

การแก้ปัญหาการตอบสนองย้อนกลับสำหรับอารมณ์หุ่นยนต์ด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซี  
ร่วมกับสมิทชาร์ท

COPING INVERSE RESPONSE FOR ROBOT EMOTION USING FUZZY LOGIC  
AND SMITH CHART



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยทางเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1791-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การแก้ไขการตอบสนองย้อนกลับสำหรับอารมณ์หุ่นยนต์ด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซี  
ร่วมกับสมิทชาร์ท

COPING INVERSE RESPONSE FOR ROBOT EMOTION USING FUZZY LOGIC  
AND SMITH CHART



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1791-2

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 60948

วันเดือนปี..... 7.0.0.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ไม่ประสงค์อื่น

.....
i.....

**COPING INVERSE RESPONSE FOR ROBOT EMOTION USING FUZZY LOGIC  
AND SMITH CHART**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2005**

**ISBN 974-15-1791-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การแก้ไขการตอบสนองย้อนกลับสำหรับอาร์มน์หุ่นยนต์ ด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซีร่วมกับสมิซซาร์ท
นักศึกษา	นางสาว พิกุลแก้ว ตั้งติสานนท์
รหัสนักศึกษา	46061303
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. ปิติเชต สุรัรักษา
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. ดร. กนก เจนจิระพงศ์เวช

### บทคัดย่อ

แม้ว่าปัญหาทางด้านเครื่องกลและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวิศวกรรมหุ่นยนต์โดยส่วนมากได้รับการแก้ไขเป็นเวลานานับหลายศตวรรษ แต่ปัญหาการสร้างระบบอาร์มน์ซึ่งเป็นปัญหาเชิงซอฟต์แวร์นั้นเพิ่งอยู่ในเฟสเริ่มต้นของการวิจัยและเป็นปัญหาที่เปิดกว้างและต้องการคำตอบสำหรับนักวิจัยทั่วโลก ในงานวิจัยนี้ปัญหาการตอบสนองย้อนกลับที่อาจเกิดขึ้นจากการที่ระบบมีกลไกหรืออันตรกิริยาการตอบสนองไปในทิศทางตรงข้ามก่อนย้อนกลับไปในทิศทางที่ต้องการให้เป็น ด้วยกระบวนการดังกล่าวอาจทำให้เกิดการเสียหายจากเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์อันเกิดจากรามน์ที่แปรปรวนในทิศทางตรงข้ามตอนต้น งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีตรรกศาสตร์ฟัซซีร่วมกับการใช้สมิซซาร์ทในการออกแบบและวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

<b>Thesis Title</b>	Coping Inverse Response for Robot Emotion using Fuzzy Logic and Smith Chart
<b>Student</b>	Miss Pikulkaew Tangtisanon
<b>Student ID.</b>	46061303
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Information Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa
<b>Thesis Coadvisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Kanok Jenjirapongvej

### ABSTRACT

Although many mechanic and electronic problems in robotics have been solved for many decades, but problems associated with implementation of robot emotion in software forms are still in the beginning phase. The realization and implementation attract attention from researchers around the world. In this research, inverse response problem is realized. The rationale is lie on the fact that opposite direction of the inverse response phenomenon of robot emotion can reach to an unwanted behavior. This research proposes a solution for coping this challenge by using fuzzy logic and Smith chart for designing and analyzing the system.

## II

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ผู้ควบคุม วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ดอกเตอร์ปิติเชต ผู้รักษาและอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วมรอง ศาสตราจารย์ดอกเตอร์กนก เงินจระพงศ์เวช ผู้เขียนต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำแนะนำ คำสั่งสอนและข้อชี้แนะในส่วนที่บกพร่องทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์แบบมากขึ้น

ขอขอบพระคุณ บิดาและมารดา ที่ช่วยเหลืออำนวยความสะดวกและคอยให้กำลังใจแก่ผู้เขียน ตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนสำหรับข้อมูล คำแนะนำดี ๆ และกำลังใจอย่างมากมายที่มีให้แก่ผู้ เขียน โดยตลอด

พิบูลแก้ว ตั้งศิษานนท์



### III

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1    ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2    เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ.....	1
1.3    มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร.....	1
1.4    การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	2
1.5    ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6    ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1    งานวิจัยด้านอารมณ์หุ่นยนต์.....	3
2.2    งานวิจัยด้านฟuzzyลอจิกเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์.....	4
2.2.1    ประวัติการนำทฤษฎีฟuzzyลอจิกมาใช้ในการแก้ปัญหาในระบบควบคุม หุ่นยนต์.....	4
2.2.2    ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟuzzy.....	4
2.2.2.1    ทฤษฎีฟuzzyเซต.....	5
2.2.2.2    ปฏิบัติการพื้นฐานสำหรับฟuzzyเซต.....	6
2.2.2.3    ความสัมพันธ์ฟuzzy.....	6
2.2.2.4    ตัวแปรเชิงภาษา.....	7
2.2.2.5    ตรรกศาสตร์ฟuzzy.....	7
2.2.2.6    ฟuzzyพีเคชัน.....	8

## IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2.7 กฎการควบคุมพีชชี.....	8
2.2.2.8 คีพีชชีพีเคชัน.....	8
2.3 งานวิจัยด้านการนำสมิธชาร์ทมาช่วยแก้ปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์.....	9
2.3.1 การนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมการสื่อสาร.....	9
2.3.1.1 การใช้เรเดียลลิสเทลพารามิเตอร์ในสมิธชาร์ท.....	10
2.3.1.2 ตัวอย่างการนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมการสื่อสาร.....	10
2.3.2 การนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมระบบควบคุม.....	11
2.3.2.1 การหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกับค่า $z$ ..	11
2.3.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด.....	12
2.3.2.3 ความสัมพันธ์ของอัตราขยาย.....	16
2.3.2.4 ผลตอบสนองชั่วขณะ.....	17
2.3.2.5 การหาเสถียรภาพในระบบเปิด.....	19
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 แบบจำลองอารมณ์ย้อนกลับ.....	22
3.1.1 ทฤษฎีการเกิดการตอบสนองย้อนกลับ.....	22
3.1.2 ปัญหาการเกิดการตอบสนองย้อนกลับในหุ่นยนต์.....	22
3.2 การควบคุมด้วยตรรกศาสตร์พีชชีพีไอ.....	23
3.2.1 พีชชีพีเคชัน.....	25
3.2.1.1 การออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต.....	25
3.2.1.2 การออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุต.....	26
3.2.2 กฎการควบคุมพีชชี.....	26
3.2.3 คีพีชชีพีเคชัน.....	27
3.2.4 ระบบการควบคุมพีชชีพีไอแบบปิดมีกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	29
3.3 การใช้สมิธชาร์ทสำหรับช่วยออกแบบการควบคุม.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 โปรแกรมช่วยในการจำลองผล.....	32
บทที่ 4 ผลการจำลอง.....	35
4.1 เงื่อนไขและพารามิเตอร์.....	35
4.2 ผลการจำลอง.....	37
4.2.1 กรณีไม่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง.....	37
4.2.2 กรณีที่มีความผิดพลาดของแบบจำลอง.....	38
บทที่ 5 สรุปผล.....	40
บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก. โปรแกรมภาษาวิซวลเบสิก.....	44
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	64
ประวัติผู้เขียน.....	70

## VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าของ $z$ ที่ถูกแทนค่าด้วย $\omega$ ซึ่งนำมาใช้หาเสถียรภาพในระบบปิด.....	15
2.2 ค่าของ $z$ ที่ถูกแทนค่าด้วย $\omega$ ซึ่งนำมาใช้หาเสถียรภาพในระบบเปิด.....	20
3.1 ข้อแตกต่างของระบบพีซีพีไอกับระบบดิจิทัลพีซีซีธรรมดา.....	23
3.2 กฎการควบคุมพีซีซี.....	27



# สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมพีชชี.....	5
2.2 ตัวอย่างเซตพีชชี.....	5
2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมและแบบเกาส์.....	6
2.4 ยูเนียน อินเตอร์เซกชัน และส่วนเติมเต็มของเซตพีชชี.....	7
2.5 ตัวอย่างการนำสมิธชาร์ตมาใช้ในวิศวกรรมสื่อสาร.....	11
2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด.....	12
2.7 ค่า $z$ ที่ถูกแทนค่าด้วย $j\omega$ เพื่อนำมาหาขนาดของ $z$ ในระบบปิด.....	16
2.8 ลักษณะของ Transient response ของระบบที่มีสมการอันดับสอง.....	18
2.9 ค่า $z$ ที่ถูกแทนค่าด้วย $\omega$ เพื่อนำมาหาขนาดของ $z$ ในระบบปิด.....	21
3.1 การควบคุมแบบพีชชีพีโอ.....	24
3.2 ความเป็นสมาริกันอินพุต.....	25
3.3 ความเป็นสมาริกันเอาต์พุต.....	26
3.4 ความเป็นสมาริกันเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีเมื่อใช้วิธีพีชชีซึ่งเกิดต้น.....	26
3.5 ระบบผลตอบสนองขั้นบันไดสำหรับกฎแบบข้อเท็จจริง.....	26
3.6 ระบบการตอบสนองบนระนาบเฟส.....	27
3.7 อินพุตสเปซของตัวควบคุมพีชชี.....	28
3.8 ระบบการควบคุมพีชชีพีโอแบบปิดมีกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1.....	29
3.9 ระบบการควบคุมพีชชีพีโอแบบปิดมีกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2.....	30
3.10 วิธีการใส่ตัวแปรลงในโปรแกรม.....	33
3.11 ผลลัพธ์ของโปรแกรม.....	33
4.1 ขนาดการตอบสนองสูงสุดของระบบ.....	36
4.2 การจำลองผลระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีพีชชีพีโอ.....	37
4.3 ผลการตอบสนองในระบบปกติ.....	37
4.4 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่มีระบบควบคุม.....	38
4.5 ผลตอบสนองจากการทดลองเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสามแบบ $a$ $b$ และ $c$ .....	39

## VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 อธิบายถึงปัญหาที่กำลังศึกษาและวิจัย

ปัญหาวิจัยในวงการหุ่นยนต์ที่เป็นที่สนใจอยู่ในปัจจุบันคือ ปัญหาทางด้านการเพิ่มความฉลาดให้กับหุ่นยนต์ หนึ่งในปัญหาการเพิ่มความฉลาดให้กับหุ่นยนต์นั้นคือ ปัญหาการสร้างอารมณ์ให้กับหุ่นยนต์ซึ่งเป็นงานวิจัยที่กำลังเป็นที่สนใจของนักวิจัยทั่วโลก

ปัญหาการตอบสนองย้อนกลับหรือย้อนทิศ เป็นปัญหาที่ทำให้อารมณ์ของหุ่นยนต์แปรกลับในทิศตรงข้ามกับที่ควรจะเป็น ซึ่งส่งผลให้ในขณะที่อารมณ์นั้นยังคงอยู่พฤติกรรมของหุ่นยนต์ก็จะเปลี่ยนไปในทิศตรงกันข้าม หากไม่ได้รับการแก้ไขหุ่นยนต์อาจมีพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์อันอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

### 1.2 เพราะเหตุใดปัญหานี้ถึงน่าสนใจ

ดังได้กล่าวในข้างต้นแล้วว่า ปัญหาอารมณ์หุ่นยนต์เป็นปัญหาใหม่ที่น่าสนใจและเป็นปัญหาเปิดกว้างที่ยังคงมีปัญหามากต้องการคำตอบ ปัญหาการตอบสนองย้อนกลับทางอารมณ์จัดเป็นปัญหาที่ท้าทายประการหนึ่งด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้

1. เป็นปัญหาที่ยังไม่มีผู้ใดนำเสนอมาก่อนจากการค้นหาและทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด
2. คำตอบของปัญหาจะช่วยป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากการที่หุ่นยนต์มีอารมณ์แปรปรวน โดยตอบสนองย้อนกลับจากทิศที่ควรจะเป็น
3. ช่วยตอบคำถามที่ว่าเป็นไปได้หรือไม่ที่จะใช้เครื่องมือที่คุ้นเคยในวิศวกรรมสื่อสารคือ สมิทชาร์ท (Smith Chart) [1] มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์วิศวกรรมการควบคุมหุ่นยนต์ [2] จึงจัดเป็นโจทย์ที่ท้าทาย

### 1.3 มีการนำเสนอหลักการใหม่อย่างไร

จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่ายังไม่มีผู้ใดเคยเสนอวิธีการในการนำเอาสมิทชาร์ทซึ่งเป็นเครื่องมือที่คุ้นเคยในการช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในวิศวกรรมสื่อสารมาประสานกับการใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซีในวิศวกรรมระบบควบคุม เพื่อช่วยแก้ปัญหการออกแบบระบบหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้อาจนับได้ว่าเป็นชิ้นแรกที่น่าเสนอหลักการนี้

## 1.4 การเปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

ในอดีตการใช้สมิธชาร์ทมาช่วยแก้ปัญหานั้น จำกัดอยู่ในวงวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร แต่เครื่องมือนี้ผู้วิจัยได้เสนอและแสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิศวกรรมระบบควบคุมได้ โดยจะนำสมิธชาร์ทมาช่วยออกแบบและวิเคราะห์การแก้ไขการตอบสนองย้อนกลับของอารมณ์หุ่นยนต์ ซึ่งจัดเป็นปัญหาใหม่ที่ยังไม่มีผู้ใดนำเสนอมาก่อน

## 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองย้อนกลับหรือย้อนทิศของหุ่นยนต์ และวิธีการแก้ไขปัญหานี้โดยการนำสมิธชาร์ทเข้ามาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ร่วมกับตรรกศาสตร์ฟัซซี อีกทั้งยังจัดทำเครื่องมือให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้ง่าย โดยทำให้ผู้ใช้สามารถอ่านค่าผลลัพธ์ของสมิธชาร์ทได้ง่ายผ่านทางโปรแกรมวิซวลเบสิก (Visual Basic)

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดขั้นตอนของการทำงานโดยสามารถแบ่งเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยทางด้านอารมณ์หุ่นยนต์ การนำตรรกศาสตร์ฟัซซีลงจกมาใช้เพื่อแก้ปัญหาหุ่นยนต์ และหลักการงานของสมิธชาร์ทในด้านของวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร
2. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการตอบสนองย้อนกลับหรือย้อนทิศของหุ่นยนต์
3. ทดลองวิจัยโดยนำทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และวิเคราะห์ถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัย
4. ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสมิธชาร์ทในระบบสื่อสารกับการนำสมิธชาร์ทมาใช้เพื่อช่วยในการหาเสถียรภาพของระบบควบคุม
5. นำสมิธชาร์ทมาใช้แก้ปัญหามาในข้อ 2. ร่วมกับทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี
6. ออกแบบและเขียน โปรแกรมเพื่อเป็นเครื่องมือในการจำลองผล
7. จำลองผลและวิเคราะห์
8. สรุปผลการศึกษาและให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุง

## บทที่ 2

# งานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 งานวิจัยทางด้านอารมณ์หุ่นยนต์

ในยุคปัจจุบันนี้หุ่นยนต์ได้ถูกพัฒนาให้มีความสลับซับซ้อนมากกว่ายุคก่อน ทั้งในส่วน ของฟังก์ชันการใช้งานและรูปแบบโครงสร้าง แต่อย่างไรก็ตามในส่วนของอารมณ์ของหุ่นยนต์นั้น กลับมีพัฒนาการที่ช้ามาก ซึ่งทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถแสดงอารมณ์ได้เหมือนสิ่งมีชีวิตจริงในโลก ในขณะนี้มีนักวิจัยหลายคนได้พยายามทำการคิดค้นและวิจัยในด้านของอารมณ์ของหุ่นยนต์ ดังเช่น

ในปี ค.ศ. 1998 Nakata, Sato, และ Mori [3] ได้เสนอแนะวิธีแบ่งแยกรูปแบบการแสดง อารมณ์ของหุ่นยนต์ไว้เป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ การแสดงอารมณ์ด้านเดียว (One-side expression) การ แสดงอารมณ์โต้ตอบ (Reaction expression) และ การแสดงอารมณ์ซ้ำไปมา (Repeat expression)

ในปี ค.ศ. 2003 Kazuyashi, Takanori, Tomoko, Kayoko, และ Kazuo [4] ได้ทำการวิจัย และสร้างหุ่นยนต์สัตว์เลี้ยงเพื่อทำหน้าที่บำบัดฟื้นฟูจิตใจคนชรา โดยได้สร้างหุ่นยนต์แมว น้ำ จำนวนสามตัวและทำการทดลองเป็นเวลา 4 เดือน โดยได้ผลสรุปว่าการที่หุ่นยนต์แมว น้ำสามารถโต้ตอบได้ เช่น เมื่อมีการลูบ แมว น้ำก็จะแสดงท่าทางที่แสดงความพอใจ เป็นต้น ทำให้สภาพจิตใจ ของคนชราในบ้านพักดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยในการจำลองลักษณะทางอารมณ์ของหุ่นยนต์ แมว น้ำนั้น ได้จากการ ไปสังเกตพฤติกรรมของแมว น้ำจริงในขั้วโลก ส่วนลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ นั้น ประกอบไปด้วย 4 ส่วนหลักคือ เซนเซอร์แสง เซนเซอร์ทิศทางของเสียง เซนเซอร์การทรงตัว และ เซนเซอร์รับสัมผัส และในปีเดียวกัน Miwa และ Okuchi [5] ได้เสนอแนะสมการทางอารมณ์ของ หุ่นยนต์ โดยอ้างอิงจากสมการการเคลื่อนไหวและการแสดงความรู้สึกในด้านของจิตวิทยาการ เปลี่ยนแปลงจากการถูกกระตุ้น และนอกเหนือจากนั้นยังได้ทำการแนะนำทฤษฎีทิศทางในด้าน คณิตศาสตร์ของอารมณ์ของหุ่นยนต์ (Mood vector) และอัลกอริทึมในการตัดสินใจการเปลี่ยน สถานะของอารมณ์ของหุ่นยนต์ในทางจิตวิทยาที่เกิดจากอารมณ์และสิ่งเร้า

ในปี ค.ศ. 2004 Shunsuke และ Yoichiro [6] ได้วิจัยโดยสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ มี ลักษณะคล้ายสัตว์เลี้ยงโดยพัฒนาให้หุ่นยนต์สามารถเรียนรู้พฤติกรรมทางอารมณ์ได้ด้วยวิธี Q-learning ร่วมกับตัวแปรที่ถูกควบคุมโดยการควบคุมแบบ Neuromodulators โดยหุ่นยนต์เคลื่อนที่นี้ สามารถแสดงอารมณ์ได้หลากหลายโดยมีการอ้างอิงกับเวกเตอร์แสดงอารมณ์ 3 แบบด้วยกันคือ อารมณ์ดีใจ อารมณ์โกรธ และอารมณ์เศร้า ซึ่งจะจำลองได้จากวิธีการแบบฟิชซีโดย Maeda [7] เป็น ผู้วิจัยในปี ค.ศ.1999

## 2.2 งานวิจัยด้านฟัซซีลอจิกเพื่อแก้ปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์

### 2.2.1 ประวัติการนำทฤษฎีฟัซซีลอจิกในการแก้ปัญหาในระบบควบคุมหุ่นยนต์

ในปี ค.ศ. 2002 Sooraksa, Pattaradej , และ Chen [8] ได้ทำการวิจัยโดยได้นำหลักการ Fuzzy  $P^2ID$  มาใช้ในการควบคุมที่จับสำหรับเลี้ยวคันบังคับของหุ่นยนต์จักรยาน

