การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี

IMPLEMENTATION OF FUZZY P^2ID CONTROLLER

ธนา ภัทรเดช

THANA PATTARADEJ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-189-2

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี

IMPLEMENTATION OF FUZZY P^2ID CONTROLLER

T045886

ธนา ภัทรเดช

THANA PATTARADEJ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 45886
วัน, เดือน, ปี 19 ก.พ. 2546

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-189-2

IMPLEMENTATION OF FUZZY P^2ID CONTROLLER

THANA PATTARADEJ

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGYLADKRABANG
2003

ISBN 974-324-189-2

COPYRIGHT 2003
SCHOOL OF GRADUATE STUDUIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี

IMPLEMENTATION OF FUZZY P^2ID CONTROLLER

ชื่อนักศึกษา นายธนา ภัทรเดช

รหัสประจำตัว 43061136

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ปิติเขต สู้รักษา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		**ลายมือชื่อ**
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
ผศ.นภพินทุ์	อนันตรศิริชัย	
ผศ.อุทัย	ศรีธีระวิโรจน์	
รศ.ดร.จงกล	งามวิวิทย์	
ผศ.ดร.ปิติเขต	สู้รักษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 ธันวาคม 2545 เวลา 10.30-12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-401)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัตชู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....13.....**เดือน**.....มกราคม.....**พ.ศ.**.....2546.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี
นักศึกษา	นายธนา ภัทรเดช
รหัสประจำตัว	43061136
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2546
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ปิติเขต สู้รักษา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี ซึ่งตัวควบคุมที่นำเสนอนี้เป็นตัวควบคุมแบบระบบไฮบริจด์ที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ และตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีโดยตัวควบคุมทั้งสองนี้มีการปรับเปลี่ยนเกนแบบอัตโนมัติ (Automatic Gain Control, AGC) การสลับการควบคุมทำโดยตัวเลือก (Selector) และการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบมานี้ได้ทำการทดลองกับการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Time-varying loads) และการทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีซึ่งทำการทดลองควบคู่ไปกับการควบคุมแบบพีไอดี ผลที่ได้จากการทดลองทั้งสองนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ออกแบบให้เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งแทนตัวควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิม

Thesis Title	Implementation of Fuzzy P^2ID Controller
Student	Mr. Thana Pattaradej
Student ID.	43061136
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

This thesis presents the design and implement action of the fuzzy P^2ID controller. This controller is a hybrid controller that consists of the fuzzy PI controller and the fuzzy PD controller. Both of those subsystems have Automatic gain control (AGC). A control scheme is selected to perform by a selector depending on the output. To validate effectiveness of the proposed control scheme, two experiments are conduced, which are testing for position control with time-varying load and for speed DC motor control. The results show that the proposed fuzzy P^2ID controller is an alternative controller besides conventional PID one.

กิตติกรรมประกาศ

การสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในวิทยานิพธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดีก็ด้วยคำแนะนำ คำปรึกษาและความกรุณาจาก ผศ. ดร. ปิติเขต สู้รักษา อาจารย์ผู้คุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ Prof. Dr. Guanrong Chen (IEEE Fellow) Chair Professor, Director of Center for Chaos Control and Synchronization, Department of Electronic Engineering City University of Hong Kong. ที่ให้โอกาสได้เดินทางไปทำงานวิจัยและกรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมฟัซซีที่เขตปกครองพิเศษฮองกงประเทศจีนเป็นระยะเวลา 6 เดือนเต็ม

ขอขอบคุณ นายภูวนาถ ดำรงพร และ นายณัฐพงษ์ จินจาคาม ที่ได้ใช้ชีวิตร่วมกันอย่างมีค่ามากมายในฮองกง ตลอด 6 เดือนเต็ม

ขอขอบคุณนางสาวนันทวดี ผอบทอง และพี่ๆ น้องๆ ปริญญาโทที่ช่วยเรียบเรียงในงานแปลเอกสารและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพระคุณ บิดา และ มารดา เป็นอย่างยิ่งที่เฝ้าเลี้ยงดู อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตั้งแต่เริ่มต้นจนสำเร็จ

