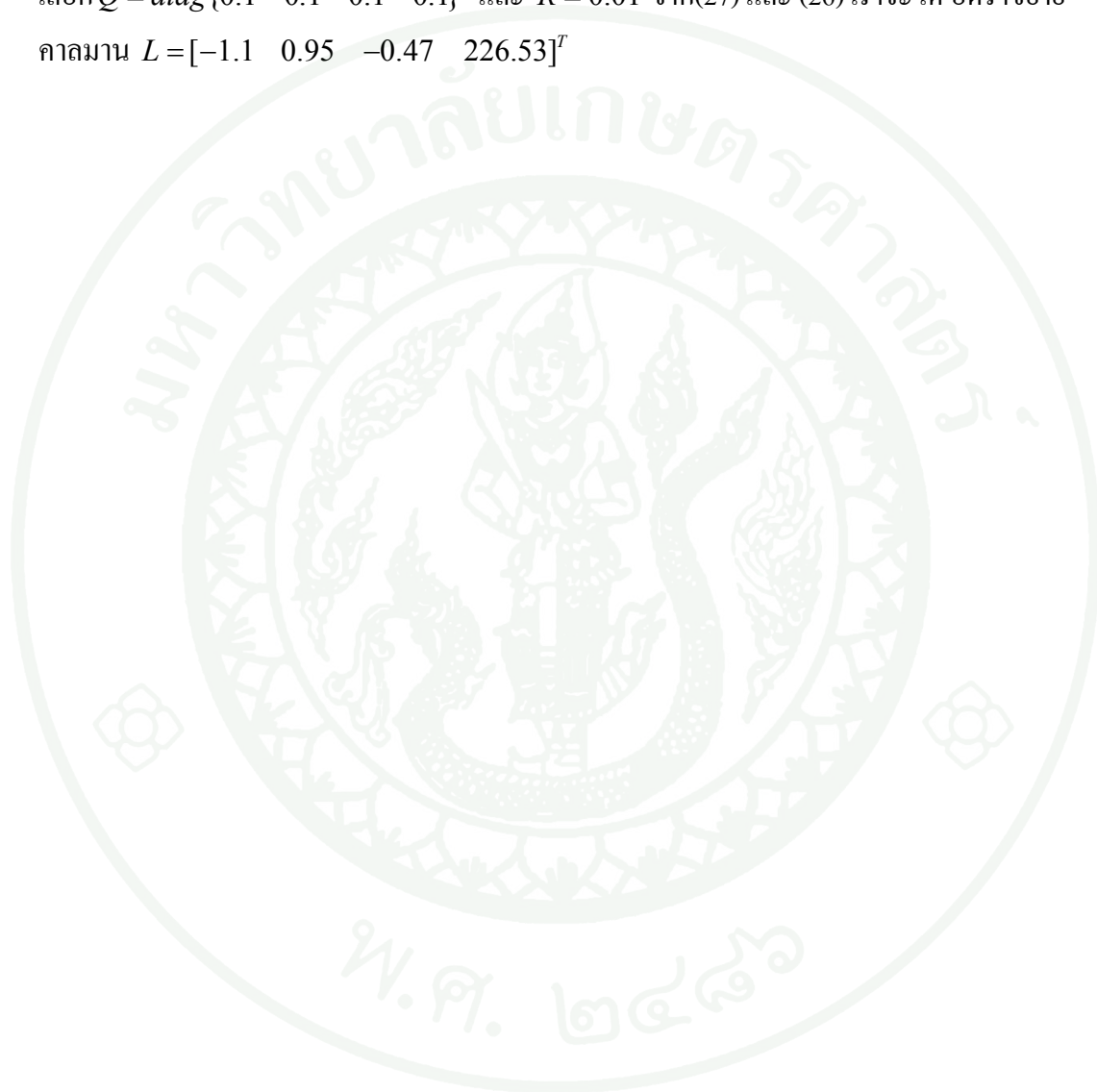
หา ค่าอัตราขยายคาลมาน L ได้จากสมการ

$$L = PC^T R^{-1} \quad (26)$$

และ Error Covariance ARE

$$AP + PA^T + GQG^T - PC^T R^{-1} CP = 0 \quad (27)$$

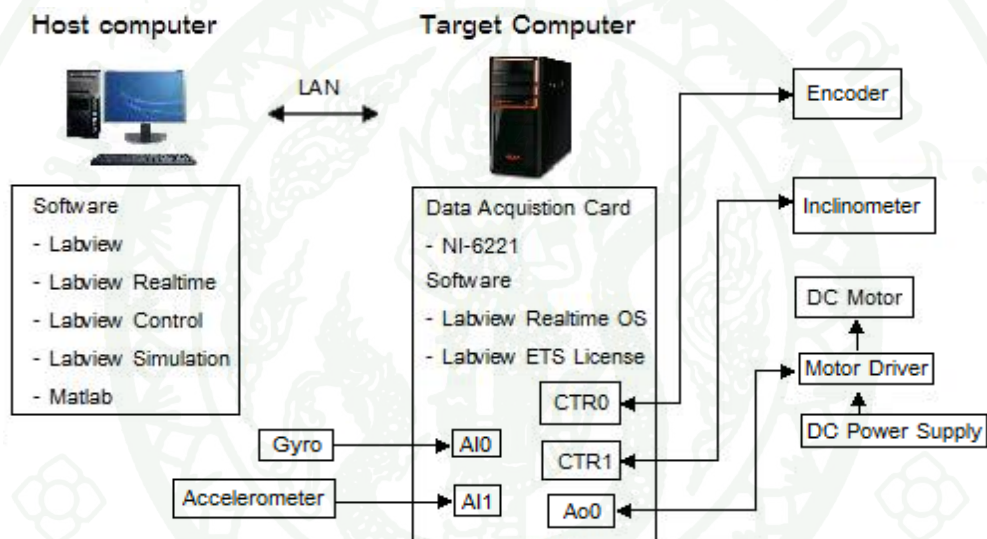
โดยที่ P คือ Steady-state error covariance, Q และ R คือ Covariance matrix of the process noise vector และ Covariance matrix of the measurement noise vector ตามลำดับ เลือก $Q = \text{diag}\{0.1 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.1\}$ และ $R = 0.01$ จาก(27) และ (26) เราจะได้ อัตราขยาย คาลมาน $L = [-1.1 \ 0.95 \ -0.47 \ 226.53]^T$