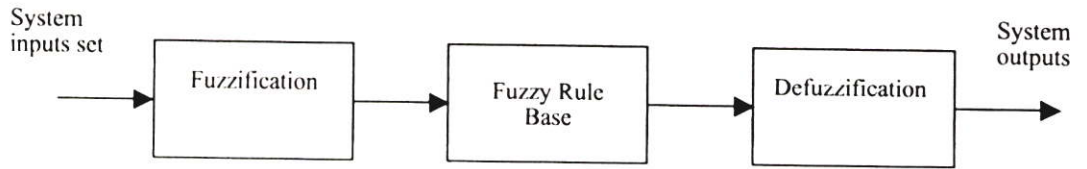
ในปี ค.ศ. 2004 Tanabe และ Maeda [9] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับวิธีการประเมินผลทางด้านพฤติกรรมทางอารมณ์ของหุ่นยนต์ประเภทสัตว์เลี้ยงโดยใช้หุ่นยนต์ AIBO ที่ผลิตโดยบริษัท โซนี่ ในตอนแรกได้ประเมินผลในส่วนของตัวหุ่นยนต์โดยอ้างอิงจากทฤษฎีของ Laban จากนั้นจึงได้นำ ตรรกศาสตร์ฟัซซีลอจิกมาช่วยคำนวณหาความสัมพันธ์ของอารมณ์ของหุ่นยนต์กับองศาทางคณิตศาสตร์โดยให้ฟังก์ชันของสมาชิกแสดงถึง a. อัตราความเร็ว b. พื้นที่ c. ตำแหน่ง d. อารมณ์พึงพอใจหรือไม่พึงพอใจ e. สถานะตื่นหรือหลับ และกฎของฟัซซีถูกออกแบบโดยกฎข้อแรก ค่า d. จะแปรผันไปตามค่า b. และ c. ส่วนกฎข้อที่สอง ค่า c. จะแปรผันไปตาม a. และ b. และนำค่าที่ได้มาเข้าสู่วิธีการประเมินผลค่าตัวเลขของอารมณ์โดยทฤษฎีแบบจำลองของ Russell

### 2.2.2 ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี

เดิมระบบจะถูกวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ หากแต่การวิเคราะห์ระบบด้วยวิธีนี้ไม่เหมาะสมกับระบบเชิงภาษาที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ที่มีลักษณะไม่ชัดเจน Zadeh [10] จึงคิดค้นเรื่องการนำตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบแบบ ส่วนในระบบควบคุม Mamdani [11] เป็นคนแรกที่ประยุกต์ใช้ตรรกศาสตร์ฟัซซีกับระบบควบคุม โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้กับระบบที่คลุมเครือและไม่สามารถรู้ค่าตัวแปรบางชนิดได้ เช่น ระบบที่ไม่สามารถหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอนได้ โดยในปัจจุบันทฤษฎีนี้ได้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อันเนื่องมาจากทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซีสามารถนำไปใช้ควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี อีกทั้งยังมีการนำตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซีมาทำในรูปแบบของวงจรรวม (Integrated Circuit) ทำให้การนำไปใช้งานทำได้สะดวก

ทฤษฎีพื้นฐานของฟัซซี [12] จะมีกฎฟัซซี (Fuzzy rule) เป็นตัวตัดสินใจกลไกการทำงานของระบบควบคุมให้มีการปรับเปลี่ยนไปตามผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบ โดยจุดประสงค์ที่คิดค้นวิธีการควบคุมระบบแบบฟัซซี ก็คือการนำส่วนของกฎการควบคุมฟัซซี (Fuzzy rule-base) เข้าไปแทนที่การควบคุมแบบเก่า ซึ่งถูกควบคุมโดยมนุษย์ที่มีความชำนาญในระบบนั้น ๆ (Skilled human operator)

โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซีประกอบด้วยส่วนของ ฟัซซีฟิเคชัน กฎการควบคุมฟัซซี และดีฟัซซีฟิเคชัน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมฟัซซี

### 2.2.2.1 ทฤษฎีฟัซซีเซต (fuzzy set theory)

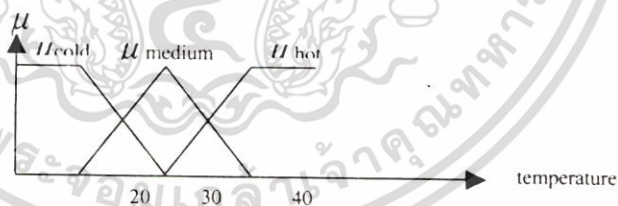
ข้อแตกต่างของทฤษฎีฟัซซีเซตกับทฤษฎีเซตแบบดั้งเดิมคือ ทฤษฎีฟัซซีเซตมีความสามารถในการแสดงค่าความเป็นสมาชิกบางส่วน (partial membership) ได้ โดยเรียกว่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิก (membership function) หากให้  $U$  เป็นกลุ่มของวัตถุที่พิจารณา และให้  $A$  เป็นเซตของฟัซซี จะสามารถแสดงค่าความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซี  $A$  ในกลุ่มวัตถุที่กำลังพิจารณาโดยแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu(A)$

ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตออกเป็น 3 ช่วงคือ

- เป็นสมาชิกของฟัซซีเซตอย่างชัดเจนแทนด้วย 1
- เป็นสมาชิกของฟัซซีเซตอย่างไม่แน่ชัดแทนด้วย 0-1
- ไม่เป็นสมาชิกของฟัซซีเซตอย่างชัดเจนแทนด้วย 0

โดยฟัซซีเซตที่มีสมาชิกเพียงตัวเดียวและมีค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเท่ากับ 1 จะถูกเรียกว่าฟัซซีซิงเกิลตัน (fuzzy singleton)

ตัวอย่าง กำหนดเซตฟัซซีที่ให้อีกว่า "cold", "medium" และ "hot" โดย  $U = [0, \text{tem}_{\max}]$



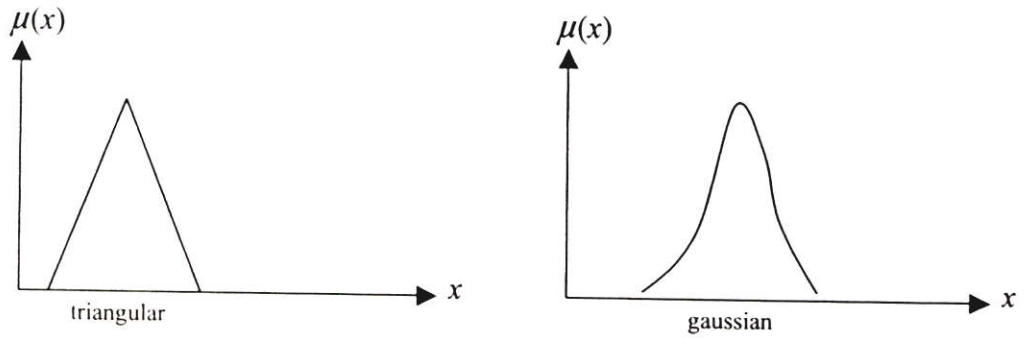
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างเซตฟัซซี

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า โดยทั่วไปมีวิธีการกำหนดลักษณะของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้กันคือ การใช้ความเข้าใจของผู้ออกแบบเกี่ยวกับความหมายของเซตฟัซซีที่สนใจ ตัวอย่างเช่นผู้ออกแบบระบบทำความร้อน ควรมีความเข้าใจว่าอุณหภูมิ "ร้อนจัด" "ร้อนปานกลาง" หรือ "ร้อนน้อย" นั้นหมายถึงอุณหภูมิในช่วงไหน จึงจะสามารถกำหนดตำแหน่งและรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตฟัซซี ที่ใช้แทนอุณหภูมิเหล่านั้นให้เหมาะสมกับงานได้โดยรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่นิยมใช้กันมี 2 แบบคือ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยม

(triangular membership function) และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบเกาส์ (gaussian membership function) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญขาดเห็นาไปเซบระเยชชนต่านการรค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมและแบบเกาส์

### 2.2.2.2 ปฏิบัติการพื้นฐานสำหรับฟัซซีเซต (basic operation for fuzzy set)

กำหนดให้  $X$  และ  $Y$  เป็นเซตฟัซซีใน  $A$  ซึ่งสามารถนิยามการดำเนินการบนเซตฟัซซี  $X$  และ  $Y$  ได้ โดยสามารถนำวิธีการดำเนินการแบบเดียวกับเซตแบบดั้งเดิมมาประยุกต์ใช้ได้ดังรูป 2.4 ดังเช่น

- ยูเนียน

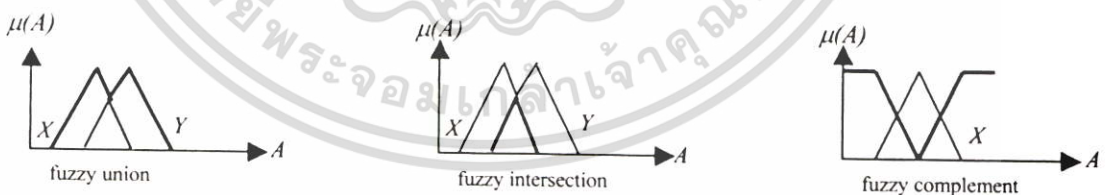
$$\mu_{X \cup Y}(A) = \max[\mu_X(A), \mu_Y(A)] \quad (2.1)$$

- อินเตอร์เซกชัน

$$\mu_{X \cap Y}(A) = \min[\mu_X(A), \mu_Y(A)] \quad (2.2)$$

- ส่วนเติมเต็ม

$$\mu_{\bar{X}}(A) = 1 - \mu_X(A) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.4 ยูเนียน อินเตอร์เซกชัน และส่วนเติมเต็มของเซตฟัซซี

### 2.2.2.3 ความสัมพันธ์ฟัซซี (fuzzy relation)

ความสัมพันธ์ฟัซซี คือการแสดงความเกี่ยวเนื่องในการเชื่อมต่อระหว่างกันของสมาชิกในกลุ่มต่าง ๆ โดยจะแบ่งเป็น 3 ระดับเหมือนความสัมพันธ์ของเซต โดยมีทฤษฎีฟัซซีคอมโพสิชันไว้ช่วยหาความสัมพันธ์ฟัซซีจากความสัมพันธ์ที่ถ่ายทอดต่อเนื่องกัน เช่น หากให้  $A, B, C$  เป็นกลุ่มฟัซซีเซตในเอกภพสัมพัทธ์  $X, Y, Z$  ตามลำดับ และ  $F$  คือค่าความสัมพันธ์ของฟัซซี

ถ้าให้ความสัมพันธ์จากฟัซซีเซต  $A$  ไปฟัซซีเซต  $B$  เป็น  $F(A, B)$  และ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร โดยไม่หวังผลกำไร และขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้ความสัมพันธ์จากฟัซซีเซต B ไปฟัซซีเซต C เป็น  $F(B,C)$  จากสองความสัมพันธ์นี้จะทำให้สามารถหาความสัมพันธ์  $F(A,C)$  ได้โดยใช้ทฤษฎีฟัซซีคอมโพสิชันเช่น แมกซ์ มิน คอมโพสิชัน (Max-Min Composition) แมกซ์ โพรดักท์ คอมโพสิชัน (Max-Product Composition)

#### 2.2.2.4 ตัวแปรเชิงภาษา (linguistic variable)

ตัวแปรเชิงภาษา คือตัวแปรที่ใช้แทนคำพูดหรือประโยค ตัวอย่างเช่น ตัวแปรเชิงภาษา อุณหภูมิ สามารถมีค่า หนาว ปานกลาง หรือ ร้อน เป็นต้น โดยตัวแปรเชิงภาษาสามารถมีค่าเป็นจำนวนตัวเลขได้ด้วย เช่น “อุณหภูมิ” มีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

มีการนิยามตัวแปรภาษาไว้ด้วยฟังก์ชัน 5 เทอมคือ  $(U, a, H(a), L, C)$  โดยที่

$a$  คือ ชื่อของตัวแปรเชิงภาษา เช่น ฟัซซีเซตของอุณหภูมิ

$H(a)$  คือ เทอมเซตของตัวแปรเชิงภาษา เช่น เทอมเซตของอุณหภูมิ

$L$  คือ การกำหนดระดับต่างๆ ให้กับฟัซซีเซตนั้นๆ เป็นภาษา เช่น ชื่อของฟัซซีเซต อุณหภูมิแบ่งเป็น หนาว ปานกลาง ร้อน

$C$  คือ การกำหนดข้อตกลงในระดับต่างๆ

ตัวอย่าง ถ้าหนดให้เอกภพสมพัทธ์มีค่าเป็น  $[0, 100]$  ค่าตัวแปรเชิงภาษาคือ temperature จะได้

$$T(\text{temperature}) = \{\text{cold, medium, hot, ...}\}$$

$$G = \{\text{cold, medium, hot, ...}\}$$

$M(\text{cold}) =$  ฟัซซีเซตสำหรับ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

$M(\text{medium}) =$  ฟัซซีเซตสำหรับ อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส

$M(\text{hot}) =$  ฟัซซีเซตสำหรับ อุณหภูมิที่สูงกว่า 40 องศาเซลเซียส

เทอมดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

#### 2.2.2.5 ตรรกศาสตร์ฟัซซี (Fuzzy Logic)

ในตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมนั้นค่าความจริงแสดงได้ด้วย “จริง” หรือ “ไม่จริง” แต่ทฤษฎีฟัซซีลอจิกได้นำทฤษฎีตรรกศาสตร์เดิมมาเพิ่มเติมในส่วนที่มีค่าไม่ชัดเจนเช่น จริงและไม่จริงผสมกัน โดยมีปฏิบัติการพื้นฐานคือ AND, OR และ NOT

ประพจน์ในตรรกศาสตร์ฟัซซีแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

- ประพจน์ฟัซซีเดี่ยว (Atomic fuzzy proposition)

มีรูปแบบ คือ

$$a \quad \text{is} \quad b$$

โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $a =$  ตัวแปรทางภาษา  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

is = คุณสมบัติของการเป็น

b = ค่าที่ต้องการจำกัดให้ตัวแปรทางภาษา

● ประพจน์ฟัซซีผสม (Compound fuzzy proposition) คือ ประพจน์ที่มีการเชื่อมประพจน์ฟัซซีเดี่ยวตั้งแต่ 2 ประพจน์ขึ้นไปด้วยตัวเชื่อมต่าง ๆ เช่น ประพจน์ฟัซซีเดี่ยวที่เชื่อมกันด้วย “AND” ใช้ตัวปฏิบัติการ ฟัซซีอินเตอร์เซกชัน ดังเช่น

$$A \text{ is } X \text{ AND } B \text{ is } Y$$

$$\mu_{X \cap Y}(a, b) = \min [\mu_X(a), \mu_Y(b)] \quad (2.4)$$

#### 2.2.2.6 ฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

ฟัซซีฟิเคชัน คือ การเปลี่ยนปริมาณที่เป็นค่าตัวเลขของอินพุตฟัซซีให้เป็นปริมาณที่แทนได้ด้วยเซตฟัซซี หรือแปลงเป็นค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของฟัซซีเซตที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เช่น ถ้ามีอุณหภูมิเข้ามาเป็น 20 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความเป็นสมาชิกของฟังก์ชัน cold เป็น 1 เป็นต้น

#### 2.2.2.7 กฎการควบคุมฟัซซี (Fuzzy rule base)

กฎของฟัซซี (fuzzy rule) คือ กฎการควบคุมแบบมีเงื่อนไข โดยใช้หาความสัมพันธ์ที่มาจากความสัมพันธ์ของอินพุตทุกกับฟังก์ชันของฟัซซี ซึ่งได้มาจากผู้มีประสบการณ์ในระบบนั้น ๆ เป็นผู้ออกแบบไว้ให้อยู่ในเงื่อนไขของ IF...THEN... มีวิธีเขียนได้ 2 แบบ คือ กฎแมมดานิฟัซซี (Mamdani Fuzzy) ซึ่งจะแสดงเอาต์พุตของกฎฟัซซีเป็นตัวแปรเชิงภาษา และ ทากาจิ ซูเกโนฟัซซี (Takagi-Sugeno) ซึ่งจะแสดงเอาต์พุตของกฎฟัซซีเป็นฟังก์ชันของตัวแปรอินพุต ซึ่งทั้งสองกฎนี้มีวิธีวินิจฉัยหาเอาต์พุตของกฎฟัซซีในแต่ละกฎจากค่าการเป็นสมาชิกของข้อมูลอินพุต (fuzzy inference) แตกต่างกัน โดยการทำให้ฟัซซีอินเฟอเรนซ์ เช่น ในกฎแมมดานิฟัซซี จะมีวิธีที่นิยมใช้ทำการวินิจฉัยอยู่ด้วยกันหลายวิธีหากแต่เมื่อแทนเอาต์พุตของกฎฟัซซีด้วยฟัซซีซิงเกิลตันแล้วจะได้ผลลัพธ์ของการอินเฟอเรนซ์เหมือนกัน

#### 2.2.2.8 ดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

ดีฟัซซีฟิเคชัน คือการนำค่าที่ได้จากการทำการวินิจฉัยมาแปลงเป็นค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีเพื่อจะได้นำไปใช้งานต่อได้ เช่น นำไปใช้เป็นแรงดันไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์

วิธีการดีฟัซซีฟิเคชันนั้นมีหลายวิธีดังเช่น วิธีเงินเนอรอลไลซ์ดีฟัซซีฟายเออร์ กำหนดให้  $y$  คือเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี  $n$  คือจำนวนกฎฟัซซี  $\mu_i$  คือค่าการเป็นสมาชิกของแต่ละกฎ  $i$  คือ 1, 2, 3, ...,  $n$  และ  $\alpha$  คือพารามิเตอร์ในการออกแบบ โดยที่  $z_i$  คือเอาต์พุตฟัซซีของแต่ละกฎ (กฎแมมดานิ กับ กฎทากาจิ ซูเกโน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^\alpha z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i^\alpha} \quad (2.5)$$

หากเปลี่ยนค่า  $\alpha = 1$  จะเรียกวิธีนี้ว่าเป็นการดีฟัซซิฟิเคชันแบบเซ็นทรอยด์ดีฟัซซิฟายเออร์ (Centroid defuzzifier) เป็นการคำนวณโดยใช้วิธีหาค่าเอาต์พุตจากจุดกึ่งกลางการถ่วงน้ำหนักของเอาต์พุตฟัซซีที่คำนวณได้โดยกฎการควบคุมฟัซซี ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ดีและง่ายต่อการใช้งานที่สุด

หากเปลี่ยนค่า  $\alpha = \infty$  จะเรียกวิธีนี้ว่าเป็นการดีฟัซซิฟิเคชันแบบมีนออฟแมกซิมัมดีฟัซซิฟายเออร์ (Mean of maximum defuzzifier) เป็นการคำนวณโดยใช้วิธีการหาค่าเฉลี่ยของเอาต์พุตฟัซซีที่มีค่าการเป็นสมาชิกสูงสุด ข้อดีคือคำนวณง่าย ใช้เวลาน้อยแต่ระบบจะไม่ค่อยมีความถูกต้อง