ถ้าปราศจากบุคคลเหล่านี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยอวยพรความสุขสวัสดีจงมีแด่ทุกท่าน

ธนา ภัทรเดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัยวัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.3 ขั้นตอนของงานวิจัย	3
1.4 สมมติฐานเบื้องต้น	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม	4
2.1.1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี	4
2.1.2 เทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ในส่วนเอาต์พุตของระบบ	5
2.2 ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์ฟัซซี	5
2.2.1 บทนำ	5
2.2.2 ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี	5
2.2.3 การคำนวณแบบฟัซซี	6
2.2.4 คำนิยามเซตฟัซซี	6
2.2.5 การปฏิบัติการทางทฤษฎีเซตฟัซซี	6
2.2.6 ตัวแปรทางภาษาและเซตฟัซซี	8
2.2.7 ตรรกศาสตร์ฟัซซีและการหาเหตุผลมาประมาณค่า	9
2.2.8 ตัวโอเปอเรเตอร์ฟัซซิฟิเคชัน	10
2.2.9 ตัวโอเปอเรเตอร์เชื่อมประโยค	10
2.2.10 ตัวโอเปอเรเตอร์คอมโพสิท	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.11 ตัวโอเปอเรเตอร์ดิฟัซซิฟิเคชัน......11

2.2.12 ภาวะเงื่อนไขฟัซซีและกฎการควบคุมฟัซซี......11

2.2.13 ความคิดหลักของ FLC......12

บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ......16

3.1 การออกแบบจากระบบควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม......16

3.2 การทำฟัซซิฟิเคชัน......18

3.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีไอ......19

3.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีไอ......20

บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี......23

4.1 การออกแบบจากระบบควบคุมพีดีแบบดั้งเดิม......23

4.2 การทำฟัซซิฟิเคชัน......25

4.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีดี......26

4.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีดี......27

บทที่ 5 ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี......30

5.1 บทนำ......30

5.2 การออกแบบกฎการสลับและกล่องปรับเกนอัตโนมัติ......31

5.3 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์......36

บทที่ 6 ผลการทดลอง......39

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง......39

6.2 การทดลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
ขณะภาระเปลี่ยนตามเวลา......40

6.3 การทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง......46

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....................53

7.1 สรุปผลการทดลอง....................53

7.2 ข้อแนะนำในการวิจัย....................54

7.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย....................54

7.4 แนวทางการพัฒนาในอนาคต....................55

เอกสารอ้างอิง....................56

ภาคผนวก 60

ภาคผนวก ก. การหาสมการประจำพื้นที่ของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอในบทที่ 3....................61

ภาคผนวก ข. การหาสมการประจำพื้นที่ของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดีในบทที่ 4....................87

ภาคผนวก ค. การประยุกต์ใช้ฟัซซีพีสแควร์ไอดีในไมโครคอนโทรลเลอร์....................113

ภาคผนวก ง. หุ่นยนต์ MARCH

(Multi-purpose Autonomous Robust Carrier for Hospitals).....................115

ภาคผนวก จ. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์....................119

ประวัติผู้เขียน....................142

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 กฎของระบบฟัซซีพีไอ...20

4.1 กฎของระบบฟัซซีพีดี...26

6.1 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4...41

6.2 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4...41

6.3 ผลการทดลองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมาย
และค่าเกนในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4...42

6.4 ผลการทดลองของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายและค่าเกน
ในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4...42

6.5 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในการทดลองรูปที่ 6.5 ถึง 6.8...44

6.6 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในการทดลองรูปที่ 6.5 ถึง 6.8...44

6.7 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.10...48

6.8 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.10...48

6.9 ผลการทดลองในรูปที่ 6.10...49

6.10 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14...50

6.11 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอในรูปที่ 6.12 และ 6.14...50