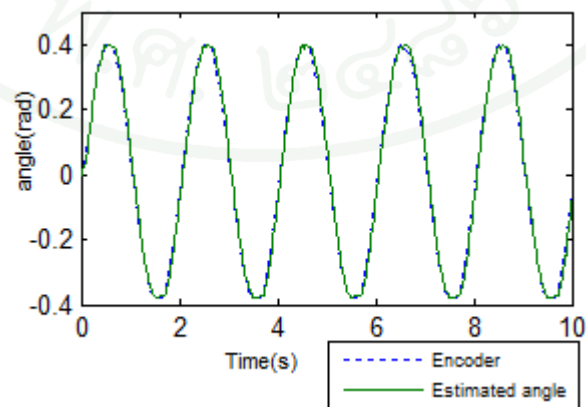
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองตัววัดมุมเอียง

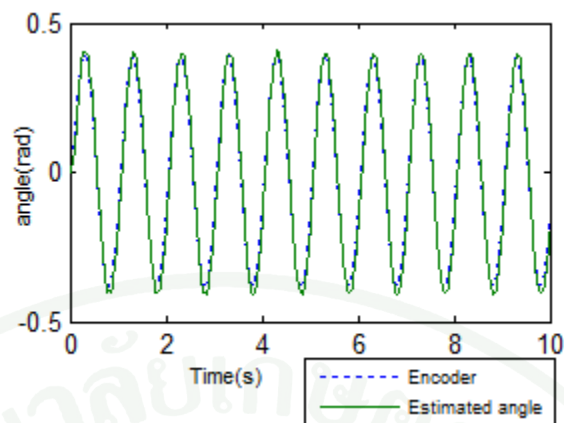
เราได้ทดลองตัวสังเกตสถานะที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยการหมุนกลับไปกลับมาตาม สัญญาณ sine wave และไม่มีความเร็วในแนวระดับ อุปกรณ์วัดมุมเอียงได้ถูกติดตั้งศูนย์กลางการ หมุน แผนผังการต่อการทดลองแสดงใน ภาพที่ 34 ประกอบด้วยอุปกรณ์ทดสอบการวัดมุมเอียง, Host computer และ Target computer