## 2.3 งานวิจัยด้านการนำสมิธชาร์ทมาช่วยแก้ปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์

### 2.3.1 การนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมสื่อสาร

อีกวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาทางระบบสื่อสาร [13] คือการนำชาร์ทที่มีชื่อเรียกว่า โพลาร์ อิมพีแดนซ์ชาร์ท หรือในชื่อที่รู้จักกันคือว่า สมิธชาร์ท ที่ถูกคิดค้นขึ้นโดย Smith [14] โดยชาร์ทนี้ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายนำสัญญาณ โดยค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงมากกับวิธีหาจากสูตรคำนวณ ในการใช้งานจะเป็นลักษณะวาดค่าที่ทราบบางค่าลงในสมิธชาร์ท แล้วจึงสามารถทราบค่าพารามิเตอร์อื่นที่ต้องการทราบได้โดยไม่ต้องใช้สูตรในการคำนวณ ซึ่งวิธีการนี้ทำให้ประหยัดเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์อื่นมาก อีกทั้งยังสามารถใช้สมิธชาร์ทนี้กับสายนำสัญญาณได้ทุกแบบ และทุกความถี่ใช้งาน โดยมีข้อจำกัดตรงที่ว่าสายนำสัญญาณนั้นจะต้องทราบค่าคาเรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณนั้น ๆ แล้วเท่านั้น โดยค่าสัมประสิทธิ์เบื้องต้นของระบบวิศวกรรมสื่อสารคือ

#### 1. ความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับ (Return Power Loss)

ความสูญเสียที่เกิดจากกำลังงานย้อนกลับคือ ความสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เราได้ส่งออกไปจากด้านส่งไปยังด้านรับโดยที่ทางด้านรับมีการต่อโหลดได้ไม่เหมาะสมกับทางด้านส่งดังนั้นกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากด้านส่งบางส่วนก็จะเดินทางจากทางด้านรับย้อนกลับคืนมายังด้านส่งจึงเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น

#### 2. ความสูญเสียกำลังงานจากการต่อค่าโหลดที่ไม่เหมาะสมกับสายนำสัญญาณ (Mismatch Power Loss)

ความสูญเสียกำลังงานจากการต่อค่าโหลดที่ไม่เหมาะสมกับสายนำสัญญาณคือ ค่าอัตราส่วนของกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งไปทั้งหมดต่อค่าของกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งไปได้ โดยไม่ได้ย้อนกลับมาเนื่องจากการต่อค่าโหลดที่ไม่เหมาะสมกับสายนำสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรละเมิดลิขสิทธิ์ของเอกสารนี้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดัน (Voltage Reflection Coefficient)

จากการต่อค่าโหลดที่ไม่เหมาะสมกับสายนำสัญญาณ ทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังงาน ได้ 2 ลักษณะใหญ่ ๆ กล่าวคือ กำลังงานที่สูญเสียที่โหลด และ กำลังงานที่สูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการสูญเสียกำลังงานในลักษณะหลังนี้จะสูญเสียมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของแรงดันนั่นเอง โดยค่าสัมประสิทธิ์นี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของแรงดันที่สะท้อนกลับต่อแรงดันตกกระทบ หรือ ผลต่างของค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดกับค่าคาแรกเตอร์สตติกอิมพีแดนซ์และผลรวมของค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดกับค่าคาแรกเตอร์สตติกอิมพีแดนซ์

$$\Gamma = \frac{\text{reflection Voltage}}{\text{incident Voltage}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.6)$$

#### 2.3.1.1 การใช้เรเดียลลิสเกลพารามิเตอร์ในสมิธชาร์ท

เรเดียลลิสเกลพารามิเตอร์ (Radially Scaled parameter) คือแถบสเกล 2 แถบที่อยู่ข้างใต้วงกลมสมิธชาร์ท วิธีใช้งานคือ หากทราบค่าพารามิเตอร์ชนิดหนึ่งแล้วจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ชนิดอื่นๆ ได้ เช่น หากทราบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio) ก็จะสามารถนำไปหาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio) จากการค่าของแถบสเกลนี้ได้โดยตรงในหน่วยเดซิเบล

#### 2.3.1.2 ตัวอย่างการนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมสื่อสาร

สายนำสัญญาณ 50  $\Omega$  เทอร์มินัลปลายด้วยโหลด  $Z_L = 100 + j75$  ถ้าต้องการแมทช์โหลดเข้ากับสายนำสัญญาณ โดยใช้สลับต่อขนาน จงหาค่าตำแหน่งที่จะต่อสลับนี้และความยาวของสลับที่ใช้ด้วย เมื่อใช้งานที่ความถี่ 2 GHz

1. นอร์มอลไลซ์  $\frac{Z_L}{Z_0} = 2 + j1.5$

2. เมื่อนำค่าที่ได้จากข้อ 1. มาเขียนลงในสมิธชาร์ทจะสามารถอ่านค่าความยาวคลื่นได้  $0.2\lambda$

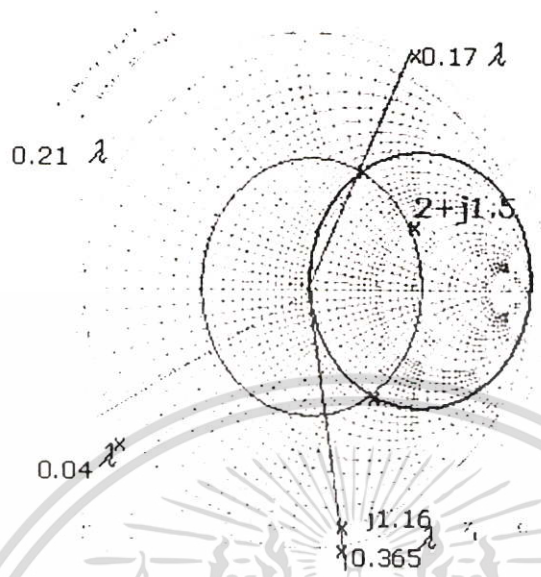
3.  $\lambda = 30/2 = 15$  เซนติเมตร ระยะห่างความยาวคลื่นจากโหลดถึงสลับมีค่า  $0.2\lambda$  เพราะฉะนั้นตำแหน่งที่จะต่อสลับแบบขนานจะมีค่าเท่ากับ  $0.2(15) = 3$  เซนติเมตร

4. ค่าแอดมิตแดนซ์ของโหลดมีค่า  $\frac{Y_L}{Y_0} = 1.0 + j1.16$  การแมทช์จึงจะต้องทำให้ค่า  $Y_L = Y_0$  หรือ  $\frac{Y_L}{Y_0} = 1$  ดังนั้นสลับที่จะนำมาต่อขนานที่ตำแหน่งระยะห่าง 3 เซนติเมตร จากโหลดต้องมี

อินพุทแอดมิตแดนซ์เป็น  $-j1.16$  เทียบเป็นค่าความยาวคลื่นที่นอร์มอลไลซ์แล้วเท่ากับ  $0.365\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ฉะนั้นความยาวของซอร์ตสลับจะเท่ากับ 5.475 เซนติเมตร  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการนำสมิธชาร์ทมาใช้ในวิศวกรรมสื่อสาร

### 2.3.2 การนำสมิธชาร์ทมาประยุกต์ใช้ในระบบควบคุม

การนำสมิธชาร์ทมาเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบทำให้การวิเคราะห์ระบบง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถอ่านค่าตัวแปร พารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ ได้จากกราฟสมิธชาร์ทได้โดยตรงจึงไม่ต้องแก้สมการที่มีความยุ่งยากสูง

#### 2.3.2.1 การหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับกับค่า $z$

การแปลงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับในสมิธชาร์ทกับค่า  $z$  จะให้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9 และ 2.15

$$\Gamma = \frac{z-1}{z+1} \quad (2.7)$$

$$\Gamma = u + jv \quad (2.8)$$

$$z = r + jx \quad (2.9)$$

$$(2.7) = (2.8)$$

$$u + jv = \frac{z-1}{z+1} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\stackrel{(2.9)}{=} \frac{r+jx-1}{r+jx+1} \tag{2.11}$$

$$= \frac{(r-1)+jx}{(r+1)+jx} \times \left[ \frac{(r+1)-jx}{(r+1)-jx} \right] \tag{2.12}$$

$$= \frac{(r^2-1)+x^2+jx(r+1-r-1)}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.13}$$

$$= \frac{r^2+x^2-1+2jx}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.14}$$

$$= \frac{r^2+x^2-1}{(r+1)^2+x^2} + j \frac{2x}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.15}$$

$$u = \frac{r^2+x^2-1}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.16}$$

$$v = \frac{2x}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.17}$$

ดังนั้น

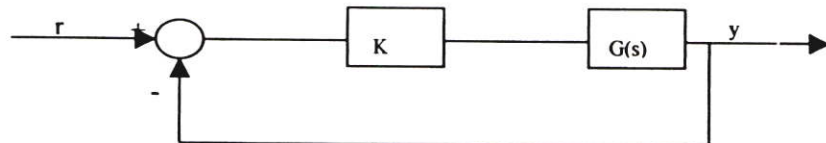
$$\Gamma = \frac{r^2+x^2-1}{(r+1)^2+x^2} + j \frac{2x}{(r+1)^2+x^2} \tag{2.18}$$

จะเห็นได้จากสมการที่ (2.18) ว่าหากนำสมการดังกล่าวมาจัดรูปของสมการใหม่ก็จะได้ สมการของ วงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่จุด  $u = 1, v = \frac{1}{x}$  และมีรัศมี  $\frac{1}{x}$

### 2.3.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด (Close-loop transfer function)

ในระบบควบคุมจะมีสมการฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด [15] คือ

$$T(s) = \frac{KG(s)}{1 + KG(s)} \tag{2.19}$$



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้ค่า s แทนด้วย  $j\omega$

$$T(j\omega) = \frac{KG(j\omega)}{1 + KG(j\omega)} \tag{2.20}$$

$$= \frac{KG(j\omega) + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}}{KG(j\omega) + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}} \tag{2.21}$$

$$T(j\omega) = \frac{[2KG(j\omega) + 1] - 1}{[2KG(j\omega) + 1] + 1} \tag{2.22}$$

$$\Gamma = T(j\omega) \tag{2.23}$$

$$|T| = \Gamma \tag{2.24}$$

$$z = 2KG(j\omega) + 1 \tag{2.25}$$

$1 \leq \omega < \infty$

จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับจาก s-domain ได้กลายเป็นขนาดของผลตอบสนองของระบบปิด สำหรับค่าความถี่ต่างๆและมุมของผลตอบสนองทางความถี่ของระบบปิดก็สามารถอ่านได้โดยตรงในหน่วยของศาหรือเรเดียนจากสเกลที่อยู่ตรงขอบของกราฟสมิทชาร์ท

ในกรณีที่ค่า  $|T(j\omega)| > 1$   
ทำการกลับค่า  $T(j\omega)$

$$\frac{1}{T(j\omega)} = \frac{[2KG(j\omega) + 1] + 1}{[2KG(j\omega) + 1] - 1} = \frac{1}{\Gamma} = \frac{z + 1}{z - 1} \tag{2.26}$$

เมื่อ

$$G'(j\omega) \cong -G(j\omega)$$

$$\frac{1}{T(j\omega)} = \frac{[-2KG'(j\omega) + 1] + 1}{[-2KG'(j\omega) + 1] - 1} \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นได้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{[2KG'(j\omega) - 1] - 1}{[2KG'(j\omega) - 1] + 1} \tag{2.28}$$

$$z = 2K G'(j\omega) - 1 = z' \quad (2.29)$$

$$z' = 2K G'(j\omega) - 1 \quad (2.30)$$

$$= -2KG'(j\omega) - 1 \quad (2.31)$$

$$= -[2KG(j\omega) + 1] \quad (2.32)$$

$$= -z \quad (2.33)$$

จะเห็นว่าค่าการวาดกราฟแบบข้อนกลับจะได้มาจากค่า  $z$  ที่คิดลบสำหรับทุกค่า  $\omega$  ที่ทำให้  $|T(j\omega)| > 1$

โดยในระบบนี้นั้นจะมีโพลเด่นแบบสังยุคเชิงซ้อน (Dominant complex conjugate poles) ที่มีความหน่วง  $\zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$  จะทำให้ได้ขนาดของ  $|T(j\omega)|$  มีค่าสูงสุด ซึ่งจะแทนด้วยสัญลักษณ์  $M_m$ , ความถี่ก้อง (Resonant frequency) ซึ่งก็คือมุมที่ทำให้  $|T(j\omega)|$  มีขนาดสูงสุดแทนด้วย  $\omega_m$  และมุมที่ทำให้  $|T(j\omega)|$  มีขนาดสูงสุดแทนด้วย  $N_m$  ซึ่งทั้งสามค่านี้สามารถหาได้โดยการเขียนกราฟ  $|T(j\omega)|$  ลงบนสมิธชาร์ทแล้วอ่านค่า  $M_m$  และ  $N_m$  ออกมาก่อนจากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า  $\omega_m$  แต่ถ้าหากค่า  $|T(j\omega)| > 1$  ต้องเขียนกราฟลงบนสมิธชาร์ท โดยแทนด้วย  $\frac{1}{T(j\omega)}$  และค่าขนาดสูงสุดของ  $\frac{1}{T(j\omega)}$  จะเป็น  $\frac{1}{M_m}$  และมุมที่ทำให้ค่า  $\frac{1}{T(j\omega)}$  มีขนาดมากที่สุดจะแทนด้วย  $-N_m$

ตัวอย่าง การนำสมิธชาร์ทมาออกแบบระบบควบคุม

$$KG(s) = \frac{100}{s(s+1)(s+2)}$$

$$z = 2KG(j\omega) + 1 = \frac{\omega^5 + 5\omega^3 - 596\omega + j200(\omega^2 - 2)}{9\omega^3 + \omega(2 - \omega^2)^2}$$

ทำการคำนวณหาค่า  $Z$  ด้วยการเปลี่ยนค่า  $\omega$  ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าของ  $z$  ที่ถูกแทนค่าด้วย  $\omega$  ซึ่งนำมาใช้หาเสถียรภาพในระบบปิด

$\omega$	$z$
0	Nan-Infi
1	-59-20j
2	-14+5j
3	-3.6154+3.5897j
3.5	-1.7866+2.7203j
4	-0.7647+2.0588j
4.7	0.0040+1.4191j
6	0.5946+0.7658j
10	0.9429+0.1866j
100	1+0.0002j

จะเห็นได้ว่าค่าจริงของ  $z$  จะเป็นลบเมื่อค่า  $0 \leq \omega \leq 4.7$  และจะเป็นบวกต่อเมื่อ  $4.7 < \omega < \infty$  เราจึงต้องเขียนกราฟแบบย้อนกลับ ในช่วงที่ค่าจริงมีค่าเป็นลบ และจากรูปเราจะ ได้ขนาดของ  $\frac{1}{T(j\omega)}$  มีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่ารัศมี 0.75

$$\frac{1}{M_m} = 0.75 \text{ ดังนั้น } M_m = 1.5$$

และสามารถสังเกตได้อีกว่าในช่วง  $3 < \omega_m < 4$  ค่าของ  $\omega_m$  จะไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งจะหาค่าได้ยากจึงได้มีการพัฒนาแนวคิดในอีกวิธีหนึ่งขึ้นมาเพื่อหาค่า  $\omega_m$  โดยเราจะใช้ส่วนที่ตัดกันของ  $\frac{1}{T(j\omega)}$  กับ  $\frac{1}{M_m}$  เพื่อสร้างสมการ โพลีโนเมียลจะทำให้หาค่าได้ง่ายขึ้น โดยจากตัวอย่างนี้จุดตัดจะอยู่ที่ 1.8-j2.8 หากนำค่าที่ได้นี้ไปแทนยังสมการการหาค่า  $Z$

$$Z = -z' = -1.8+j2.8 = \frac{\omega^5 + 5\omega^3 - 596\omega + j200(\omega^2 - 2)}{9\omega^3 + \omega(2 - \omega^2)^2}$$

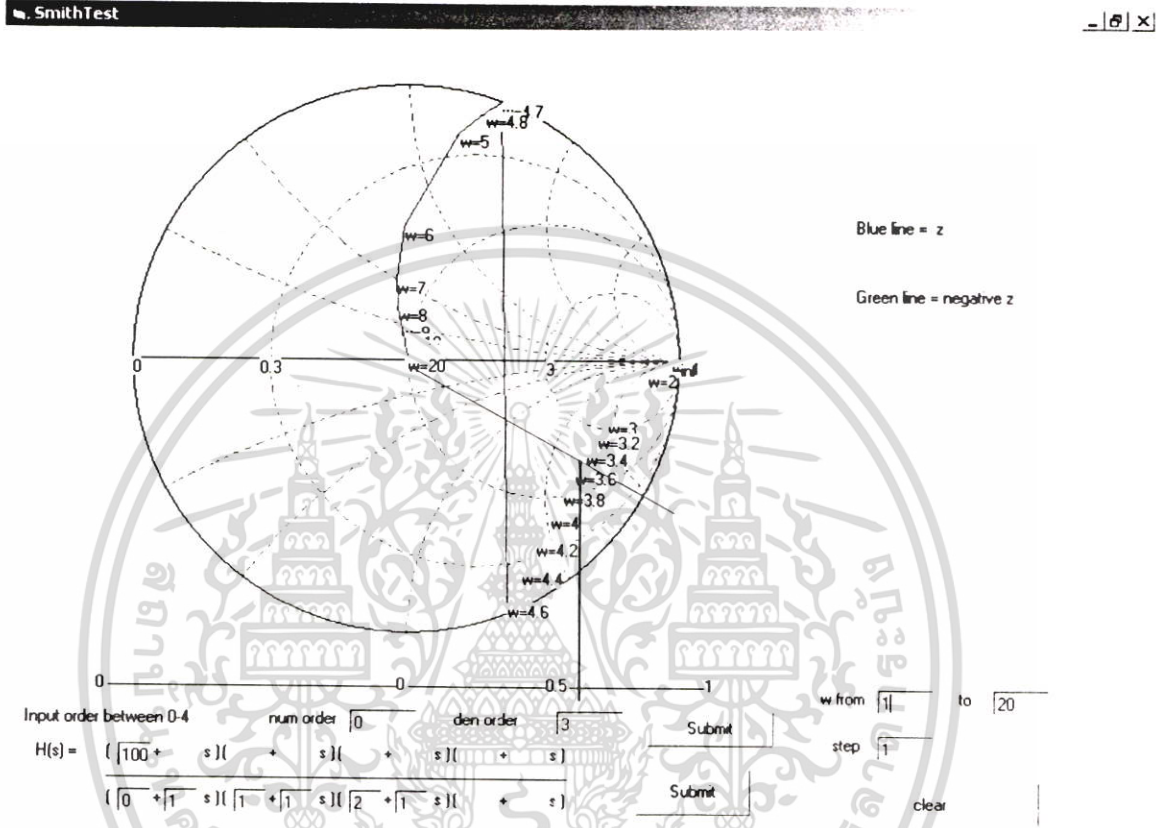
แก้สมการดังกล่าวโดยทำการเลือกสมการอันดับต่ำ

$$\omega^4 + 5\omega^2 - 210.3 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแก้สมการออกมาจะทำให้ได้ค่า  $\omega_m = 3.49$

ค่า  $N_m$  หาได้โดยการลากเส้นตรงจากจุดศูนย์กลางของซาร์ทไปยังจุดตัดของ  $\frac{1}{T(j\omega)}$  กับ  $\frac{1}{M_m}$  และลากเลขไปยังขอบนอกของวงกลมสมิทซาร์ทและอ่านค่า  $-N_m = -29.5^\circ$  ดังนั้น  $N_m = 29.5^\circ$



