

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับกฎด้วยตนเอง

SELF-ORGANIZING FUZZY LOGIC CONTROLLER DESIGN



โดย

นายพงศธร กนิษฐานนท์

นายมนตรา วงศ์สายเชื้อ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...42329
วัน, เดือน, ปี...17 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

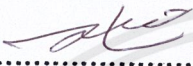
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบตัวควบคุมพีชซีแบบปรับกฎด้วยตนเอง

ผู้จัดทำ 1.นายพงศธร กนิษฐานนท์ 40010473

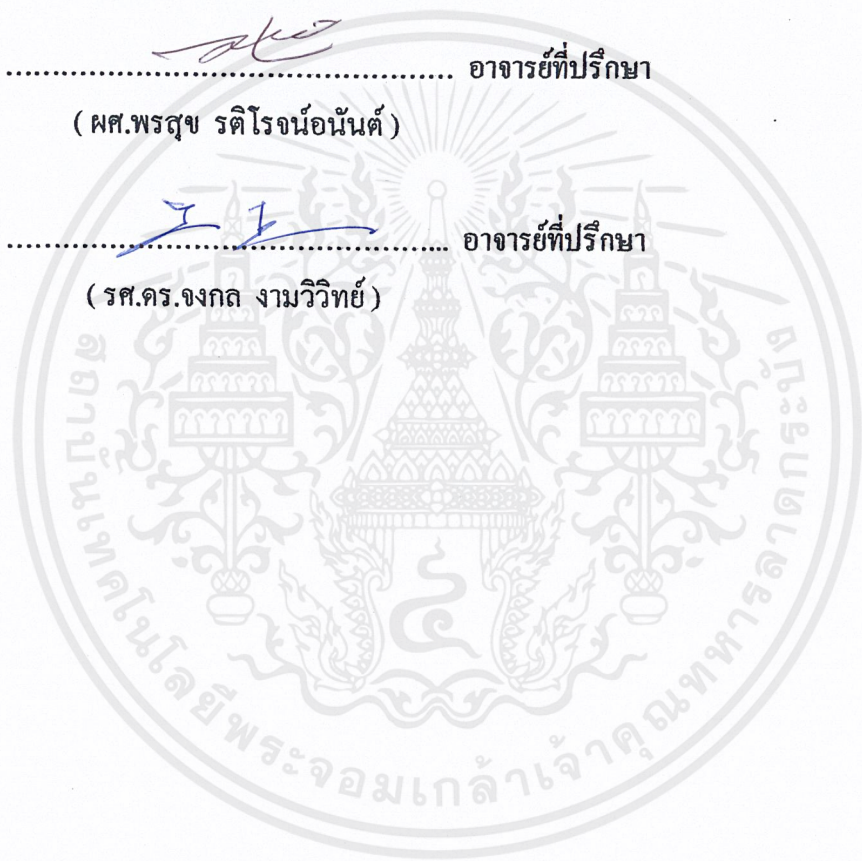
2.นายมนตรา วงศ์สายเชื้อ 40010578


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พรสุข รติโรจน์อนันต์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.จنگต งามวิวิทย์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตนเอง
(Self-Organizing Fuzzy Logic Controller Design)

โดย

นายพงศธร กนิษฐานนท์
นายมนตรา วงศ์สายเชื้อ
อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.พรศุข รติโรจน์อนันต์
รศ.ดร.จกกล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตนเอง จุดประสงค์เพื่อหาโครงสร้างกฎที่เหมาะสมจากการเรียนรู้และแก้ไขกฎในฐานความรู้ของระบบ เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองให้เป็นไปตามที่ต้องการ สำหรับอัลกอริทึมในการปรับกฎ ใช้การวิเคราะห์ทางเดินสถานะของระบบเพื่อตรวจสอบกฎที่ควรปรับ และทำการปรับปรุงผลตอบสนองโดยใช้ฟังก์ชันอิ่มตัวเป็นค่าถ่วงน้ำหนักในการเลื่อนกฎเพื่อลดการพุ่งเกิน (Overshoot) และใช้การขยายกฎเพื่อลดเวลาในการเข้าถึง (Rise time) ในส่วนการทดลองเพื่อทดสอบอัลกอริทึมแบบปรับกฎนี้ ใช้ตัวควบคุมฟัซซี่ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษาซีในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ทำการควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัม

Abstract

This thesis presents self-organizing fuzzy logic controller design. The objective is to determine the appropriate control rules by learning and modifying from knowledge base to accomplish the desired control performance. The self-organizing algorithm is based on the state trajectory analysis that can determine the rules for modifying the characteristic of fuzzy logic controller. The saturated function is used to weight the shifting of the rule in order to reduce the overshoot and hedge the rule in order to shorten the rise time. To improve this algorithm, the designed controller is used to control the inverted pendulum car which is implemented on the personal computer by using C-language.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
สารบัญรูปภาพและตาราง	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 เหตุผลในการใช้การควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control)	1
1.2.1 เหตุผลในทางทฤษฎี	1
1.2.2 เหตุผลในทางปฏิบัติ	2
1.3 เหตุผลในการเลือกระบบเป็นรถอินเวอร์ทเพนดูลัม (Inverted Pendulum Car)	2
1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	4
2.1 ทฤษฎีฟัซซี่เซต	4
2.1.1 ตัวแปรฟัซซี่	4
2.1.2 ตัวดำเนินการฟัซซี่เซต	5
2.2 ฟัซซี่ลอจิก	5
2.2.1 การแทนข้อมูลโดยฟัซซี่เซต	6
2.2.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	8
2.2.2.1 ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม	8
2.2.2.2 ฟังก์ชันรูปตัว S	9
2.2.2.3 ฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ	10
2.2.3 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	11
2.3 ระบบควบคุมฟัซซี่	12
2.3.1 กระบวนการฟัซซิฟิเคชัน	13
2.3.2 กระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์	16
2.3.3 กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน	23
2.3.4 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก	25
2.3.5 การออกแบบกฎที่ใช้ในการควบคุม	25
2.3.5.1 ฐานความรู้จากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญหรือวิศวกรควบคุม	25
2.3.5.2 แบบจำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.5.3 แบบจำลองฟัซซี่	26
2.3.5.4 การเรียนรู้ด้วยระบบเอง	26
2.3.5.5 วิธีฮิวริสติก	26
2.3.5.6 วิธีคิโทมินิสติก	31
2.3.5.7 เทคนิคการสร้างแบบจำลองฟัซซี่	31
2.4 ตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตนเอง	32
หน่วยวัดสมรรถนะ	33
หน่วยการแก้ไขกฎ	37
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้างระบบควบคุมรถอินเวอร์ตเพนดูลัม	39
3.1 ส่วนประกอบของระบบ	39
3.1.1 ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ลอจิก	41
3.1.2 รถอินเวอร์ตเพนดูลัม	41
3.1.3 ตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ	42
3.1.4 วงจรปรับแปลงสัญญาณ	43
3.1.5 วงจรขับมอเตอร์	44
3.1.6 วงจร Data converter	45
3.1.6.1 วงจร Analog to Digital Converter	45
3.1.6.2 วงจร Digital to Analog Converter	47
3.2 การออกแบบระบบควบคุมฟัซซี่	48
3.2.1 การออกแบบในส่วนของ Basic Fuzzy Logic Controller	48
3.2.1.1 การจำลองการทำงาน โดยใช้โปรแกรม Matlab	48
3.2.2.2 การประยุกต์ใช้งานจริงด้วยโปรแกรมภาษาซี	48
3.2.2 การออกแบบในส่วนของ Self-organizing Fuzzy Logic Controller	48
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	52
4.1 การทดลองควบคุมระบบอินเวอร์ตเพนดูลัมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ที่ไม่มีการปรับกฎ	52
4.2 การทดลองควบคุมระบบอินเวอร์ตเพนดูลัมด้วยตัวควบคุมฟัซซี่ที่มีการปรับกฎด้วยตนเอง	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมพืชที่ปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3	54
4.2.2 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมพืชที่ปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5	57
4.2.3 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมพืชที่ปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7	59
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในการปรับกฎของตัวควบคุมพืช	62
5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในส่วนอื่นงาน	63
5.4 แนวทางในการค้นคว้าต่อไปสำหรับนักศึกษารุ่นหลัง	65
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	69
กิตติกรรมประกาศ	70
เอกสารอ้างอิง	71

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงกราฟของความเป็นสมาชิกของเซตธรรมดา	7
รูปที่ 2.2 แสดงกราฟระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต	7
รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม	9
รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัว S	10
รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัวระฆังคว่ำ	10
รูปที่ 2.6 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม	11
รูปที่ 2.7 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม	11
รูปที่ 2.8 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม	12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของ Fuzzy Logic Controller	13
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่	13
รูปที่ 2.11 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร error	14
รูปที่ 2.12 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร cerror	15
รูปที่ 2.13 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร u	16
รูปที่ 2.14 แสดงการ Fuzzy Reasoning โดยวิธีการ min-max-gravity method	19
รูปที่ 2.15 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{NB}(\text{error})$)	19
รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{NS}(\text{error})$)	20
รูปที่ 2.17 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{ZE}(\text{error})$)	20
รูปที่ 2.18 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{PS}(\text{error})$)	21
รูปที่ 2.19 แสดงตัวแปรเอาต์พุตในเทอมของฟัซซี่เซต	23
รูปที่ 2.20 แสดงกระบวนการดิฟฟิเคชัน โดยวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง	24
รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างลูปวงปิดที่ควบคุมโดยตัวควบคุมฟัซซี่	27
รูปที่ 2.22 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดต่อสัญญาณขั้นบันได และแสดงสร้างระนาบของเฟสด้วยตัวแปรอินพุตสองตัว E และ CE	27
รูปที่ 2.23 แสดงแนวของกฎบนเมตริกซ์กฎการควบคุม	30
รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซี่แบบปรับกฎด้วยตนเอง	33
รูปที่ 2.25 แสดงช่วงของกฎจาก error และ cerror	34
รูปที่ 2.26 แสดงกราฟทางเดินสถานะของระบบ	35

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่ 2.27 แสดงการเลื่อนกฎในกระบวนการปรับกฎ	38
รูปที่ 2.28 แสดงการขยายกฎในกระบวนการปรับกฎ	38
รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	39
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ในระบบ	40
รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของรถ invert pendulum	41
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ	42
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของวงจรปรับแปลงสัญญาณ	43
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับมอเตอร์	45
รูปที่ 3.7 แสดง ET-DIO Card	46
รูปที่ 3.8 โพลีชาร์ทแสดง โปรแกรมหลักในการทดสอบกระบวนการทำงานของระบบ	49
รูปที่ 3.9 โพลีชาร์ทแสดง โปรแกรมย่อย Pendulum	50
รูปที่ 3.10 โพลีชาร์ทแสดง โปรแกรมย่อย modify_rule	51
รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น 0.2625 เรเดียน	52
รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น -0.2625 เรเดียน	53
รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	55
รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	56
รูปที่ 4.5 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	57
รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	58
รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	60
รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	61
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรขับมอเตอร์ที่ได้รับการปรับปรุง	64
รูปที่ 5.2 แสดงส่วนของวงจรที่ต่อเพิ่มเติม	65

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงตารางของกฎที่ได้จากการออกแบบ	18
ตารางที่ 2.2 แสดงการออกแบบกฎควบคุมแบบพีชชีด้วยเทอมเซต [N, Z, P] สำหรับตัวแปร [E, CE, CI]	28
ตารางที่ 2.3 แสดงการออกแบบกฎควบคุมแบบพีชชีด้วยเทอมเซต [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB] สำหรับตัวแปร [E, CE, CI]	29
ตารางที่ 2.4 แสดงตารางเมตริกซ์ของกฎการควบคุม	30
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่านุมเริ่มต้น 0.2625 เรเดียน	53
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่านุมเริ่มต้น -0.2625 เรเดียน	54
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	55
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	56
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	58
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	59
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน	60
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็น สมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่านุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การควบคุมระบบในปัจจุบันมีหลายวิธี โดยปกติแล้วนิยมใช้ตัวควบคุมแบบ PID (PID Controller) แต่เนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้มีความลำบากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามไปด้วย ซึ่งจะเกิดข้อจำกัดในการใช้ ตัวควบคุมแบบPIDในระดับหนึ่ง จึงได้มีการคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวขึ้นมากมาย วิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คือ การควบคุมโดยเลียนแบบความคิดของมนุษย์ได้แก่การควบคุมโดยใช้ทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) และทฤษฎีโครงข่าย(Neural Network)

ระบบควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control System) มีพื้นฐานแนวความคิดมาจากทฤษฎีฟัซซี่ลอจิก และทฤษฎีฟัซซี่เซต (Fuzzy Set) โดยทฤษฎีฟัซซี่ลอจิกมีพื้นฐานอยู่บนทฤษฎีฟัซซี่เซต ซึ่งจะช่วยให้สามารถอธิบายการทำงานและกฎการควบคุมของระบบได้ชัดเจนมากขึ้น หลักสำคัญของทฤษฎีฟัซซี่เซต คือ ยอมรับสมาชิกที่มีลักษณะตามเซตเพียงบางส่วนเข้ามาเป็นสมาชิก ซึ่งแตกต่างจากทฤษฎีเซตดั้งเดิม (Crisp Set) ที่เน้นชัดเจนเลยว่าเป็นหรือไม่เป็นสมาชิกของเซต ไม่มีการเป็นสมาชิกของเซตเพียงบางส่วน

สำหรับในส่วนของปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ (Fuzzy Controller) ควบคุมรถอินเวอร์ตเพนดูลัม (Inverted Pendulum Car) โดยอาศัยทฤษฎีฟัซซี่ลอจิกมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม (Controller)

1.2 เหตุผลในการใช้การควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control)

สำหรับระบบที่ใช้ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ เรียกว่า ระบบควบคุมฟัซซี่ หรือ ระบบกฎพื้นฐาน (Rule-based System) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้กฎของฟัซซี่ในการตัดสินใจเพื่อทำการควบคุมระบบ โดยมีเหตุผลในการใช้การควบคุมฟัซซี่ดังนี้

1.2.1 เหตุผลในทางทฤษฎี

1.2.1.1 ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่สามารถออกแบบจากผู้เชี่ยวชาญโดยอธิบายระบบออกมาเป็นภาษามนุษย์ ส่วนตัวควบคุมแบบเก่าไม่สามารถนำข้อมูลที่เป็นภาษามนุษย์มาใช้ได้

1.2.1.2 การควบคุมฟัซซี่ ไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.2.1.3 ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่เป็น ตัวควบคุมชนิดไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear controller) สามารถปรับแต่งให้ทำงานเป็น การควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear control action)แบบใด ๆ ก็ได้ ถ้าเลือก ตัวแปร (parameter) ของตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ได้อย่างเหมาะสมแล้วสามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ได้

1.2.2 เหตุผลในทางปฏิบัติ

1.2.2.1 การควบคุมชนิดฟัซซี่เป็นระบบที่ทำความเข้าใจได้ง่าย เนื่องจากการเลียนแบบวิธีการควบคุมของมนุษย์

1.2.2.2 ในปัจจุบันมี ไอซีฟัซซี่วีแอลเอสไอ (Fuzzy VLSI Chip) ทำให้สร้างตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ได้ง่ายและรวดเร็ว

1.2.2.3 เสียค่าใช้จ่ายน้อย เนื่องจากการควบคุมชนิดฟัซซี่ ทำความเข้าใจได้ง่าย ทำให้ต้นทุนด้านซอฟต์แวร์ (software cost) ต่ำและจากการที่สามารถสร้างตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ขึ้นได้ง่าย จึงทำให้ต้นทุนทางด้านฮาร์ดแวร์ (hardware cost) ต่ำด้วยเช่นกัน

1.3 เหตุผลในการเลือกระบบเป็นรถอินเวอร์ทเพนดูลัม (Inverted Pendulum Car)

1.3.1 เนื่องจากรถอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็น ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) ซึ่งเหมาะสมกับการควบคุมโดยตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ลอจิก

1.3.2 รถอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจในหลักการการทำงาน ดังนั้นจึงสามารถศึกษาเพื่อให้เกิดความชำนาญในระบบแก่ผู้ออกแบบได้ง่าย

1.3.3 เนื่องจากรถอินเวอร์ทเพนดูลัมได้มีการออกแบบและสร้างไว้แล้ว จึงใช้เวลาไม่นานในการศึกษาและปรับปรุงระบบ

1.4 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการทำปริญญานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาและควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic Controller (FLC)) และ ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง (Self-Organizing Fuzzy Logic Controller (SOFLC)) โดยอาศัยทฤษฎีฟัซซี่ลอจิกและ หลักการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ (tracking state trajectory)

1.4.2 ศึกษาและทดลองการจำลองการทำงาน (Simulation) ของ ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ลอจิก โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (Matlab Programme) บน เครื่องคอมพิวเตอร์ (personal computer)

1.4.3 ศึกษาและเปรียบเทียบระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control System) ที่ควบคุมโดยตัวควบคุมชนิดพีชชีลจิกและตัวควบคุมพีชชีลจิกชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ศึกษาการเลือกใช้กฎพื้นฐาน (Rule Bases) และฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (Membership function) ให้เหมาะสมกับกระบวนการของระบบ

1.4.4 ศึกษาแนวทางและทดลองการนำ ตัวควบคุมชนิดพีชชีลจิกและตัวควบคุมพีชชีลจิกชนิดปรับกฎด้วยตัวเอง ไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้ ซอฟต์แวร์ และ การ์ดอินเทอร์เฟซ (Interface Card) ร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์



บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีฟัซซีเซต

ทฤษฎีฟัซซีเซตเป็นเซตที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของสมาชิกภายในกลุ่มแต่ละตัวกับค่าจำกัดความของเซตนั้น ๆ โดยความสัมพันธ์นี้จะถูกแสดงในลักษณะของระดับความเป็นสมาชิก ที่มีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ แทนที่จะแสดงว่า สมาชิกตัวใดเป็นสมาชิกหรือไม่เป็นสมาชิกของเซตนั้น อย่างเซตธรรมดา (ซึ่งมีค่าเป็น $\{0,1\}$ โดย 0 คือค่าต่ำสุดและ 1 คือค่าสูงสุด) ถ้าเรากำหนดให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ และฟัซซีเซต A มีสมาชิกของเซตเป็น $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$ โดยที่ X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) เป็นสมาชิกของเซต A ซึ่งเซต A สามารถแสดงในรูปแบบของความสัมพันธ์ในฟัซซีเซตได้โดย $\mu_A(X_i)$ ความสัมพันธ์เช่นนี้ในทางทฤษฎีของฟัซซีเซตจะเรียกว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) และสามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดย

$$\mu_A(X_i) \rightarrow [0,1] \quad (2.1)$$

โดยที่ $\mu_A(X_i)$ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซต A

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตใดก็จะสอดคล้องกับค่าจำกัดความของเซตนั้น และค่าจำกัดความเหล่านี้ก็คือตัวแปรต่างๆของฟัซซีเซตที่อยู่ภายในขอบเขตเอกภพสัมพัทธ์หรือระบบใดๆที่เราสนใจ

2.1.1 ตัวแปรฟัซซี (Fuzzy Variable) หรือบางครั้งอาจจะเรียกว่า ตัวแปรทางภาษา (Linguistic Variable) ซึ่งก็คือฟัซซีเซตใด ๆ ของระบบที่เราสนใจ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณา “อุณหภูมิ” เป็นตัวแปรฟัซซีและถ้าค่าของตัวแปรของเซตนี้ คือ {ต่ำ, ปานกลาง, สูง} ซึ่งเรียกเซตของค่าตัวแปรฟัซซีนี้ว่า เทอมเซตหรือเซตย่อย และนอกจากนี้ตัวแปรฟัซซีเซตแต่ละตัวอาจมีส่วนขยาย (Hedges หรือ Qualifiers) เพื่อปรับค่าตัวแปรให้มีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น เช่น จากค่าของตัวแปรอุณหภูมิ “ต่ำ \rightarrow ต่ำมาก”, “สูง \rightarrow ค่อนข้างสูง” เป็นต้น คำว่า “มาก” หรือ “ค่อนข้าง” ในที่นี้เป็นส่วนขยายของตัวแปรฟัซซี ซึ่งในทางปฏิบัติสามารถแทนด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้

2.1.2 ตัวดำเนินการฟัซซี่เซต

ตัวดำเนินการฟัซซี่เซตส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวดำเนินการคล้ายกับเซตธรรมดา เช่น อินเตอร์เซกชัน ยูเนียน คอมพลิเมนต์ เป็นต้น ซึ่งตัวดำเนินการเหล่านี้จะใช้ในการอนุมานฟัซซี่เซตเพื่อประโยชน์ในการตัดสินใจโดยการประมาณค่าของตัวแปร ในที่นี้จะเสนอตัวดำเนินการของฟัซซี่เซตบางส่วนที่ใช้ในแบบจำลองการตัดสินใจของระบบควบคุมโดยใช้ฟัซซี่เซตเท่านั้น

กำหนดให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพัทธ์ A, B เป็นเทอมเซตใด ๆ ที่อยู่ใน U และตัวดำเนินการพื้นฐานต่าง ๆ สามารถกำหนดได้ดังนี้

1. เซตย่อย A เป็นเซตย่อยของ B ($A \subseteq B$) ก็ต่อเมื่อ

$$\mu_A(x_i) \leq \mu_B(x_i) ; \forall x_i \in U \quad (2.2)$$

2. คอมพลิเมนต์ของ B ($A = B'$) ก็ต่อเมื่อ

$$\mu_A(x_i) = \mu_{B'}(x_i) = 1 - \mu_B(x_i) ; \forall x_i \in U \quad (2.3)$$

3. อินเตอร์เซกชันของ A และ B ($A \cap B$) กำหนดได้โดย

$$\mu_{A \cap B}(x_i) = \text{Min}(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)) ; \forall x_i \in U \quad (2.4)$$

4. ยูเนียนของ A กับ B ($A \cup B$) กำหนดได้โดย

$$\mu_{A \cup B}(x_i) = \text{Max}(\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)) ; \forall x_i \in U \quad (2.5)$$

2.2 ฟัซซี่ลอจิก

ฟัซซี่ลอจิกเป็นลอจิกที่แตกต่างจากลอจิกดั้งเดิม(Classical Logic) ซึ่งจะมีเพียง 2 สถานะคือ 0 และ 1 หรือ เท็จและจริง ฟัซซี่ลอจิกอาจจะไม่เป็นเท็จหรือจริงทั้งหมด ซึ่งสถานะของลอจิกจะเป็นระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต

ฟัซซี่ลอจิกจะมีการกระทำทางลอจิกเพื่อรวมค่าลอจิกต่าง ๆ ให้เป็นค่าฟัซซี่ลอจิก คล้ายตัวแปรในระบบลอจิกดั้งเดิม โดยจะต้องมีการกำหนดลักษณะความหมายให้แตกต่างกันแต่ใช้คำสั่งทางลอจิกที่เหมือนกัน คือ AND, OR และ NOT ความหมายต่าง ๆ ในระบบฟัซซี่ ถูกกำหนดโดย L.A. Zadeh ผู้คิดค้นระบบฟัซซี่ลอจิก

- การ AND ของฟัซซี่ลอจิก ตามคำจำกัดความของ Zadeh คือ ค่าความจริงที่น้อยที่สุด (Minimum) นั่นคือสำหรับค่าฟัซซี่ A และ B

$$\mu(A \text{ and } B) = \min(\mu_A, \mu_B) \quad (2.6)$$

- การ OR ของฟัซซีลอจิก ตามคำจำกัดความของ Zadeh คือ ค่าความจริงที่มากที่สุด (Maximum)

$$\mu(A \text{ OR } B) = \max(\mu_A, \mu_B) \quad (2.7)$$

- การ NOT ของค่าฟัซซีลอจิก

$$\mu(\text{NOT } A) = 1 - \mu_A \quad (2.8)$$

ซึ่งการกระทำทั้ง 3 นี้ เป็นสมมูลของการกระทำในลอจิก 2 ระดับ สำหรับค่า μ มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