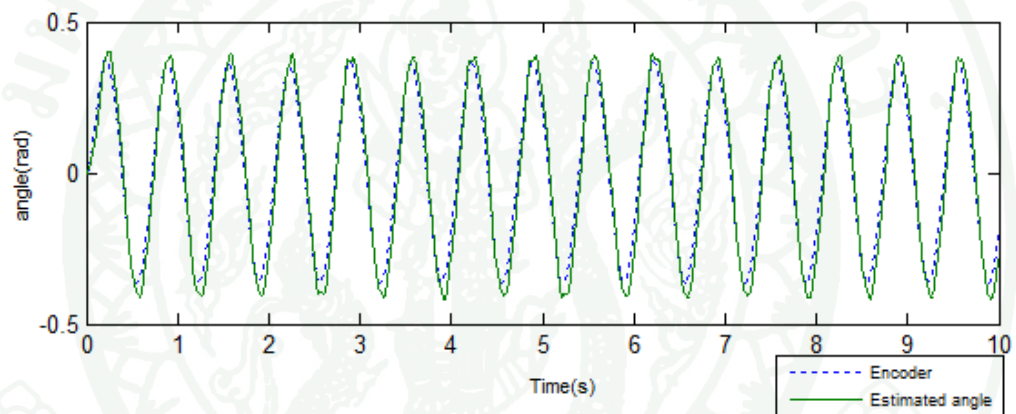
ภาพที่ 34 แผนผังการต่อการทดลอง



ภาพที่ 35 มุมประมาณที่ความถี่ 0.5 Hz



ภาพที่ 36 มุมประมาณที่ความถี่ 1 HZ



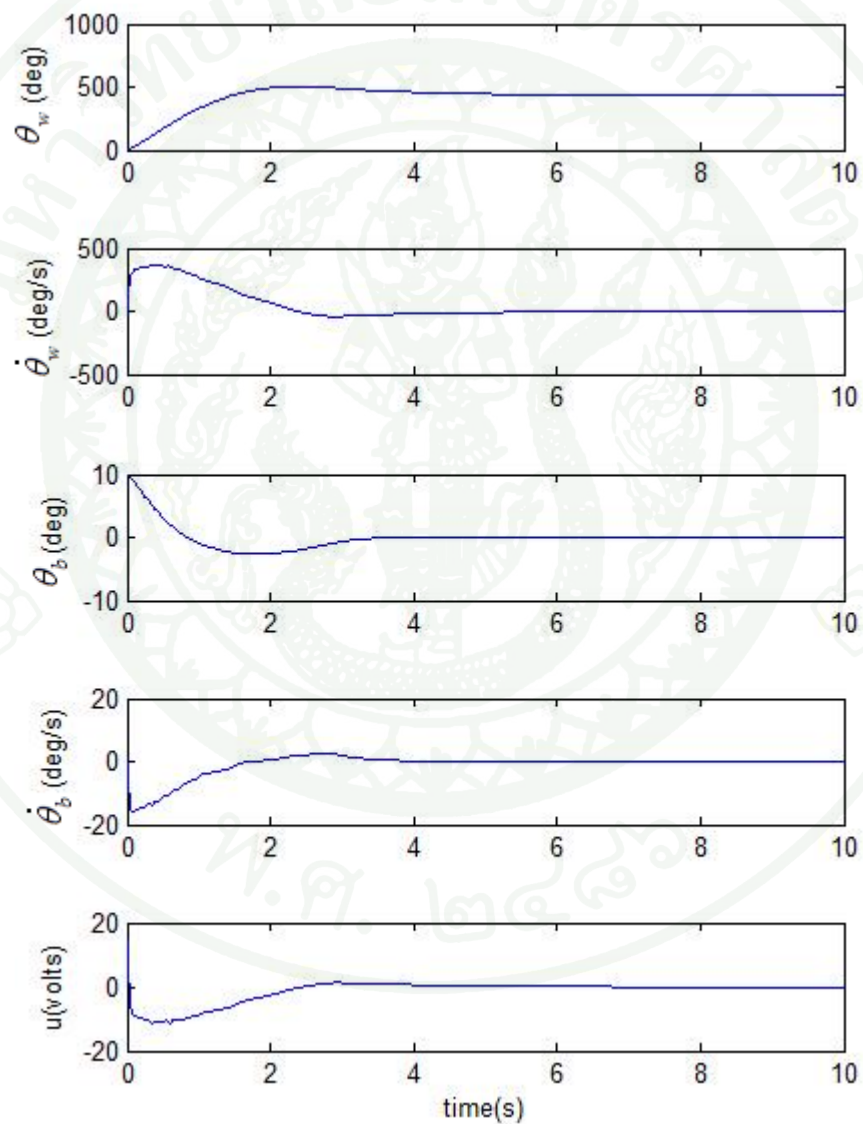
ภาพที่ 37 มุมประมาณที่ความถี่ 1.5 Hz

ภาพที่ 35, 36, 37 แสดงค่าประมาณมุมเชิงจากตัวสังเกตเทียบกับมุมเชิงจริงที่ได้จาก Encoder ที่ความถี่เท่ากับ 0.5, 1 และ 1.5 