รูปที่ 2.7 ค่า z ที่ถูกแทนค่าด้วย jω เพื่อนำมาหาขนาดของ z ในระบบวงรอบปิด

2.3.2.3 ความสัมพันธ์ของอัตราขยาย

$$\text{จาก } Z = 2k_1 G(j\omega) + 1 \tag{2.34}$$

$$\text{ให้ } z_1 = 2k_1 G(j\omega_1) + 1 \tag{2.35}$$

$$z_2 = 2k_2 G(j\omega_2) + 1 \tag{2.36}$$

$$k_2 z_1 = 2k_1 k_2 G(j\omega_1) + k_2 \tag{2.37}$$

$$k_1 z_2 = 2k_1 k_2 G(j\omega_1) + k_1 \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_2 z_1 - k_1 z_2 = k_2 - k_1 \tag{2.39}$$

$$-k_1 z_2 + k_1 = k_2 - k_2 z_1 \quad (2.40)$$

$$k_1 z_2 - k_1 = k_2 (z_1 - 1) \quad (2.41)$$

$$z_2 - 1 = \frac{k_2}{k_1} (z_1 - 1) \quad (2.42)$$

$$z_2 = \frac{k_2}{k_1} (z_1 - 1) \quad (2.43)$$

$$-z_2 = \frac{k_2}{k_1} (z_1 - 1) + 1 \quad (2.44)$$

$$= \frac{k_2}{k_1} (-z_1 + 1) - 1 \quad (2.45)$$

$$= \frac{k_2}{k_1} (z_1 + 1) - 1 \quad (2.46)$$

### 2.3.2.4 ผลตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response)

ในส่วนของสมการอันดับสอง

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเปิด  $KG(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$  (2.47)

ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบปิด  $T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$  (2.48)

จากสมการที่ 2.52 จะหาขนาดสูงสุดของ  $|T(j\omega)|$  และ  $M_m$  ได้โดยจะเกิดขึ้นที่

$$\omega_m = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (2.49)$$

$$M_m = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.50)$$

เมื่อ  $\omega_m$  เป็นจำนวนจริง ดังนั้นค่า  $\zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$  เพื่อให้สามารถหาค่า  $M_m$  ได้ และจากสมการที่ (2.49)

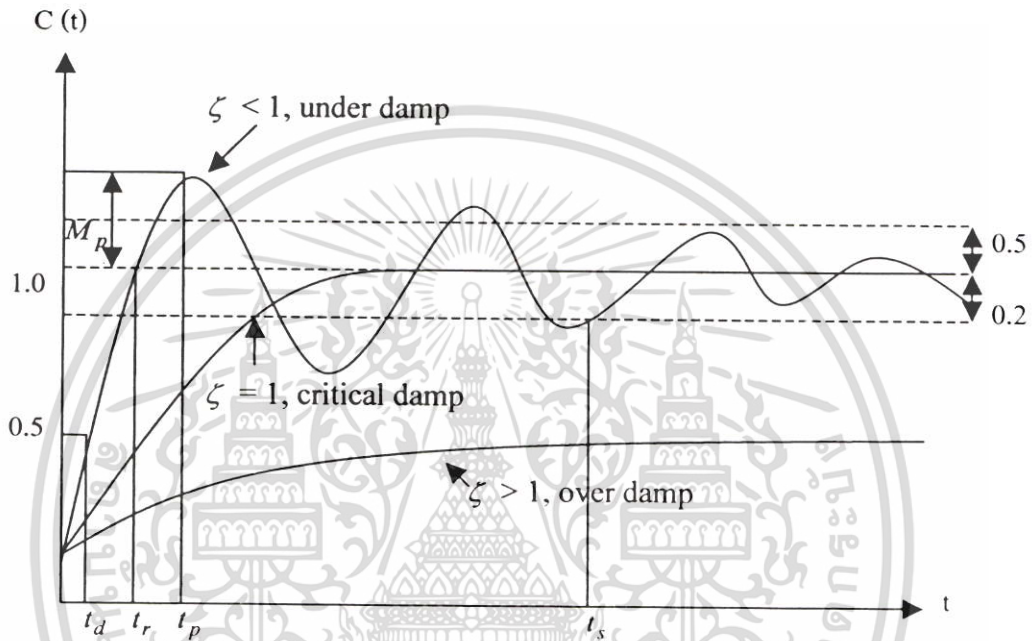
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า และ (2.50) สามารถหาค่า  $\omega_n$  และ  $\zeta$  ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากให้ค่าอินพุตเป็นการตอบสนองแบบสเตป (Step response) ลงไปยังสมการที่ 2.48

$$e(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \cos^{-1} \zeta) \quad (2.51)$$

จากสมการที่ (2.51) สามารถนำมาเขียนกราฟโดยเปลี่ยนค่า  $\zeta$  ได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 ลักษณะของผลตอบสนองชั่วขณะของระบบที่มีสมการอันดับสอง

จากรูปที่ 2.8 สามารถนำมาวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบได้ดังนี้

- เวลาหน่วง (Delay time),  $t_d$  คือเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าเป็น 50% ของค่าสุดท้าย
- เวลาไต่ขึ้น (Rise time),  $t_r$  คือเวลาที่ผลตอบสนองมีขนาดเพิ่มขึ้นจาก 10% ถึง 90%
- เวลาที่ระบบมีผลตอบสนองสูงสุด (Peak time),  $t_p$  คือเวลาที่ผลตอบสนองของระบบมีค่าสูงสุด สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (2.52)$$

- ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum overshoot),  $M_p$  คือค่าผลตอบสนองสูงสุด สามารถนำมาใช้หาอัตราส่วนระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตหรือนำมาวัดเสถียรภาพของระบบ โดยอยู่ในหน่วยของร้อยละ นำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$M_p = 1 + \exp\left(-\frac{\zeta \Pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (2.53)$$

และนำมาหาค่าร้อยละของค่าพุ่งเกินสูงสุด (Percent maximum overshoot), P.O. ได้ดังสมการนี้

$$\text{P.O.} = 100 \exp\left(-\frac{\zeta \Pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (2.54)$$

• เวลาสู่สมดุล (Setting time),  $t_s$  เป็นค่าเวลาที่ผลตอบสนองมีค่าลดลงอยู่ภายในค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งปกติจะกำหนดไว้ที่ 2% ถึง 5% นำมาเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_s \approx \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (2.55)$$

### 2.3.2.5 การหาเสถียรภาพในระบบเปิด

จาก  $T(j\omega) = KG(j\omega)$  (2.56)

$$T(j\omega) = \frac{2KG}{2} \quad (2.57)$$

$$T(j\omega) = \frac{(1 + KG(j\omega)) - (1 - KG(j\omega))}{(1 + KG(j\omega)) + (1 - KG(j\omega))} \quad (2.58)$$

$$T(j\omega) = \frac{(1 + KG(j\omega)) - (1 - KG(j\omega))}{(1 + KG(j\omega)) + (1 - KG(j\omega))} \cdot \frac{1 - KG(j\omega)}{1 - KG(j\omega)} \quad (2.59)$$

$$T(j\omega) = \frac{(1 + KG(j\omega))}{(1 - KG(j\omega))} \cdot \frac{(1 - KG(j\omega))}{(1 - KG(j\omega))} \cdot \frac{(1 - KG(j\omega))}{(1 - KG(j\omega))} + \frac{(1 - KG(j\omega))}{(1 - KG(j\omega))} \quad (2.60)$$

$$T(j\omega) = \frac{(1 + KG(j\omega))}{(1 - KG(j\omega))} - 1 \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{1 + KG(j\omega)}{1 - KG(j\omega)} \quad (2.62)$$

วิธีหาเสถียรภาพของระบบแบบ Nyquist [16] ได้แสดงถึงเฟสที่น้อยที่สุดที่จะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพโดย หากระบบเปิดที่อยู่ในระนาบเชิงซ้อน KG มีการวนล้อมของกราฟที่จุด  $-1+j0$  อย่างน้อยหนึ่งครั้งจะแสดงว่าระบบเปิดนั้นไม่เสถียรภาพ

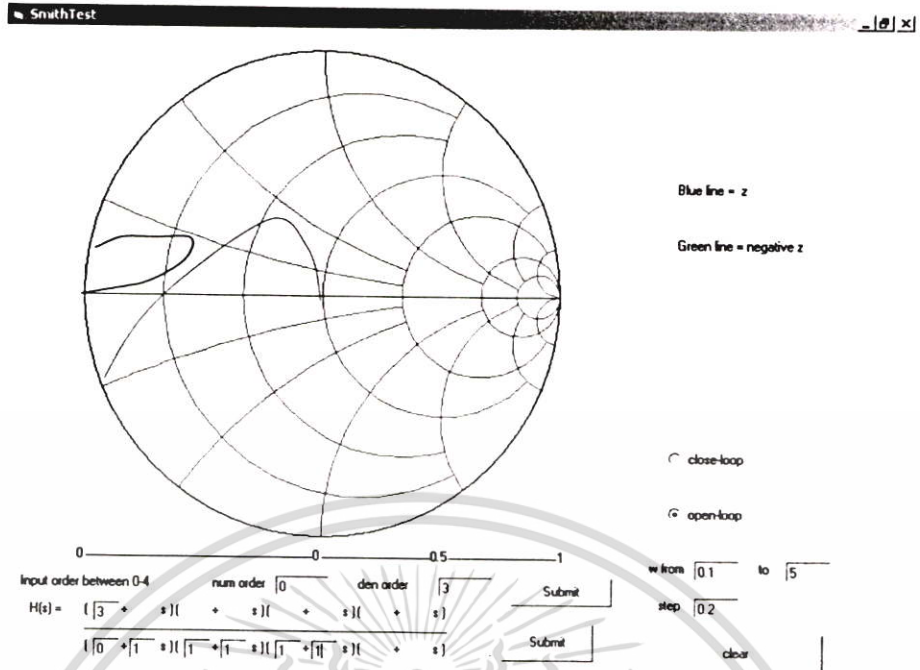
ตัวอย่าง ระบบที่ไม่เสถียรภาพ

$$KG(s) = \frac{3}{s(s+1)^2}$$

$$Z = \frac{-2\omega^2 - j\omega^3 + 2j\omega^2}{-2\omega^2 - j\omega^3}$$

ตารางที่ 2.2 ค่าของ z ที่ถูกแทนค่าด้วย  $\omega$  ซึ่งนำมาใช้หาเสถียรภาพในระบบเปิด

$\omega$	Z
0	Inf
0.2	0.7+0.2j
0.4	0.5+0.14j
0.6	0.4+j
0.8	0.3+0.8j
1.3	0.02+0.14j
1.5	0.13+0.19j
2	0.28+0.25j
3	0.28+0.19j
4	0.15+0.19j
5	0.11+0.04j



### รูปที่ 2.9 ค่า $z$ ที่ถูกแทนค่าด้วย $j\omega$ เพื่อนำมาหาขนาดของ $z$ ในระบบปิด

กราฟมีการวนไปยังจุด  $1+j0$  ดังนั้นระบบนี้จึงไม่เสถียรภาพ

จากเนื้อหาข้างต้นทำให้เห็นว่า การจะออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพสูงหรือการจะหาเสถียรภาพของระบบนั้นสามารถทำได้โดยใช้สมิธชาร์ทในการออกแบบระบบหรือหาความเสถียรภาพ ซึ่งสามารถกระทำได้อย่างสะดวกและง่ายดาย โดยไม่ต้องมีการคำนวณที่ยุ่งยากและซับซ้อน ส่วนในบทต่อไปนั้นจะกล่าวถึงวิธีนำค่าที่ได้จากส่วนที่กล่าวไว้แล้วในบทนี้มาใช้ร่วมกับตรรกศาสตร์ฟัซซีในการแก้ไขผลตอบสนองย้อนกลับสำหรับอารมณ์หุ่นยนต์และการใช้งานโปรแกรมการหาค่าตัวแปรใน สมิธชาร์ท

## บทที่ 3

# วิธีดำเนินงานวิจัย

### 3.1 แบบจำลองอารมณ์ย้อนกลับ

#### 3.1.1 ทฤษฎีการเกิดการตอบสนองย้อนกลับ

สิ่งที่ทราบแล้วว่า ระบบใดก็ตามหากมีสัญญาณพลวัตที่มีขนาดตรงข้ามกันตั้งแต่ 2 สัญญาณ ขึ้นไปเข้ามาในระบบจะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์การตอบสนองย้อนกลับได้ [17] เช่น หากมีสัญญาณ 2 สัญญาณเข้ามาในระบบโดยที่สัญญาณหนึ่งมีขนาดเล็กแต่มีความเร็วสูง ส่วนอีกสัญญาณหนึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแต่มีความเร็วต่ำ ในตอนแรกสัญญาณที่มีขนาดเล็กแต่มีความเร็วสูงกว่าจะมีผลต่อระบบก่อนซึ่งอาจทำให้สัญญาณตอบสนองของระบบมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ หลังจากนั้นสัญญาณที่มีขนาดใหญ่กว่าแต่มีความเร็วน้อยกว่าจึงเข้ามามีผลต่อระบบตามมา ทำให้สัญญาณตอบสนองของระบบสามารถดำเนินไปได้อย่างถูกต้อง ในทางคณิตศาสตร์นั้น อาจกล่าวได้ว่าระบบดังเช่นที่กล่าวถึงนั้นคือระบบที่มีซีโร (zero) หนึ่งตัวอยู่ทางขวาของระนาบเชิงซ้อน  $s$  และจำนวนของซีโรทั้งหมดรวมกันแล้วมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนโพล (pole) ที่มีอยู่ในระบบโดยมีฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ดังสามารถแสดงได้โดยสมการ

$$H(s) = \frac{K(-a_0s + 1) \prod_{i=1}^m (a_i s + 1)}{\prod_{i=1}^n (b_i s + 1)} \quad (3.1)$$

โดยมี  $K =$  อัตราขยาย

$M =$  จำนวนซีโร

$N =$  จำนวน โพลที่มีค่าเป็นลบ ( $n > m+1$ )

$a_i$  และ  $b_i =$  ค่าตัวเลขสัมประสิทธิ์

#### 3.1.2 ปัญหาการเกิดการตอบสนองย้อนกลับในหุ่นยนต์

จากทฤษฎีดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในเรื่องของอารมณ์ของหุ่นยนต์ หากมีสัญญาณเข้ามาในระบบ 2 สัญญาณแล้วก็อาจจะทำให้เกิดพฤติกรรมทางอารมณ์ที่ไม่พึงปรารถนาอันเกิดจากปรากฏการณ์การตอบสนองย้อนกลับทางอารมณ์ของหุ่นยนต์ได้เช่นเดียวกัน เช่น ในกรณีที่อารมณ์โกรธเป็นสัญญาณที่มีความเร็วกว่าและอารมณ์ดีเป็นสัญญาณที่มีความเร็วต่ำกว่าถูกผสมปนอยู่ด้วยกัน ในตอนต้นจากสัญญาณที่เร็วกว่าทำให้หุ่นยนต์แสดงอารมณ์โกรธก่อน ซึ่งสามารถไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้หุ่นยนต์ที่อยู่รอบข้างเกิดความเสียหายขึ้นได้ก่อนที่จะเข้าสู่สถานะเสถียรและแสดงอาการผิดที่ถูกต้อง ในกรณีนี้สามารถเห็นได้ชัดเจนว่าผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นในส่วนแรกไม่เป็นที่ต้องการให้เกิดและสมควรแก่การกำจัดทิ้ง ในส่วนต่อไปที่จะกล่าวถึงคือวิธีการกำจัดการตอบสนองย้อนกลับทางอารมณ์หุ่นยนต์

### 3.2 การควบคุมด้วยตรรกศาสตร์ฟัซซีพีไอ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเอาทฤษฎีแบบแผนการควบคุมแบบฟัซซีแบบพีไอ (Fuzzy PI) [18] เพื่อพัฒนาและรับรองความเสถียรภาพของระบบในการควบคุมวงจรทางด้านอารมณ์ของหุ่นยนต์ ข้อแตกต่างหลักของการควบคุมแบบฟัซซีพีไอกับการควบคุมแบบพีไอดั้งเดิม คือ ส่วนหน้าของการควบคุมแบบฟัซซีพีไอจะมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของสัญญาณ ( $\Delta u_p(nT)$ ) อีกทั้งการควบคุมแบบฟัซซีพีไอยังมีกลุ่มของอัตราขยายที่สามารถปรับแต่งได้คือ  $\{K_p, K_i, K_{upD}, \text{ and } L\}$  ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงานให้กับระบบมากกว่าเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบพีไอดั้งเดิมซึ่งมีอัตราขยายแบบคงที่ โดยในระบบฟัซซีพีไอจะมีค่าอินพุตเป็นค่าผิดพลาด  $e_p(nT)$  และการเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด  $e_p(nT)$  อีกทั้งกลุ่มสมาชิกสัมพันธ์ (L) ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ไม่ได้มีความสัมพันธ์เพียงแค่อินพุตและเอาต์พุตของระบบแต่เป็นตัวควบคุมการตัดสินใจของระบบ ( $u_p$ ) อีกด้วย

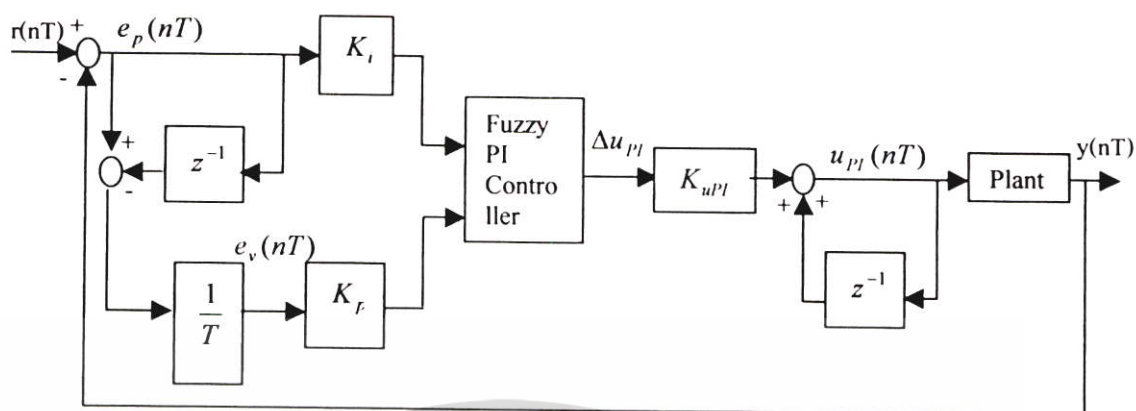
ข้อแตกต่างของระบบฟัซซีพีไอกับระบบพีไอแบบดั้งเดิมสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อแตกต่างของระบบฟัซซีพีไอกับระบบพีไอแบบดั้งเดิม

พีไอแบบดั้งเดิม	ฟัซซีพีไอ
ควบคุมได้เฉพาะระบบเชิงเส้น	ควบคุมได้ทั้งระบบเชิงเส้นและระบบไม่เป็นเชิงเส้น
ค่าเวลาได้ขึ้นสูง	ลดค่าเวลาได้ขึ้น
เกิดผลตอบสนองสูงหากต้องการค่าเวลาได้ขึ้นต่ำ	ลดการเกิดค่าผลตอบสนองโดยไม่ต้องเพิ่มค่าเวลาได้ขึ้น
ไม่สามารถควบคุมระบบที่ไม่รู้ค่าตัวแปรหรือฟังก์ชันถ่ายโอนได้	สามารถควบคุมระบบที่ไม่รู้ค่าตัวแปรหรือฟังก์ชันถ่ายโอนได้

ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบควบคุมที่นำตรรกศาสตร์ฟัซซีพีไอ มาใช้นั้นมีส่วนที่มีประโยชน์และมีความสมบูรณ์แบบมากกว่าระบบที่ใช้การควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมมาก โดยระบบควบคุมที่นำตรรกศาสตร์ฟัซซีพีไอมาใช้นั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 การควบคุมแบบพีซีซีพีโอ