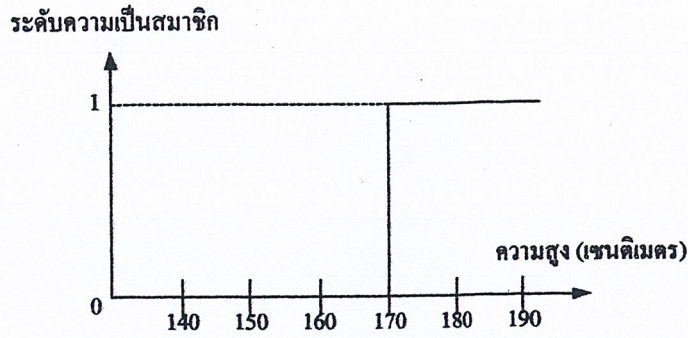
2.2.1 การแทนข้อมูลโดยฟัซซีเซต

เพื่อทำความเข้าใจการแทนข้อมูลโดยฟัซซีได้ง่ายขึ้น เราจะขอยกตัวอย่างของสถานการณ์ที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน คือเราจะพิจารณาความสูงของผู้ชายไทย โดย “ความสูง” ในที่นี้จะเป็นตัวแปรฟัซซีเซตและเพื่อให้เข้าใจความหมายของฟัซซีเซตได้เด่นชัดยิ่งขึ้น เราจะเปรียบเทียบการแทนข้อมูลของฟัซซีกับเซตธรรมดา จะต้องมีกำหนัดค่าเทรชโฮลด์(Threshold) เพื่อที่จะนำมาเป็นตัวตัดสินว่าสมาชิกตัวใดในเซตเอกภพสัมพัทธ์ที่เป็นสมาชิกเซตที่กำลังพิจารณาอยู่บ้าง สำหรับตัวอย่างของเซตความสูงของผู้ชายไทย สมมุติอยู่ในช่วง 140-180 เซนติเมตร(โดเมน(Domain)ของเซตเอกภพสัมพัทธ์) แต่ในที่นี้เราสนใจคนที่สูง ถ้าเรากำหนดให้ A เป็นเซตของคนสูง(“สูง”ในกรณีของฟัซซีเซตจะเป็นเทอมเซต)ดังนั้นเซตAในกรณีของเซตธรรมดาจะต้องมีค่าขีดเริ่มต้นเปลี่ยนหรือค่าเทรชโฮลด์ ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้เท่ากับ 170 เซนติเมตร นั่นคือ ถ้าชายไทยมีความสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 170 เซนติเมตร จะถือว่าสูง(เป็นสมาชิกของเซตA) ซึ่งสามารถเขียนเป็นฟังก์ชันคุณลักษณะ(Characteristic Function) หรือฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ดังนี้

$$\mu_A(X_i) = \{ X_i \geq 170 \} \quad (2.9)$$

โดยที่ X_i คือ ความสูงของชายไทยคนที่ i

จากสมการที่ สามารถนำมาเขียนกราฟของความเป็นสมาชิกได้ดังรูปที่ 2.1



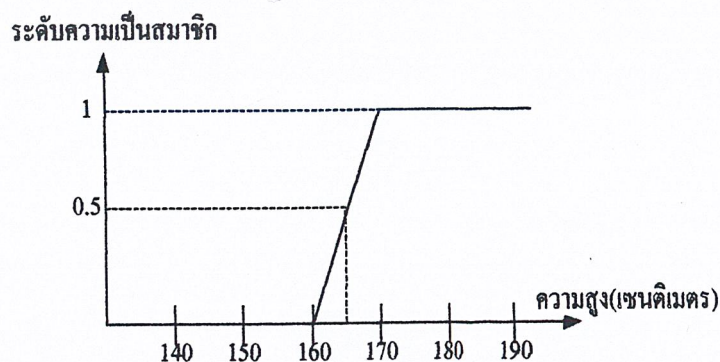
รูปที่ 2.1 แสดงกราฟของความเป็นสมาชิกของเซตธรรมดา

ในกราฟ บนแนวแกนตั้งแทนค่าระหว่างระดับความเป็นสมาชิกที่มีค่าเป็น 0 (ไม่เป็นสมาชิกของเซต A) และ 1 (เป็นสมาชิกของเซต A) และจะเห็นได้ว่าคนที่มีความสูงมากกว่าหรือเท่ากับ 170 เซนติเมตร ขึ้นไปเท่านั้นจึงจะถือว่าผู้ชายคนนั้นสูง นอกนั้นจะไม่ใช้สมาชิกของเซต A

ในกรณีของฟัซซีฟังก์ชัน ความเป็นสมาชิกจะมีความยืดหยุ่นกว่า และสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่าเซตธรรมดา ดังในสมการที่ 2.10

$$\mu_A(X_i) = \begin{cases} \frac{1}{(170 - 160)} (X_i - 160) & ; 160 \leq X_i \leq 170 \\ 1 & ; X_i > 170 \\ 0 & ; \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (2.10)$$

ในสมการที่ 2.10 เป็นการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกให้กับเทอมของคนสูงและในกราฟรูปที่ 2.2 แสดงกราฟระดับความเป็นสมาชิกของสมการนี้



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซีเซต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

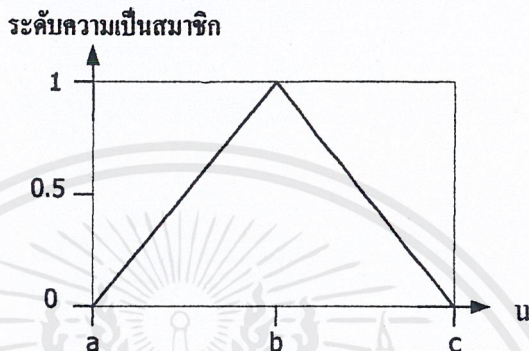
เมื่อเปรียบเทียบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในกราฟรูปที่ 2.1 กับรูปที่ 2.2 จะเห็นว่ากราฟ แสดงความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตจะมีความต่อเนื่องในค่าระดับความเป็นสมาชิกในช่วง $[0,1]$ เช่น คนที่มีความสูง 165 เซนติเมตร ก็จะถือว่าเป็นคนสูงเช่นกัน แต่เขาจะมีระดับความเป็นสมาชิก ของเซต A ทั้งที่เขามีความสูงแตกต่างจากคนที่สูงไม่ถึงเซนติเมตรเท่านั้น หรือแม้แต่คนที่มีความสูง 169 เซนติเมตร ซึ่งมีความสูงแตกต่างจากคนที่ถือว่าสูงเพียง 1 เซนติเมตรเท่านั้น แต่ในเซตธรรมดา จะถือว่าเขาไม่ใช่คนสูงแต่สำหรับการแทนข้อมูลโดยฟuzzyจะถือว่าคนนี้เป็นเซตของคนสูงด้วยค่า ระดับความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.9 (คือเกือบจะเป็นคนสูงเลยทีเดียว)

2.2.2 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกให้กับฟuzzyเซตมี 2 วิธี คือ การกำหนดโดยใช้ตัวเลข และกำหนดโดยใช้ฟังก์ชัน การกำหนดโดยใช้ตัวเลขนั้น ค่าระดับความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซต สามารถอธิบายได้โดยใช้เวกเตอร์ตัวเลขซึ่งมิติของเวกเตอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนสมาชิกซึ่งเป็นแบบไม่ ต่อเนื่องในเอกภพสัมพัทธ์ ส่วนการกำหนดโดยใช้ฟังก์ชันนั้นจะมีการกำหนดฟังก์ชันซึ่งเป็น ฟังก์ชันจากเอกภพสัมพัทธ์ไปบน $[0,1]$ ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนี้จะใช้ในการประมาณค่า ความเป็นสมาชิกของแต่ละเทอมเซต โดยมีทั้งแบบประมาณค่าเป็นเชิงเส้น เช่น รูปสามเหลี่ยม รูปสี่ เหลี่ยมคางหมู และแบบที่ประมาณค่าโดยฟังก์ชันต่อเนื่อง เช่น S, S^{-1} , ระฆังคว่ำ เป็นต้น ในที่นี้จะ กล่าวถึงรูปแบบที่นิยมใช้ ดังนี้

2.2.2.1 ฟังก์ชันรูปสามเหลี่ยม (T-function) การกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกโดยใช้ รูปสามเหลี่ยม นิยมใช้กันมากในระบบควบคุมที่ใช้ฟuzzyเซต เทอมเซตที่กำหนดโดยฟังก์ชันนี้จะ ต้องมีค่าเหมาะสมที่สุดอยู่เพียงค่าเดียวที่ทำให้ค่าความเป็นสมาชิกเท่ากับหนึ่ง ส่วนค่าอื่น ๆ จะมีค่า ความเป็นสมาชิกลดลงเรื่อย ๆ เมื่อยิ่งห่างค่านี้น่ามากขึ้น ถ้ากำหนดให้ $a \leq b \leq c$ เมื่อ a, b และ c เป็น เลขจำนวนจริงใดๆ และ u คือ ค่าตัวแปรอินพุต สมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของรูป สามเหลี่ยมสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$T(u;a,b,c) = \begin{cases} 0 & ; u \leq a \\ (u - a) / (b - a) & ; a < u \leq b \\ (c - u) / (c - b) & ; b < u \leq c \\ 0 & ; u > c \end{cases} \quad (2.11)$$

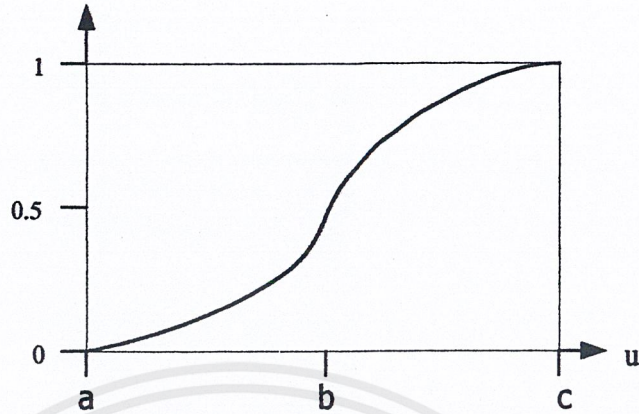


รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม

2.2.2.2 ฟังก์ชันรูปตัว S (S-function) เป็นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนไปยังเรนจ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้ ฟังก์ชันนี้ คือพวกอายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรพวกนี้มักจะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ถ้ากำหนดให้ $a \leq b \leq c$ เมื่อ a, b และ c เป็นเลขจำนวนจริงใด ๆ และ u คือ ค่าตัวแปรอินพุต สมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของรูปตัว S สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$S(u;a,b,c) = \begin{cases} 0 & ; u < a \\ 2[(u - a) / (c - a)]^2 & ; a \leq u < b \\ 1 - 2[(u - c) / (c - a)]^2 & ; b \leq u \leq c \\ 1 & ; u > c \end{cases} \quad (2.12)$$

ระดับความเป็นสมาชิก

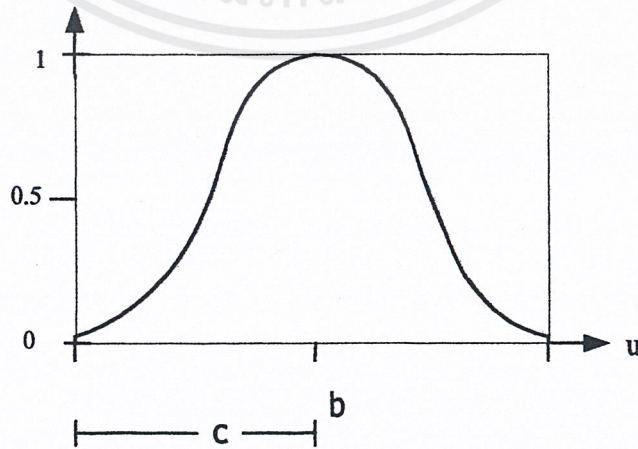


รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัว S

2.2.2.3 ฟังก์ชันรูประฆังคว่ำ (π -function) เทอมเซตที่ใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูประฆังคว่ำจะมีคุณสมบัติของข้อมูลคล้ายสมการรูปสามเหลี่ยม แต่ข้อมูลของโดเมนที่แปลงไปยังเรนจ์จะมีความสัมพันธ์ในลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ถ้ากำหนดให้ $a \leq b \leq c$ เมื่อ a,b และ c เป็นเลขจำนวนจริงใดๆ และ u คือ ค่าตัวแปรอินพุต สมการของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของรูประฆังคว่ำสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$\pi(u;b,c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-b/2, c) & ; u \leq c \\ 1-S(u; c, c+b/2, c+b) & ; u > c \end{cases} \quad (2.13)$$

ระดับความเป็นสมาชิก



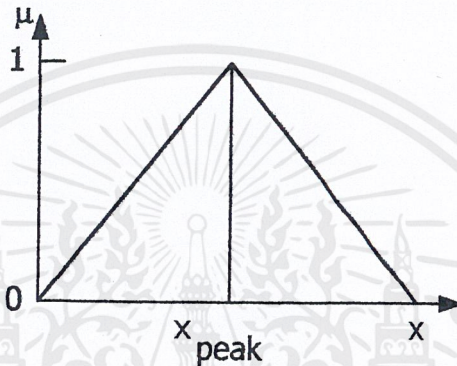
รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปตัวระฆังคว่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 พารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

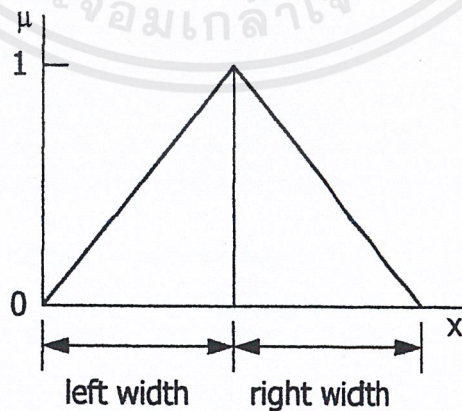
ในส่วนของปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้เฉพาะฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมเท่านั้น จึงกล่าวเพียงพารามิเตอร์ของฟังก์ชันสามเหลี่ยมเท่านั้น

ค่าสูงสุด (Peak Value) หมายถึง ค่าสูงสุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในแต่ละเทอม โดยจะมีค่าเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ค่าสูงสุดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

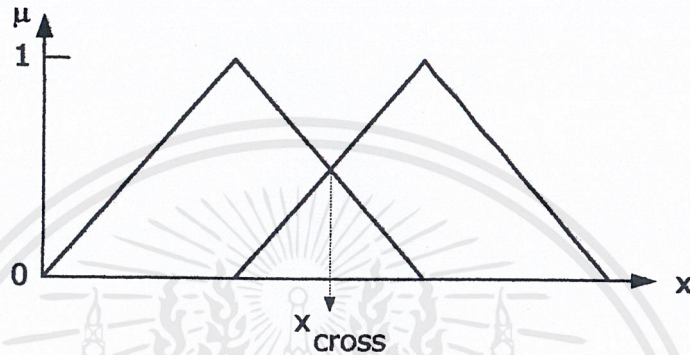
ความกว้างทางซ้ายและทางขวา (Left and Right Width) หมายถึง ช่วงความกว้างระหว่างจุดสูงสุดและจุดศูนย์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือ เรียกว่า ซัพพอร์ตของเซต ถ้าความกว้างทั้งสองเท่ากัน เราเรียกฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความกว้างของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

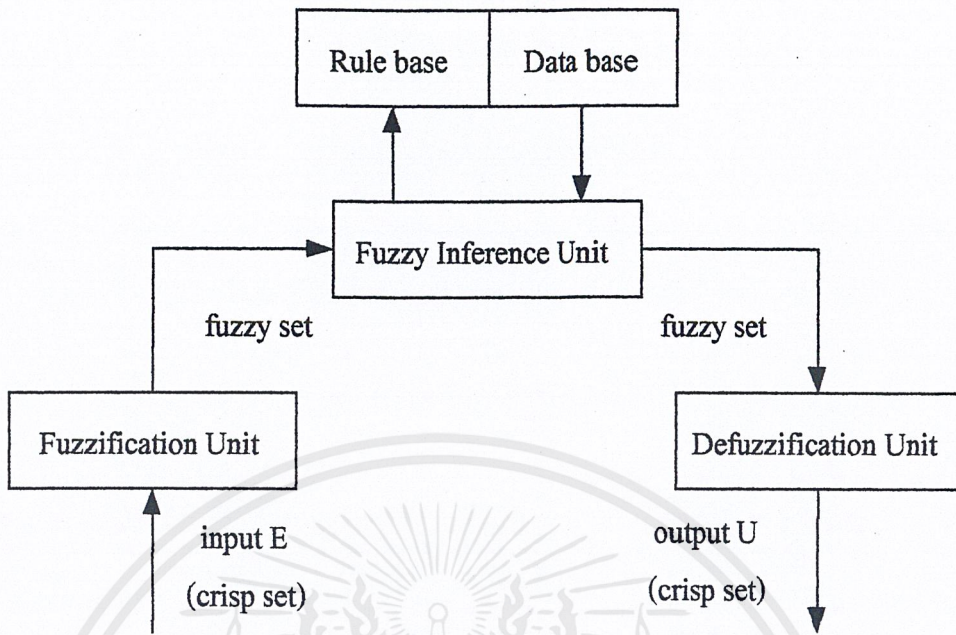
จุดตัด (Crosspoints) จุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A_1} และ μ_{A_2} ในเอกภพสัมพัทธ์ X คือค่า x_{cross} ที่ซึ่ง $\mu_{A_1}(x_{\text{cross}}) = \mu_{A_2}(x_{\text{cross}}) > 0$ และระดับของจุดตัดคือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของ x_{cross} และจำนวนจุดตัดระหว่างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก 2 ฟังก์ชัน เรียกว่า อัตราส่วนของจุดตัด (cross-point ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



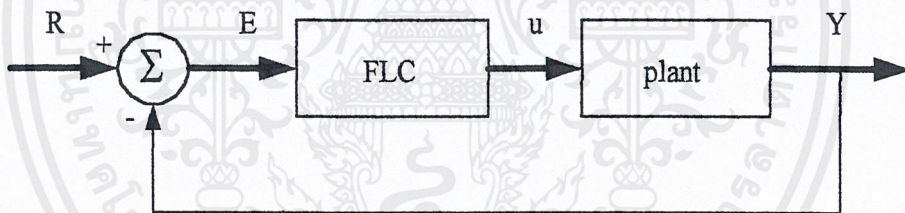
รูปที่ 2.8 จุดตัดของฟังก์ชันสามเหลี่ยม

2.3 ระบบควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy Control System)

ระบบควบคุมฟัซซี่ คือ ระบบกฎพื้นฐาน (Rule-based Systems) ประกอบด้วยกลุ่มของกฎฟัซซี่ (Fuzzy Control Rules) ซึ่งเป็นกระบวนการควบคุมการตัดสินใจของระบบแทนความสามารถในการปฏิบัติกรของมนุษย์ โดยทั่วไปแล้ว ตัวควบคุมชนิดฟัซซี่ จะมีโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญ 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างพื้นฐานของ Fuzzy Logic Controller



เมื่อ R คือ ตัวแปรต้น(input) u คือ สัญญาณควบคุม(control signal)
 E คือ ค่าความผิดพลาด(error) Y คือ ตัวแปรตาม(output)

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซี่

2.3.1 กระบวนการฟัซซิฟิเคชัน (Fuzzification Unit)

เป็นส่วนที่ทำการแปลงค่าของตัวแปรอินพุทและเอาต์พุทที่อยู่ในรูปคริปเซต (Crisp Set) ไปเป็นค่าความเป็นสมาชิกของฟัซซี่เซต โดยใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและตัวแปรทางภาษา สำหรับในส่วนของปริภูมียนิพจน์บับนี้สามารถกำหนดได้ดังนี้

ตัวแปรอินพุท มี 2 ตัวแปร คือ

- 1.ค่าความผิดพลาด (ERROR) นิยามได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$error(e(t)) = \text{ค่าที่กำหนด(Set Point Value)} - \text{ค่าตัวแปร โพรเซส(Process Variable)}$ (2.14)

เนื่องจากระบบที่ใช้ทดลองคือ รถอินเวอร์ทเพนดูลัม ถูกออกแบบให้ก้านเพนดูลัมเคลื่อนที่ไปกลับได้ 15 องศาจากแนวตั้ง หรือ มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.2625, 0.2625]$ เรเดียน เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมในการควบคุม

ใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมและเป็นฟังก์ชันสมมาตร มีตัวแปรทางภาษาดังนี้

NB : Negative Big มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.2625, -0.0875]$ เรเดียน

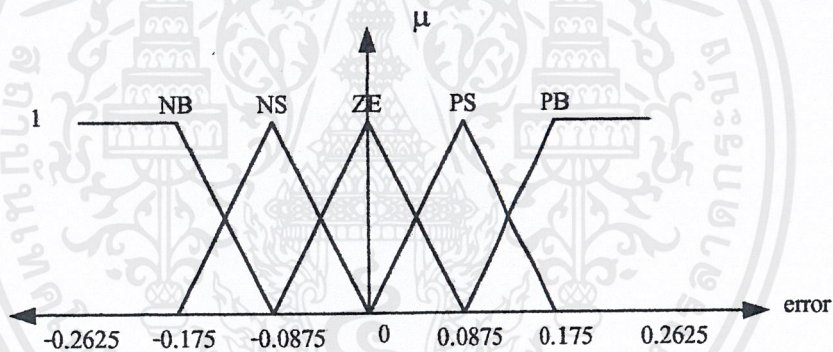
NS : Negative Small มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.175, 0]$ เรเดียน

ZE : Zero Equal มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.0875, 0.0875]$ เรเดียน

PS : Positive Small มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 0.175]$ เรเดียน

PB : Positive Big มีค่าอยู่ในช่วง $[0.0875, 0.2625]$ เรเดียน

สามารถแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร error

2. อัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (Change of error) นิยามได้จาก

$$cerror(nT) = e(nT) - e(nT-T) \quad (2.15)$$

เมื่อ $e(nT)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่คาบเวลา nT

$e(nT-T)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่เวลา $nT-T$

T คือ คาบเวลาในการสุ่ม (Sampling)

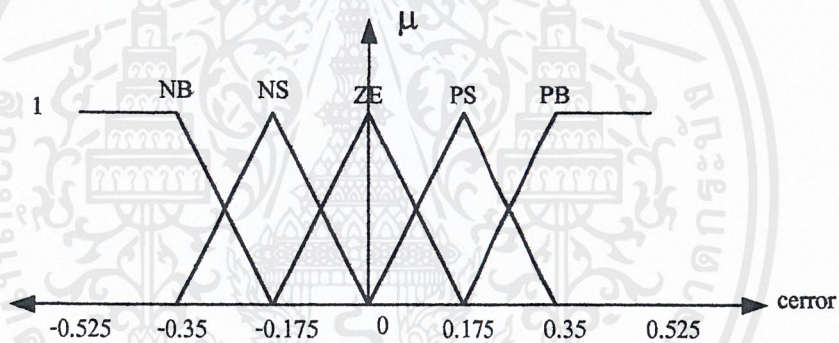
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเป็นค่าผลต่างระหว่างค่าผิดพลาด ดังนั้นค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดจึงต้องอยู่ในช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาดที่มากที่สุดคือ $0.2625 - (-0.2625) = 0.525$ เรเดียนหรือ $-0.2625 - (0.2625) = 0.525$ เรเดียน นั่นคือ มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.525, 0.525]$ เรเดียน

ใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมและเป็นฟังก์ชันสมมาตร มีตัวแปรทางภาษาดังนี้

NB : Negative Big	มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.525, -0.175]$ เรเดียน
NS : Negative Small	มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.35, 0]$ เรเดียน
ZE : Zero Equal	มีค่าอยู่ในช่วง $[-0.175, 0.175]$ เรเดียน
PS : Positive Small	มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 0.35]$ เรเดียน
PB : Positive Big	มีค่าอยู่ในช่วง $[0.175, 0.525]$ เรเดียน

สามารถแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ดังนี้

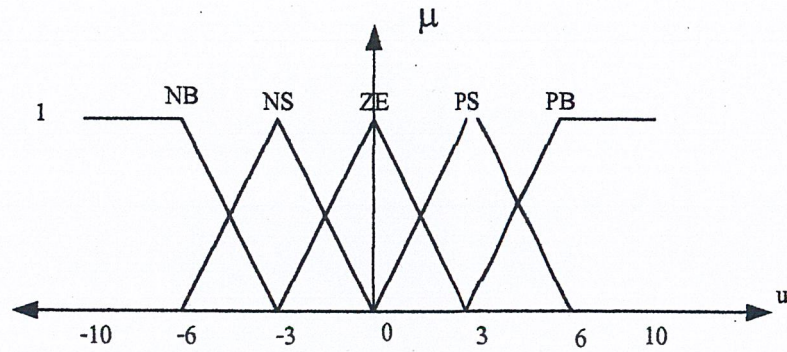


รูปที่ 2.12 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร error

ตัวแปรเอาต์พุต คือ สัญญาณควบคุม (Control Signal : u) มีค่าอยู่ในช่วง $[-10, 10]$ โวลต์ ใช้ฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมและเป็นฟังก์ชันสมมาตร มีตัวแปรทางภาษาดังนี้

NB : Negative Big	มีค่าอยู่ในช่วง $[-10, -3]$ โวลต์
NS : Negative Small	มีค่าอยู่ในช่วง $[-6, 0]$ โวลต์
ZE : Zero Equal	มีค่าอยู่ในช่วง $[-3, 3]$ โวลต์
PS : Positive Small	มีค่าอยู่ในช่วง $[0, 6]$ โวลต์
PB : Positive Big	มีค่าอยู่ในช่วง $[3, 10]$ โวลต์

สามารถแสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปร u

2.3.2 กระบวนการฟัซซี่อินเฟอร์เรนซ์ (Fuzzy Inference Unit)

เป็นส่วนที่ทำการวินิจฉัยกฎพื้นฐานเพื่อนำไปสู่เอาต์พุตที่ต้องการ ซึ่งลักษณะของกฎฟัซซี่จะอยู่ในรูปแบบ “IF... THEN...” คล้ายกับในระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System) โดยกลุ่มของส่วน IF เรียกว่า แอนติซิเดนต์ (antecedents) เป็นที่มาของและส่วนของ THEN เรียกว่า คอนซิควেন্ট (consequents) เป็นผลที่จะนำไปควบคุมโดยที่การออกแบบกฎนั้นได้มาจากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญในระบบนั้น หรือได้จากการทดลองค่าที่ได้จากกระบวนการฟัซซี่พีเคชัน จะนำเข้าสู่กฎพื้นฐานเพื่อให้ได้เอาต์พุตออกมา โดยใช้ Fuzzy Reasoning ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีการ ในที่นี้จะนำเสนอวิธีการของ Mamdani หรือ “min-max-gravity method” โดยสมมุติว่ามีกฎควบคุมฟัซซี่ดังนี้

R_1 : if x is A_1 and y is B_1 then z is C_1

R_2 : if x is A_2 and y is B_2 then z is C_2

... ..