Hz ตามลำดับ จากรูปแสดงให้เห็นว่ามุมที่ประมาณได้จาก คาลมานฟิลเตอร์ ให้ผลที่แม่นยำ มีความผิดพลาด น้อยลงและตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว

ผลการทดลองรถสองล้อ

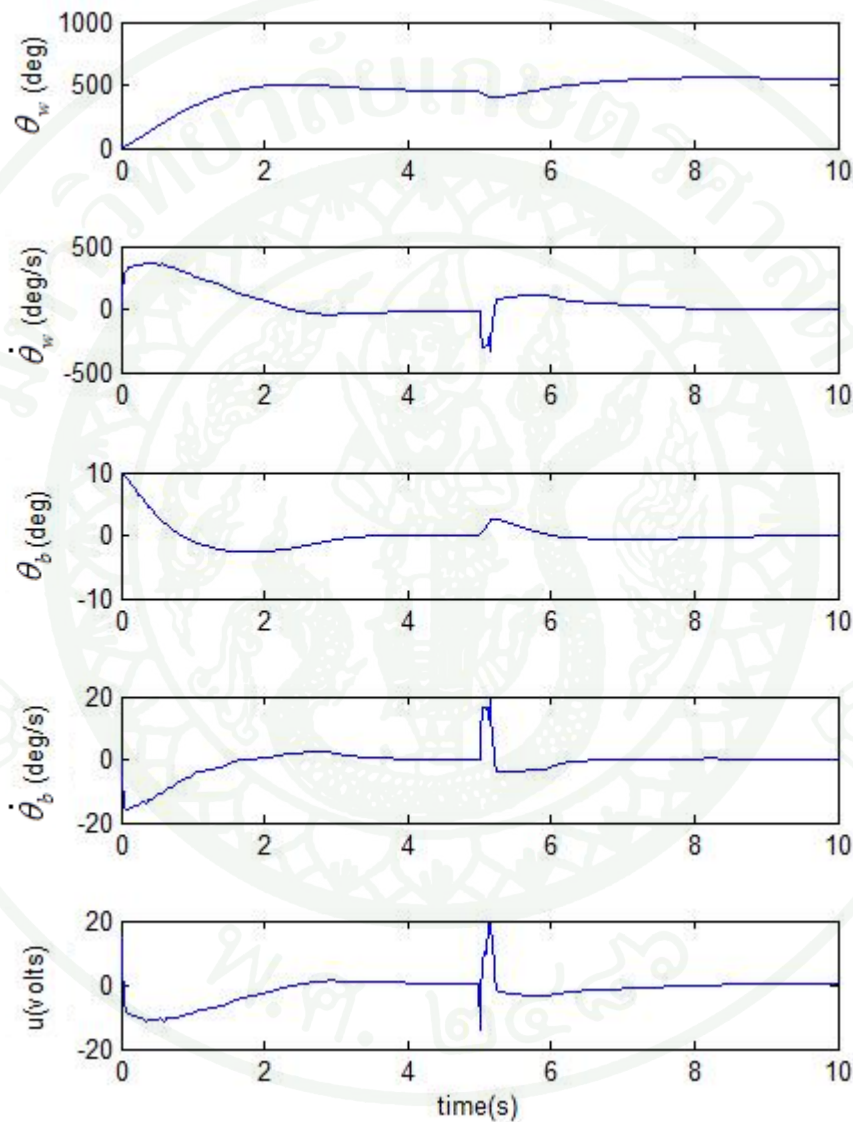
ผลการทดลองรถสองล้อ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือผล จากการจำลองระบบ ด้วยโปรแกรม MATLAB และผลจากการทดลองจริง

1. ผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB



ภาพที่ 38 ผลการจำลองระบบเมื่อให้มุมเริ่มต้นที่ค่า 10 องศา

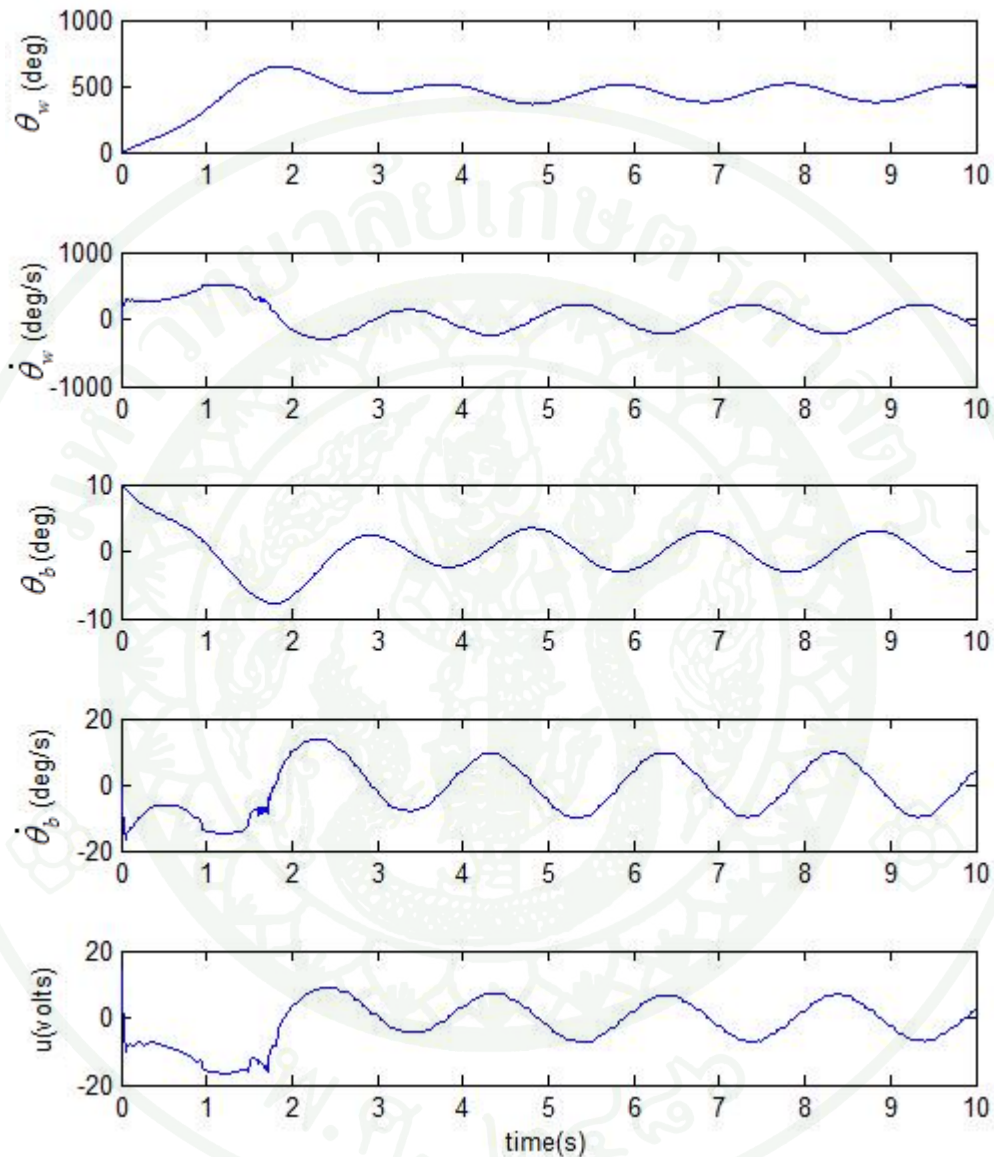
ผลการจำลองแสดงดังภาพที่ 38 เรากำหนดค่าเริ่มต้น มุมเอียง θ_w , 10 องศาและ ค่าเริ่มต้น มุมล้อ θ_b , 10 องศา แสดงให้เห็นถึงตัวควบคุมแบบพีซีซึ่งสามารถทำให้ผู้ขับชั้รักษาสมดุลได้ ระบบ จะเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเวลา 3 วินาที ความเร็วเชิงมุมของล้อ $\dot{\theta}_w$ และ ความเร็วเชิงมุมของคน $\dot{\theta}_b$ เข้าสู่ สมดุล 0 (deg/s) ที่ 3 วินาทีเช่นกัน