โดยมี ค่าสัญญาณอ้างอิงหรือจุดอ้างอิง (Set point) คือ  $r(nT)$   
 สัญญาณเอาต์พุต (Output) คือ  $y(nT)$   
 ค่าสัญญาณความผิดพลาด (Tracking error signal) หรือ ความผิดพลาดทางตำแหน่ง คือ

$$e(nT) = r(nT) - y(nT) \quad (3.2)$$

ค่าสัญญาณสุ่มตัวอย่างตามเวลา (Sampling Time) คือ  $T$   
 ค่าสัญญาณความผิดพลาด โดยเฉลี่ย (Average tracking error signal) คือ

$$e_p(nT) = \frac{e(nT) + e(nT - T)}{2} \quad (3.3)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณความผิดพลาด (Rate of change of the error signal)  
 หรือ อัตราเร็วค่าความผิดพลาด คือ

$$e_v(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \quad (3.4)$$

ตัวควบคุมอัตราการขยายหรือเกนพีซีซี  $K_{uPI}$

สัญญาณควบคุมการกระทำของพีซีซี  $U_{PI}(nT)$

จากรูปที่ 3.1 ค่าพีซีซีพีโอที่ใช้ในการควบคุมการตัดสินใจของระบบสามารถนำมาเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta u_{pI}(nT) = K_p e_v(nT) + K_i e_p(nT) \quad (3.5)$$

$$\Delta u_{pI}(nT) = \frac{u_{pI}(nT) - u_{pI}(nT - T)}{T} \quad (3.6)$$

$$e_v(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \quad (3.7)$$

$$e_p(nT) = \frac{e(nT) + e(nT - T)}{2} \quad (3.8)$$

$$u_{pI}(nT) = u_{pI}(nT - T) + K_{uPI} \Delta u_{pI}(nT) \quad (3.9)$$

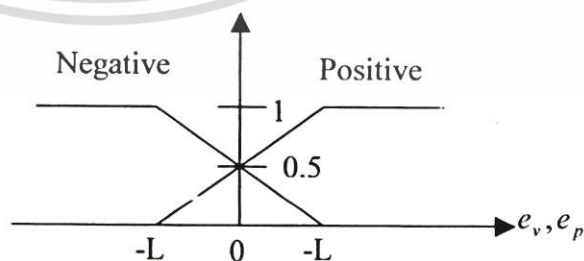
ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีพีไอนี้จะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังนี้คือ

### 3.2.1 พีซีพีเคชั่น

การทำพีซีพีเคชั่นจะกระทำได้โดยทำการนอร์มอลไลซ์เซชัน (Normalization) ก่อนเพื่อเปลี่ยนสเกลจากค่าทางกายภาพของตัวแปรสถานะไปสู่เอกภพสัมพัทธ์ซึ่งถูกนอร์มอลไลซ์แล้ว จากนั้นจึงทำการพีซีพีเคชั่นเพื่อเปลี่ยนค่าเชิงปริมาณ ที่เป็นคลิป์เซตของตัวแปรสถานะไปเป็นพีซีพีเซต โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

#### 3.2.1.1 การออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุต

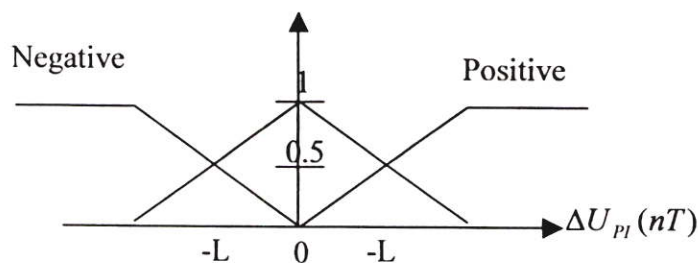
ค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตจะประกอบไปด้วย ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของค่าผิดพลาดและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงของค่าผิดพลาด โดยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งสองประกอบด้วยพีซีพีเซต negative, zero, positive



รูปที่ 3.2 ความเป็นสมาชิกด้านอินพุต

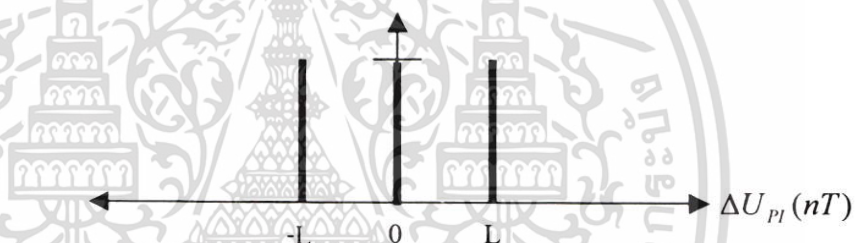
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.1.2 การออกแบบฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุต



รูปที่ 3.3 ความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุต

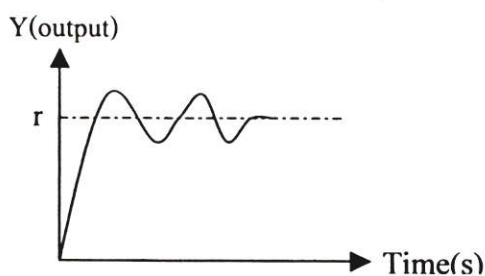
กำหนดให้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีที่ประกอบด้วยฟัซซีเซตที่มีชื่อว่า n = negative, p = positive, 0 ซึ่งถูกออกแบบเป็นฟัซซีซิงเกิลตัน



รูปที่ 3.4 ความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซีเมื่อใช้วิธีฟัซซีซิงเกิลตัน

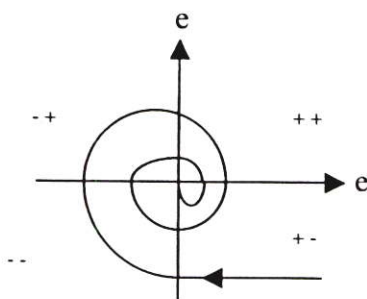
### 3.2.2 กฎการควบคุมฟัซซี (Fuzzy rules base)

เมื่อตัวควบคุมฟัซซีมีสองอินพุตและแต่ละอินพุตมีการเป็นสมาชิกสองฟังก์ชัน ดังนั้นจึงออกแบบกฎฟัซซี [18] ได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งครอบคลุมความเป็นไปได้ของเอาต์พุตของระบบในทุกสภาวะ โดยกฎการควบคุมแบบฟัซซีถูกสร้างให้สอดคล้องกับภาพที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 ระบบผลตอบสนองอันดับนโดสำหรับกฎแบบข้อเท็จจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ระบบการตอบสนองบนระนาบเฟส

ตารางที่ 3.2 กฎการควบคุมพีชชี

$E_p$	$e_v$	negative	positive
Negative		negative	0
positive		0	positive

จากตารางที่ 3.2 จะสรุปออกมาได้กฎ 4 ข้อดังนี้

(R1) IF  $e_p$  is negative AND  $e_v$  is negative THEN  $\Delta U_{PI}$  is negative

(R2) IF  $e_p$  is negative AND  $e_v$  is positive THEN  $\Delta U_{PI}$  is zero

(R3) IF  $e_p$  is positive AND  $e_v$  is negative THEN  $\Delta U_{PI}$  is zero

(R4) IF  $e_p$  is positive AND  $e_v$  is positive THEN  $\Delta U_{PI}$  is positive

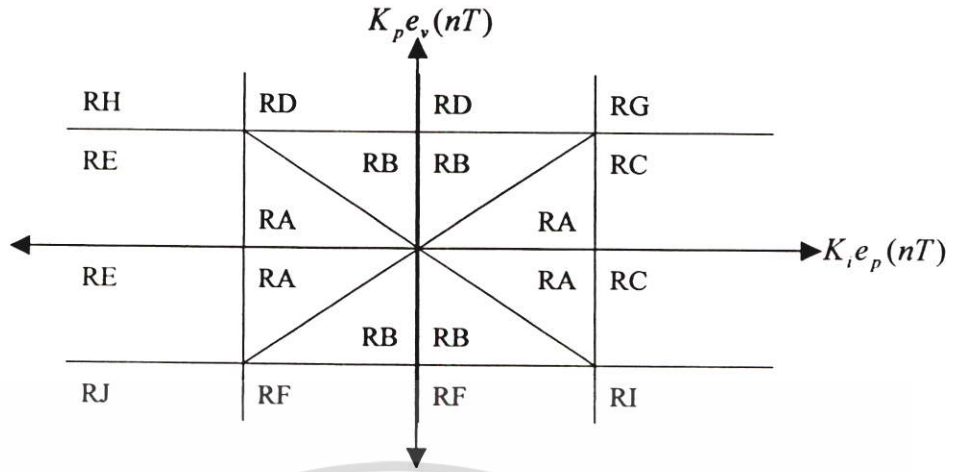
### 3.2.3 คีพีชชีพีเคชัน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้วิธีเช่นทฤษฎีคีพีชชีฟายเออร์จำนวนการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมพีชชีทั้งสอง (ค่าผิดพลาดและค่าเปลี่ยนแปลงค่าผิดพลาด) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta u(nT) = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_i \cdot \Delta u_i}{\sum_{i=1}^4 \mu_i} \quad (3.10)$$

จากฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของอินพุตทั้งสองทำให้สามารถแบ่งอินพุตสเปซ (input space) ของตัวควบคุมพีชชีพีไอออกเป็น 20 บริเวณดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 อินพุตสเปซของตัวควบคุมพีซีซี

เมื่อทำการหาผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีซีพีไอในแต่ละบริเวณ [19] แล้ว จึงจะสามารถนำการนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์หาเสถียรภาพของระบบต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละบริเวณจะมีวิธีหาดังนี้

- กำหนดค่าอินพุตในบริเวณที่กำลังพิจารณาเพื่อให้เป็นตัวแทนของอินพุตที่จะทำพีซีซีพีไอแล้วจึงหาค่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของแต่ละอินพุต
- ใช้กฎพีซีซี 4 กฎดังที่กล่าวมาแล้วในการหาค่าการเป็นสมาชิกของอินพุตของแต่ละกฎ
- ทำการดีฟัซซีฟิเคชันเพื่อคำนวณหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีซีพีไอโดยใช้วิธีเซ็ททอรรอยด์คัฟัซซีฟายเออร์

โดยวิธีการข้างต้นจะทำให้ได้สูตรการหาค่าการเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีซีพีไอมาทั้งหมด 20 สูตร แต่จากการนอมอลไลซ์เซชัน ทำให้สามารถรวมสูตรจนเหลือเพียง 9 สูตร ดังนี้

$$\Delta u_{pI}(nT) = \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)]]} \quad \text{in region RA} \quad (3.11)$$

$$= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_p |e_v(nT)]]} \quad \text{in region RB} \quad (3.12)$$

$$= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] \quad \text{in region RC} \quad (3.13)$$

$$= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] \quad \text{in region RD} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับค่าใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) - L] \quad \text{in region RE} \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{2}[K_p e_p(nT) - L] \quad \text{in region RF} \quad (3.16)$$

$$= 0 \quad \text{in region RH,I} \quad (3.17)$$

$$= -L \quad \text{in region RJ} \quad (3.18)$$

$$= +L \quad \text{in region RG} \quad (3.19)$$

### 3.2.4 ระบบการควบคุมฟัซซีพีโอแบบปิดมีกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 3.8 ระบบการควบคุมฟัซซีพีโอแบบปิดมีกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 1

เมื่อ

$sp(nT)$  คือ อินพุตของระบบควบคุม

$y(nT)$  คือ เอาท์พุตของระบบควบคุม

$e(nT)$  คือ ค่าสัญญาณที่ผิดพลาด

$r(nT)$  คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

$u(nT)$  คือ เอาท์พุตของระบบฟัซซี

$N(\cdot)$  คือ กระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.8 ถ้าให้กระบวนการที่ถูกควบคุม โดยฟัซซีพีโอเป็นกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

[19] และจากกฎการควบคุมในตารางที่ 3.2 ถ้ากำหนดให้

$$e(nT) = e_1(nT)$$

$$u(nT) = e_2(nT)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u_2(nT) = u(nT - T)$$

$$S_1(e_1(nT)) = -\frac{G_U^2 H}{2(2L - G_E |e_1(nT)|)} \left[ (G_e + \frac{G_r}{T}) \times e_1(nT) - \frac{G_r}{T} e_1(nT - T) \right]$$

$$S_2(e_2(nT)) = N(e_2(nT)) \quad (3.20)$$

เมื่อ  $G_u$  คือ อัตราขยายของเอาต์พุตของระบบควบคุมพีซี

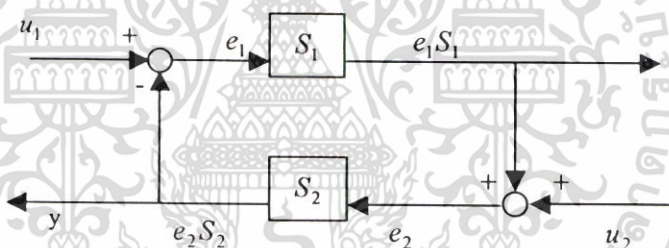
$G_r$  คือ อัตราขยายของค่าสัญญาณผิดพลาด

$G_e$  คือ อัตราขยายของค่าอัตราสัญญาณผิดพลาด

$H$  คือค่าแสดงความเป็นสมาชิกด้านเอาต์พุตของตัวควบคุมพีซีเมื่อใช้วิธีพีซีซิงเกิลตัน

ดังรูปที่ 3.4

จากสมการข้างต้นสามารถนำมาเขียนดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ระบบการควบคุมพีซีพีโอแบบปิดมีกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบที่ 2

จากรูปที่ 3.9 จะได้ว่า

$$u_1(nT) = sp(nT) = e(nT) + N^*(u(nT))$$

$$= e_1(nT) + S_2(e_2(nT)) \quad (3.21)$$

$$u_2(nT) = u(nT - T) = u(nT) - G_U \Delta U(nT)$$

$$= e_2(nT) + S_1(e_1(nT)) \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีบทเกนน้อย (Small Gain Theorem) ที่ใช้ในการหาเงื่อนไขที่จะทำให้ระบบมีความเสถียรภาพเมื่อนำมาใช้โดยการแบ่งพื้นที่การควบคุมพีชชีจากรูปที่ 3.7 ออกเป็น 3 ส่วนจะได้สมการคือ

$$\frac{G_u^2(TG_E + G_R)H}{2T(2L - G_R M_e)} \|N\| < 1 \quad \text{RA} \quad (3.23)$$

$$\frac{G_u^2(TG_E + G_R)H}{2T(2L - G_R M_r)} \|N\| < 1 \quad \text{RB} \quad (3.24)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{G_u^2 G_E H}{2TL} \|N\| < 1 \\ \frac{G_u^2 G_R H}{2TL} \|N\| < 1 \\ \|N\| = \text{ขอบเขต} \end{aligned} \right\} \text{RC-RJ} \quad (3.25)$$

$\|N\|$  คือ นอร์มของกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น

$M_e$  คือ ขนาดสูงสุดของค่าสัญญาณผิดพลาด

$M_r$  คือ ขนาดสูงสุดของค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด

จากสมการที่ (3.23)-(3.25) สามารถนำมารวมกันทำให้ได้เงื่อนไขในการควบคุมพีชชีพีโอแบบปิดที่มีกระบวนการแบบไม่เป็นเชิงเส้นให้มีความเสถียรภาพโดยกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะต้องมีค่า นอร์มของอัตราขยาย  $< \infty$  และมีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีชชีพีโอ ดังสมการ

$$\frac{G_u^2(\beta G_E + G_R H)}{T(2L - G_M)} \|N\|_\infty < 1 \quad (3.26)$$

โดย  $G_m = \max\{G_E M_e, G_R M_r\}$  และ  $\beta = \max\{1, T\}$

จากสมการที่ (3.26) จะเห็นได้ว่า  $0 < G_m < 2L$  อีกทั้งยังสามารถหาเงื่อนไขเบื้องต้นที่จะนำมาใช้กับระบบควบคุมพีชชีพีโอกับกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยในขั้นแรกต้องกำหนดค่า  $G_U = T$

$$e(nT) = y(nT) - sp(nT) \quad \text{มีค่าเข้าใกล้ 0 และค่า n เข้าใกล้ } \infty$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงหาค่า  $G_R$  หรือ  $G_E$  จากสมการที่ (3.26) สำหรับการนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความผิดพลาด

จากสมการที่ (3.26),  $\frac{1}{2L - G_M}$  ที่ทำให้ได้ผลลัพธ์น้อยที่สุดคือต้องกำหนดให้ค่า  $G_M = 0$  หรืออีกนัยหนึ่งคือกำหนดให้ค่า  $M_e = M_r = 0$  ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรดังนี้จะทำให้ได้เอาต์พุตอยู่ในสถานะคงที่  
อีกทั้งหากกำหนดให้

$$G_u = T, \beta = 1, G_E = \frac{K_i}{T}, G_R = \frac{K_p}{T}, L = 4H$$

แล้วใช้กฎความสัมพันธ์ของระบบควบคุมพีซีพีไอในกระบวนการที่ไม่เป็นเชิงเส้นกับระบบควบคุมพีไอเชิงเส้น แทนค่าลงไปในสมการที่ (3.26) จะได้

$$(K_i + K_p) \|M\| < 1 \quad (3.27)$$

สมการที่ (3.27) สามารถนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมพีไอสำหรับกระบวนการเชิงเส้นให้มีเสถียรภาพ

### 3.3 การใช้สมิทซาร์ท สำหรับช่วยออกแบบการควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมพีซีพีไอเพื่อนำไปควบคุมกระบวนการไม่เป็นเชิงเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.26) โดยค่า  $\|M\|$  นั้นสามารถหาได้จากสมิทซาร์ท โดยจะสามารถเทียบเท่ากับค่าที่ทำให้ได้ขนาดของ  $|T(j\omega)|$  มีค่าสูงสุดเป็น  $M_m$  ซึ่งวิธีหาค่านี้จะได้ระบุไว้แล้วในบทที่ 2

### 3.4 โปรแกรมช่วยในการจำลองผล

การหาค่าของ  $z$  และส่วนกลับของ  $z$  ดังวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น กระทำได้ยากและเสียเวลามาก ดังนั้นผู้เขียนจึงได้สร้างโปรแกรมการวาดกราฟของค่าดังกล่าวไว้เพื่อให้ง่ายแก่การนำไปใช้ยิ่งขึ้น โดยทฤษฎีของทฤษฎีวงเวียนและโค๊ดของโปรแกรมนั้นแสดงไว้ในส่วนภาคผนวก

ตัวอย่าง การนำโปรแกรมมาใช้งาน

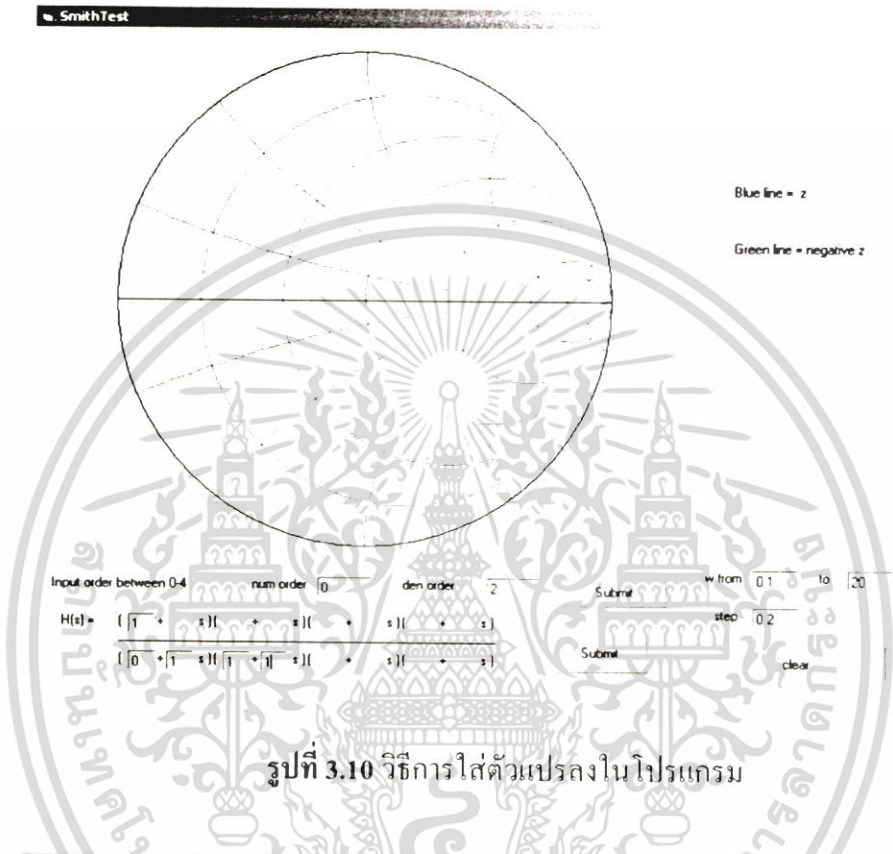
กำหนดให้ฟังก์ชันถ่ายโอน 
$$H(s) = \frac{s}{s(s+1)}$$