R_n : if x is A_n and y is B_n then z is C_n

โดยที่ R_1, R_2, \dots, R_n เป็นอันดับของกฎ จำนวนของกฎจะ ได้จากการจับคู่ (Combination) เทอมของ x และ y

เมื่อ x คือ ตัวแปรอินพุตตัวที่ 1

y คือ ตัวแปรอินพุตตัวที่ 2

z คือ ตัวแปรเอาต์พุตตัวที่ 1

สำหรับในส่วนของปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้สามารถกำหนดได้ดังนี้ (ตัวแปร Input : error , ceerror ตัวแปร Output : u (Control signal))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Rule 1 : If error is NB and cerror is NB then u is PB
 Rule 2 : If error is NB and cerror is NS then u is PB
 Rule 3 : If error is NB and cerror is ZE then u is PB
 Rule 4 : If error is NB and cerror is PS then u is PS
 Rule 5 : If error is NB and cerror is PB then u is ZE
 Rule 6 : If error is NS and cerror is NB then u is PB
 Rule 7 : If error is NS and cerror is NS then u is PB
 Rule 8 : If error is NS and cerror is ZE then u is PS
 Rule 9 : If error is NS and cerror is PS then u is PS
 Rule 10 : If error is NS and cerror is PB then u is ZE
 Rule 11 : If error is ZE and cerror is NB then u is PS
 Rule 12 : If error is ZE and cerror is NS then u is PS
 Rule 13 : If error is ZE and cerror is ZE then u is ZE
 Rule 14 : If error is ZE and cerror is PS then u is ZE
 Rule 15 : If error is ZE and cerror is PB then u is NS
 Rule 16 : If error is PS and cerror is NB then u is PS
 Rule 17 : If error is PS and cerror is NS then u is ZE
 Rule 18 : If error is PS and cerror is ZE then u is NS
 Rule 19 : If error is PS and cerror is PS then u is NB
 Rule 20 : If error is PS and cerror is PB then u is NB
 Rule 21 : If error is PB and cerror is NB then u is ZE
 Rule 22 : If error is PB and cerror is NS then u is NS
 Rule 23 : If error is PB and cerror is ZE then u is NB
 Rule 24 : If error is PB and cerror is PS then u is NB
 Rule 25 : If error is PB and cerror is PB then u is NB

สามารถนำมาเขียนตารางเพื่อช่วยต่อการพิจารณาได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงตารางของกฎที่ได้จากการออกแบบ

ERROR CERROR	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZE
NS	PB	PB	PS	ZE	NS
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PS	PS	ZE	NB	NB
PB	ZE	ZE	NS	NB	NB

การให้เหตุผลทางฟัซซี่ (Fuzzy Reasoning) โดยวิธีการ min-max-gravity method เมื่อใช้ Min Operation จะได้ดังนี้

$$\mu_{C_i}(w) = \mu_{A_i}(u) \wedge \mu_{B_i}(v) \wedge \mu_{C_i}(w) \quad (2.16)$$

สุดท้ายเมื่อหา $\mu_C(w)$ โดยใช้ Max Operation จะได้ดังนี้

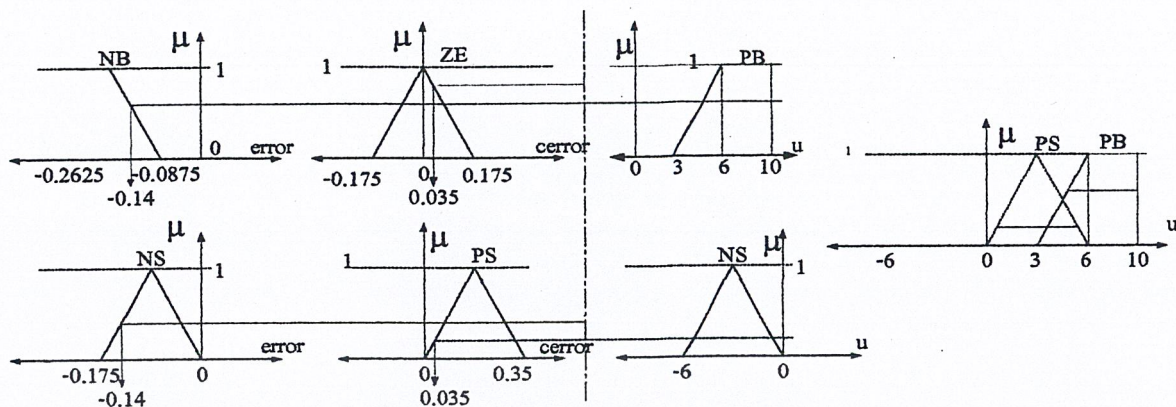
$$\mu_C(w) = \mu_{C_1}(u) \vee \mu_{C_2}(v) \vee \mu_{C_n}(w) \quad (2.17)$$

เมื่อ A_1, A_2, \dots, A_n เป็นค่าฟังก์ชันของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ x

B_1, B_2, \dots, B_n เป็นค่าฟังก์ชันของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ y

C_1, C_2, \dots, C_n เป็นค่าฟังก์ชันของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ z

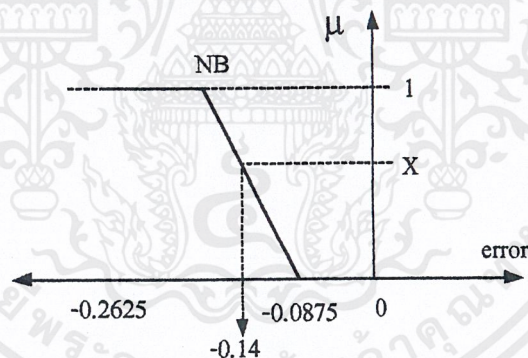
สำหรับในส่วนของปริญาณิพจน์ฉบับนี้สามารถยกตัวอย่างการ Fuzzy Reasoning โดยวิธีการ min-max-gravity method ได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงการ Fuzzy Reasoning โดยวิธีการ min-max-gravity method

เมื่อทราบค่าจากการทดลองว่า ตัวแปร error มีค่า -0.14 เรเดียน และ ตัวแปร cerror มีค่า 0.07 เรเดียน สามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรต่างๆดังนี้

พิจารณาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร error ($\mu_{NB}(\text{error})$)



รูปที่ 2.15 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{NB}(\text{error})$)

จากสมการที่ 2.11 พิจารณา $T(u; a, b, c) = (c - u)/(c - b)$; $b < u < c$ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.15 ได้ว่า

$$\begin{aligned} \mu_{NB}(\text{error}) &= (c - u)/(c - b) ; b = -0.175, c = -0.0875, u = -0.14 \\ &= (-0.0875 - (-0.14))/(-0.0875 - (-0.175)) \end{aligned}$$

$$\mu_{NB}(\text{error}) = 0.6$$

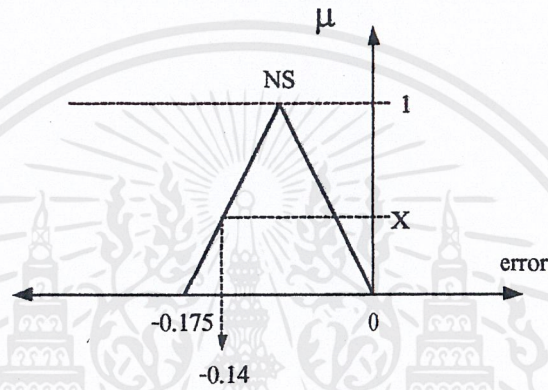
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร error ($\mu_{NS}(\text{error})$)

จากสมการที่ 2.11 พิจารณา $T(u; a, b, c) = (u - a)/(b - a)$; $a < u < b$ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.16 ได้ว่า

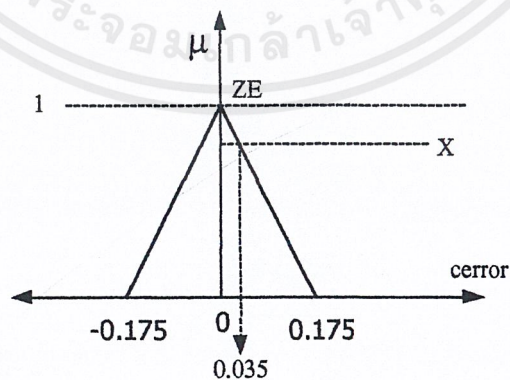
$$\begin{aligned}\mu_{NS}(\text{error}) &= (u - a)/(b - a) \quad ; \quad a = -0.175, b = -0.085, u = -0.14 \\ &= (-0.14 - (-0.175))/(-0.085 - (-0.175))\end{aligned}$$

$$\mu_{NS}(\text{error}) = 0.39$$



รูปที่ 2.16 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{NS}(\text{error})$)

พิจารณาค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร cerror ($\mu_{ZE}(\text{cerror})$)



รูปที่ 2.17 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{ZE}(\text{cerror})$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.11 พิจารณา $T(u; a, b, c) = (c - u)/(c - b)$; $b < u < c$ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.17 ได้ว่า

$$\begin{aligned}\mu_{ZE}(\text{error}) &= (c - u)/(c - b) ; b = 0, c = 0.175, u = 0.035 \\ &= (0.175 - 0.035)/(0.175 - 0)\end{aligned}$$

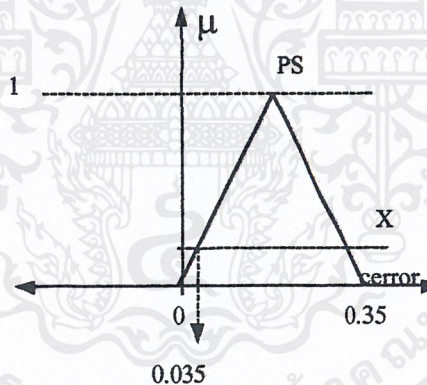
$$\mu_{ZE}(\text{error}) = 0.8$$

ค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปร error คือ $\mu_{PS}(\text{error})$

จากสมการที่ 2.11 พิจารณา $T(u; a, b, c) = (u - a)/(b - a)$; $a < u < b$ และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.16 ได้ว่า

$$\begin{aligned}\mu_{NS}(\text{error}) &= (u - a)/(b - a) ; a = 0, b = 0.175, u = 0.035 \\ &= (0.035 - 0)/(0.175 - 0)\end{aligned}$$

$$\mu_{NS}(\text{error}) = 0.2$$



รูปที่ 2.18 แสดงการหาค่าความเป็นสมาชิก ($\mu_{PS}(\text{error})$)

พิจารณาหาจำนวนกฎที่ใช้ในการควบคุม

เนื่องจากตัวแปรอินพุต error อยู่ในเทอมเซตของ NB หรือ NS และตัวแปรอินพุต cerror อยู่ในเทอมเซตของ ZE หรือ PS เพราะฉะนั้นจะเกิดกฎที่ใช้ในการควบคุมดังนี้

กฎข้อที่ 1 If error is NB and cerror is ZE then u is PB

กฎข้อที่ 2 If error is NB and cerror is PS then u is PS

กฎข้อที่ 3 If error is NS and cerror is ZE then u is PS

กฎข้อที่ 4 If error is NS and cerror is PS then u is PS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่าตัวแปรเอาที่พหุในเทอมของพีชคณิตโดยวิธีการ min-max method

Min Operation พิจารณาสมการที่ 2.4 และ สมการที่ 2.16 (เมื่อ $\mu_{NB}(\text{error}) = 0.6$, $\mu_{NS}(\text{error}) = 0.39$, $\mu_{ZE}(\text{cerror}) = 0.8$, $\mu_{PS}(\text{error}) = 0.2$)

กฎข้อที่ 1 If error is NB and cerror is ZE then u is PB

$$\begin{aligned}\mu_{PB}(u) &= \mu_{NB}(\text{error}) \wedge \mu_{ZE}(\text{cerror}) \\ &= \text{Min} (\mu_{NB}(\text{error}), \mu_{ZE}(\text{cerror})) \\ &= \text{Min} (0.6, 0.8)\end{aligned}$$

$$\mu_{PB}(u) = 0.6$$

กฎข้อที่ 2 If error is NB and cerror is PS then u is PS

$$\begin{aligned}\mu_{PS1}(u) &= \mu_{NB}(\text{error}) \wedge \mu_{PS}(\text{cerror}) \\ &= \text{Min} (\mu_{NB}(\text{error}), \mu_{PS}(\text{cerror})) \\ &= \text{Min} (0.6, 0.2)\end{aligned}$$

$$\mu_{PS1}(u) = 0.2$$

กฎข้อที่ 3 If error is NS and cerror is ZE then u is PS

$$\begin{aligned}\mu_{PS2}(u) &= \mu_{NS}(\text{error}) \wedge \mu_{ZE}(\text{cerror}) \\ &= \text{Min} (\mu_{NS}(\text{error}), \mu_{ZE}(\text{cerror})) \\ &= \text{Min} (0.39, 0.8)\end{aligned}$$

$$\mu_{PS2}(u) = 0.39$$

กฎข้อที่ 4 If error is NS and cerror is PS then u is PS

$$\begin{aligned}\mu_{PS3}(u) &= \mu_{NS}(\text{error}) \wedge \mu_{PS}(\text{cerror}) \\ &= \text{Min} (\mu_{NS}(\text{error}), \mu_{PS}(\text{cerror})) \\ &= \text{Min} (0.39, 0.2)\end{aligned}$$

$$\mu_{PS3}(u) = 0.2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น จะได้ว่า $\mu_{PB}(u) = 0.6$, $\mu_{PS1}(u) = 0.2$, $\mu_{PS2}(u) = 0.39$, $\mu_{PS3}(u) = 0.2$ และตัวแปรเอาต์พุตอยู่ในเทอมเซตของ PE และ PS

Max Operation พิจารณาสมการที่ 2.5 และ สมการที่ 2.17 ได้ว่า

ค่าความเป็นสมาชิกในเทอมเซตของ PE คือ

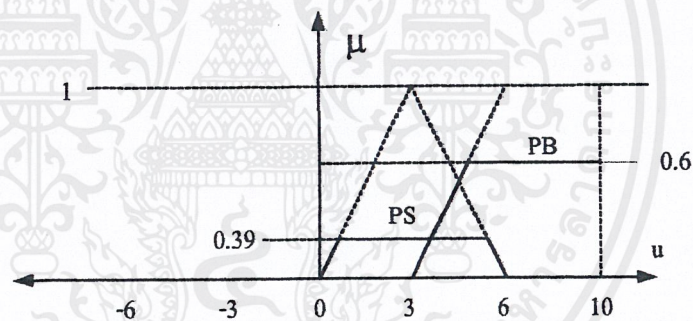
$$\mu_{PB}(u) = 0.6$$

ค่าความเป็นสมาชิกในเทอมเซตของ PS คือ

$$\begin{aligned}\mu_{PS}(u) &= \mu_{PS1}(u) \vee \mu_{PS2}(u) \vee \mu_{PS3}(u) \\ &= \text{Max} (\mu_{PS1}(u), \mu_{PS2}(u), \mu_{PS3}(u)) \\ &= \text{Max} (0.2, 0.39, 0.2)\end{aligned}$$

$$\mu_{PS}(u) = 0.39$$

สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงตัวแปรเอาต์พุตในเทอมของฟัซซีเซต

2.3.3 กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification Unit)

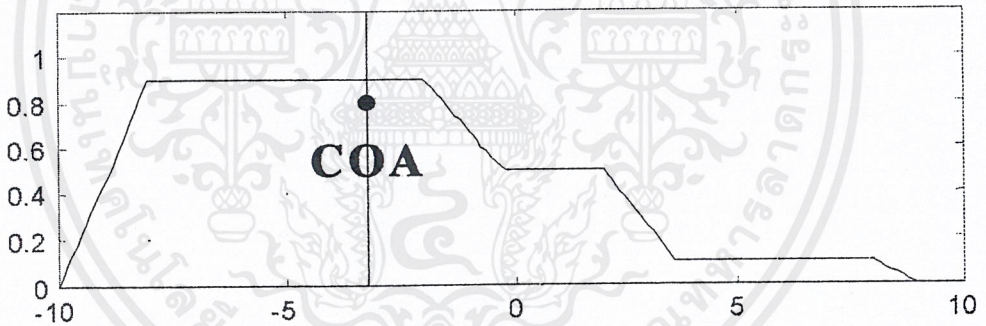
กระบวนการดีฟัซซิฟิเคชันเป็นส่วนที่ทำการแปลงค่าเอาต์พุตซึ่งเป็นค่าฟัซซีที่ได้จากการวินิจฉัยกฎพื้นฐานเพื่อเปลี่ยนไปเป็นค่าคริป (crisp) หรือค่าตัวเลขที่นำไปควบคุมระบบได้ มีวิธีดีฟัซซิฟิเคชัน หลายวิธี ซึ่งจะกล่าวถึงบางเทคนิค ดังนี้

(1) ทฤษฎีค่าน้ำหนักเฉลี่ย จะใช้ค่าเฉลี่ยของการกระทำหลังจากการกำหนดค่าระดับของการเป็นสมาชิกไว้ล่วงหน้าแล้ว เป็นวิธีที่ง่ายและใช้การคำนวณเพียงเล็กน้อย แต่ก็ยังให้ค่าที่ไม่ค่อยชัดเจน

(2) การหาจุดศูนย์กลาง (Centroid หรือ Center of Area : COA) เป็นการประมาณค่าของตัวแปรเอาต์พุตโดยหาการจุดศูนย์กลางของพื้นที่ของกฎที่เป็นจริง วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้มากในกระบวนการควบคุม เนื่องจากใช้ข้อมูลของค่าความจริงของทุกกฎที่เป็นจริง ทำให้ค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมกว่าวิธีอื่นๆ สำหรับในส่วนของปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีนี้ในการ Defuzzification ดังนี้ คือ สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.18

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i M_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i} \quad (2.18)$$

เมื่อ α_i คือ ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตของกฎที่ i
 M_i คือ ค่ากลางของตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตของกฎที่ i
 A_i คือ พื้นที่ของตัวแปรฟัซซีเอาต์พุตของกฎที่ i
 n คือ จำนวนกฎที่ใช้ควบคุม



รูปที่ 2.20 แสดงการ Defuzzification โดยวิธีการหาจุดศูนย์กลาง

(3) กรรมวิธีซิงเกิลตัน (สังเคราะห์เอาเอาต์พุตเดียว) เป็นเทคนิคพิเศษของการหาจุดศูนย์กลาง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กรรมวิธี Remaining Combination Defuzzification วิธีนี้เป็นการนำค่าเอาต์พุตของฟัซซีเซตมาใช้ใหม่ เป็นค่าเอาต์พุตค่าเดียวโดยใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยจากการกระทำรวมกันหลายๆ อย่าง ซึ่งจะได้ความถูกต้องน้อยกว่าการหาจุดศูนย์กลาง

2.3.4 หลักเกณฑ์ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

1. การกระจายข้อมูล หรือ คุณลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของกระบวนการที่ควบคุมว่าเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น ถ้าเป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ถ้าไม่เป็นเชิงเส้นควรใช้ฟังก์ชันรูปตัว S หรือฟังก์ชันรูปประฆังคว่ำ

2. คุณสมบัติในการคำนวณ เช่น ความเร็วในการคำนวณและขนาดของหน่วยความจำ

3. ความต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องของข้อมูล โดยทั่วไปจำนวนฟังก์ชันที่ใช้กำหนดระดับของค่าตัวแปรทางภาษาไม่ควรต่ำกว่า 5 ถึง 7 ระดับ ถ้าต่ำกว่านี้จะเกิดความไม่ต่อเนื่องและเกิดความผิดพลาดในผลลัพธ์ ถ้ามีจำนวนมากกว่านี้จะเสียเวลาในการคำนวณมากขึ้น

4. การกำหนดฟังก์ชันแต่ละฟังก์ชันควรให้มีการทับกันระหว่างฟังก์ชัน (overlap) ของเซตที่อยู่ติดกัน เพื่อให้แน่ใจว่าการควบคุมต้องมีกฎควบคุมอย่างน้อย 1-2 กฎ ในการรองรับตัวแปรอินพุต เปอร์เซ็นต์การทับกันอยู่ที่ประมาณ 15-50%

5. การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ควรมีอัตราส่วนของจุดตัดเป็นหนึ่ง ระดับความเป็นสมาชิกของจุดตัดควรเท่ากับ 0.5 (ดังรูปที่ 2.8) และฟังก์ชันควรมีลักษณะสมมาตรซึ่งจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี นั่นคือเวลาในการเข้าถึงเร็วและเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินต่ำ

2.3.5 การออกแบบกฎที่ใช้ในการควบคุม (Fuzzy Control Rules)

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีนั้น มักจะประสบปัญหาเกี่ยวกับการออกแบบ Fuzzy Control Rules ที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งการออกแบบกฎที่ใช้ในการควบคุมที่เหมาะสมกับระบบนั้น มักจะอยู่บนพื้นฐานในการออกแบบดังนี้

2.3.5.1 ฐานความรู้จากประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญหรือวิศวกรควบคุม (Domain expert's experience/control engineering knowledge)

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน การออกแบบตัวควบคุมชนิดฟัซซีโดยส่วนใหญ่จะอยู่บนพื้นฐานของความชำนาญและประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ และขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของระบบที่ต้องการออกแบบอันประกอบกับความรู้ทางด้านการควบคุมทางวิศวกรรมซึ่ง

- กฎที่ใช้ในการควบคุมจะอยู่ในกรอบการทำงานตามความรู้ความชำนาญของผู้ออกแบบ
- ผู้เชี่ยวชาญส่วนมากพบว่าวิธีนี้มีความสะดวกและรวดเร็วในการออกแบบกฎที่ใช้ในการควบคุม

ข้อเสียของวิธีนี้ก็คือ ส่วนมากผู้ควบคุมจะไม่สามารถถ่ายทอดความรู้ที่มีออกมาได้เป็นลายลักษณ์อักษร โดยเฉพาะเมื่อระบบมีความซับซ้อนมาก และผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้และความชำนาญมากด้วย

2.3.5.2 แบบจำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ (Modeling the operator's control actions)

ในหลายระบบควบคุม ได้มีการทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุทแล้วสร้างเป็นทฤษฎีการควบคุมและการจำลองการทำงาน จะใช้ทักษะนี้ในการออกแบบแบบจำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ แบบจำลองการควบคุมของผู้ปฏิบัติการ ได้มาจากการสังเกตการควบคุมของระบบเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้วแสดงผลในรูปแบบของข้อมูลตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุท

2.3.5.3 แบบจำลองฟัซซี่ (Fuzzy modeling)

แบบจำลองฟัซซี่ได้จากพฤติกรรมของระบบที่ถูกควบคุม โดยใช้ฟัซซี่เป็นตัวอธิบาย ซึ่งเป็นคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของกระบวนการควบคุม โดยวิธีนี้เราสามารถสร้าง กฎที่ใช้ในการควบคุม จากพฤติกรรมของระบบที่เหมาะสม ตรงตามเป้าหมายของกระบวนการ ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ

2.3.5.4 การเรียนรู้ด้วยระบบเอง (Self-organizing/learning)

ระบบควบคุมชนิดฟัซซี่สามารถสร้างจากแบบจำลองการเรียนรู้ของมนุษย์ และสามารถสร้างและแก้ไข กฎที่ใช้ในการออกแบบบนพื้นฐานของการแสดงออกของระบบ มีหลายวิธีที่ใช้ในกระบวนการออกแบบนี้ เช่น ทฤษฎีโครงข่าย, ปรับตนเองได้ (self-tuning)

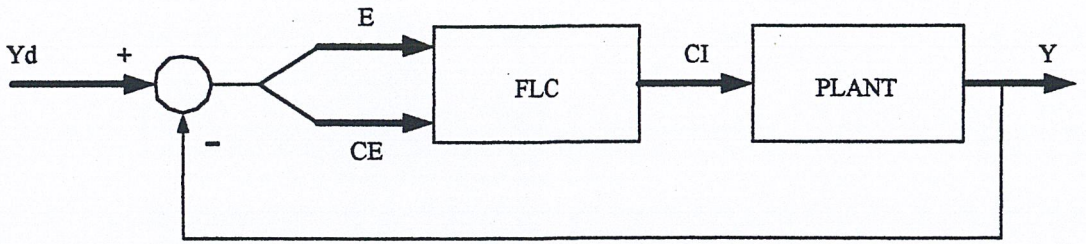
ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างในการออกแบบกฎซึ่งนำเสนอเพียง 2 วิธีที่นำมาประยุกต์ใช้ในปริญาณิพนธ์ฉบับนี้ คือ

1. วิธีฮิวริสติก (Heuristic Approach)
2. วิธีดีเทอร์มินิสติก (Deterministic Approach)

วิธีฮิวริสติกใช้ความรู้ของผู้เชี่ยวชาญและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบในการสร้างกฎควบคุม ส่วนวิธีดีเทอร์มินิสติกจะหาโครงสร้างและตัวแปรต่าง ๆ ของกฎการควบคุมโดยใช้การหาแบบจำลองฟัซซี่ เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามต้องการ

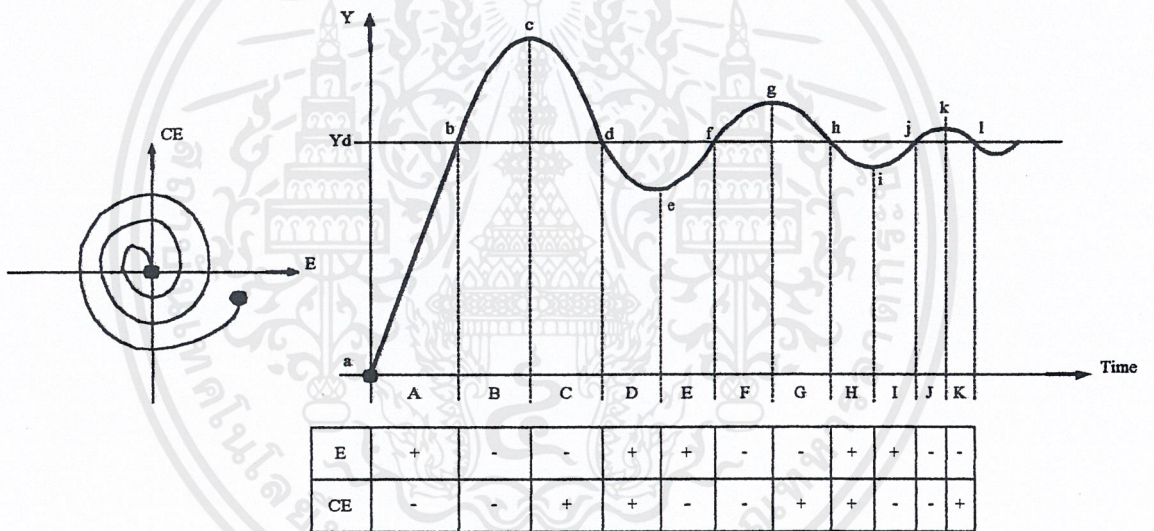
2.3.5.5 วิธีฮิวริสติก

วิธีฮิวริสติกโดยส่วนใหญ่มีพื้นฐานความรู้ในพฤติกรรมของระบบในรูปคำถาม ในทางระบบควบคุม กฎการควบคุมมักได้จากการอ้างถึงพฤติกรรมของระบบควบคุมวงปิด ความรู้เกิดขึ้นเมื่อการปรับมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ซึ่งมีมูลฐานบนการวิเคราะห์ระนาบของเฟส (Phase plane) และพฤติกรรมของระบบควบคุมวงปิด



รูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างลู่วงปิดที่ควบคุมโดยตัวควบคุมฟัซซี่

พิจารณาระบบดังแสดงในรูปที่ 2.21 ตัวแปรอินพุต คือ ค่าความผิดพลาด (E) และการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (CE) ตัวแปรเอาต์พุต คือ การเปลี่ยนแปลงกระบวนการของอินพุต (CI)



รูปที่ 2.22 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดต่อสัญญาณขั้นบันได และแสดงสร้างระนาบของเฟสด้วยตัวแปรอินพุตสองตัว E และ CE

ในการออกแบบกฎควบคุมแบบฟัซซี่ เพื่อลดการพุ่งเกินและเวลาในการเข้าถึง ได้กำหนดฟัซซี่เซตสำหรับตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตในรูป [N,Z,P] ซึ่งแทน Negative, Zero และ Positive ตามลำดับ จากระนาบของเฟสในรูปที่ 2.22 สามารถสร้างกฎควบคุมแบบฟัซซี่ได้ 2 ชนิด ดังนี้
ชนิดที่ 1 มีหน้าที่ลดเวลาในการเข้าถึงของระบบ (rise time)

IF E is Positive AND CE is Negative THEN CI is Positive

ชนิดที่ 2 มีหน้าที่ลดการพุ่งเกินของระบบ

IF E is Negative AND CE is Negative THEN CI is Negative

ในกรณีนี้ กฎควบคุมแบบฟuzzyที่ออกแบบได้ดังตารางที่ 2.2 ยิ่งทำการแบ่งฟuzzyเซตของตัวแปรอินพุทและเอาท์พุทมากเท่าใด จะได้สมรรถนะของระบบดีมากยิ่งขึ้น

Rule No.	E	CE	CI	References	Function
1	P	Z	P	points a, e, i	shorten rise time
2	Z	N	N	points b, f, j	reduce overshoot
3	N	Z	N	points c, g, k	reduce overshoot
4	Z	P	P	points d, h, l	reduce overshoot
5	Z	Z	Z	set point	breaking system
6	P	N	P	ranges A, E	shorten rise time
7	N	N	N	ranges B, F, J	reduce overshoot
8	N	P	N	ranges C, G	reduce overshoot
9	P	P	P	ranges D, H	reduce oscillation
10	P	N	Z	ranges I	breaking system
11	N	P	Z	ranges K	breaking system

ตารางที่ 2.2 แสดงการออกแบบกฎควบคุมแบบฟuzzyด้วยเทอมเซต [N, Z, P]
สำหรับตัวแปร [E, CE, CI]

Rule No.	E	CE	CI	References	Function
1	PB	ZE	PB	point a	shorten rise time
2	PM	ZE	PM	point e	shorten rise time
3	PS	ZE	PS	point I	shorten rise time
4	ZE	NB	NB	point b	reduce overshoot
5	ZE	NM	NM	point f	reduce overshoot
6	ZE	NS	NS	point j	reduce overshoot
7	NB	ZE	NB	point c	reduce overshoot
8	NM	ZE	NM	point g	reduce overshoot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9	NS	ZE	NS	point k	reduce overshoot
10	ZE	PB	PB	point d	reduce oscillation
11	ZE	PM	PM	point h	reduce oscillation
12	ZE	PS	PS	point l	reduce oscillation
13	ZE	ZE	ZE	set point	breaking system
14	PB	NS	PM	range A	shorten rise time
15	PS	NB	NM	range A	reduce overshoot
16	NB	PS	NM	range A	reduce overshoot
17	NS	PB	PM	range A	reduce oscillation
18	PS	NS	ZE	range A	breaking system
19	NS	PS	ZE	range A	breaking system

ตารางที่ 2.3 แสดงการออกแบบกฎควบคุมแบบฟัซซี่ด้วยทอมเซต [NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB] สำหรับตัวแปร [E, CE, CI]

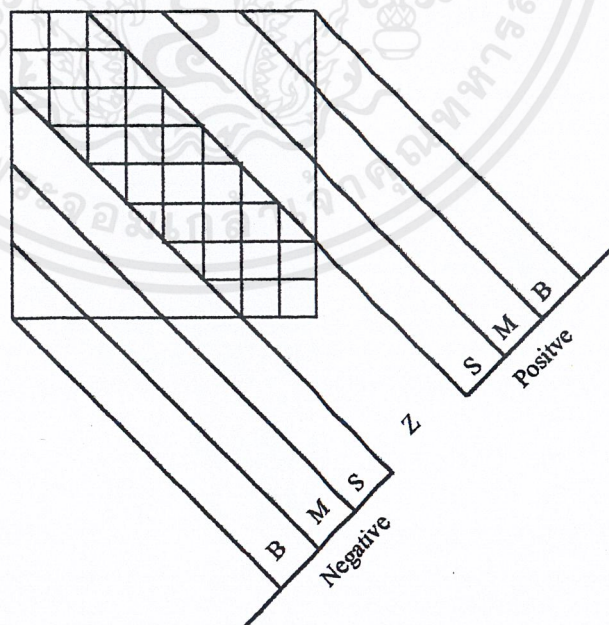
จากการออกแบบนี้ได้หลักในการสร้างกฎควบคุมแบบฟัซซี่ สำหรับตัวควบคุมในการควบคุมกระบวนการ ดังนี้

1. ถ้าเอาท์พุทเป็นค่าที่ต้องการและการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ ต้องคงค่าเอาท์พุทของ ตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิก
2. ถ้าเอาท์พุทออกจากค่าที่ต้องการ ค่าการควบคุมขึ้นอยู่กับเครื่องหมายและค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด ถ้าเงื่อนไขเป็นเช่นนั้นสามารถปรับค่าความผิดพลาดได้ทันทีโดยใช้ค่าการควบคุมในตอนนั้น แล้วคงค่าการควบคุมนี้ไว้ ไม่เช่นนั้นค่าการควบคุมจะเปลี่ยนตามค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด

	B-	M-	S-	Z-	Z+	S+	M+	B+
B+	Z+	S+	M-	B-	B-	B-	B-	B-
M+	S+	Z-	S-	M-	M-	M-	B-	B-
S+	M+	S+	Z-	S-	S-	S-	M-	B-
Z+	M+	M+	S+	Z+	Z-	S-	M-	M-
Z-	M+	M+	S+	Z+	Z-	S-	M-	M-
S-	B+	M+	S+	S+	S+	Z+	S-	S-
M-	B+	B+	M+	M+	M+	S+	Z+	Z+
B-	B+	B+	B+	B+	B+	M+	Z+	Z+

ตารางที่ 2.4 แสดงตารางเมตริกซ์ของกฎการควบคุม

กระบวนการนี้แสดงด้วยเมตริกซ์การควบคุมดังตารางที่ 2.4 เมตริกซ์นี้ใกล้เคียงกับความคิดและการทำงานของคนมากกว่าเมตริกซ์อื่น ๆ สังเกตว่าถ้าเราฉายแนวของเมตริกซ์ลงบนแกนที่ตั้งฉากกับแนวทแยงมุม จะเห็นรูปแบบได้ชัดเจนขึ้น เราสามารถเพิ่มจำนวนที่ฉายและลดความซับซ้อนของแนวลง ได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงแนวของกฎบนเมตริกซ์กฎการควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5.6 วิธีตีทอมินิสติก

วิธีตีทอมินิสติกจะหาโครงสร้างทางภาษาอย่างมีแบบแผน หรือหาค่าพารามิเตอร์ของกฎควบคุมแบบฟuzzyที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และข้อจำกัด เทคนิคต่าง ๆ ที่นำเสนอตามความมุ่งหมายนี้ มีดังนี้

1. วิธีการตรวจสอบลอจิกเพื่อแปลงข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทเป็นเซตของกฎควบคุมแบบฟuzzy
2. วิธีการสร้างแบบจำลองฟuzzyเพื่อสร้างกระบวนการหรือการควบคุมของคน ในการใช้วิธีนี้ทั้งการแยกแยะ โครงสร้างและพารามิเตอร์โดยการจัดการที่อินพุทและสังเกตที่เอาต์พุท และแบบจำลองสร้างขึ้นเป็นกระบวนการอยู่ในรูปของคำถาม ซึ่งกระบวนการอาจเป็นระบบที่ควบคุมหรือเป็นกล่องดำ วิธีการจัดกลุ่มฟuzzyใช้หาจำนวนกฎและแบ่งช่วงของอินพุท และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยวิธีกำลังน้อยที่สุด (Least square) หรือวิธีกำลังสองเฉลี่ย (Mean square)

2.3.5.7 เทคนิคการสร้างแบบจำลองฟuzzy

เทคนิคการสร้างแบบจำลองฟuzzyใช้สร้างระบบที่ไม่มีฐานความรู้ ซึ่งกระบวนการที่ควบคุมสร้างโดยการแบ่งข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทอย่างเพียงพอ สามารถออกแบบตัวควบคุมฟuzzyได้ เมื่อมีการสร้างแบบจำลองฟuzzy ซึ่งแสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

สมมติว่าระบบถูกกำหนด โดย

1. IF u_n is positive and y_{n-1} is positive, THEN y_n is positive big.
2. IF u_n is negative and y_{n-1} is positive, THEN y_n is positive small.
3. IF u_n is positive and y_{n-1} is negative, THEN y_n is negative small.
4. IF u_n is negative and y_{n-1} is negative, THEN y_n is negative big.

กำหนดอินพุทอ้างอิง $r=0$ เราสามารถหากฎควบคุมฟuzzyตามวิธีข้างต้นได้ดังนี้

rule 1: IF y_{n-1} is positive and y_n is positive big, THEN u_n is negative big

rule 2: IF y_{n-1} is positive and y_n is negative, THEN u_n is positive

rule 3: IF y_{n-1} is negative and y_n is positive, THEN u_n is negative.

rule 4: IF y_{n-1} is negative and y_n is negative big, THEN u_n is positive big

การสร้างแบบจำลอง โดยใช้เพียงข้อมูลอินพุทและเอาต์พุท มักอ้างถึงการจำแนกกระบวนการแบ่งแบบจำลองตามที่กล่าวมักมีปัญหาในการหาแบบจำลองที่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของระบบที่ใช้ข้อมูลอินพุทและเอาต์พุท

ในการสร้างแบบจำลองที่ใช้วิธีจำแนกกระบวนการของกล่องดำ ประกอบไปด้วยการจำแนกโครงสร้างและพารามิเตอร์ สำหรับการจำแนกโครงสร้างเกี่ยวกับการจำแนกตัวแปรอินพุทและเอาต์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต ส่วนการจำแนกพารามิเตอร์เกี่ยวกับการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของฟuzzyเซตของตัวแปรแต่ละตัว ในการจำแนกระบบโดยทั่วไป ค่าพารามิเตอร์จะเป็นสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่เป็นฟังก์ชัน ในแบบจำลองฟuzzy พารามิเตอร์อยู่ในรูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกซึ่งในวิธีดั้งเดิม เช่น ค่าความผิดพลาดของเอาต์พุต สามารถใช้การจำแนกพารามิเตอร์ได้ ในกรณีนี้ มักใช้วิธีกำลังน้อยที่สุดหรือวิธีกำลังสองเฉลี่ย

การจำแนกโครงสร้างมีความเกี่ยวข้องกับ 2 หัวข้อ คือ

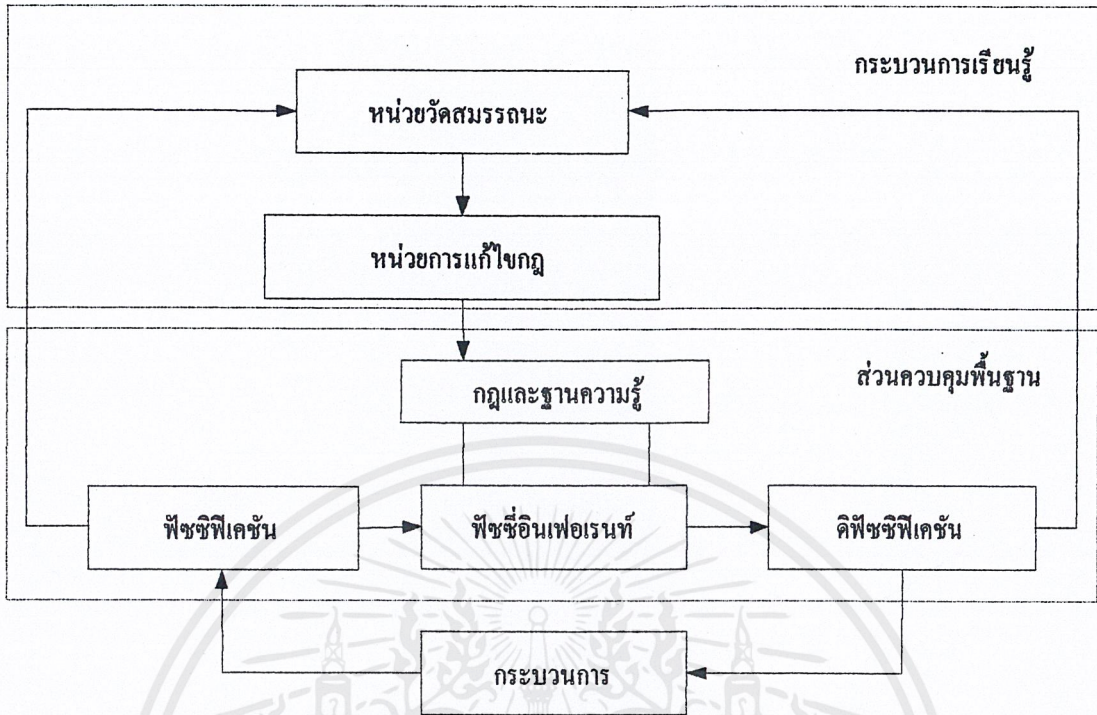
1. การหาตัวแปรอินพุต กล่าวคือ มีเซตของอินพุตที่เป็นไปได้แล้วทำการหาชุดตัวแปรอินพุตที่มีผลต่อเอาต์พุต ในการประยุกต์ใช้งานโดยส่วนมากมักไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ เนื่องจากผู้ออกแบบรู้จักอินพุตที่มีผลต่อเอาต์พุตกันอยู่แล้ว

2. การหาจำนวนกฎฟuzzy และ การแบ่งช่วงอินพุตที่เหมาะสม

แบบจำลองฟuzzy มักจะมีกฎ IF-THEN อยู่จำนวนหนึ่ง จำนวนกฎพิจารณาตามอันดับของแบบจำลองดั้งเดิม

2.4 ตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับกฎด้วยตนเอง (Self-organizing fuzzy logic controller)

จากการที่กล่าวมาแล้วถึงโครงสร้างและแนวทางการออกแบบส่วนต่างๆ ของตัวควบคุมฟuzzy จะเห็นได้ว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะนำมาจากฐานความรู้ ดังนั้นปัญหาของการควบคุมฟuzzy คือ จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกหรือกฎในฐานความรู้อาจจะน้อยเกินไปหรือหาจุดที่เหมาะสมไม่ได้ จึงต้องทำการปรับแต่งจนสามารถใช้งานได้ อีกประการหนึ่งเมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลง ค่าต่างๆจะต้องทำการปรับ แก้ไขใหม่ ดังนั้น ตัวควบคุมฟuzzyจึงได้มีการพัฒนาเพื่อให้สามารถเรียนรู้และปรับค่าด้วยตัวเอง ซึ่งแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด สำหรับในส่วนของปริญญา นิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธี Self-organizing คือ ใช้การปรับแต่งกฎในฐานความรู้ ในการออกแบบ



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมฟัซซีแบบปรับกฎด้วยตนเอง

จากโครงสร้างดังรูปที่ 2.24 จะเพิ่มส่วนประกอบอีก 2 ส่วน คือ หน่วยวัดสมรรถนะ ในส่วนประกอบส่วนนี้ จะวัดเอาค่าเอาท์พุทว่าอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือไม่ และนำผลความแตกต่างระหว่างสมรรถนะที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับสมรรถนะที่กำหนดไว้ นำความแตกต่างไปปรับกฎเพื่อให้ได้สมรรถนะตามที่ต้องการ หน่วยการแก้ไขกฎ ในส่วนประกอบส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แก้ไขกฎเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของผลการตอบสนอง ซึ่งวิธีการปรับกฎนั้นมีหลายวิธี สำหรับในส่วนของปริญาณิพันธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับกฎโดยการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ หน่วยวัดสมรรถนะ

ทำหน้าที่เลือกกฎที่ควรได้รับการแก้ไข สำหรับการเลือกกฎนั้นวิเคราะห์จากจุดที่อยู่บนทางเดินสถานะว่าอยู่ในช่วงของกฎใด โดยพิจารณาช่วงของกฎจากสมการ

$$\mu_{A_i}(\text{error}) * \mu_{B_i}(\text{error}) \geq \mu_{A_j}(\text{error}) * \mu_{B_j}(\text{error}) \quad (2.19)$$

โดยที่ $\mu_{A_i}(\text{error})$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของค่า error ที่ค่าถึงกัจิตติ A

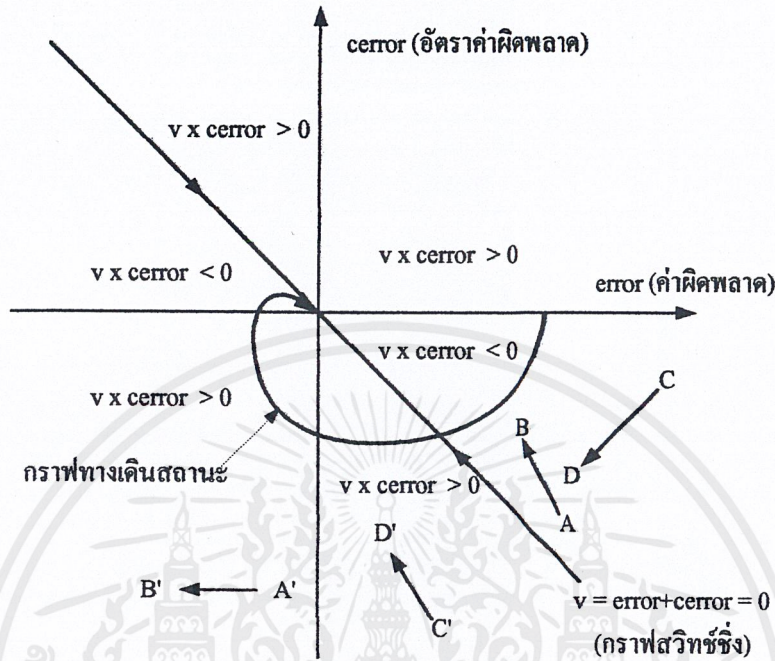
$\mu_{B_i}(\text{error})$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของค่า error ที่ค่าถึงกัจิตติ B

$\mu_{A_j}(\text{error})$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของค่า error ที่ค่าถึงกัจิตติ A

$\mu_{B_j}(\text{error})$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกของค่า error ที่ค่าถึงกัจิตติ B

i แทน กฎที่ i

เมื่อเลือก q เท่ากับ 1 จะได้สมการเป็น $error + cerror = 0$ เมื่อนำไปเขียนกราฟสวิตซ์จึงได้กราฟที่มีความชันเท่ากับ -1 ดังรูป 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟทางเดินสถานะของระบบ

ข้อสังเกต สมการ $error + cerror = 0$ เทียบเคียงได้กับสมการ

$$e(t) + \dot{e}(t) = 0 \tag{2.21}$$

โดยที่ $e(t)$ เป็นค่าความผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ

$\dot{e}(t)$ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่เวลา t ใด ๆ

จะเห็นว่าเป็นสมการอันดับหนึ่ง (First order) เมื่อหาผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step function) ได้ผลตอบสนองที่ไม่มีการพุ่งเกินและมีเวลาในการเข้าถึงค่อนข้างน้อย จึงสามารถใช้เป็นกราฟเปรียบเทียบเพื่อหาผลตอบสนองที่ดีของระบบได้

3. หาค่าการเบี่ยงเบนทิศทางการเคลื่อนที่ของทางเดินสถานะ กำหนดให้เป็นตัวแปร m ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

- กรณีที่ 1 : $v \times cerror < 0$ เป็นบริเวณดังแสดงในรูปที่ 2.26 หาค่า m ได้จากสมการ

$$m = q_1 - (\Delta cerror / \Delta error) \tag{2.22}$$

โดยที่ q_1 เป็นค่าความชันคงที่ที่กำหนดขึ้น ซึ่งต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ ($q_1 > 0$)

$\Delta cerror / \Delta error$ เป็นค่าความชันของกราฟทางเดินสถานะที่จุดในเวลานั้น

ถ้า $m > 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นต้องได้รับการแก้ไข

ตัวอย่างเช่น ทางเดินจากจุด A ไปยังจุด B ดังรูป ที่ 2.26 มีความชันเท่ากับ -2.5 กำหนด q_1 เท่ากับ 0.3 จากสมการ (2.22) จะได้ค่า $m = 0.3 - (-2.5) = 2.8$ ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ จากการวิเคราะห์ทางเดินสถานะพบว่า การเคลื่อนที่มีแนวโน้มออกจากกราฟสวิทซ์จึง จึงต้องทำการแก้ไขกฎเพื่อให้ทางเดินเข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่ง

ถ้า $m \leq 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นไม่ต้องได้รับการแก้ไข

ตัวอย่างเช่น ทางเดินจากจุด C ไปยังจุด D ดังรูป ที่ 2.26 มีความชันเท่ากับ 1.0 กำหนด q_1 เท่ากับ 0.3 จากสมการ (2.22) จะได้ค่า $m = 0.3 - (1.0) = -0.7$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าศูนย์ จากการวิเคราะห์ทางเดินสถานะพบว่า การเคลื่อนที่มีแนวโน้มเข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งอยู่แล้ว จึงไม่ต้องทำการแก้ไขกฎ

กรณีที่ 2 : $v \times \text{error} > 0$ เป็นบริเวณดังแสดงในรูปที่ 2.21 หากค่า m ได้จากสมการ

$$m = -q_2 + (\Delta \text{error} / \Delta \text{error}) \quad (2.23)$$

โดยที่ q_2 เป็นค่าความชันคงที่ที่กำหนดขึ้น ซึ่งต้องมีค่าตามเงื่อนไข $q_2 < -q < 0$

- ถ้า $m > 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นต้องได้รับการแก้ไข

ตัวอย่างเช่น ทางเดินจากจุด A' ไปยังจุด B' ดังรูป ที่ 2.26 มีความชันเท่ากับ 0 กำหนด q_2 เท่ากับ -1.5 และ q เท่ากับ 1.0 จากสมการ (2.23) จะได้ค่า $m = -(-1.5) + 0 = 1.5$ ซึ่งมีค่ามากกว่าศูนย์ จากการวิเคราะห์ทางเดินสถานะพบว่า การเคลื่อนที่มีแนวโน้มออกจากกราฟสวิทซ์จึง จึงต้องทำการแก้ไขกฎเพื่อให้ทางเดินเข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่ง

- ถ้า $m \leq 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นไม่ต้องได้รับการแก้ไข

ตัวอย่างเช่น ทางเดินจากจุด C' ไปยังจุด D' ดังรูป ที่ 2.26 มีความชันเท่ากับ -1.5 กำหนด q_2 เท่ากับ -1.5 และ q เท่ากับ 1.0 จากสมการ (2.23) จะได้ค่า $m = -(-1.5) + 1.5 = 0$ ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ จากการวิเคราะห์ทางเดินสถานะพบว่า การเคลื่อนที่มีแนวโน้มเข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งอยู่แล้ว จึงไม่ต้องทำการแก้ไขกฎ

ถ้าสถานะของระบบเริ่มแรกอยู่ในช่วงที่มีทางเดินของสถานะที่ดี กฎต่างๆจะไม่ถูกแก้ไข แต่เมื่อทางเดินของสถานะมีการเดินออกไปนอกช่วงของทางเดินสถานะที่ดี ฐานความรู้จะถูกปรับเพื่อให้แนวทางเดินของสถานะกลับเข้าสู่ช่วงที่เหมาะสม จากรูปที่ 2.26 เป็นกราฟทางเดินสถานะ โดยสมมติว่า สถานะอยู่ที่จุด A (error, cerror) ตำแหน่งต่อไปอยู่ที่ จุด B (error + Δ error, cerror + Δ ccerror) การเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไปสู่ตำแหน่ง B ทำให้เราสามารถนำค่า $\Delta \text{ccerror} / \Delta \text{error}$ มาอธิบายข้อมูลของสถานะเมื่อเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นกราฟการสวิทซ์ซึ่ง โดยกำหนดให้ $v = v(\text{error}, \text{ccerror}) = 0$ เป็นกราฟสวิทซ์ซึ่ง

ที่บริเวณการเคลื่อนที่ จากจุด A ไปยัง จุด B ค่า $(v \times cerror) < 0$ และ $\Delta cerror / \Delta error$ ควรจะมากกว่าศูนย์ ซึ่งหมายความว่า สถานะกำลังเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณที่มุ่งไปสู่กราฟสวิทซ์ซึ่ง และถ้า $\Delta cerror / \Delta error$ มีค่ามากกว่าค่าๆหนึ่งซึ่งมากกว่าศูนย์ นั้นหมายความว่าสถานะเคลื่อนที่เข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งด้วยความเร็วที่พอเพียง ดังนั้นฐานความรู้จึงไม่จำเป็นต้องถูกแก้ไข ทำนองเดียวกัน บริเวณการเคลื่อนที่จากจุด A' ไปยังจุด B' ค่า $(v \times cerror) > 0$ และ $\Delta cerror / \Delta error$ ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าๆหนึ่งซึ่งน้อยกว่าศูนย์ นั้นหมายความว่าสถานะยังสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่กราฟสวิทซ์ซึ่งได้อย่างเหมาะสม ในกรณีนี้ฐานความรู้ก็ไม่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขเช่นเดียวกัน แต่ถ้า $\Delta cerror / \Delta error$ มีค่ามากกว่าศูนย์แสดงว่าสถานะกำลังเคลื่อนที่ออกจากกราฟสวิทซ์ซึ่งนั่นคือกฎที่มีผลต่อผลการตอบสนองในช่วงนี้ควรได้รับการแก้ไขดังนั้นเราสามารถสร้างกฎที่ใช้ในการแก้ไขได้ดังแสดงในสมการที่ 2.24

$$m = \begin{cases} q1 - \frac{\Delta cerror}{\Delta error} & ; (v \times cerror) < 0 \\ -q2 + \frac{\Delta cerror}{\Delta error} & ; (v \times cerror) > 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

ถ้า $m \leq 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นไม่ต้องได้รับการแก้ไข

ถ้า $m > 0$ แสดงว่ากฎที่เวลานั้นต้องได้รับการแก้ไข

หน่วยการแก้ไขกฎ

ทำหน้าที่แก้ไขกฎในฐานความรู้เพื่อให้ผลการตอบสนองของระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวและมีค่าสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ โดยการแก้ไขกฎจะเลือกกฎที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินและจะทำการแก้ไขโดยการเลื่อนกฎไปด้วยระยะทางตามค่าถ่วงน้ำหนักที่คำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ 2.25 ส่วนกฎที่มีผลต่อเวลาในการเข้าถึงจะใช้วิธีการขยายกฎ(hedge)

$$w = \text{sat}(w_m, l_m \cdot m \cdot \text{sgn}(v(\text{error}, \text{cerror}))) \quad (2.25)$$

กำหนดให้

w = ค่าถ่วงน้ำหนักในการเลื่อนกฎ

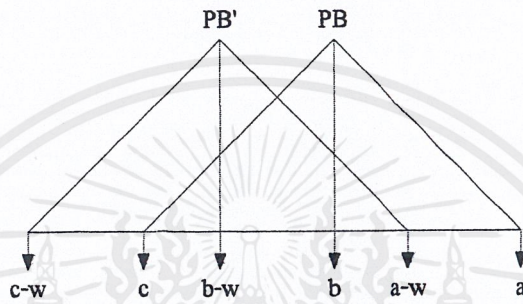
w_m = ค่าถ่วงน้ำหนักที่มากที่สุดที่เป็นไปได้

l_m = ความละเอียดในการเลื่อนกฎ

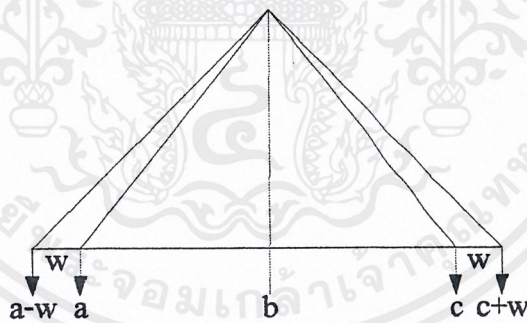
$\text{sgn}(v(\text{error}, \text{cerror}))$ = เครื่องหมายของค่าที่คำนวณได้จากฟังก์ชันกราฟสวิทซ์ซึ่งที่เวลาใดๆ

ฟังก์ชันอิมตัว $\text{sat}(a, x)$ กำหนดได้ดังสมการ

$$\text{sat}(a, x) = \begin{cases} a & ; x > a \\ x & ; |x| \geq a \\ -a & x < a \end{cases} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.27 แสดงการเลื่อนกฎในกระบวนการปรับกฎ



รูปที่ 2.28 แสดงการขยายกฎในกระบวนการปรับกฎ

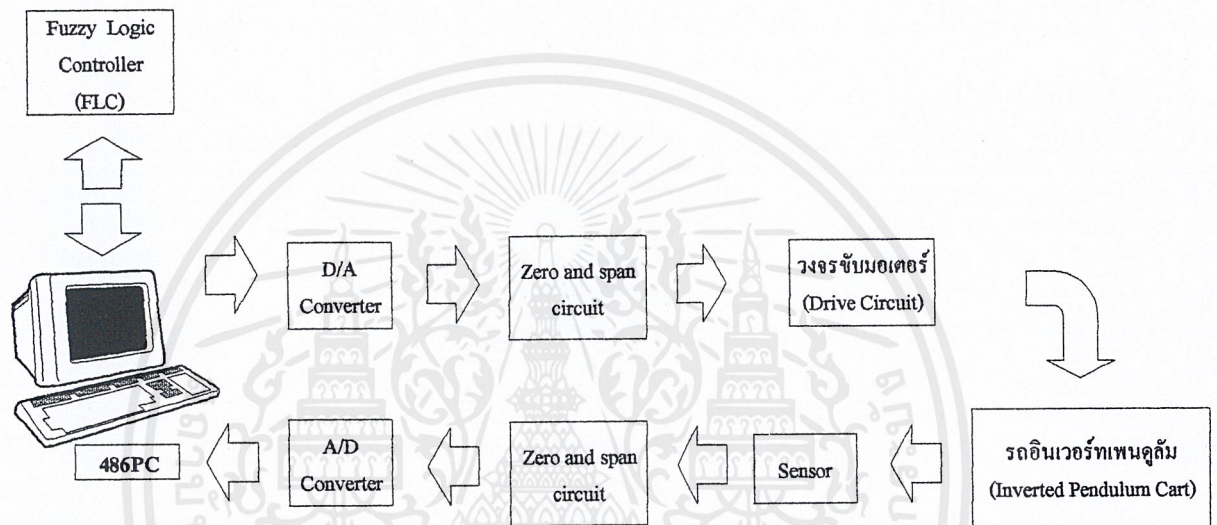
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้างระบบควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัม

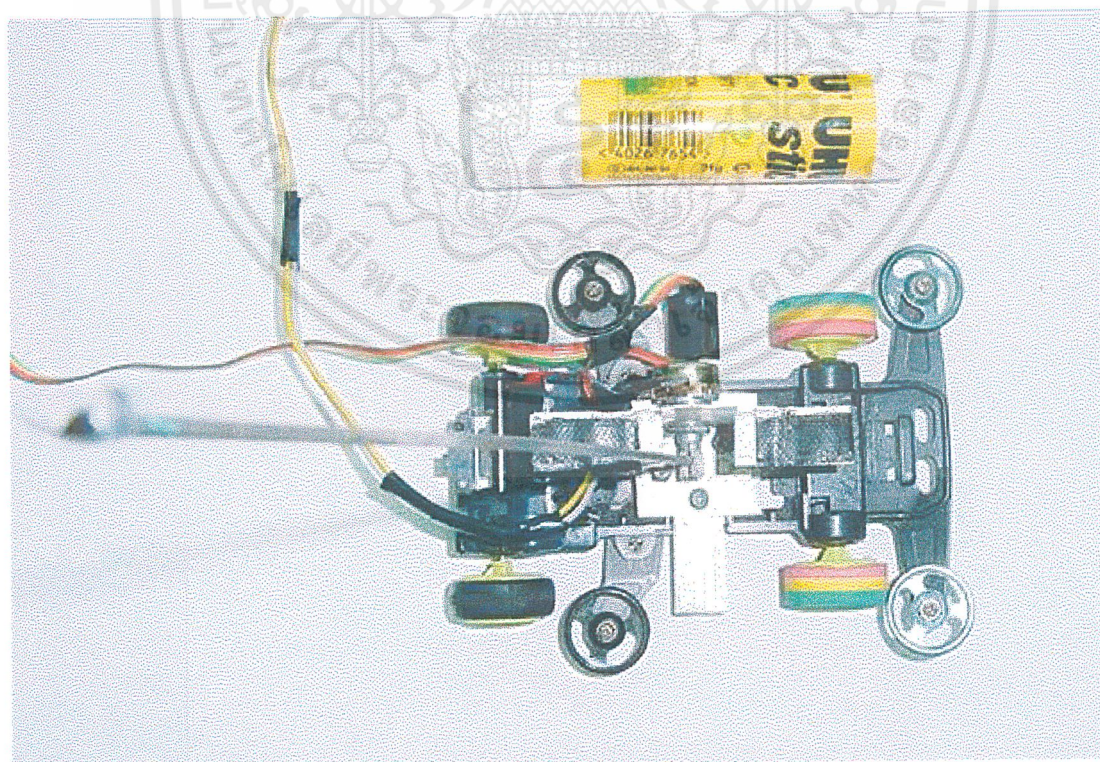
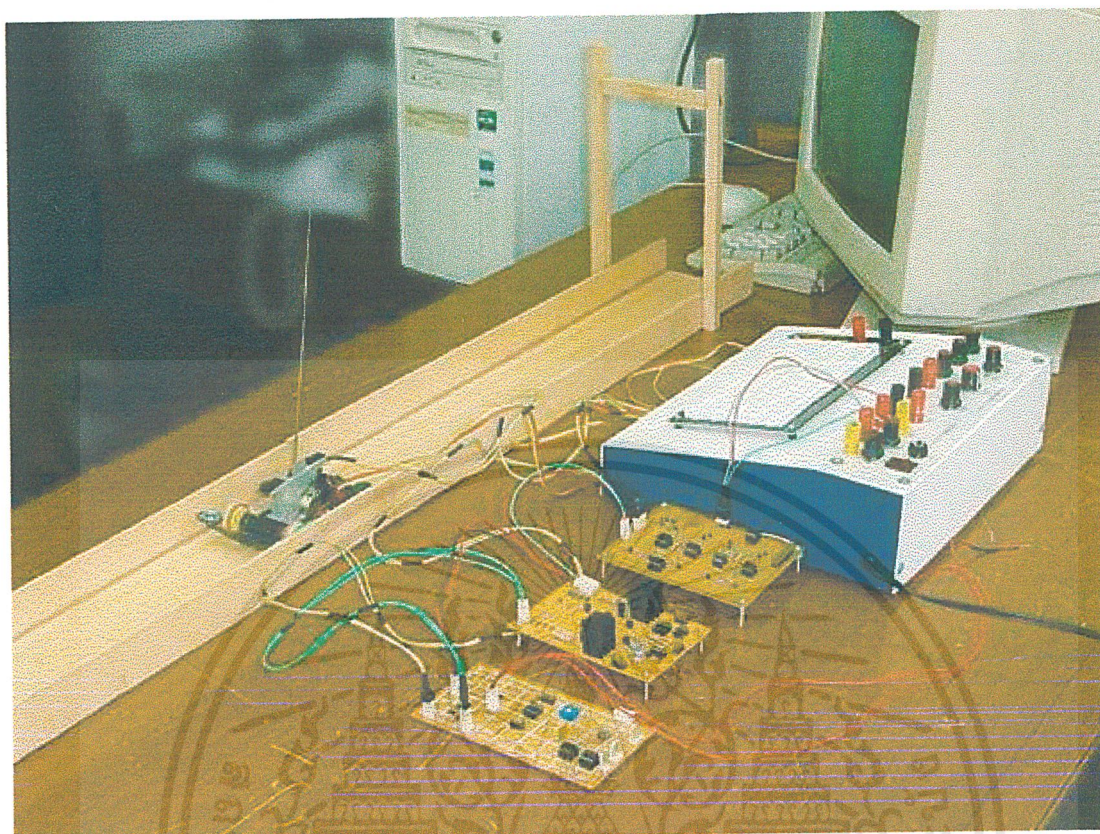
3.1 ส่วนประกอบของระบบ

สามารถเขียนเป็น Block diagram ต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



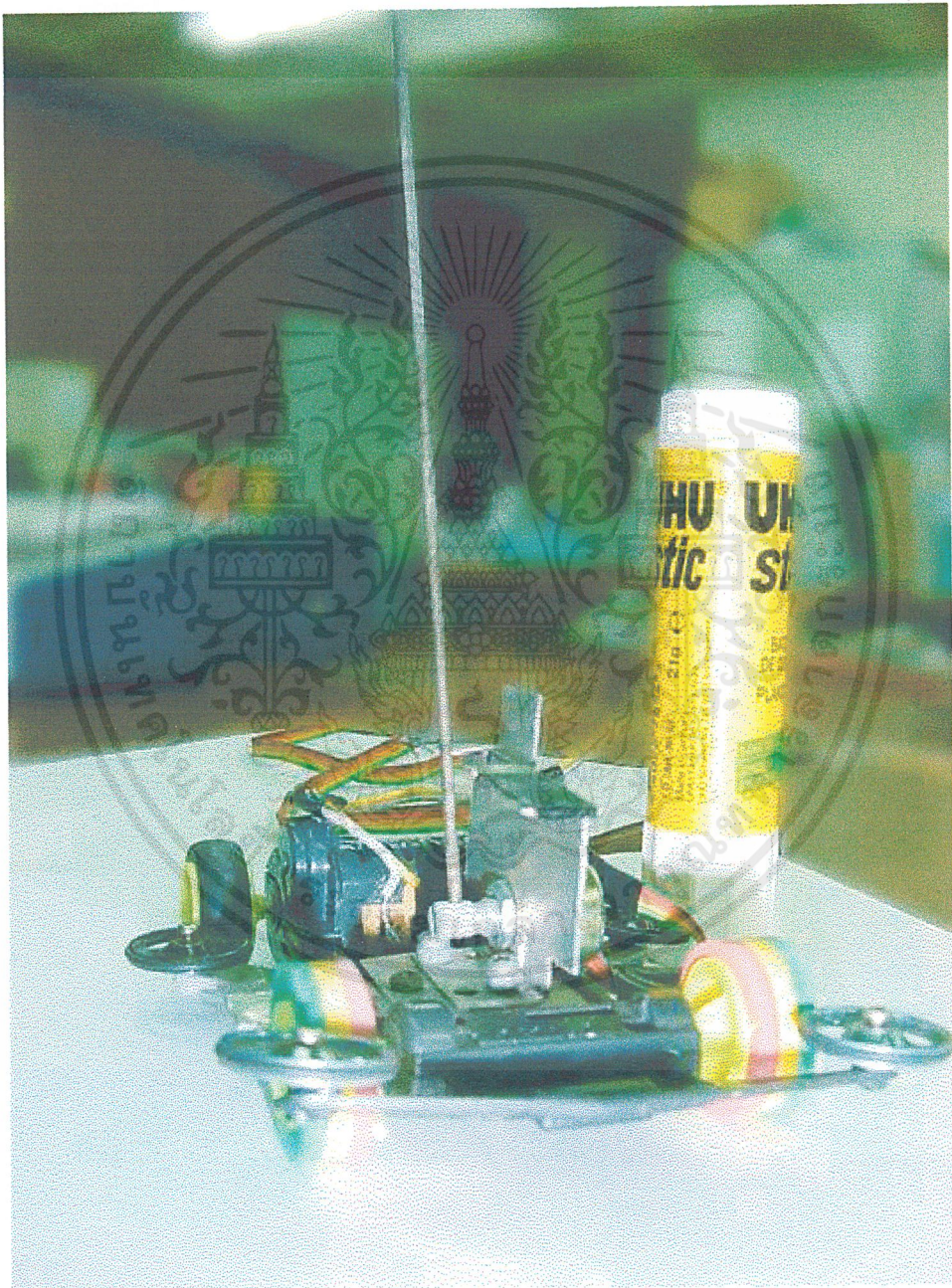
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบต่างๆในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอนำเสนอที่ละส่วนดังนี้

3.1.1 ตัวควบคุมชนิดพีซีลอจิก (ได้นำเสนอไปแล้ว รายละเอียดอยู่ในบทที่ 2)

3.1.2 รถอินเวอร์ทเพนดูลัม



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของรถ invert pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้สมการการเคลื่อนที่ของรถดังนี้

$$(M + m) \ddot{x} + ml \cos(\theta) \ddot{\theta} - ml \sin(\theta) \dot{\theta}^2 = U \quad (3.1)$$

$$m \ddot{x} \cos \theta + (4/3)ml \ddot{\theta} = mg \sin \theta \quad (3.2)$$

เมื่อ parameter ต่างๆ มีดังนี้

M : มวลของรถ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม(kg)

m : มวลของลูกตุ้ม มีหน่วยเป็น กิโลกรัม(kg)

L : ระยะหูดถึงจุดศูนย์

กลางมวลของก้าน

และลูกตุ้ม มีหน่วยเป็น เมตร (m)

U : แรง มีหน่วยเป็น นิวตัน(N)

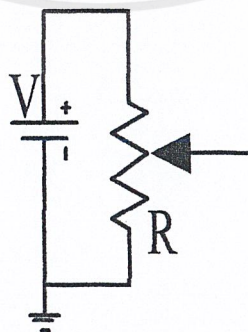
θ : มุมของก้านลูกตุ้ม

ที่ทำกับแนวดิ่ง มีหน่วยเป็น องศา (°)

g : ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

3.1.3 ตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ(Sensor)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางกลศาสตร์ (คือ ขนาดของมุมของก้านลูกตุ้มที่ทำกับแนวดิ่ง(θ) ดังรูปที่ มีหน่วยเป็น องศา) เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (คือ ค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระแสตรง มีหน่วยเป็น VDC) โดยในส่วนของปริยญาณีพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ ตัวต้านทานปรับค่าได้ ชนิด volume เป็นตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ



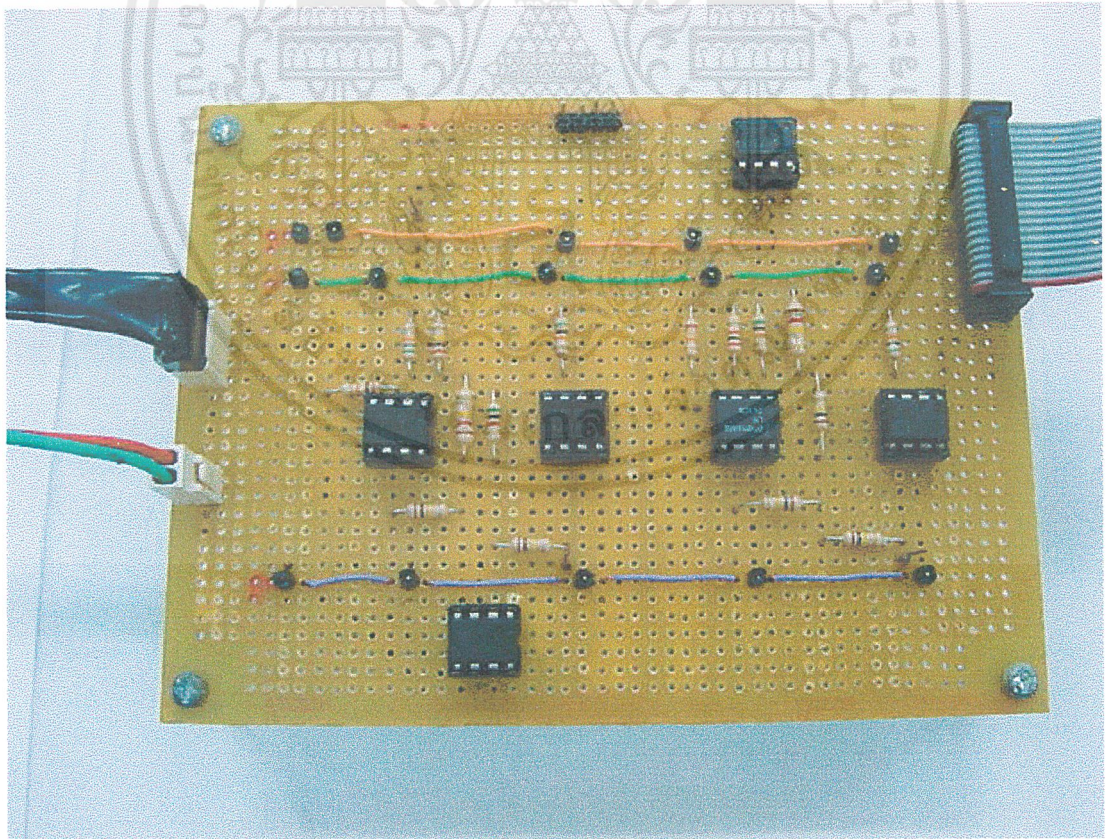
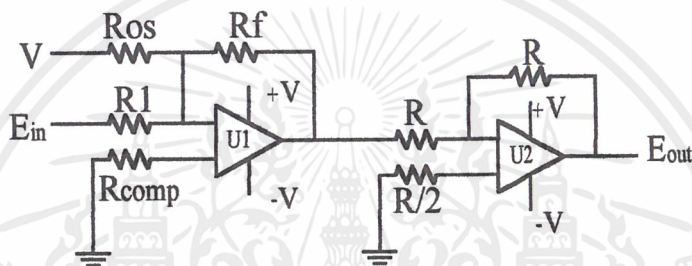
รูปที่ 3.4 แสดงโครงสร้างของตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 วงจรปรับแปลงสัญญาณ(Zero and span circuits)

ในส่วนของวงจรปรับแปลงสัญญาณ ก็เพื่อทำการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการใช้งาน(หรือให้อยู่ในระดับ 0 – 5 โวลท์ (สภาวะลอจิก 0 และ 1; เพราะคอมพิวเตอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถรับรู้สถานะการทำงานได้นั่นเอง)

สำหรับในส่วนของปริณูณานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวงจรปรับแปลงสัญญาณชนิด Inverting summer ซึ่งการออกแบบวงจรส่วนนี้จะอาศัยการประยุกต์ใช้สมการเส้นตรงในการแปลงค่าความชัน และการปรับตำแหน่งศูนย์ของ transfer characteristic curve ระหว่าง input และ output



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของวงจรปรับแปลงสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

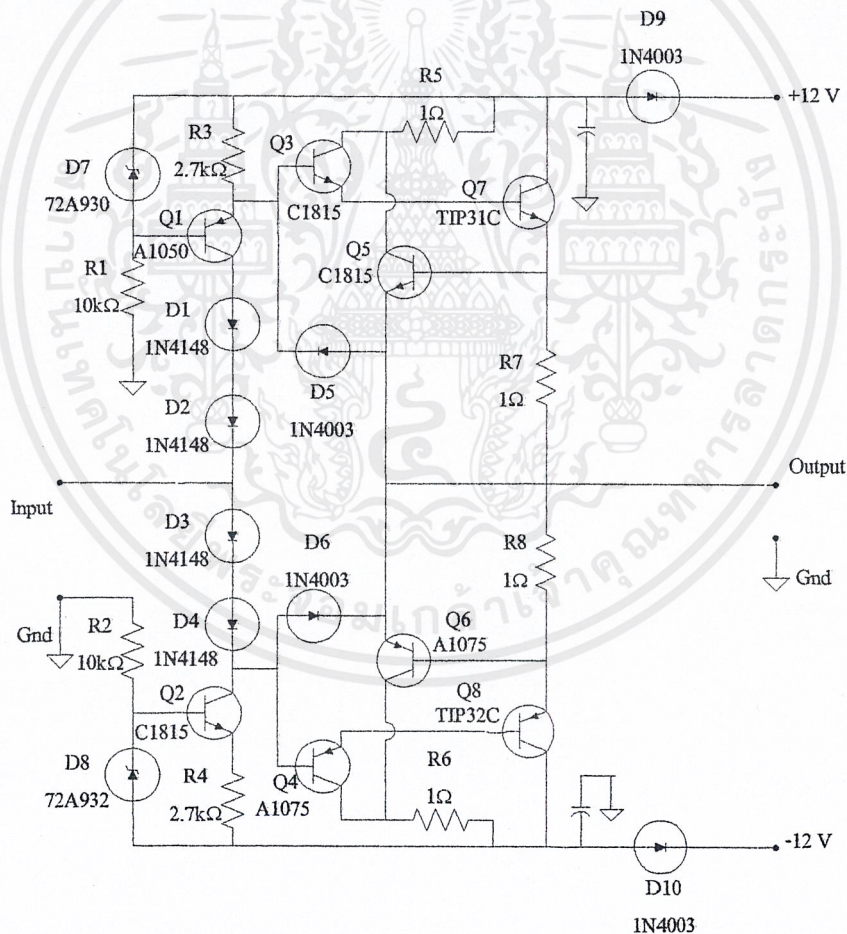
จากวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะได้ความสัมพันธ์ของ e_{in} และ e_{out} ดังนี้

$$e_{out} = (R_F / R_I) \cdot e_{in} + (R_F / R_{OS}) \cdot V \quad (3.3)$$

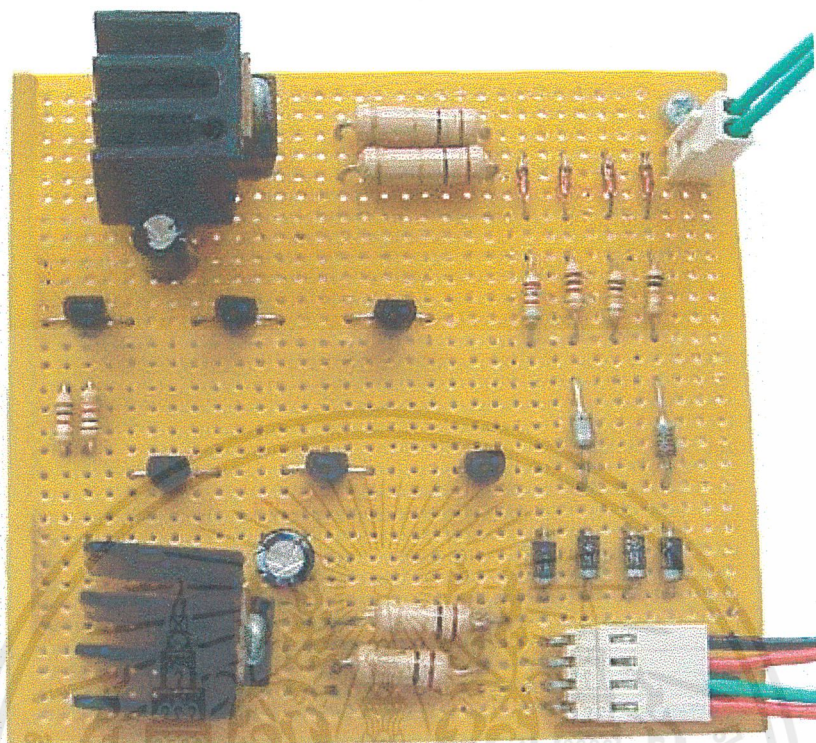
เมื่อค่าความชันคือ R_F / R_I และ ค่า offset คือ $(R_F / R_{OS}) \cdot V$

3.1.5 วงจรขับมอเตอร์

เป็นวงจรเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (Power Electronics) เพื่อใช้ในการควบคุมการจ่ายโวลต์เตจ (Voltage) ให้กับมอเตอร์ในรถอินเวอร์ทเพนดูลัม ในการควบคุมความเร็วและทิศทาง เหตุที่ต้องมีวงจรขับมอเตอร์เนื่องจากจะเกิด Voltage dropped อย่างมาก ถ้าหากนำสัญญาณมาต่อกับมอเตอร์ในรถอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยตรง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขับมอเตอร์

3.1.6 วงจร Data Converter

วงจร Data Converter คือส่วนของวงจร Digital to Analog Converter (DAC) และ วงจร Analog to Digital Converter (ADC) เพื่อใช้ในการแปลงข้อมูลระหว่าง PC และ FLC กับ ระบบ สำหรับในส่วนของปริญญาโทฉบับนี้ การเชื่อมต่อระบบ กับ PC และ FLC ได้ใช้ ET – Digital Input/Output Card (ET-DIO Card) ดังมีรายละเอียดของวงจร Data Converter ดังนี้

3.1.6.1 วงจร Analog to Digital Converter (ADC) ในส่วนของปริญญาโทฉบับนี้ ใช้ ไอซีเบอร์ ADC0804 (8 Bits) ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตในรูปของ Analog แล้วเปลี่ยนเป็น Digital เพื่อส่งให้ CPU ประมวลผล ซึ่ง ET-DIO Card สามารถรับสัญญาณ Analog ได้ถึง 5 VDC และสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามานั้นสามารถกำหนดแถบความกว้าง (Range) ของสัญญาณได้โดยการควบคุมขนาดของ V_I – และ $V_{ref} / 2$ ซึ่ง V_I – จะเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นหรือค่าต่ำสุดของสัญญาณที่รับเข้ามาบน ET-DIO Card ซึ่งต้องกำหนดเองโดยปรกติแล้วต้องมีค่ามากกว่า 0 VDC แต่ต้องต่ำกว่า $V_{ref} / 2$ เสมอ ส่วนสัญญาณ $V_{ref} / 2$ จะเป็นตัวกำหนดขนาดสูงสุดของสัญญาณที่รับเข้ามา นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเป็น 2 เท่าของ $V_{ref} / 2$ จะได้ Data = FFH

สัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเป็น 1 เท่าของ $V_{ref} / 2$ จะได้ Data = 7FH

สัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเท่ากับ $V_I -$ จะได้ Data = 00H

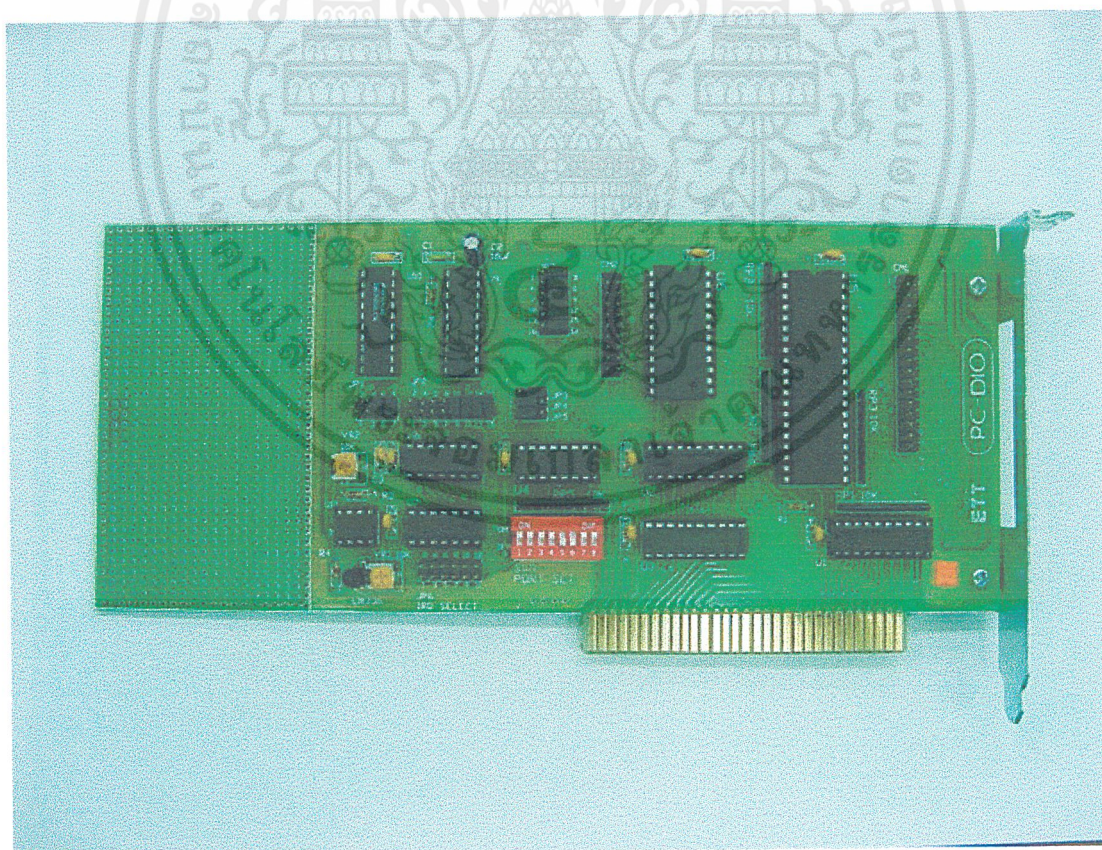
ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Data ที่มีต่อขนาดของสัญญาณจะเป็นเชิงเส้นตลอด(Linear) ซึ่งขนาดของสัญญาณ $V_{ref} / 2$ ที่ป้อนเข้ามานั้นต้องมีค่ามากกว่า 0 VDC และไม่ควรมากเกิน 2.5 VDC ด้วยเช่นกัน

สำหรับไอซี ADC0804 บน ET-DIO Card สามารถเลือกโหมดการทำงานได้ทั้งสองโหมดการทำงาน คือ

1. โหมดการทำงานปรกติ (Free Run Mode)

2. โหมดอินเทอร์รัพท์ (Interrupt Mode)

(ในส่วนของปริญญาโทฉบับนี้ เลือกโหมดการทำงานปรกติ และสามารถดูรายละเอียดการปรับแต่ง ET-DIO Card ที่ภาคผนวก)



รูปที่ 3.7 แสดง ET-DIO Card

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6.2 วงจร Digital to Analog Converter (DAC) ในส่วนของปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ ไอซีเบอร์ DAC0832 (8 Bits) ทำหน้าที่ที่มีลักษณะตรงข้ามกับการทำงานของไอซี ADC0804 กล่าวคือ ทำหน้าที่ที่เปลี่ยนสัญญาณ Digital เปลี่ยนเป็นสัญญาณ Analog ซึ่งนิยมใช้ในงานในด้านการควบคุมต่างๆ

การควบคุมขนาดของสัญญาณ Analog Output นั้นทำได้โดยการส่งค่า Data ออกไปยังพอร์ตควบคุมของ DAC (Port control DAC) ซึ่งอัตราส่วนของขนาดสัญญาณ Analog Output ที่ได้นั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้น (Linear) นั่นคือ

ถ้าส่งค่า Data เป็น FFH จะได้ขนาดสัญญาณ Analog Output สูงสุด

ถ้าส่งค่า Data เป็น 7FH จะได้ขนาดสัญญาณ Analog Output ครึ่งหนึ่ง

ถ้าส่งค่า Data เป็น 00H จะได้ขนาดสัญญาณ Analog Output ต่ำสุด

ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog Output นั้นมีความละเอียดถึง 256 ค่า จากย่านความกว้างของสัญญาณทั้งหมด(Range) หรือคำนวณได้จาก

$$\text{ความละเอียดของช่วงสัญญาณ} = (V_{\max} - V_{\min})/256 \quad (3.4)$$

(สามารถดูรายละเอียดการ ปรับแต่ง ET-DIO Card ที่ภาคผนวก)

ตัวอย่าง

ต้องการขนาดสูงสุดของสัญญาณ 10 VDC โดยให้ขนาดต่ำสุดของสัญญาณเป็น 0 VDC จะหาความละเอียดของสัญญาณได้

$$\begin{aligned} \text{ความละเอียดของช่วงสัญญาณ} &= (10 \text{ VDC} - 0 \text{ VDC})/256 \\ &= 0.039 \text{ VDC} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ความละเอียดของสัญญาณเป็น 0.039 VDC

3.2 การออกแบบระบบควบคุมฟัซซี่

สำหรับการออกแบบสามารถแบ่งขั้นตอนในการออกแบบได้เป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบในส่วนของ Basic Fuzzy Logic Controller และ การออกแบบในส่วนของ Self-organizing Fuzzy Logic Controller

3.2.1 การออกแบบในส่วนของ Basic Fuzzy Logic Controller

การออกแบบ Basic Fuzzy Logic Controller ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab และการประยุกต์ใช้งานจริงด้วยโปรแกรมภาษาซี

3.2.1.1 การจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab

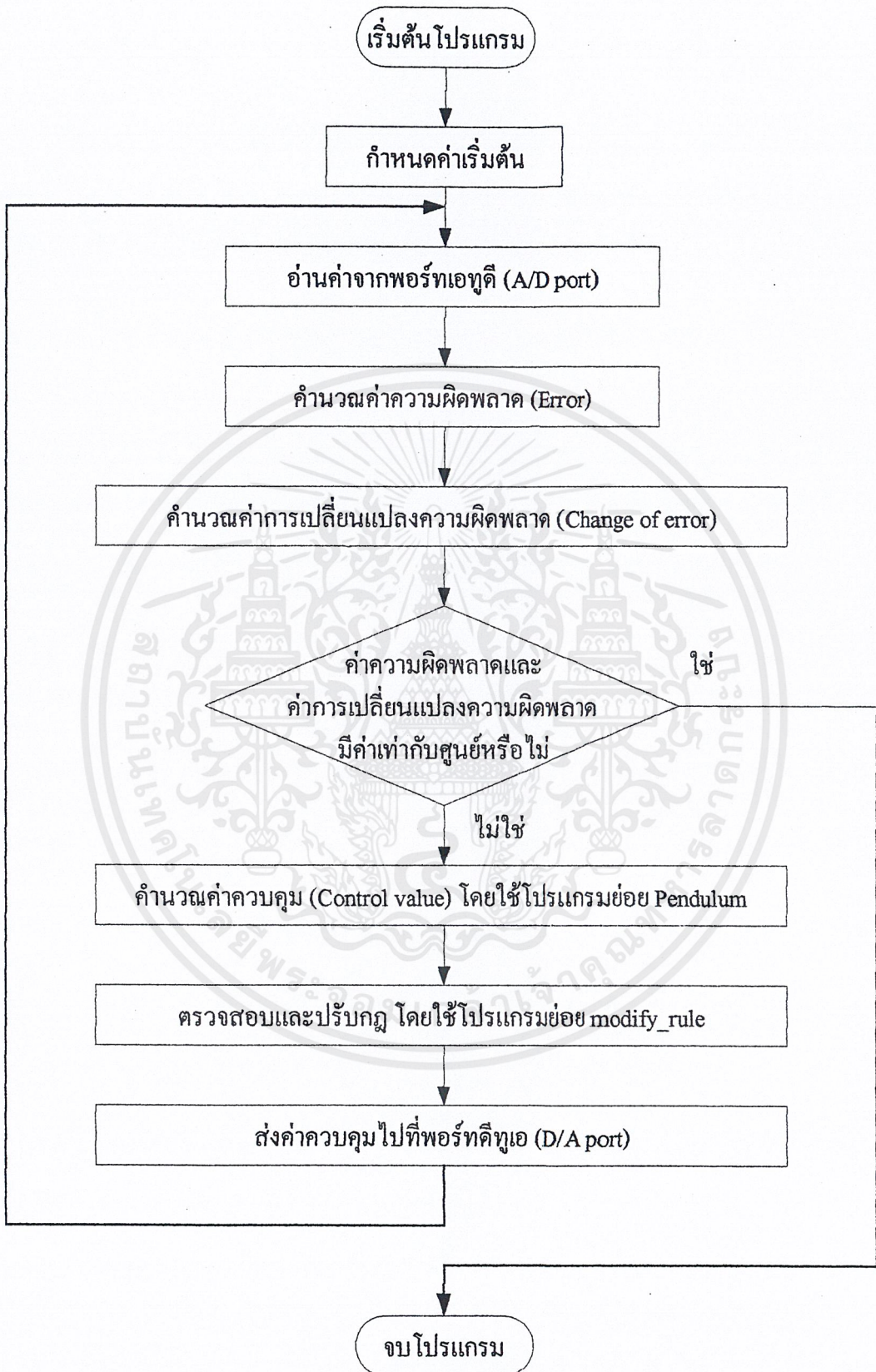
1. สร้าง Model ของ invert pendulum cart โดยเลียนแบบตัวอย่างจาก Fuzzy demo ในโปรแกรม Matlab และใช้ Simulink block ช่วยในการสร้าง
2. การออกแบบกฎในโปรแกรม Matlab จะมี function เกี่ยวกับการออกแบบ Fuzzy Logic Controller ซึ่งสามารถออกแบบและทดสอบกฎต่างๆที่ได้ออกแบบกับระบบจำลอง
3. หลังจากการจำลองการทำงานจนได้ผลตอบสนองที่น่าพอใจแล้ว นำแบบจำลอง Fuzzy Logic Controller ที่ได้จากการจำลองการทำงานนั้น ไปประยุกต์ใช้งานจริงด้วยโปรแกรมภาษาซี

3.2.1.2 การประยุกต์ใช้งานจริงด้วยโปรแกรมภาษาซี

1. เมื่อได้แบบจำลอง Fuzzy Logic Controller จากการจำลองการทำงานแล้ว นำมาเขียนโปรแกรมภาษาซี
2. ทำการทดสอบกระบวนการทำงานตาม flowchart ดังแสดงในรูปที่ 3.8 , 3.9 และ 3.10

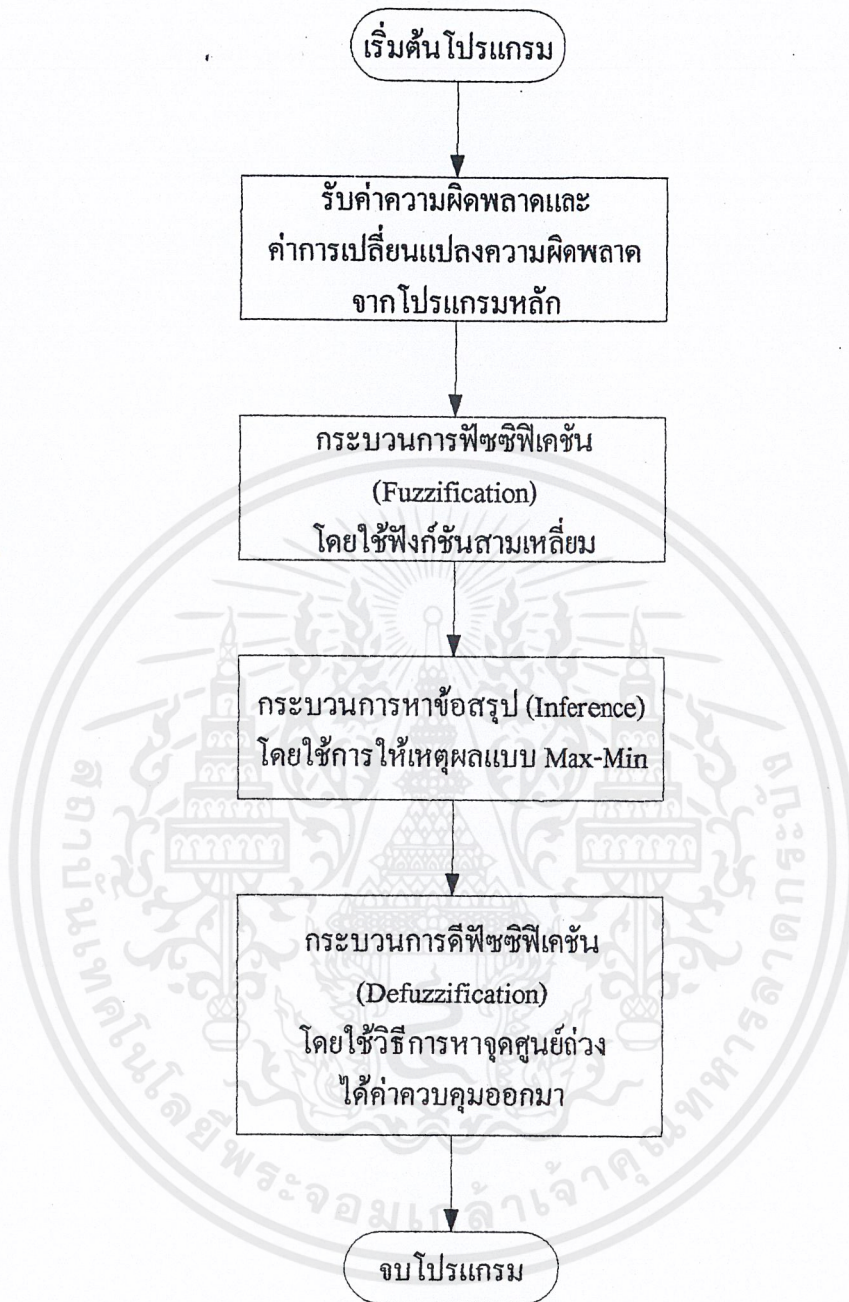
3.2.2 การออกแบบในส่วนของ Self-organizing Fuzzy Logic Controller