ภาพที่ 39 ผลการจำลองตัวควบคุมรถสองล้อด้วย Matlab เมื่อมีสิ่งรบกวนระบบ

ภาพที่ 39 แสดงผลตอบสนองของรถสองล้อเทียบกับเวลา กำหนดค่าเริ่มต้น θ_b , 10 องศา จากการจำลอง รถสองล้อวิ่งเข้าสู่จุดสมดุล 0 องศา ที่เวลา 3 วินาที จากนั้นเราได้สิ่งรบกวนจากภายนอกระบบเข้าไปที่เวลา 5 วินาที ในการจำลองของระบบใช้สัญญาณรบกวนแบบ unit impulse

จากภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมพีชซี สามารถกำจัดสิ่งรบกวนเนื่องจากแรงภายนอก และกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลได้



ภาพที่ 40 ผลการจำลองระบบเมื่อให้สิ่งรบกวนระบบเป็น Sine wave

ภาพที่ 40 กำหนดค่าเริ่มต้น θ , 10 องศา และ จำลองของระบบโดยใช้สัญญาณรบกวนจากภายนอกแบบ sine จากภาพที่ 40 แสดงให้เห็นว่า ผู้ขับจะย้ายไปมาอยู่ในช่วงระหว่งที่มีสัญญาณรบกวน และระบบไม่เสถียรสมดุล