1. ในช่อง num order คือจำนวนอันดับของเศษและในช่อง den order คือจำนวน

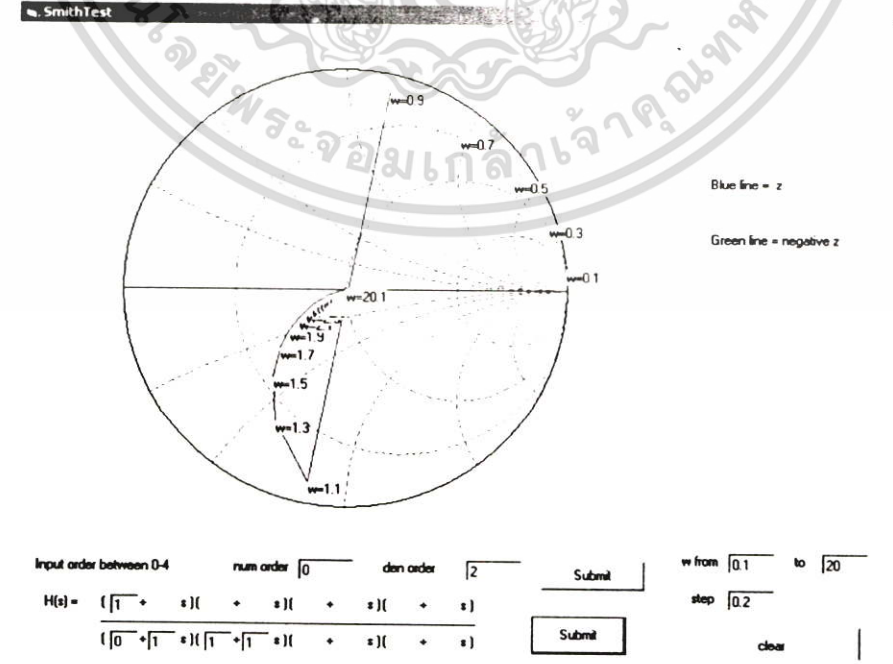
อันดับของส่วนเมื่อกรอกแล้วกดปุ่ม submit จึงจะสามารถใส่ค่าของ  $H(s)$  ได้ ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใส่ค่า H(s) และค่าช่วงความถี่ที่ต้องการจะทราบ รวมทั้งระยะห่างระหว่างความถี่ ลงในช่องว่าง แล้วกดปุ่ม submit โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า  $Z=2KG+1$  แล้ววาดออกมาเป็นเส้นสีฟ้า ส่วน  $z' = -2KG+1$  จะเป็นเส้นกราฟสีเขียวดังรูปที่ 3.11
3. ปุ่ม clear จะทำการลบเส้นกราฟที่วาดบนสมิธชาร์ท



รูปที่ 3.10 วิธีการใส่ตัวแปรลงในโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 3.11 ผลลัพธ์ของโปรแกรม**  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าโปรแกรมนี้มีความสามารถในการคำนวณค่าได้รวดเร็วและแม่นยำมาก

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย ซึ่งนำสมิธชาร์ทมาใช้ร่วมกับตรรกศาสตร์ฟัซซีเพื่อแก้ไขการเกิดปัญหาผลตอบสนองย้อนกลับของอารมณ์ของหุ่นยนต์แล้ว ในส่วนต่อไปจะเป็นการจำลองผลจากทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการจำลอง

#### 4.1 เงื่อนไขและพารามิเตอร์

บทนี้นำเสนอการจำลองผลให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการใช้ระบบควบคุมแบบพีซีพีไอ เพื่อกำจัดผลการตอบสนองย้อนกลับที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว โดยทำการจำลองผลให้อารมณ์ของหุ่นยนต์ถูกเปลี่ยนจากอารมณ์หนึ่งไปยังอีกอารมณ์หนึ่ง หลังจากนั้นจึงรบกวนระบบด้วยการใช้แบบจำลองที่มีความผิดพลาด (Mismatch model) กับระบบที่กำลังดำเนินอยู่ โดยที่ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรที่ใช้แสดงถึงอารมณ์ของหุ่นยนต์ซึ่งสามารถสร้างได้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเซลล์กูลาร์ (Cellular Neural Network) และสามารถแสดงค่าได้จากสมการทางคณิตศาสตร์หรือเซตของสมการที่สร้างโดยอาศัยกฎทางฟิสิกส์

ในการจำลองนี้จะใช้แบบจำลองการตอบสนองย้อนกลับที่แทนด้วยระบบที่มีสมการอันดับที่สองในรูป

$$H(s) = \frac{K(-a_0s + 1) \prod_{i=1}^m (a_i s + 1)}{\prod_{r=1}^n (b_r s + 1)} \quad (4.1)$$

โดยมี  $K = 1, A_0 = 3, b_1 = 2, b_2 = 5$   
จะได้สมการ

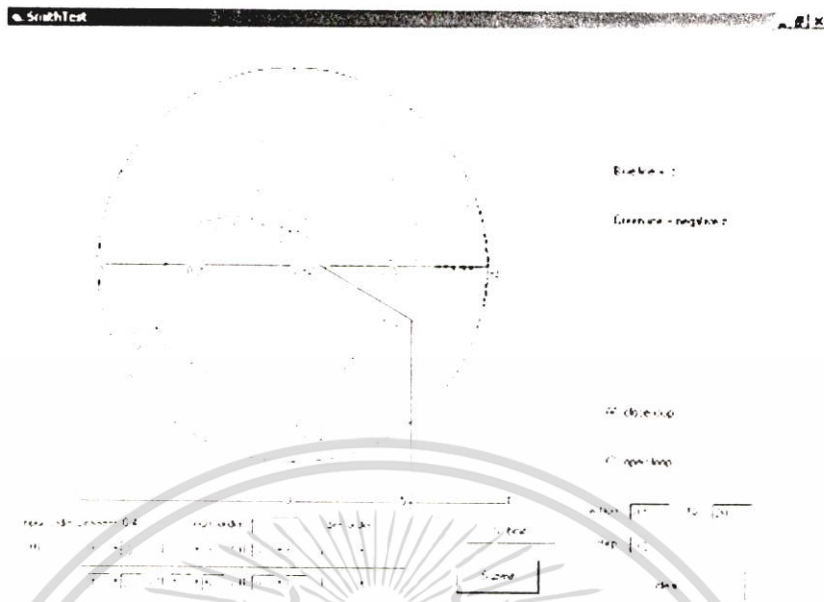
$$H(s) = \frac{1(-3s + 1)}{(2s + 1)(5s + 1)} \quad (4.2)$$

ในการออกแบบให้ระบบมีเสถียรภาพ ระบบจะต้องมีเงื่อนไขตัวควบคุมดังที่กล่าวไว้แล้วในสมการที่ (3.26) โดยค่า  $\|N\|_\infty$  จะได้จาก  $M_m$  ซึ่งหาได้จากการนำสมิธชาร์ทมาช่วยคำนวณดังนี้

หากนำสมการที่ (4.2) มาแปลงเป็นสมการเชิงซ้อนจะได้

$$H(j\omega) = \frac{1(-3j\omega + 1)}{(2j\omega + 1)(5j\omega + 1)}$$

ใช้โปรแกรมในการเขียนกราฟของระบบนี้ได้ดังรูปที่ 4.1 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ขนาดการตอบสนองสูงสุดของระบบ

จากการอ่านค่าจากรูปที่ 4.1 จะได้ขนาดของ  $M_m$  เท่ากับ 0.5 โดยหากกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์การควบคุมเท่ากับ

$$K_p = 1, K_i = 2, K_{up} = 1.1, L = 450$$

แทนค่าลงไปยังสมการที่ (3.26).

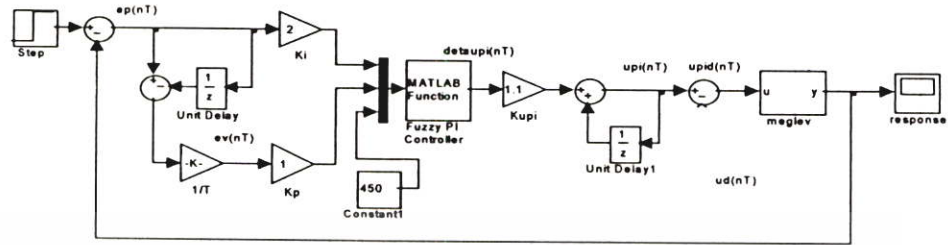
$$\left( \frac{1.1^2 (0.1 * 2 + 1 * 450)}{1(2 * 450 - 450)} \right) * 0.5 < 1.$$

$$0.5502 < 1$$

จะเห็นว่าสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ และกำหนดให้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเซลล์ลาร์ก่อให้เกิดรูปแบบ การแสดงอารมณ์โกรธเมื่อได้รับสัญญาณขนาด 10 V และแสดงอารมณ์มีความสุขเมื่อได้รับสัญญาณขนาด 15 V

## 4.2 ผลการจำลอง

ในการจำลองผลนี้จะใช้เครื่องมือของ Matlab โดยใช้ฟังก์ชัน Simulink ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การจำลองผลระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธีฟัซซีพีไอ

### 4.2.1 กรณีที่แบบจำลองไม่มีความผิดพลาด

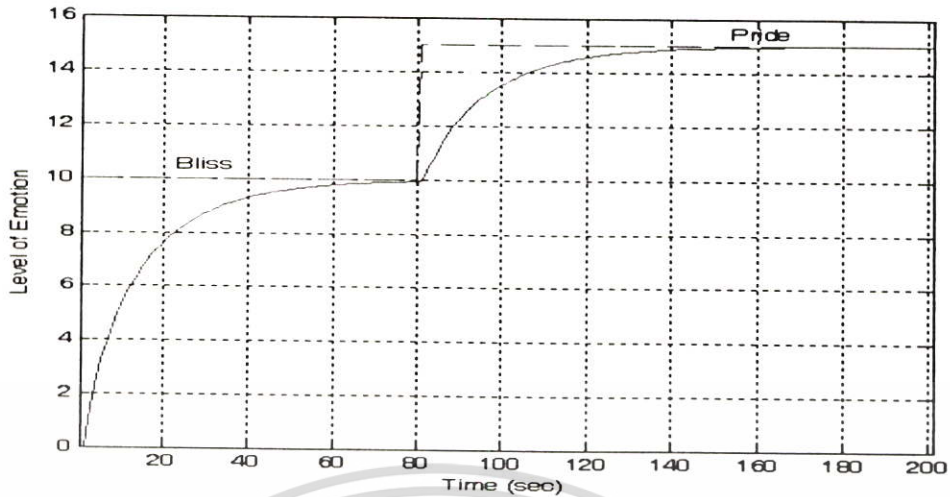
จากรูปที่ 4.2 หากป้อนสัญญาณขั้นบันไดเข้าไปในระบบจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่

4.3



รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองในระบบปกติ

ซึ่งมีการเกิดผลตอบสนองย้อนกลับขึ้นและระบบใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลถึง 1,400 วินาที หากให้สัญญาณกำลังเปลี่ยนจาก 10 V ไปเป็น 15 V โดยผ่านระบบควบคุมจะได้ค่าผลตอบสนองดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลตอบสนองของระบบในกรณีที่มีการควบคุม

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมพีซีพีอินั้นทำให้ผลตอบสนองที่ออกมาจากระบบดีขึ้น โดยสังเกตได้จากระบบไม่เกิด โอเวอร์ชูต (Overshoot) และไม่เกิดการตอบสนองย้อนกลับเลยแม้แต่น้อย และระบบมีเวลาเข้าสู่สมคูลดีขึ้นโดยใช้เวลาเพียง 60 วินาทีเท่านั้น

#### 4.2.2 กรณีที่แบบจำลองมีความผิดพลาด

เพื่อทดสอบความคงทน (Robustness) ของระบบที่ได้ออกแบบ จะทำการจำลองโดยการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ดังนี้

- a. ให้ค่าซีโร (zero) ที่อยู่ทางขวาของระนาบมีค่าเพิ่มขึ้น 200% ( $a_0$  จาก 3 เป็น 9)

$$H(s) = \frac{1(-9s + 1)}{(2s + 1)(5s + 1)}$$

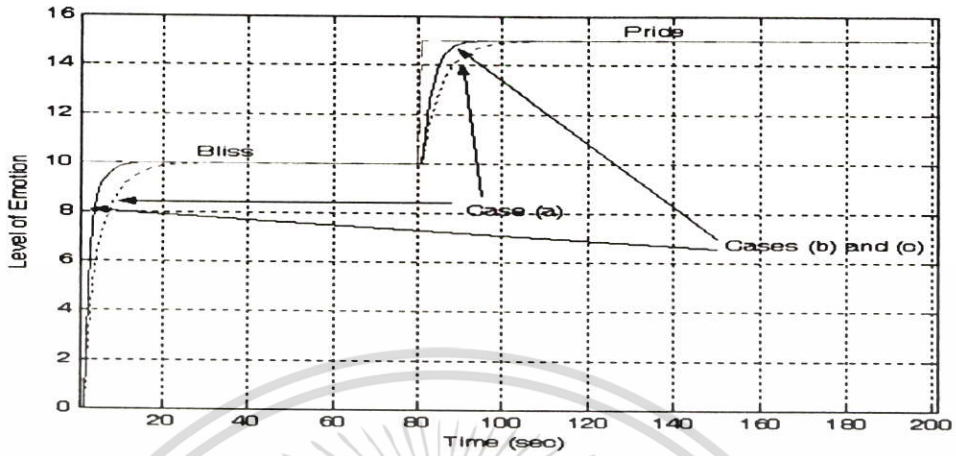
- b. ลดค่าโพลของระบบลง 80% ( $b_2$  จาก 5 เป็น 1)

$$H(s) = \frac{1(-3s + 1)}{(2s + 1)(s + 1)}$$

- c. ให้ค่าซีโร (zero) ที่อยู่ทางขวาของระนาบมีค่าเพิ่มขึ้น 100% ( $a_0$  จาก 3 เป็น 6) และให้โพลในระบบลดลง 60% ( $b_2$  เปลี่ยนจาก 5 เป็น 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### จะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลตอบสนองจากการทดลองเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสามแบบ a. b. และ c.

จากรูปที่ 4.5 สังเกตได้ว่าในกรณี b. และ c. มีผลการตอบสนองเหมือนกันเนื่องมาจากการเพิ่มค่าซีโรและลดค่าโพลเมื่อนำมาหักล้างกันก็จะได้ผลลัพธ์ดังกล่าวพอดี และระบบมีเวลาเข้าสู่สมดุลดีขึ้นโดยในกรณี a. ใช้เวลา 20 วินาที ส่วนกรณี b. และ c. ใช้เวลาเพียง 10 วินาทีเท่านั้น

จากการทดลองทั้งหมดทำให้สังเกตเห็นได้ว่าระบบที่มีตัวควบคุมจะมีความคงทนสูง โดยสังเกตได้ว่าแม้มีการเปลี่ยนแปลงของระบบในหลายๆ เงื่อนไขระบบก็ยังคงมีเสถียรภาพ ไม่มีการเกิดค่าพุ่งเกิน อีกทั้งสามารถกำจัดผลการตอบสนองย้อนกลับได้อย่างสิ้นเชิงและทำให้ระบบประมวลผลด้วยเวลาที่เร็วขึ้นอีกด้วย จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมอารมณ์หุ่นยนต์ที่ได้ออกแบบให้ผลตามความมุ่งหมายโดยสามารถกำจัดการตอบสนองย้อนกลับและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดของแบบจำลองอีกด้วย

## บทที่ 5

### สรุปผล

#### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการออกแบบระบบควบคุมสถานะของอาร์มพ์หุ่นยนต์โดยอาศัยสมิท ชาร์ท อันเป็นเครื่องมือที่คุ้นเคยวิศวกรในวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ด้วยการนำเครื่องมือนี้มาช่วยคำนวณประเมินขนาดสูงสุดของการตอบสนองของระบบอาร์มพ์หุ่นยนต์ที่อาจสร้างด้วยวงจรโครงข่ายประสาทเทียมแบบเซลล์ลูลาร์ [21] โดยจะได้เอาที่พุดออกมาเป็นกระแสไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ กันตามอาร์มพ์ของหุ่นยนต์ในขณะนั้น ในกรณีที่ระบบเกิดการตอบสนองย้อนกลับ เราจึงจะใช้การควบคุมแบบพีซีซี ซึ่งออกแบบในรูปพีซีซีพีไอโดยการประเมินค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนี้ใช้สมิท ชาร์ทในการประมาณค่าตามเงื่อนไขเสถียรภาพที่ได้วิเคราะห์และแสดงไว้ในบทก่อนหน้า

หลังจากนั้นจึงได้ทำการจำลองเพื่อที่จะสาธิตปรากฏการณ์การเกิดการตอบสนองย้อนกลับทางอาร์มพ์ของหุ่นยนต์และวิธีแก้ไข ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นที่น่าพึงพอใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากระบบควบคุมแบบพีซีซีพีไอที่ใช้ร่วมกับสมิท ชาร์ทนี้สามารถกำจัดการตอบสนองย้อนกลับได้อย่างสมบูรณ์แบบ อีกทั้งยังช่วยให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองของระบบดีขึ้นและมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ทำให้แบบจำลองมีความผิดพลาดอีกด้วย

ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคตคือ การนำไปใช้สร้างและใช้งานกับระบบหุ่นยนต์จริง แม้ว่าการตอบสนองย้อนกลับทางอาร์มพ์จะเป็นประเด็นปัญหาที่กล่าวไว้ล่วงหน้าก่อนที่จะเกิดเหตุการณ์จริง กระนั้น ก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจควรแก่การศึกษาเพิ่มเติมในเงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวที่ได้จากงานปฏิบัติการจริงในภาคสนาม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. H. Smith. **Electronic Applications of the Smith Chart**. New York : McGraw-Hill. 1969.
- [2] สุมาลี อุณหวนิชย์. **ระบบควบคุม**. สำนักพิมพ์. เพ็ชรสกุล. 2545.
- [3] T. Nakata, T. Sato and T. Mori. "Expression of Emotion and Intention by Robot Body Movement" **Intelligence Autonomous system5(IAS-5)**, 1998. pp. 352-359.
- [4] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Sakamoto and K. Tanie "Long-term Robot Assisted Activity to Eldrly People at a Health Service Facility for Aged" **Human and Artificial Intelligence Systems From Control to Autonomy**, vol. 1, Dec 2004. pp. 303-308.
- [5] H. Miwa and T. Okuchi. "A new Mental Model for Humanoid Robots for Human Friendly Communication-Introduction of learning system, Mood Vector and second order Equations of emotion" **Proc. IEEE Int Conf. on Robotics and Automation**, 2003. pp. 3588-3593.
- [6] S. Akiguchi and Y. Maeda. "Emotion Behavior Learning for Autonomous Mobile Robot Based on Neuromodulators" **Human and Artificial Intelligence Systems From Control to Autonomy**, vol. 1, Dec. 2004. pp. 309-314.
- [7] Y. Maeda. "Emotional Generation Model for Autonomous Moblie Robot" **KANSEI Engineering International**, vol. 1, no.1, Nov. 1999. pp. 59-66.
- [8] P. Sooraksa, T. Pattaradej and G. Chen "Design and Implementation of Fuzzy  $P^2ID$  Controller for Handlebar Control of a Bicycle Robot" **Integrated Computer-Aided Engineering**, vol. 9, 2002. pp. 319-331.
- [9] N. Tanabe and Y. Maeda "Emotional Behavior Evaluation Method Used Fuzzy Reasoning for Pet-type Robot" **Human and Artificial Intelligence Systems From Control to Autonomy**, vol. 1, Dec 2004. pp. 321-326.
- [10] L. Zadeh "Fuzzy sets" **Informat. Control**, vol. 8, 1965. pp. 338-353.
- [11] H. Mamdani "Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant" **Proc. IEEE**, vol. 121, 1974. pp. 1585-1588.
- [12] J. Lu, G. Chen and H. Ying "Predictive fuzzy PID Control : Theory, design and simulation" **Information Sciences**, vol. 137, 2001. pp. 157-187.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] พิชัย ภัคดีพาณิชย์เจริญ. **ทฤษฎีและการใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟ**. โครงการตำราเรียน PHISICS CENTER. 2536.
- [14] R. piper, F. Dellsperger “Personal computer assisted tutorial for smith charts” **Proc. IEEE**, March, 2001. pp. 139-144.
- [15] K. Ogata. **Modern Control Engineering**. 4th ED. Prentice-Hal, Inc. 2001.
- [16] วรวิทย์ อึ้งภากรณ์, และรัชทิน จันทรเจริญ. **ระบบควบคุมเชิงเส้น**. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2545.
- [17] L. Luyben, L. Lyben. **Essential of process control**. McGraw Hill. 1997.
- [18] S. Ranganathan, H. Malki and G. Chen “Fuzzy Predictive PI control for process with large time delay” **Expert systems**, vol. 19, 2002. pp. 21-33.
- [19] ธนา ภัทรเดช. “การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีฟีสแควร์ไอดี” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
- [20] H. Ying, W. Siler and J. Buckleys “Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case” **Automatics**, vol. 26, 1990. pp. 513-520.
- [21] ไกรมน มณีศิลป์. “การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขาด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบเซลลูลาร์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## โปรแกรมภาษาวิซวลเบสิก

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
Select Case Text9
```

```
Case 0
```

```
Text1.Visible = True
```

```
Command2.Visible = True
```

```
Case 1
```

```
Text1.Visible = True
```

```
Text2.Visible = True
```

```
Command2.Visible = True
```

```
Case 2
```

```
Text1.Visible = True
```

```
Text2.Visible = True
```

```
Text3.Visible = True
```

```
Text4.Visible = True
```

```
Command2.Visible = True
```

```
Case 3
```

```
Text1.Visible = True
```

```
Text2.Visible = True
```

```
Text3.Visible = True
```

```
Text4.Visible = True
```

```
Text5.Visible = True
```

```
Text6.Visible = True
```

```
Command2.Visible = True
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case 4

Text1.Visible = True

Text2.Visible = True

Text3.Visible = True

Text4.Visible = True

Text5.Visible = True

Text6.Visible = True

Text7.Visible = True

Text8.Visible = True

Command2.Visible = True

End Select

Select Case Text18

Case 0

Text10.Visible = True

Command2.Visible = True

Case 1

Text10.Visible = True

Text11.Visible = True

Command2.Visible = True

Case 2

Text10.Visible = True

Text11.Visible = True

Text12.Visible = True

Text13.Visible = True

Command2.Visible = True

Case 3

Text10.Visible = True

Text11.Visible = True

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Command2.Visible = True
```

Case 4

```
Text10.Visible = True
Text11.Visible = True
Text12.Visible = True
Text13.Visible = True
Text14.Visible = True
Text15.Visible = True
Text16.Visible = True
Text17.Visible = True
Command2.Visible = True
End Select
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    SmithChart1.Viewsize = 1100

    SmithChart1.BaseClear
    SmithChart1.Clinestyle = Visible
    SmithChart1.Gagestyle = Visible
    SmithChart1.Impstyle = Dot

    SmithChart1.Rtblcnt = 0
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SmithChart1.Rtblmaxx = 2000

SmithChart1.Rtblr = 3

SmithChart1.Rtblcnt = 1

SmithChart1.Rtblmaxx = 2000

SmithChart1.Rtblr = 1

SmithChart1.Rtblcnt = 2

SmithChart1.Rtblmaxx = 2000

SmithChart1.Rtblr = 0.3333333333333333

SmithChart1.Xtblcnt = 0

SmithChart1.Xtblmaxr = 2000

SmithChart1.Xtblx = 4

SmithChart1.Xtblcnt = 1

SmithChart1.Xtblmaxr = 2000

SmithChart1.Xtblx = 2

SmithChart1.Xtblcnt = 2

SmithChart1.Xtblmaxr = 2000

SmithChart1.Xtblx = 1

SmithChart1.Xtblcnt = 3

SmithChart1.Xtblmaxr = 2000

SmithChart1.Xtblx = 0.5

SmithChart1.Xtblcnt = 4

SmithChart1.Xtblmaxr = 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SmithChart1.Xtblx = 0.25

SmithChart1.TextOutA 50, 0, r#, x#, "1", 50#

SmithChart1.TextOutA 0, 0, r#, x#, "0", 50#

SmithChart1.TextOutA 150, 0, r#, x#, "3", 50#

SmithChart1.TextOutA 15, 0, r#, x#, "0.3", 50#

SmithChart1.TextOutA 200000, 0, r#, x#, "inf", 50#

Dim real, s1, s2 As Integer

Dim realnew, s1new, s2new, s3 As Integer

Dim realnew2, s1new2, s2new2, s3new, s4 As Integer

Dim w As Variant

Dim jj As Variant

Dim ans As String

a = Text1

b = Text2

c = Text3

d = Text4

e = Text5

f = Text6

g = Text7

h = Text8

I = Text10

j = Text11

k = Text12

l = Text13

m = Text14

n = Text15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
o = Text16
```

```
p = Text17
```

```
ppp = 0
```

```
If Option1.Value = True Then
```

```
ppp = 1
```

```
End If
```

```
If ppp = 0 Then
```

```
c_0 = 0
```

```
c_1 = 0
```

```
c_2 = 0
```

```
c_3 = 0
```

```
c_4 = 0
```

```
w = CCur(Text19)
```

```
w_n = CCur(Text20)
```

```
w_step = CCur(Text21)
```

```
Dim cou1 As Integer
```

```
cou1 = 0
```

```
wnew = w
```

```
wn1 = w_n
```

```
Do While wnew < wn1
```

```
cou1 = cou1 + 1
```

```
wnew = wnew + w_step
```

```
Loop
```

```
For z = 0 To cou1 Step 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
w = w + CCur(w_step)
```

```
If z = 0 Then
```

```
w = w - CCur(w_step)
```

```
End If
```

```
If k = 0 And l = 0 Then
```

```
drealfirst = I
```

```
ds1first = j
```

```
c_0 = drealfirst
```

```
c_1 = ds1first
```

```
dcom_real = drealfirst
```

```
dcom_imag = ds1first * w
```

```
dresult_real = dcom_real ^ 2
```

```
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
```

```
dresult = dresult_real + dresult_imag
```

```
End If
```

```
If k <> 0 Or l <> 0 Then
```

```
dreal = I * k
```

```
ds1 = I * l + j * k
```

```
ds2 = j * l
```

```
c_0 = dreal
```

```
c_1 = ds1
```

```
c_2 = ds2
```

```
dcom_real = (-ds2 * w ^ 2) + dreal
```

```
dcom_imag = ds1 * w
```

```
dresult_real = dcom_real ^ 2
```

```
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
dresult = dresult_real + dresult_imag
```

```
End If
```

```
If m <> 0 Or n <> 0 Then
```

```
drealnew = dreal * m
```

```
ds1new = m * ds1 + n * dreal
```

```
ds2new = m * ds2 + n * ds1
```

```
ds3 = n * ds2
```

```
c_0 = drealnew
```

```
c_1 = ds1new
```

```
c_2 = ds2new
```

```
c_3 = ds3
```

```
dcom_real = (-ds2new * w ^ 2) + drealnew
```

```
dcom_imag = (-ds3 * w ^ 3) + (ds1new * w)
```

```
dresult_real = dcom_real ^ 2
```

```
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
```

```
dresult = dresult_real + dresult_imag
```

```
End If
```

```
If o <> 0 Or p <> 0 Then
```

```
drealnew2 = drealnew * o
```

```
ds1new2 = o * ds1new + p * drealnew
```

```
ds2new2 = o * ds2new + p * ds1new
```

```
ds3new = o * ds3 + p * ds2new
```

```
ds4 = p * ds3
```

```
c_0 = drealnew2
```

```
c_1 = ds1new2
```

```
c_2 = ds2new2
```

```
c_3 = ds3new
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c_4 = ds4
dcom_real = (-ds2new2 * w ^ 2) + (ds4 * w ^ 4) + drealnew2
dcom_imag = (-ds3new * w ^ 3) + (ds1new2 * w)
dresult_real = dcom_real ^ 2
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
dresult = dresult_real + dresult_imag
End If

u_0 = 0
u_1 = 0
u_2 = 0
u_3 = 0
u_4 = 0

If c = 0 And d = 0 Then
realfirst = a
slfirst = b
u_0 = realfirst
u_1 = slfirst
End If

If c <> 0 Or d <> 0 Then
real = a * c
s1 = a * d + b * c
s2 = b * d
u_0 = real
u_1 = s1
u_2 = s2
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If  $e < 0$  Or  $f < 0$  Then

$realnew = real * e$

$s1new = e * s1 + f * real$

$s2new = e * s2 + f * s1$

$s3 = f * s2$

$u_0 = realnew$

$u_1 = s1new$

$u_2 = s2new$

$u_3 = s3$

End If

If  $g < 0$  Or  $h < 0$  Then

$realnew2 = realnew * g$

$s1new2 = g * s1new + h * realnew$

$s2new2 = g * s2new + h * s1new$

$s3new = g * s3 + h * s2new$

$s4 = h * s3$

$u_0 = realnew2$

$u_1 = s1new2$

$u_2 = s2new2$

$u_3 = s3new$

$u_4 = s4$

End If

$pluss0 = c_0 + u_0$

$pluss1 = c_1 + u_1$

$pluss2 = c_2 + u_2$

$pluss3 = c_3 + u_3$

$pluss4 = c_4 + u_4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
realplus = pluss4 * w ^ 4 - pluss2 * w ^ 2 + pluss0
```

```
imagplus = -pluss3 * w ^ 3 + pluss1 * w
```

```
minuss0 = c_0 + u_0
```

```
minuss1 = c_1 + u_1
```

```
minuss2 = c_2 + u_2
```

```
minuss3 = c_3 + u_3
```

```
minuss4 = c_4 + u_4
```

```
realminus = minuss4 * w ^ 4 - minuss2 * w ^ 2 - minuss0
```

```
imagminus = -minuss3 * w ^ 3 + minuss1 * w
```

```
dividedownreal = realminus ^ 2 + imagminus ^ 2
```

```
divideupreal = realplus * realminus + imagplus * imagminus
```

```
divideupimag = realplus * -imagminus + imagplus * realminus
```

```
smith_real = divideupreal / dividedownreal
```

```
smith_imag = divideupimag / dividedownreal
```

```
If smith_real >= 0 Then
```

```
  r# = smith_real * 50
```

```
  x# = smith_imag * 50
```

```
    If z = 0 Then
```

```
      SmithChart1.PosSet r#, x#, 2, RGB(0, 255, 0), 50#
```

```
      SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
```

```
    End If
```

```
SmithChart1.MoveTo r#, x#, RGB(0, 0, 255), Solid
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If
If smith_real < 0 Then
r# = -smith_real * 50
x# = -smith_imag * 50
    If z = 0 Then
        SmithChart1.PosSet r#, x#, 2, RGB(0, 255, 0), 50#
        SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
    End If
SmithChart1.MoveTo r#, x#, RGB(0, 255, 0), Solid
SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If
Next z
End If
If ppp = 1 Then
c_0 = 0
c_1 = 0
c_2 = 0
c_3 = 0
c_4 = 0

w = CCur(Text19)
w_n = CCur(Text20)
w_step = CCur(Text21)
Dim cou As Integer
cou = 0
wnew = w
wn1 = w_n

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Do While  $w_{new} < w_{n1}$

$cou = cou + 1$

$w_{new} = w_{new} + w\_step$

Loop

For  $z = 0$  To  $cou$  Step 1

$w = w + CCur(w\_step)$

If  $z = 0$  Then

$w = w - CCur(w\_step)$

End If

If  $k = 0$  And  $l = 0$  Then

$drealfirst = I$

$dsifirst = j$

$c\_0 = drealfirst$

$c\_1 = dsifirst$

$ans = dsifirst \& "s+" \& drealfirst$

$Text18 = ans$

$dcom\_real = drealfirst$

$dcom\_imag = dsifirst * w$

$dresult\_real = dcom\_real ^ 2$

$dresult\_imag = dcom\_imag ^ 2$

$dresult = dresult\_real + dresult\_imag$

End If

If  $k \neq 0$  Or  $l \neq 0$  Then

$dreal = I * k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ds1 = I * 1 + j * k
ds2 = j * 1
c_0 = dreal
c_1 = ds1
c_2 = ds2
ans = ds2 & "s^2+" & ds1 & "s+" & dreal

```

```

dcom_real = (-ds2 * w ^ 2) + dreal
dcom_imag = ds1 * w

```

```

dresult_real = dcom_real ^ 2
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
dresult = dresult_real + dresult_imag

```

```
End If
```

```
If m <> 0 Or n <> 0 Then
```

```

drealnew = dreal * m
ds1new = m * ds1 + n * dreal
ds2new = m * ds2 + n * ds1

```

```

ds3 = n * ds2
c_0 = drealnew
c_1 = ds1new
c_2 = ds2new
c_3 = ds3

```

```
dcom_real = (-ds2new * w ^ 2) + drealnew
```

```
dcom_imag = (-ds3 * w ^ 3) + (ds1new * w)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

dresult_real = dcom_real ^ 2
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
dresult = dresult_real + dresult_imag

```

```
End If
```

```
If o <> 0 Or p <> 0 Then
```

```

drealnew2 = drealnew * o
ds1new2 = o * ds1new + p * drealnew
ds2new2 = o * ds2new + p * ds1new
ds3new = o * ds3 + p * ds2new
ds4 = p * ds3
c_0 = drealnew2
c_1 = ds1new2
c_2 = ds2new2
c_3 = ds3new
c_4 = ds4

dcom_real = (-ds2new2 * w ^ 2) + (ds4 * w ^ 4) + drealnew2
dcom_imag = (-ds3new * w ^ 3) + (ds1new2 * w)

dresult_real = dcom_real ^ 2
dresult_imag = dcom_imag ^ 2
dresult = dresult_real + dresult_imag

```

```
End If
```

```
If c = 0 And d = 0 Then
```

```
realfirst = 2 * a
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

s1first = 2 * b
End If
If c <> 0 Or d <> 0 Then
real = 2 * a * c
s1 = 2 * (a * d + b * c)
s2 = 2 * (b * d)
End If
If e <> 0 Or f <> 0 Then
realnew = real * e
s1new = e * s1 + f * real
s2new = e * s2 + f * s1
s3 = f * s2
End If
If g <> 0 Or h <> 0 Then
realnew2 = realnew * g
s1new2 = g * s1new + h * realnew
s2new2 = g * s2new + h * s1new
s3new = g * s3 + h * s2new
s4 = h * s3
End If
If c = 0 And d = 0 Then
p_real = realfirst + c_0
p_s1 = s1first + c_1
p_s2 = c_2
p_s3 = c_3
p_s4 = c_4
End If
If c <> 0 Or d <> 0 Then
p_real = real + c_0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

p_s1 = s1 + c_1
p_s2 = s2 + c_2
p_s3 = c_3
p_s4 = c_4
End If

If e <> 0 Or f <> 0 Then
p_real = realnew + c_0
p_s1 = s1new + c_1
p_s2 = s2new + c_2
p_s3 = s3 + c_3
p_s4 = c_4
End If

If g <> 0 Or h <> 0 Then
p_real = realnew2 + c_0
p_s1 = s1new2 + c_1
p_s2 = s2new2 + c_2
p_s3 = s3new + c_3
p_s4 = s4 + c_4
End If

com_real = (-p_s2 * w ^ 2) + (p_s4 * w ^ 4) + p_real
com_imag = (-p_s3 * w ^ 3) + (p_s1 * w)
result_real = (com_real * dcom_real) + (com_imag * dcom_imag)
result_imag = (com_real * -dcom_imag) + (com_imag * dcom_real)
smith_real = result_real / dresult
smith_imag = result_imag / dresult

If smith_real >= 0 Then
r# = smith_real * 50
x# = smith_imag * 50

If z = 0 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SmithChart1.PosSet r#, x#, 2, RGB(0, 255, 0), 50#
SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If

SmithChart1.MoveTo r#, x#, RGB(0, 0, 255), Solid
SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If

If smith_real < 0 Then
r# = -smith_real * 50
x# = -smith_imag * 50

If z = 0 Then
SmithChart1.PosSet r#, x#, 2, RGB(0, 255, 0), 50#
SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If

SmithChart1.MoveTo r#, x#, RGB(0, 255, 0), Solid
SmithChart1.TextOutA r#, x#, 0#, 0#, "w=" & w, 50#
End If

Next z
End If
End Sub

Private Sub Command3_Click()
SmithChart1.Clear
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

International Series on Natural and Artificial Intelligence  
Volume 1

# Human and Artificial Intelligence Systems

From Control to Autonomy

Editors:

**Kazuyuki Murase**  
University of Fukui, Japan

**Lakhmi C. Jain**  
University of South Australia

**Kosuke Sekiyama**  
University of Fukui, Japan

**Toshiyuki Asakura**  
University of Fukui, Japan



Proceedings of the Fourth International Symposium on Human and Artificial Intelligence Systems

# A Fuzzy Logic Approach for Shaping Inverse Response of Robot's Emotion

**Pikulkaew Tangtisanon and Pitikhate Sooraksa**  
 Department of Information Engineering  
 Faculty of Engineering  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand  
[ktikulkaew@kmitl.ac.th](mailto:ktikulkaew@kmitl.ac.th) and [kspitikhate@kmitl.ac.th](mailto:kspitikhate@kmitl.ac.th)

**Abstract.** Today's robots are more sophisticated both in their functions and structures than past decade. However, in light of emotion expression, the development of this robotic aspect is far away from that of an actual living creature. This paper motivates a call for research in robot's emotion. In this paper, we describe a method using fuzzy control to shape inverse response signal toward to the target emotional level that the designer would like to achieve. Simulations are given to illustrate the scheme.

**Keywords:** robot, emotion, fuzzy logic, inverse response

## 1 Introduction

Research in psychology has been guided us what emotion is. As done by Feldman (2003), emotion is defined as feelings that generally have both physiological and cognitive elements and that influence behavior. Even though we have a guideline borrowed from psychology, but it is still not easy to implement emotion and integrate it into a robot. A crucial foundation along with deep understanding to bridge the gap between a robot and real life is still opened-questions.