เนื่องจากในโปรแกรม Matlab ไม่สามารถออกแบบ Self-organizing Fuzzy Logic Controller ได้ จึงไม่สามารถจำลองการทำงานของ Self-organizing Fuzzy Logic Controller ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎี Self-organizing ในการเขียนโปรแกรมภาษาซี แล้วเก็บข้อมูลของผลการทดลองและนำมาแสดงผลในโปรแกรม Matlab เพื่อการวิเคราะห์ระบบต่อไป



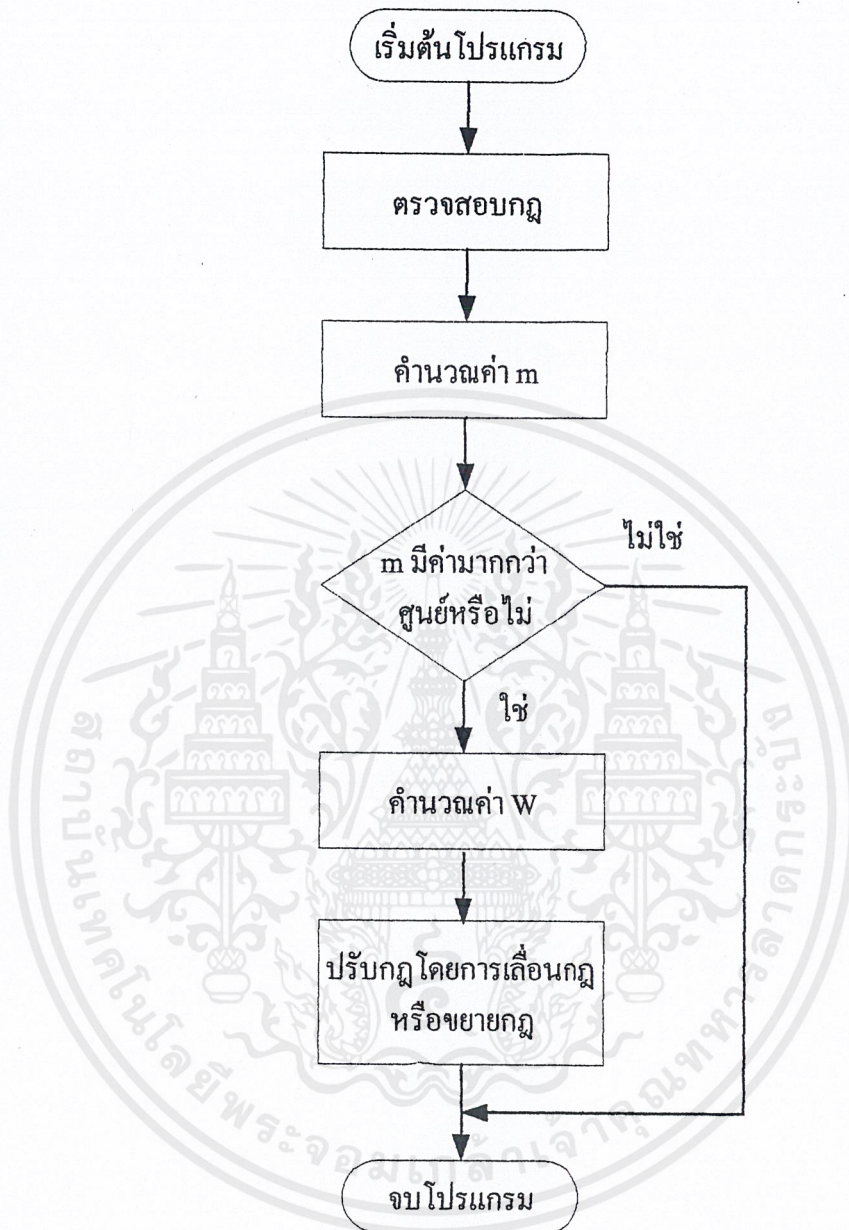
รูปที่ 3.8 โฟลว์ชาร์ทแสดงโปรแกรมหลักในการทดสอบกระบวนการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 โฟลว์ชาร์ตแสดงโปรแกรมย่อย Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 โฟลว์ชาร์ทแสดงโปรแกรมย่อย modify_rule

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

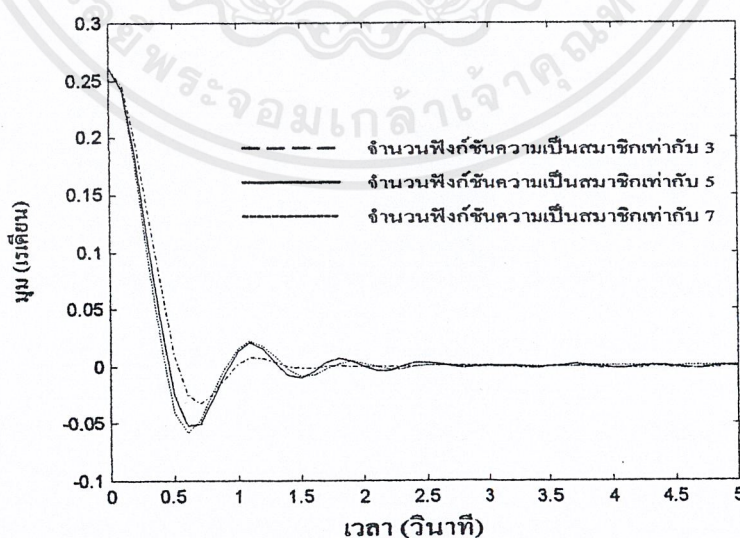
การทดลองควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมด้วยตัวควบคุมพีชซีแบบปรับได้ด้วยตนเอง ใช้การเลียนแบบระบบจริง (Simulation) ซึ่งเป็นโปรแกรมภาษาซี สำหรับพารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมมีค่าดังนี้

- มวลของรถ (M) เท่ากับ 0.09368 กิโลกรัม
- มวลของลูกตุ้ม (m) เท่ากับ 0.01818 กิโลกรัม
- ระยะหุคถึงจุดศูนย์กลางมวลของก้านและลูกตุ้ม (L) เท่ากับ 0.227 เมตร
- ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) เท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที²

ในส่วนผลการทดลอง ได้จากการบันทึกข้อมูลในรูปของแฟ้มข้อมูล แล้วนำไปเขียนกราฟโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งรายละเอียดการทดลองต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

4.1 การทดลองควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมด้วยตัวควบคุมพีชซีที่ไม่มีการปรับกฎ

การทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบโดยใช้การออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีจำนวนเท่ากับ 3, 5 และ 7 ฟังก์ชัน โดยกำหนดค่ามุมเริ่มต้นเป็น -0.2625 เรเดียน และ 0.2625 เรเดียน ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 และมีค่าสมรรถนะของระบบดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

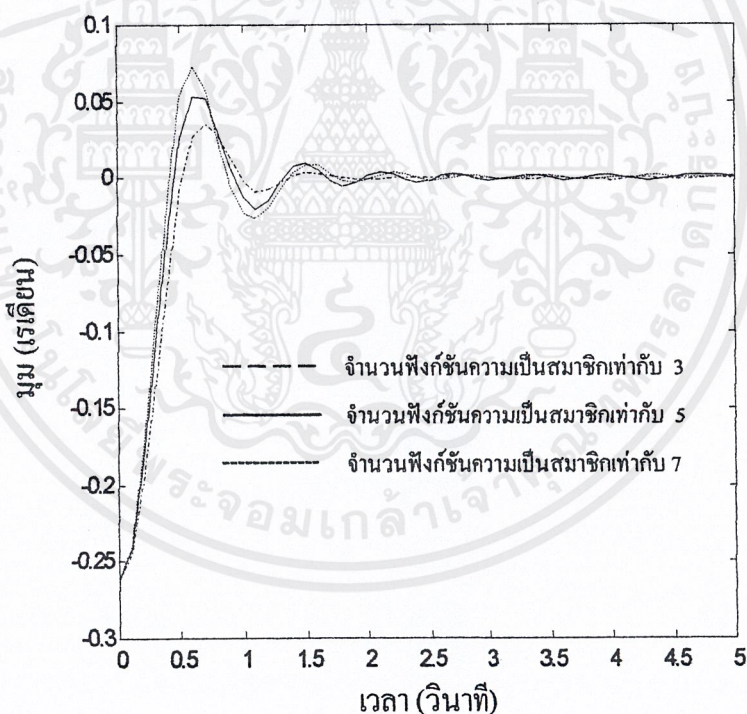


รูปที่ 4.1 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น 0.2625 เรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น 0.2625 เรเดียน

จำนวนฟังก์ชัน ความเป็น สมาชิก	เปอร์เซ็นต์ การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่ สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
3	12.64	0.6	2.0	0.0004
5	19.93	0.5	2.4	0.0010
7	36.50	0.4	2.5	0.0012



รูปที่ 4.2 แสดงผลตอบสนองของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น -0.2625 เรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่ไม่มีการปรับกฎซึ่งมีค่ามุมเริ่มต้น -0.2625 เรเดียน

จำนวนฟังก์ชัน ความเป็น สมาชิก	เปอร์เซ็นต์ การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่ สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
3	13.69	0.6	2.2	0.0006
5	20.41	0.5	2.5	0.0004
7	27.99	0.4	2.8	0.0012

4.2 การทดลองควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมด้วยตัวควบคุมฟัซซีที่มีการปรับกฎด้วยตนเอง

การทดลองนี้ทำการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบจากการเลื่อนกฎและขยายกฎของตัวควบคุมฟัซซี

4.2.1 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมฟัซซีปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3

กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับกฎจากสมการ (2.24) และ (2.25) ดังนี้

$$q_1 = 25 * (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

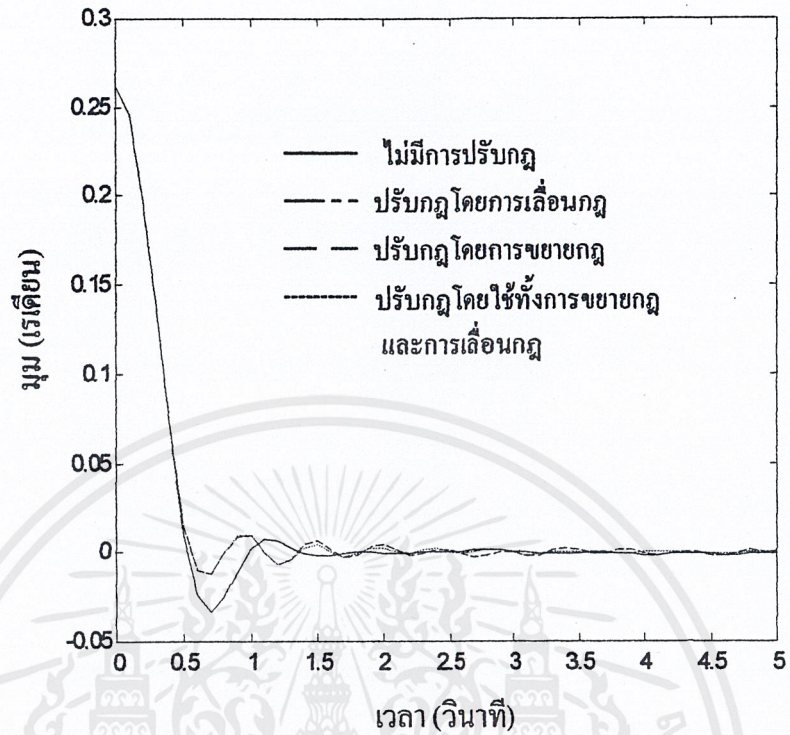
$$q_2 = -25 * (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

$$w_m = 25.0$$

$$l_m = 1.0$$

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 และค่าสมรรถนะของระบบแสดงดังตารางที่ 4.3

และ 4.4

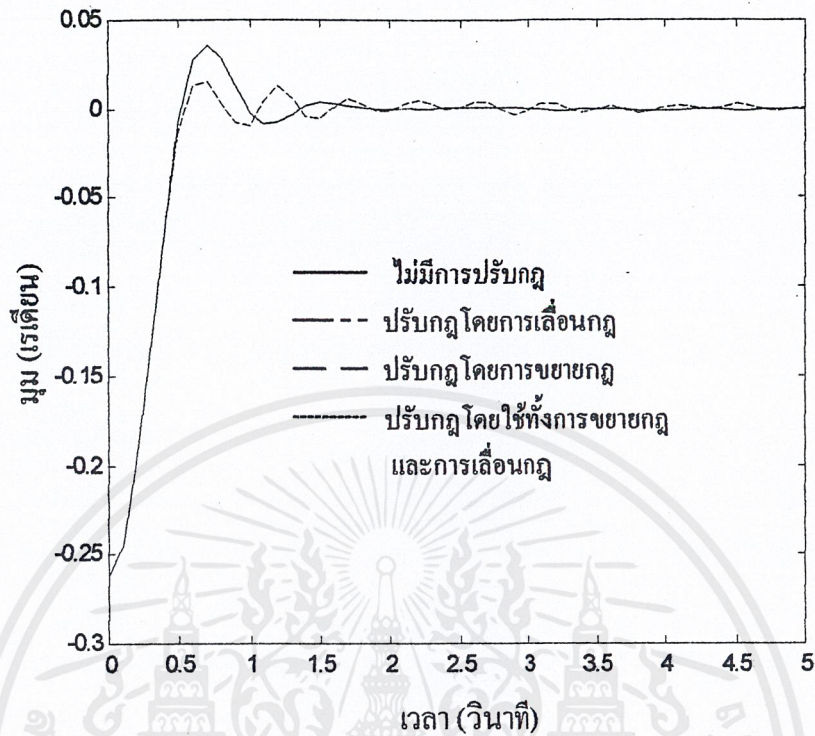


รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625เรเดียน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	12.64	0.6	2.0	0.0004
เลื่อนกฎ	4.64	0.7	2.8	0.0011
ขยายกฎ	12.64	0.4	2.6	0.0012
เลื่อนกฎและขยายกฎ	4.64	0.4	2.2	0.0004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	13.69	0.6	2.2	0.0006
เลื่อนกฎ	4.98	0.7	4.6	0.0011
ขยายกฎ	4.98	0.7	4.6	0.0011
เลื่อนกฎและขยายกฎ	4.98	0.7	4.6	0.0011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมพีชซีที่ปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5

กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับกฎจากสมการ (2.24) และ (2.25) ดังนี้

$$q_1 = 10 \cdot (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

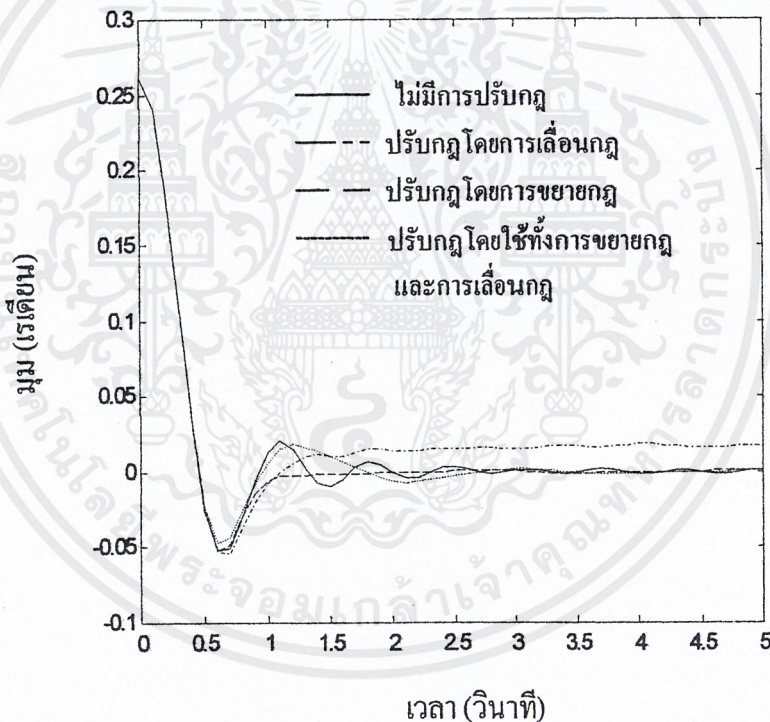
$$q_2 = -10 \cdot (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

$$w_m = 10.0$$

$$l_m = 1.0$$

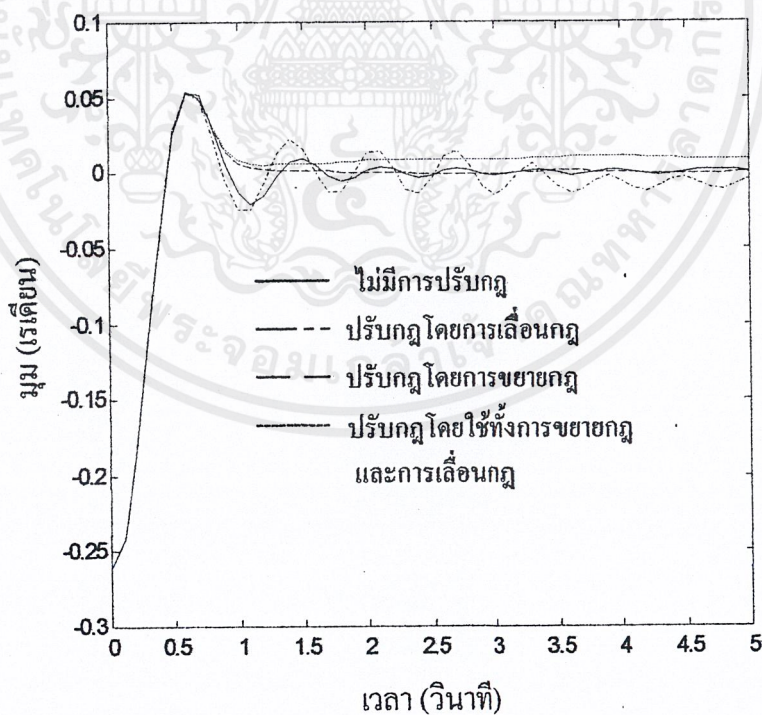
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 และค่าสมรรถนะของระบบแสดงดังตารางที่ 4.5

และ 4.6



ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	19.93	0.5	2.4	0.0010
เลือนกฎ	17.14	0.5	3.2	0.0200
ขยายกฎ	19.93	0.5	1.0	0.0012
เลือนกฎและขยายกฎ	19.93	0.5	2.6	0.0011



รูปที่ 4.6 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	20.41	0.5	2.5	0.0004
เลื่อนกฎ	18.67	0.5	1.2	0.0100
ขยายกฎ	20.41	0.5	1.1	0.0011
เลื่อนกฎและขยายกฎ	20.41	0.5	4.6	0.0100

4.2.3 การทดลองโดยใช้ตัวควบคุมพีซซีปรับกฎที่ออกแบบจำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7

กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการปรับกฎจากสมการ (2.24) และ (2.25) ดังนี้

$$q_1 = 10 \cdot (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

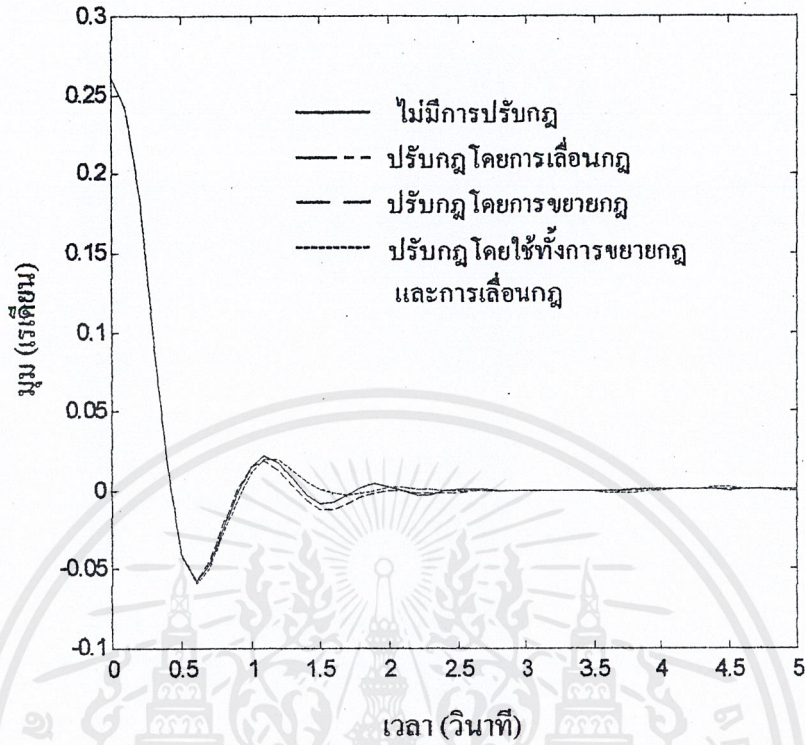
$$q_2 = -10 \cdot (10 + |\text{error}|) / (0.1 + |\text{error}|)$$

$$w_m = 5.0$$

$$l_m = 1.0$$

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 และค่าสมรรถนะของระบบแสดงดังตารางที่ 4.7

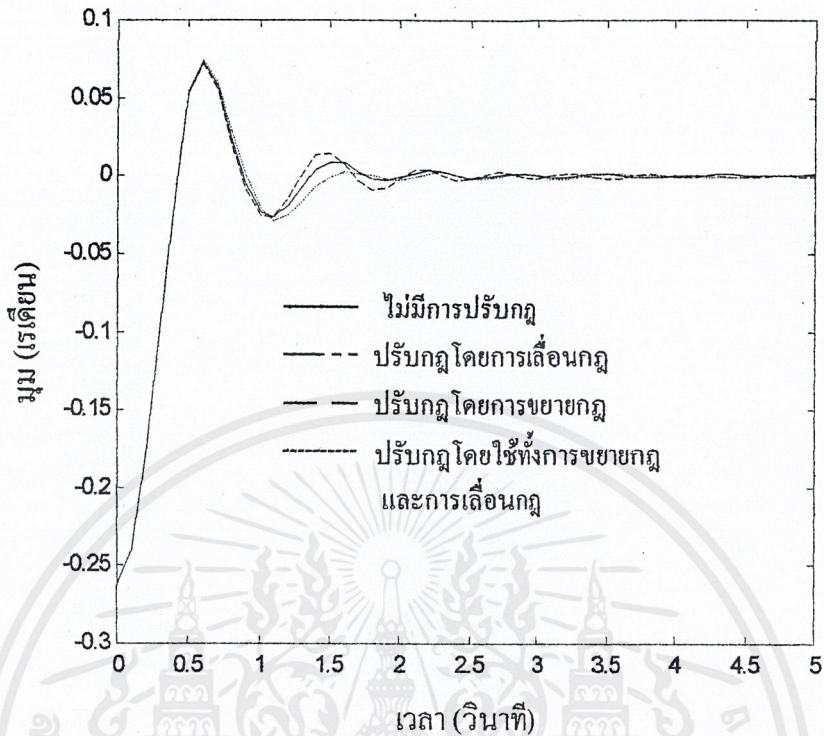
และ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ 0.2625 เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	36.50	0.4	2.5	0.0012
เลื่อนกฎ	34.26	0.4	2.1	0.0012
ขยายกฎ	36.50	0.4	2.0	0.0001
เลื่อนกฎและขยายกฎ	36.50	0.4	2.0	0.0001



รูปที่ 4.8 แสดงผลตอบสนองของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสมรรถนะของระบบที่มีการปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 7 โดยมีค่ามุมเริ่มต้นเท่ากับ -0.2625 เรเดียน