6.12 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14...50

6.13 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14...50

ผ.ก.11 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 11...76

ผ.ก.12 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 12...77

ผ.ก.13 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 13...79

ผ.ก.14 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 14...80

ผ.ก.15 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 15...81

ผ.ก.16 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 16...82

ผ.ก.17 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 17...83

ผ.ก.18 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 18...84

ผ.ก.19 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 19...85

ผ.ก.20 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 20...86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ผ.ข.1 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 1....88
ผ.ข.2 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 2....89
ผ.ข.3 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 3....91
ผ.ข.4 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 4....92
ผ.ข.5 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 5....94
ผ.ข.6 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 6....95
ผ.ข.7 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 7....97
ผ.ข.8 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 8....98
ผ.ข.9 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 9....100
ผ.ข.10 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 10....101
ผ.ข.11 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 11....102
ผ.ข.12 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 12....103
ผ.ข.13 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 13....104
ผ.ข.14 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 14....105
ผ.ข.15 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 15....107
ผ.ข.16 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 16....108
ผ.ข.17 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 17....109
ผ.ข.18 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 18....110
ผ.ข.19 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 19....111
ผ.ข.20 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 20....112

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปในกระบวนการต่อเนื่อง....................................4

2.2 ไดอะแกรมของอุณหภูมิฟัซซีด้วยเซตสามตัว....................................9

2.3 ลักษณะภายนอกพื้นฐานของ FLC....................................13

2.4. ก วิธีเกณฑ์มากสุด....................................14

2.4. ข ค่ากลางของวิธีมากสุด....................................15

2.4. ค วิธีแบบหาจุดศูนย์กลางมวล....................................15

3.1 ระบบควบคุมแบบพีไอ....................................16

3.2 ระบบควบคุมแบบดิจิตอลพีไอ....................................18

3.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ....................................18

3.4 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในฟัซซีพีไอ....................................19

3.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตในฟัซซีพีไอ....................................19

3.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีไอ....................................19

3.7 แสดงพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ของระบบฟัซซีพีไอ....................................21

3.8 แสดงพื้นที่ของระบบฟัซซีพีไอ....................................22

4.1 ระบบควบคุมแบบพีดี....................................23

4.2 ระบบควบคุมแบบดิจิตอลพีดี....................................24

4.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี....................................25

4.4 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในฟัซซีพีดี....................................25

4.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตในฟัซซีพีดี....................................25

4.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีดี....................................26

4.7 แสดงพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ของระบบฟัซซีพีดี....................................28

4.8 แสดงพื้นที่ของระบบฟัซซีพีดี....................................28

5.1 แสดงสถาปัตยกรรมของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี....................................30

5.2 วิถีเอาต์พุตกับเวลา....................................32

5.3 วิถีความค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส....................................32

5.4 แนวคิดการกำหนดพลังงานการควบคุมสำหรับระบบการสลับ....................................33

5.5 การสลับการควบคุมการทำงานจากฟัซซีพีดีไปยังฟัซซีพีไอ....................................34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.6 ผลจำลองการตอสนองการควบคุมตำแหน่งตำแหน่งมอเตอร์มีภาระเปลี่ยนแปลง
ตามเวลา..37
5.7 ค่าการใช้พลังงานทางอินพุตในรูที่ 5.6..38
6.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง รูป (ก.) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
การควบคุมตำแหน่ง รูป (ข.) แสดงการจัดตั้งเครื่องมือจริงที่ใช้ในการทดลอง.....................40
6.2 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 100.............................42
6.3 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 120.............................43
6.4 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 140.............................43
6.5 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา...45
6.6 แสดงค่าสัญญาณทางเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี
ของรูปที่ 6.5..45
6.7 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา...46
6.8 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและ
ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา...46
6.9 แสดงอุปกรณ์ที่ทำการทดลองควบคุมความเร็วเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
รูป (ก.) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทางการทดลอง รูป (ข.) แสดงภาพทางกายภาพที่ใช้
ทำการทดลอง..47
6.10 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้า
กระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดี
ขณะไม่มีภาระ..48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.11 แสดงสัญญาณทางเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.10 49
6.12 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีขณะมีภาระ 2 กิโลกรัม...............51
6.13 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12.......................51
6.14 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีขณะมีภาระ 2 กิโลกรัม...............52
6.15 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.14.......................52
ผ.ก.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1...61
ผ.ก.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2...63
ผ.ก.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3...64
ผ.ก.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4...66
ผ.ก.5 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5...67
ผ.ก.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6...69
ผ.ก.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7...70
ผ.ก.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8...72
ผ.ก.9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9...73
ผ.ก.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10...75
ผ.ก.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11...76
ผ.ก.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12...77
ผ.ก.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13...78
ผ.ก.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14...79
ผ.ก.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15...81
ผ.ก.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16...82
ผ.ก.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17...83
ผ.ก.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18...84
ผ.ก.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19...85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ผ.ก.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20..86