2. ผลการทดลองจริง

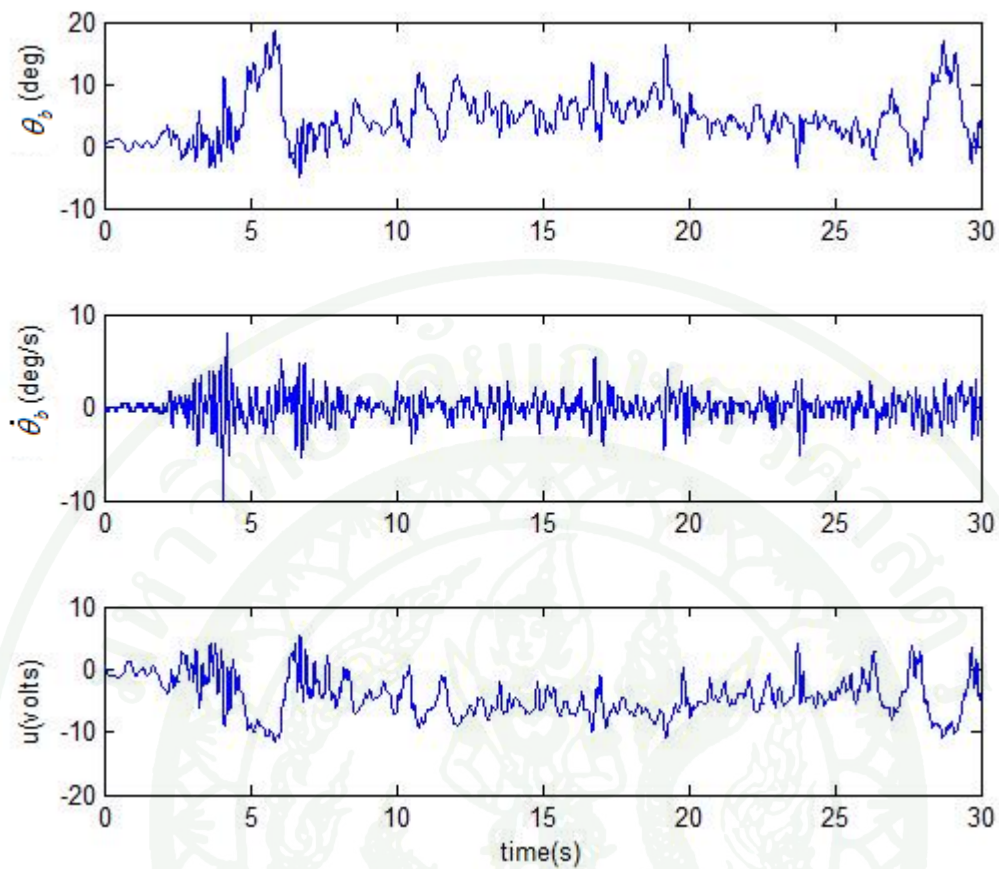
2.1 การทรงตัวในตำแหน่งหยุดนิ่ง

จากการทดสอบดังภาพที่ 41 พบว่า รถสองล้อสามารถทรงตัวอยู่กับที่ได้ ในขณะที่มีผู้ขับขี่ขึ้นไปยืนบังคับ และสามารถทดทานสิ่งรบกวนจากแรงผลักราชนอกได้



ภาพที่ 41 การทรงตัวบนรถสองล้อ

ภาพที่ 42 แสดงมุมเอียงของรถสองล้อเทียบกับเวลา เนื่องจากการสั่นไหวของข้อเท้าของผู้ขับขี่ทำให้เกิดมุมแกว่งอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 20 \text{ deg}$ อย่างไรก็ตามว่าตัวควบคุมพีชซึ่งยังสามารถควบคุมการทรงตัวของรถสองล้อไว้ได้



ภาพที่ 42 มุมเอียงของรถสองล้อขณะทรงตัวอยู่กับที่

2.2 การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและข้างหลัง

จากภาพที่ 43 การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอาศัยการเอียงตัวไปข้างหน้าของผู้ขับขี่ และสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหลังได้โดยการเอียงตัวไปข้างหลังของผู้ขับขี่เช่นกัน



ภาพที่ 43 การเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

2.3 การเคลื่อนที่เดียวซ้ายและเดียวขวา

รถสองล้อเดียวซ้ายขวาได้อย่างอิสระโดยผู้ขับขี่สามารถปรับ potentiometer เพื่อ scaling amplitude ของสัญญาณป้อนเข้า motor ซ้ายและขวา ทำให้สามารถเลี้ยวได้ตามต้องการ



ภาพที่ 44 การเคลื่อนที่เดียวขวา

สรุปและข้อเสนอแนะ

เราได้พัฒนาตัวควบคุมฟัซซี่แบบ 2 อินพุต 1 เอาท์พุท แต่ละอินพุตมี 11 linguistic numeric value ทำให้เรามี Rule base ทั้งหมด 121 Rule (11^2) เราใช้ minimum operator เป็นตัวเชื่อม premise และใช้ triangular membership function เราใช้วิธี COG defuzzication ให้ effective universe of discourse เป็น $[-1,1]$ โดยมีอัตราขยายอินพุต g_1, g_2 และอัตราขยายเอาท์พุท h ซึ่งได้จากการทดลอง

เราหาสมการทางคณิตศาสตร์ของรถสองล้อโดยใช้สมการลากรางจ์ จะคำนวณจากสมการพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ในรูปของตัวแปรพิกัด และจำลองระบบโดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink จากการจำลองพบว่าตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบ สามารถรักษาสถิตของรถสองล้อได้ในขณะหยุดนิ่ง เมื่อมีสิ่งรบกวนจากภายนอกที่เป็นสัญญาณรบกวนแบบ unit impulse และแบบ sine wave ตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบก็ยังสามารถรักษาสถิตได้

เราได้ทำการทดลองจริงโดยให้ผู้ขับขี่ขึ้นไปบังคับรถสองล้อ พบว่าตัวควบคุมฟัซซี่ที่ออกแบบสามารถรักษาสถิตไว้ได้ขณะหยุดนิ่ง โดยที่ผู้ขับขี่ไม่ล้มลง และผู้ขับขี่สามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือด้านหลังโดยการโน้มตัวไปด้านหน้าหรือหลัง ผู้ขับขี่สามารถเพิ่มหรือลดความเร็วของรถสองล้อได้โดยใช้ขนาดการโน้มเอียงที่มากขึ้นหรือน้อยลง นอกจากนี้ผู้ขับขี่ยังสามารถเลี้ยวซ้ายหรือขวาได้โดยการปรับ potentiometer เพื่อ Scaling สัญญาณที่ส่งไปที่ motor ซ้ายหรือขวา