ฟังก์ชันการปรับกฎ	เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาในการเข้าถึง (Rise time) หน่วยเป็นวินาที	เวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) หน่วยเป็นวินาที	ค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) หน่วยเป็นเรเดียน
ไม่ปรับกฎ	27.99	0.4	2.8	0.0012
เลื่อนกฎ	26.29	0.4	2.7	0.0012
ขยายกฎ	27.99	0.4	2.4	0.0001
เลื่อนกฎและขยายกฎ	27.99	0.4	2.4	0.0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีมีผลต่อผลตอบสนองของระบบ คือ จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่มีมากขึ้น ช่วยลดเวลาในการเข้าถึงของระบบได้ แต่ทำให้เปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินเพิ่มตามไปด้วย
2. ตัวควบคุมฟัซซีที่ปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 3 เมื่อทำการเลื่อนกฎหรือขยายกฎจะมีผลตอบสนองของระบบไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสามารถลดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินของระบบได้
3. ตัวควบคุมฟัซซีที่ปรับกฎโดยใช้จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเท่ากับ 5 และ 7 มีผลต่อระบบในทำนองเดียวกัน คือ
 - การเลื่อนกฎช่วยลดเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกิน ซึ่งเป็นการปรับปรุงผลตอบสนองของระบบในช่วงเริ่มต้น (Transient response) แต่จะทำให้ระบบเกิดการแกว่ง (Oscillate) มากขึ้น ในบางครั้งทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่สภาวะคงตัวได้
 - การขยายกฎช่วยลดเวลาในการเข้าสู่สภาวะคงตัว และทำให้ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งเป็นการปรับปรุงผลตอบสนองของระบบในช่วงสภาวะคงตัว (Steady state response)
4. จำนวนฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวควบคุมฟัซซีที่เหมาะสมในการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม คือ 5 และ 7 ฟังก์ชัน

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในการปรับกฎของตัวควบคุมฟัซซี

ในการปรับกฎของตัวควบคุมฟัซซีในปริณญาณิพนธ์นี้ ได้เลือกวิธีการวิเคราะห์ทางเดินสถานะ ซึ่งพบปัญหาและได้ทำการแก้ไขดังนี้

1. การเลือกค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังสมการ (2.24) และ (2.25) เช่น q_1 , q_2 , W_m ให้เหมาะสมกับระบบทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากหลักในการเลือกเป็นหลักการกว้าง ๆ จึงต้องทำการลองผิดลองถูกในการเลือกค่า
2. สามารถปรับกฎได้รอบเดียว ซึ่งถ้าปรับในรอบต่อไป จะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ไม่สามารถควบคุมได้ อาจทำการแก้ไขโดยกำหนดช่วงในการเลื่อนกฎและขยายกฎให้เหมาะสม

3. ในการปรับกฎที่สภาวะคงตัว จะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นไม่มากนัก แต่จะเกิดการปรับกฎอยู่ตลอดเวลา ทำให้ระบบเกิดการแกว่งได้ ซึ่งลดผลของการปรับกฎนี้ได้โดยการหยุดปรับกฎเมื่อค่าผลตอบสนองของระบบอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ เช่น 0.05% ของค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

5.3 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไขในส่วนชิ้นงาน

ในส่วนของชิ้นงานพบปัญหาต่างๆดังนี้

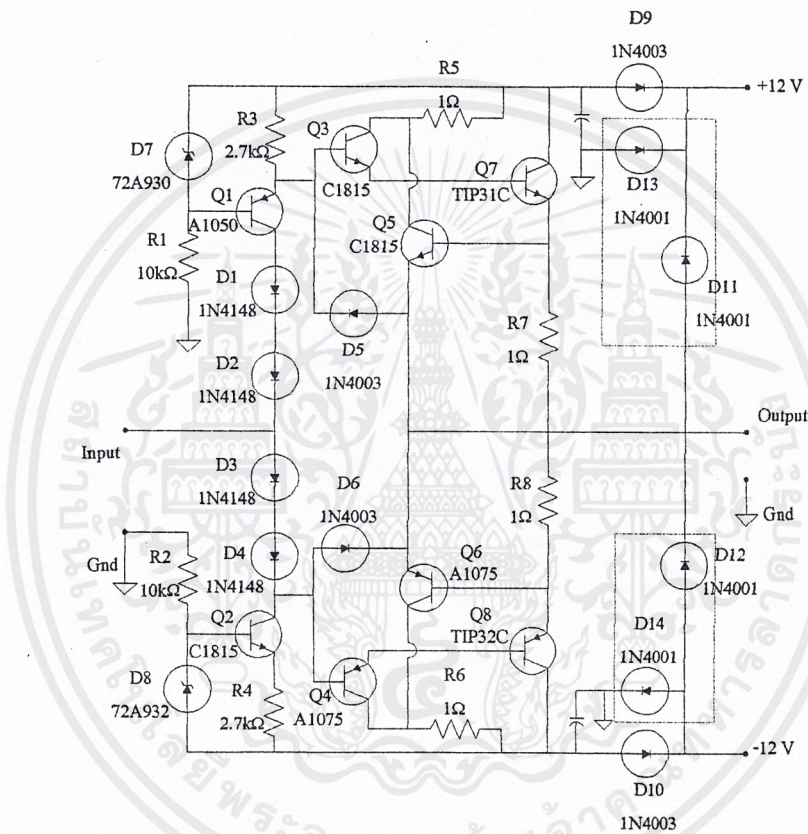
1. เนื่องจากได้มีการเชื่อมต่อสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณอนาลอกที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงในรถอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยผ่านการ์ดอินเทอร์เฟซ ET-DIO ซึ่งใช้กราวด์ร่วมกันนั้น เป็นผลทำให้แรงดันย้อนกลับ (Back Electromotive Force : Back EMF) ที่เกิดจากมอเตอร์กระแสตรงไปรบกวนสัญญาณดิจิทัลและสัญญาณอนาลอกในการ์ดอินเทอร์เฟซ ET-DIO ส่งผลทำให้ ไอซีเบอร์ ADC0804 ในวงจร Analog to Digital Converter(ADC) ร้อนและเกิดความเสียหายได้ มีแนวทางการแก้ไขได้ดังนี้

- แก้ไขที่การ์ดอินเทอร์เฟซ ET-DIO โดยการแยกสัญญาณอนาลอกกราวด์ และสัญญาณดิจิทัลกราวด์ ออกจากกัน
- แยกกราวด์ของชุดควบคุม(ได้แก่ ตัวควบคุม ตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณ วงจรปรับแปลงสัญญาณ และวงจร Data Converter)และกราวด์ของระบบ(วงจรขับมอเตอร์และรถอินเวอร์ทเพนดูลัม) ออกจากกัน โดยใช้แหล่งจ่ายไฟคนละแหล่งจ่าย
- เนื่องจากวงจรขับมอเตอร์ในปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้เป็นเชิงเส้น (Linear Drive) การแยกกราวด์มีความยุ่งยากจึงจำเป็นต้องต่อวงจรไดโอดที่วงจรขับมอเตอร์ (แนวเส้นประ) ดังรูปที่ 5.1 เพื่อป้องกันการรบกวนของแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากมอเตอร์กระแสตรง

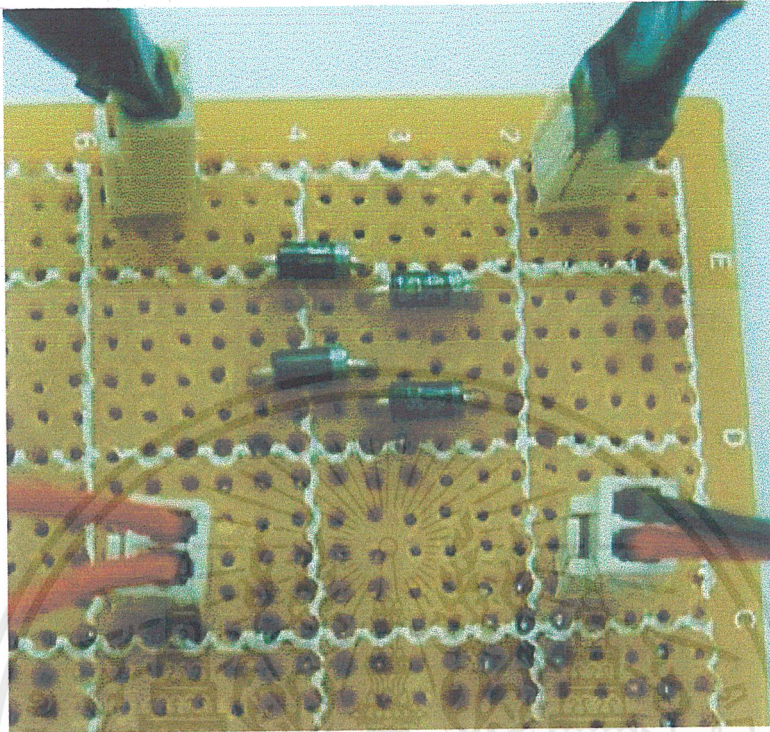
2. มอเตอร์กระแสตรงมีอัตราเร่งไม่เพียงพอที่จะเหวี่ยงก้านเพนดูลัมให้ขึ้นมาได้ จึงยากต่อการควบคุม ซึ่งมีแนวทางการแก้ไขดังนี้

- ควรดูก่อนว่าเฟืองของมอเตอร์กับเฟืองที่เพลา ขบกันดีหรือไม่ เพราะหากขบกันไม่ดี จะทำให้ลื่นหมุนฟรี ความเร็วเริ่มต้นต่ำ อัตราเร่งต่ำ
- เพิ่มการพันรอบของมอเตอร์ให้มากขึ้น เพราะจะได้ดึงกระแสจากแหล่งจ่ายไฟได้มากขึ้น ทำให้มอเตอร์มีอัตราเร่งสูงขึ้น ความเร็วเริ่มต้นสูงขึ้น

3. เมื่อป้อนแรงดันในช่วง -1 โวลต์ ถึง 1 โวลต์ มอเตอร์จะไม่หมุนเนื่องจากค่าแรงดันดังกล่าวไม่เพียงพอ ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพลดลง ซึ่งมีแนวทางการแก้ไขดังนี้
- หาและทำการทดสอบมอเตอร์เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการใช้งาน
4. ในการใช้ความต้านทานปรับค่าได้เป็นตัวตรวจจับและแปลงสัญญาณนั้นก้านเพนคูล์มีความผิด ทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมลดลง



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้รับการปรับปรุง



รูปที่ 5.2 แสดงส่วนของวงจรที่ต่อเพิ่มเติม

5.4 แนวทางการค้นคว้าต่อไปสำหรับนักศึกษารุ่นหลัง

1. ลองเปลี่ยนวงจรขับมอเตอร์เป็นแบบ PWM (Pulse Width Modulation) และใช้ Op-to isolater ในการแยกกราวน์ระหว่างชุดควบคุมกับระบบ แล้วดูผลตอบสนอง
2. ตัวรถที่เลือกในการออกแบบไม่ควรเบา หรือนักเกินไป ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุม
3. ในการออกแบบควรมีมาตรฐานในการวัดค่ามุมที่แน่นอน และการกำหนดขอบเขตของมุมต่างๆกันในการควบคุม จะให้ผลตอบสนองต่างกันหรือไม่ อย่างไร
4. ควรมีวงจรทดสอบการทำงานของไอซีที่มีหน้าที่สำคัญ เช่น ไอซี ADC0804 ไอซี DAC0832 เป็นต้น
5. ในส่วนการปรับกฎของตัวควบคุมฟัซซีมีอัลกอริทึม (Algorithm) อื่น ๆ ที่น่าสนใจ เช่น วิธีเกรเดียนต์เดสเซนส์ (Gradient descent) หรืออาจศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมในวิชา Adaptive control หรือ Optimum control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รายละเอียด ET-DIO Card

ลักษณะทั่วไป ของ ET-DIO Card

ET-DIO Card เป็นลักษณะของการ์ดคอมพิวเตอร์ (PC Card) ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) เพื่อขยายระบบอินพุตและเอาต์พุต ให้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้นซึ่ง ET-DIO Card สามารถที่จะรับสัญญาณอินพุตและให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาได้ทั้งในรูปแบบของอนาล็อกและดิจิตอล ทำให้มีความอ่อนตัวในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้นซึ่ง ET-DIO Card มีอุปกรณ์ร่วมและมีจุดเด่น ๆ ของตัวมันเองดังนี้ คือ

- มี ไอซี 8255 จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะใช้โปรแกรมให้เป็นไปได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุตตามความต้องการของผู้ใช้เองได้ทั้งหมด 3 พอร์ต หรือ 24 บิต ในรูปสัญญาณดิจิตอลนั่นเอง

- มี ไอซี 8253 จำนวน 1 ตัว ทำให้ ET-DIO Card สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับระบบฐานเวลาต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น

1. โปรแกรมให้ทำงานเป็นวงจรสร้างฐานเวลาแบบต่าง ๆ
2. โปรแกรมให้ทำงานเป็นวงจรมับแบบต่าง ๆ
3. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างสัญญาณอินเทอร์พท์ให้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
4. โปรแกรมให้ทำงานเป็นวงจรสร้างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม (Square wave)
5. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างความถี่

ซึ่งไอซี 8253 นี้มีโครงสร้างภายในให้ใช้งานถึง 3 แชนแนล และแต่ละแชนแนลทำงานแยกจากกันอย่างอิสระ

- มี ไอซี ADC (Analog to Digital Converter) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะเลือกใช้ได้ถึง 2 เบอร์ คือ ADC0804 (8 บิต) หรือ ADC1001 (10 บิต) ซึ่งทำให้ ET-DIO Card สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับ หรือการวัดสัญญาณหรือรับสัญญาณอินพุตในรูปแบบของสัญญาณอนาล็อกได้ 1 แชนแนล ซึ่งขนาดของสัญญาณอนาล็อกที่รับเข้ามาสามารถมีรับได้โดยตรงสูงถึง 5VDC หรือมากกว่าโดยเพิ่มวงจรขยายย่านวัดเข้าไปอีกเล็กน้อย ทำให้ ET-DIO Card สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น

1. เครื่องวัดกระแส
2. เครื่องวัดแรงดัน
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ

4. เครื่องวัดความต้านทาน

5. เครื่องวัดความจุ

ซึ่งผลของการวัดแบบต่าง ๆ สามารถที่จะนำมาเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลหรือแสดงผลในรูปแบบอื่น ๆ ได้ตามต้องการ โดยให้ผู้ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมเอง

- มี ไอซี DAC (Digital to Analog Converter) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ถึง 2 เบอร์ คือ DAC0832 (8 บิต) หรือ DAC1232 (12 บิต) ทำให้ ET-DIO Card สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่าง ๆ โดยส่งสัญญาณในรูปของอนาลอกออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งขนาดของสัญญาณอนาลอก มีวงจรรอปแอมป์เพื่อขยายขนาดของสัญญาณอยู่แล้วซึ่งผู้ใช้สามารถปรับขนาดของสัญญาณได้ตั้งแต่ 0-10.66 VDC

- มีวงจรถอดรหัสตำแหน่งของพอร์ตที่จะใช้งาน ทำให้สะดวกในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพอร์ตที่จะใช้งาน ได้ง่าย ทำให้มีความอ่อนตัวในการใช้งาน และสามารถที่จะนำ ET-DIO Card ต่อร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้มากกว่า 1 การ์ด โดยกำหนดพอร์ตใช้งานที่แตกต่างกัน

- มีพื้นที่ใช้งาน มากถึง 5x9 ซม. ทำให้มีพื้นที่ว่างใช้งานมากยิ่งขึ้นจึงทำให้ผู้ใช้สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานต่อวงจรหรือเพิ่มเติมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้มากมายและสะดวกยิ่งขึ้น

การปรับแต่งแรงดันอ้างอิง

ET-DIO Card มีวงจรถวลคุมแรงดันอ้างอิงซึ่งประกอบอยู่ในตัวเรียบร้อยแล้วซึ่งใช้ไอซี LM336 เป็นอุปกรณ์หลักโดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้ (VR1) เป็นตัวปรับแต่งค่าแรงดันอ้างอิง ซึ่งขนาดของแรงดันอ้างอิงนี้กำหนดให้มีขนาดเท่ากับ 2.50 VDC โดยใช้เป็นค่าแรงดันอ้างอิงของไอซี DAC และ ไอซี ADC ซึ่งการปรับแต่งค่าแรงดันอ้างอิงนี้ทำได้โดยการใช้โวลท์มิเตอร์วัดเทียบระหว่าง กราวนด์และจุดกำเนิดแรงดันอ้างอิง 2.50 VDC แล้วทำการปรับ VR1 จนได้ แรงดัน 2.50 VDC พอดี

****หมายเหตุ**** ถ้าค่าแรงดันอ้างอิงนี้ไม่เที่ยงตรงจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับ ไอซี DAC และ ไอซี ADC อาจทำให้ผลการวัดต่าง ๆ ได้ค่าที่ผิดพลาดตามไปด้วย

การปรับแต่งขนาดของสัญญาณอนาลอก

สัญญาณอนาลอกที่ได้จากไอซี DAC มีวงจรรอปแอมป์ เพื่อทำการขยายให้มีขนาดของสัญญาณสูงขึ้น เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งานด้านต่าง ๆ ได้ดีขึ้น ซึ่งขนาดของสัญญาณนี้สามารถที่จะกำหนดและปรับแต่งได้ตั้งแต่ 0-10.6 VDC โดยประมาณ การปรับแต่งขนาดของสัญญาณอนาลอกของ DAC ทำได้โดย

1. กำหนดค่าของสัญญาณสูงสุดที่ต้องการใช้
2. ส่งค่าข้อมูล FFH ให้พอร์ตควบคุม ของ DAC

3. ปรับ VR2 ให้ได้ขนาดของสัญญาณตามต้องการ

หมายเหตุ การปรับขนาดของสัญญาณอนาล็อกต้องทำหลังจากปรับแต่งแรงดันอ้างอิงเรียบร้อยแล้วจึงจะได้ผลที่แน่นอน

SPECIFICATIONS

DESCRIPTION	MIN	MAX	UNITS
INPUT LOGIC LOW	-0.5	0.8	VOLT
INPUT LOGIC HIGH	2.0	5.5	VOLT
OUTPUT LOGIC LOW	-	0.45	VOLT
OUTPUT LOGIC HIGH	2.4	5.0	VOLT
FREQUENCY INPUT	-	2.5	MHz
ANALOG INPUT (VI+)	0	5	VOLT
ANALOG OUTPUT	0.1	10.67	VOLT
VREF/2 (DAC)	-	2.50	VOLT
VREF/2 (ADC)	0.1	2.50	VOLT
VI-	0.0	5.0	VOLT
VCC	: +5V		
	: +12 V		
	: -12V		
	: GND		
SIZE	: HALF SLOT (9 X 17 cm)		
	: WORKING AREA (9 X 5 cm)		
	: TOTAL AREA (9 X 22 cm)		
DIGITAL I/O	: 3 PORT (24 BITS I/O 8255)		
TIMER/COUNTER	: 3 CHANNEL (8253)		
ANALOG INPUT	: 1 CHANNEL (ADC 8 BITS OR 10 BITS OPTION)		
ANALOG OUTPUT	: 1 CHANNEL (DAC 8 BITS OR 12 BITS OPTION)		
CONNECTOR	: 34 PIN X 1 (HEADER 17 PIN X 2 ROW)		
	: 20 PIN X 1 (HEADER 10 PIN X 2 ROW)		
DECODE PORT	: 8 POSITION DIP SWITCH		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyโดยใช้โปรแกรม MATLAB

ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzy สิ่งที่ต้องทำการออกแบบ คือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตต่าง ๆ และออกแบบกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต ก่อนที่จะนำตัวควบคุมไปใช้กับระบบจริง ต้องมีการทดสอบโดยการเลียนแบบ (Simulation) ในที่นี้ ได้นำเสนอวิธีการเลียนแบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ส่วนการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎ มีขั้นตอนดังนี้

1. พิมพ์คำสั่ง fuzzy ที่ MATLAB Command Window จะมีหน้าต่าง FIS Editor ขึ้นมา
2. สำหรับ FIS Editor นี้อยู่ในส่วนของ Fuzzy logic toolbox เมื่อต้องการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิก ให้คลิกไปที่ View แล้วเลือก Edit membership functions ซึ่งจะเข้าไปที่หน้าต่าง Membership Function Editor สามารถเลือกช่วงและประเภทฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม ได้ตามต้องการ
3. สำหรับการออกแบบกฎทำได้โดยคลิกที่ View แล้วเลือก Edit rules จะมีหน้าต่าง Rule Editor ขึ้นมา จากนั้นออกแบบได้ตามต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบค่าเอาต์พุตของกฎได้โดยคลิกไปที่ View แล้วเลือก View rules แล้วจะมีหน้าต่าง Rule viewer ขึ้นมา

ส่วนการทดสอบโดยการเลียนแบบ

เราใช้ Simulink ในโปรแกรม MATLAB ช่วยในการทดสอบโดยการเลียนแบบ ในที่นี้จะขอยกตัวอย่าง การทดสอบโดยการเลียนแบบกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเลียนแบบ แบบจำลองของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม จาก Fuzzy demo ในส่วน cart and pole sim
2. สร้าง Simulink block ดังรูป
3. ทำการ Save to workspace ไฟล์ใน FIS Editor ที่ได้ทำการออกแบบฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎไว้แล้ว จากนั้นกำหนดชื่อ fuzzy controller block ใน Simulink block ข้อ 2. ให้ตรงกับชื่อ ไฟล์
4. ทำการรัน (Run) Simulink เพื่อดูผลการทดสอบ และทำการแก้ไขฟังก์ชันความเป็นสมาชิกและกฎ จนได้ผลการทดสอบตามต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คุณความดีขอมอบให้บุคคลผู้ให้ความอนุเคราะห์ ตลอดจนคำแนะนำในด้านต่าง ๆ ต่อผู้จัดทำดังนี้

อาจารย์พรสุข และอาจารย์จงดล อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยให้ความรู้ ให้คำปรึกษา งานโครงการพิเศษนี้สำเร็จขึ้นมาได้

อาจารย์ถาวร ที่ช่วยให้ความรู้เรื่องรถอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทำโครงการ
อาจารย์เกียรติวรรณ อาจารย์สุมิตร อาจารย์เกียรติศักดิ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในการทำโครงการ

พี่อาร์ม ศูนย์วิจัยที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้โปรแกรม MATLAB ที่เกี่ยวข้องกับความรู้ทางฟิสิกส์

พี่เปี้ยว และน้องเบ๊ยก ที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
คัม หมี่ หนึ่ง และ โทน ที่ให้ยืมคอมพิวเตอร์ในการจัดพิมพ์รายงาน

ตลอดจนเพื่อน ๆ ผู้ให้คำแนะนำในการทำงานและช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และที่ขาดเสีย
ไม่ได้คือบุพการีผู้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา

นายพงศธร กนิษฐานนท์

นายมนตรา วงศ์สายเชื้อ

ผู้จัดทำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Li-Xin Wang. **A Course in Fuzzy System and Control**. Prentice-Hall International, Inc. 1997.
- [2] Jun Yan, Michael Ryan, James Power. **Using fuzzy logic Towards intelligent systems**. Prentice- Hall international (UK) Limited. 1994.
- [3] Dimiter Driankov, Hans Hellendoorn and Michiael Reim frank. **An Introduction to Fuzzy Control**. U.S.A. : Springer-Verlag Berlin. 1993.
- [4] Mario E.Magana, Frank Holzapfel. "Fuzzy-Logic Control of an Inverted Pendulum with Vision Feedback." IEEE Transaction on Education, Vol. 41, No. 2 , May 1998.
- [5] Young-Moon Park, Un-chul Moon and Kwang Y. Lee. "A Self-Organizing Fzzy Logic Controller for Dynamic System Using a Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model.", IEEE Transaction on Fuzzy System, Vol. 3, No. 1, Febuary 1995.
- [6] B.S. Zhang and J.M. Edmunds. "Self-organizing Fuzzy Logic Controller." IEE Proceedings-D, Vol. 13, No. 5, September, 1992, pp. 460-464.
- [7] รัชณี สุภักตพานิช. "การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยฟัซซี่ชนิดปรับกฎด้วยตนเอง." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543
- [8] รอดินเวอร์ทเพนคูล์ม. วิชา Pre – Project สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2542.
- [9] กมล เกี้ยวศรีกุล, ถวิดา มณีวรรณ. "ระบบควบคุมฟัซซี่" วิทยานิพนธ์ สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2536