To contribute in this area, this paper aims to illustrate a solution for shaping inverse response of robot's emotion. In this paper, four assumptions need to be declared as follows:

- Robot's emotion is designed and implemented by assigning a certain value of threshold or a set-point. For example, a level of voltage signal at 2 V or below in an emotional circuitry could be expressed as a sad level, whereas, the signal at 12 V and above could be assigned for joyful status. Figure 1 illustrates classification of emotion that can be categorized by level of voltage signals.
- Inverse response is a response that establishes the initial direction of an emotional response opposite to the final one. This could lead to confuse behaviors when this phenomenon occurs.
- Each level of emotional behavior in Assumption 1 can be implemented in the form and used the pattern of CNN implemented in the form of circuits (Arena 2002).
- Assume that a linearized model of the system in the above assumption exists.

In order to shape the inverse response described in Section 2 into the desire target emotion, we employ a fuzzy control paradigm presented in Section 3 Computer simulations for illustration of the conceptual system are given in Section 4 and Section 5 provides concluding remarks.

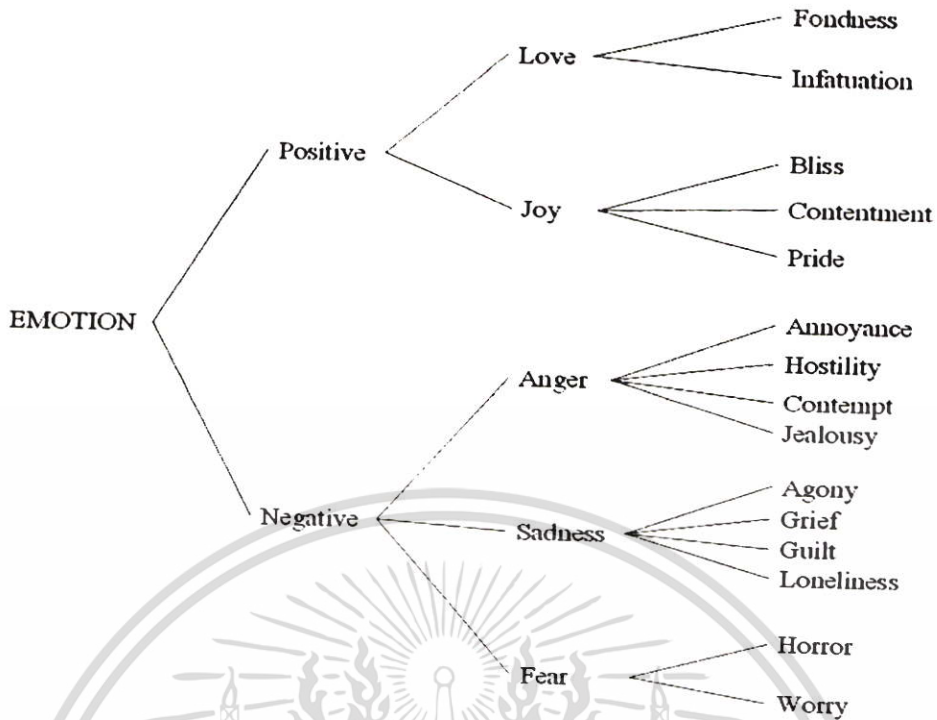


Figure 1. Robot's emotions can be categorized by imitating those of human (Fischer 1990).

## 2 Inverse Response Behaviors

As we have known that a system having at least two opposing dynamic modes of different magnitudes in the system can be led to an inverse response phenomenon (Luyben 1997). Suppose that there are two modes in the response behaviors which are the fast with smaller magnitude and the slow one having larger magnitude. The fast mode acts first but leading the initial wrong way response. Then the slower mode would eventually be superseded the effects to the right way direction. Mathematically a system whose has aforementioned property is the one has single right-half plane (RHP) zero and total number of zeros less than the number of poles. The transfer function of such systems can be described by equation (1);

$$H(s) = \frac{K(-a_0s + 1) \prod_{i=1}^m (a_i s + 1)}{\prod_{i=1}^n (b_i s + 1)} \quad (1)$$

where  $K$  is a gain with  $m$  poles,  $n$  regular-negative zeros (with  $n > m + 1$ ), and  $a_i$  and  $b_i$  are coefficients.

Analogically robot's emotion causing by two signaling modes may cause the same effects on undesired behavior in the initial phase shown an inverse response process. For example, in the case of the anger mode as the faster signaling and the joy mode as the slower one are mingled, the anger emotion leads to the corresponding behavior which can be harmful to the other near-by robots at the time before transition to the desired behavior. The unexpected results resulting from the initial and unwanted emotional status should be eliminated in this case. Next section provides a solution on how to shape the inverse response problem using method of fuzzy logic control.

### 3 Fuzzy Logic Controller

In this paper, we adopt a fuzzy proportional-integral (PI) control scheme developed and guaranteed stability (G. Chen and H. Ying 1997) for controlling emotional circuitry of the robot. For more detail on analysis and derivation of this controller, the reader is referred to G. Chen and H. Ying (1997). Notations used in Figure 2 are defined as follows:

- tracking reference or set point;  $r(nT)$ ,
- output;  $y(nT)$ ,
- tracking error signal (position);

$$e(nT) \equiv r(nT) - y(nT), \quad (2)$$

- sampling time;  $T$ ,

- average tracking error signal;

$$e_p(nT) \equiv e(nT), \quad (3)$$

- rate of change of the error signal (velocity);

$$e_v(nT) \equiv \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T}, \quad (4)$$

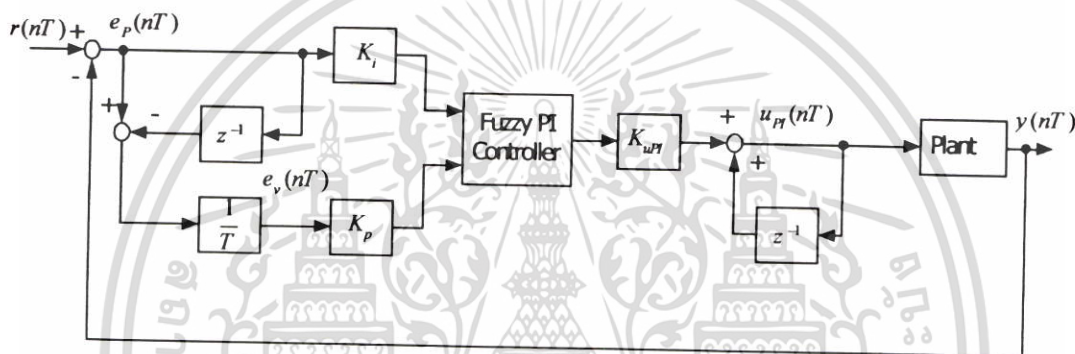


Figure 2. A Fuzzy PI Controller.

The key difference between the fuzzy PI controller and the conventional digital PI controller is that an extra fuzzy controller is in the forward path of the control incremental signal  $\Delta u_{PI}(nT)$ . Sets of the adjustable gains  $\{K_p, K_i, K_{uPI}, \text{ and } L\}$  for fuzzy PI improve the capabilities and performance compared with the fixed gains conventional digital PI controllers. The membership parameter,  $L$  is shown in Figure 3 and Figure 4. Note that the membership parameter  $L$  is not only associated with the input-output membership function, but also it has been selected as a control action shown in Figure 3. Interested reader should refer to the aforementioned literatures for detailed derivation of the standard procedure for fuzzy PD/PI controller which consists of three steps:

- fuzzification
- fuzzy logic rule base
- defuzzification.

From Figures 2, a fuzzy PI control action  $u_{PI}$ , can be written mathematically as

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT - T) + K_{uPI} \Delta u_{PI}(nT) \quad (5)$$

In equation (5)  $K_{uPI}$  is a fuzzy control gain to be determined later by the designer. Control incremental signal  $\Delta u_{PI}(nT)$  has totally nine formula based on control decision over the input combination region on the error-phase plane shown in Figure 5. In Figure 5 the reader should imagine himself that membership functions of Figure 3 are aligned in the third dimension protruded out of the paper.

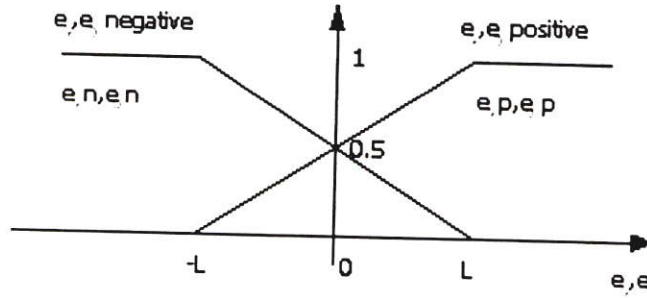


Figure 3. The input membership functions for the fuzzy logic control part.

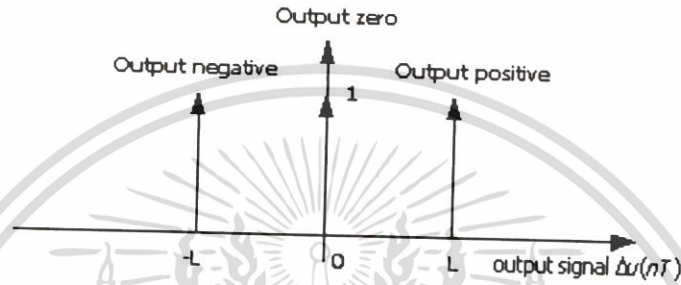


Figure 4. The output membership functions for the fuzzy logic control part.

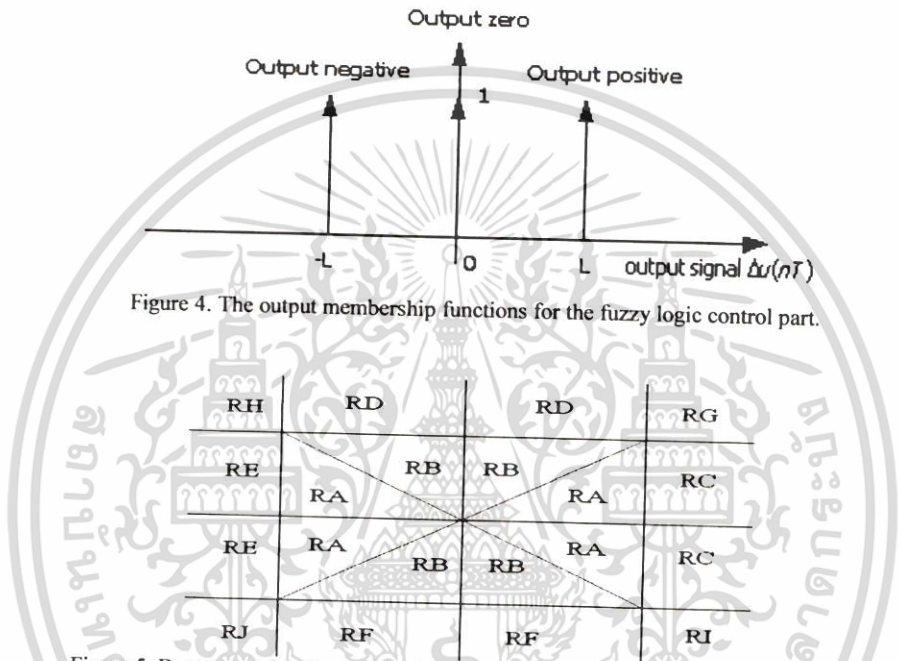


Figure 5. Decomposed regions of the input-combination values for fuzzy PI controller.

Note that incremental control input corresponding through all regions on the error-phase plan for fuzzy PI control can be described as:

$$\begin{aligned}
 \Delta u_{PI}(nT) &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_p |e_v(nT)|]} && \text{in region RA} \\
 &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)|]} && \text{in region RB} \\
 &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) - L] && \text{in region RC} \\
 &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) - L] && \text{in region RD} \\
 &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] && \text{in region RE} \\
 &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] && \text{in region RF} \\
 &= 0 && \text{in region RG,J} \\
 &= -L && \text{in region RH} \\
 &= +L && \text{in region RI}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

We then use the controller briefly reviewed in this section to control setting signal as the emotional set point in the next section.

## 4 Simulation Results

To illustrate an effectiveness of using the fuzzy logic controller described in Section 3 for an inverse response behavior described in Section 2. Here we emulate the situation that the emotion of the robot is transformed from one state to the other. We then perturb the system by using mismatch model of the nominal process. Note that the transfer function of the nominal emotional circuit may be implemented as a CNN in the form of an analog circuit. Inputs of this circuit can be current signals (Arena 2002). The transfer function can be identified by using method of mathematical identification or set of equations using law of physics. Here we use the nominal inverse response model described by a second order system where  $K=1$ ,  $a_0=3$ ,  $b_1=2$ ,  $b_2=5$ . The control parameters are  $K_p=1$ ,  $K_i=2$ ,  $K_{up_i}=1.1$  and  $L=450$ . Figure 6 shows unit step response of the nominal system. It is easy to see that the system has the inverse response property.

In case of modeling error, model parameter is equal to the nominal plant parameter. The output of 10 and 15 represented emotional levels are emulated Bliss emotion and Pride emotion in a hierarchy of Joy emotion. Figure 7 depicts that there is no overshoot and the inverse response behavior is completely eliminated from the control system.

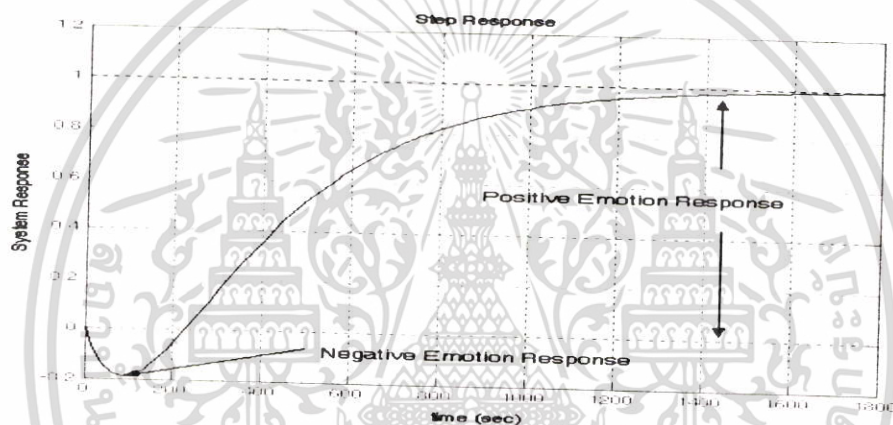


Figure 6. The unit step response of the nominal system.

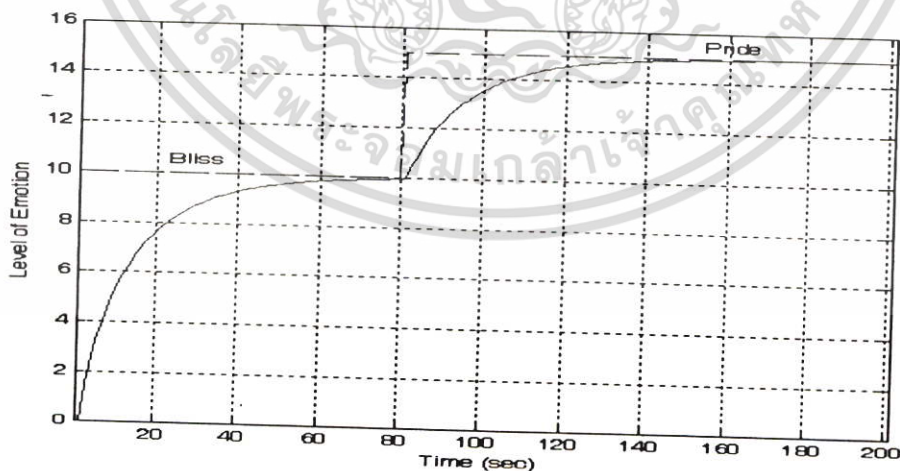


Figure 7. A case of no modeling error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Three cases of modeling error are investigated:

1. actual RHP zero is increased by 200% ( $a_0$  is changed from 3 to 9)
2. actual system pole is decreased by 80% ( $b_2$  is changed from 5 to 1)
3. actual RHP zero is increased by 100% ( $a_0$  is changed from 3 to 6) and system pole is decreased by 60% ( $b_2$  is changed from 5 to 2). According to Figure 8, the control scheme shows robust property even when the system parameters have been changed in various condition. As we can see that the tracking result has no overshoot and can eliminate the inverse response effect completely. Note that in case 2 and 3, we got the same response, this is because increasing value of a zero and decreasing value of a pole has an appropriate amount of cancellation effects.

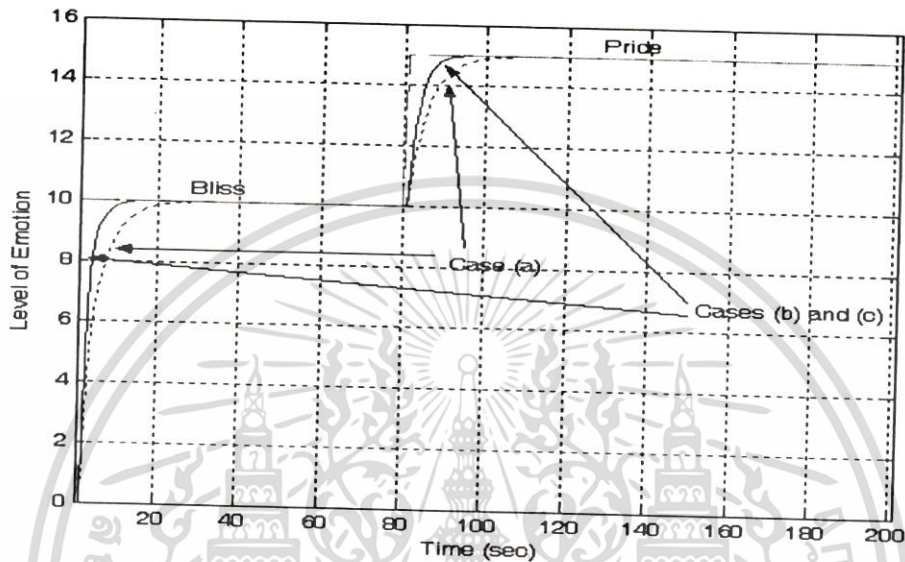


Figure 8. Three cases of modeling error for case (a), (b), and (c) correspond to the system parameter variation.

## 5 Concluding Remarks

In this paper, we focus on demonstration of emotional realization in robotic system. We first assume that emotion can be realized by using a CNN in the form of an analog circuit to generate levels of voltages corresponding to various emotions for the robot. In case of the system performs an inverse response phenomenon, a fuzzy logic used here which is fuzzy PI control scheme can be employed to cope with the encountered situation. Computer simulation has demonstrated how we realize emotion tracking while eliminating undesired inverse responds. Satisfactory results are achieved based on this control scheme with robustness. Implementation and further investigation are encouraged and needed to be carried out for future research.

## 6 References

- Arena, P. and Fortuna, L. (2002), "Analog cellular locomotion control of hexapod robots," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, pp. 21 - 36.
- Feldman, R. S. (2003), *Essentials of Understanding Psychology*, 5th ed., Mc Graw Hill.
- Fischer, K. W., Shaver, P.R., & Carnichan, P. (1990), "How emotions develop and how they organize development," *Cognition and Emotion*, No. 4, pp. 81-127.
- G. Chen and H. Ying (1997), "BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control systems," *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, vol. 5, pp. 3-21.
- Luyben, W. L., and Luyben, M. L. (1997), *Essentials of Process Control*, McGraw Hill.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวพิกุลแก้ว ตังติสานนท์ เกิดวันที่ 29 กรกฎาคม 2525 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวិชากรรมศาสตร์บัณฑิต (สารสนเทศ) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้