การสั่นไหวของข้อเท้าของผู้ขับขี่ที่เกิดจากความไม่เคยชิน จะทำให้เกิดสิ่งรบกวนระบบ แม้ว่าตัวควบคุมฟัซซี่ของรถสองล้อจะยังรักษาสถิตไว้ได้แต่ก็ทำให้การบังคับรถสองล้อเกิดความยากลำบาก

การออกแบบ Rule Base ทั้ง 121 rule ของตัวควบคุมฟัซซี่ ที่มาจากความรู้ความเข้าใจในการบังคับควบคุมระบบของผู้ออกแบบ มีผลอย่างมากในประสิทธิภาพของการควบคุม การออกแบบ Rule base ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลงหรือทำให้ระบบไร้เสถียรภาพได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Baerveldt, A.J. and R. Klang. 1996. A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter, pp 391-395. **In Proceedings of IEEE Conf. Intelligent Engineering System.**
- Binhayihmat, W. and W. Chatlatanagulchai. 2011. Inclination Angle Estimation Using Kalman Filter and Low-Cost Sensors. **Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand. (ME-NETT 25).** 19-21 Oct. 2011.
- Chatlatanagulchai, W., K. Yaovaja and T. Siritanapipat. 2008. Design of servo systems for a two-wheeled robot using integrators-augmented observer-based LQR. **Journal of Research in Engineering and Technology** 5(4): 114-120.
- Ching-Chih, T., H. Hsu-Chih and L. Shui-Chun. 2010. Adaptive Neural Network Control of a Self-Balancing Two-Wheeled Scooter. **IEEE Transaction on Industrial Electronic,** 57(4): 178-215.
- Grasser, F., A.D. Arrigo, S. Colombi and A. Ruffer. 2002. JOE: A Mobile, Inverted Pendulum. **IEEE Transactions on Industrial Electronics** 49(1): 87-93.
- Hashimoto, M. and F. Oba. 1993. Dynamic control approach for motion coordination of multiple wheeled mobile robots transporting a single object, **Proceedings of 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems** 18(1): 1944-1951.
- Ha, Y. and S. Yuta. 1996. Trajectory Tracking Control for Navigation of The Inverse Pendulum Type Self-contained Mobile Robot. **Robotic and Autonomous System** 17(1-2): 65-80.
- Kodagoda, K.R.S., W.S. Wijesoma and E.K. Teoh. 2002. Fuzzy Speed and steering control of an agv. **IEEE Transaction on Control System Technology** 10(1): 135-147.

- Leavitt, J., A. Sideris and J.E. Bobrow. 2006. High Bandwidth Tilt Measurement Using Low-Cost Sensors. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics** 11(3): 158-173.
- Lewis, F.L. and V.L. Syrmos. 1995. **Optimal Control**. John Wiley & Sons, New York.
- L.Wang, S. Zheng, X. Wang and L. Fan. 2010. Fuzzy control of a double inverted pendulum based on information fusion. **Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)** 13-15 Aug 2010, Dalian, China.
- Rehbinder, H. and X. Hu. 2004. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies. **Automatica** 40: 653-659.
- Sasaki, M., N. Yanagihara, O. Matsumoto and K. Komoriya. 2004. Forward and Backward motion control of Personal riding-type wheeled mobile platform, pp.3331- 3336. **Conference on Robotics and Automation, 2004 IEEE International** April 26-May 1, 2004
- Sasaki, M., N. Yanagihara, O. Matsumoto and K. Komoriya. 2005. Steering control of the personal riding-type wheeled mobile platform (PMP), pp. 1697- 1702. **Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005 IEEE/RSJ International (IROS 2005)**. 2-6 Aug. 2005.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายวัชรพล บิลหะยีหมัด
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 พฤษภาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์(บางเขน) พ.ศ. 2550
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์