ผ.ข.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1...87

ผ.ข.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2...89

ผ.ข.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3...90

ผ.ข.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4...92

ผ.ข.5 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5...93

ผ.ข.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6...95

ผ.ข.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7...96

ผ.ข.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8...98

ผ.ข.9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9...99

ผ.ข.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10..100

ผ.ข.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11..101

ผ.ข.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12..103

ผ.ข.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13..104

ผ.ข.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14..105

ผ.ข.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15..106

ผ.ข.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16..107

ผ.ข.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17..108

ผ.ข.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18..109

ผ.ข.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19..110

ผ.ข.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20..111

ผ.ค.1 หุ่นยนต์ MARCH II ที่ใช้ในการทดสอบ..113

ผ.ค.2 การตอบสนองต่อการหมุนในหุ่นยนต์ MARCH II...114

ผ.ง.1 โครงสร้างของ MARCH I...116

ผ.ง.2 ภาพด้านบนของMARCH I..116

ผ.ง.3 บล๊อคไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ของระบบทั้งหมดใน MARCH II............117

ผ.ง.4 แสดงหุ่นยนต์ MARCH II และคณะผู้สร้าง...118

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ตัวควบคุมที่นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางมากที่สุดในภาคอุตสาหกรรมนั้นคือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ง่ายและมีคุณสมบัติในการขจัดสิ่งรบกวนให้น้อยลงได้เป็นอย่างดี แต่เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบเชิงเส้นจึงไม่สามารถควบคุมระบบที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีนัก ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีปรับปรุงระบบควบคุมแบบต่าง ๆ มากมาย ซึ่งระบบควบคุมแบบฟัซซี (fuzzy control system) เป็นระบบหนึ่งที่สามารถใช้งานได้ทั้งแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นได้

ระบบควบคุมแบบฟัซซีกำเนิดมาจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีเซตฟัซซีของศาสตราจารย์ L.A. Zadeh ในปี 1965 [1] และนำมาประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมของตัวควบคุมแบบฟัซซีครั้งแรกในปี 1974 ของ E.H. Mamdani [2] ตั้งแต่นั้นมาระบบควบคุมฟัซซี จึงมีบทบาทสำคัญในระบบทางวิศวกรรมและผลิตภัณฑ์เพื่อการบริโภค และในช่วงปี 1980 ถึง 1990 ได้มีผลิตผลทางทฤษฎีใหม่ ๆ [3,4] และการประยุกต์ใช้ใหม่ ๆ [5,6,37] ได้เกิดขึ้นมากมายอย่างต่อเนื่องตั้งแต่นั้นมา การควบคุมแบบฟัซซีนั้นมีพื้นฐานมาจากตรรกศาสตร์ฟัซซีที่กำหนดวิธีที่นำข้อมูลมาเป็นพื้นฐานของเหตุผล การควบคุมจะถูกนำเสนอด้วยภาษาตามความเข้าใจของมนุษย์ในกฎถ้า-แล้ว โดยตัวควบคุมจะนำข้อมูลอินพุตมาผ่านขั้นตอนตามกระบวนการวินิจฉัยตามกฎอ้างอิงที่วางไว้แล้วนำมาสร้างข้อมูลเอาต์พุตที่ถูกต้องในขั้นตอนสุดท้าย

สิ่งที่ทำให้ระบบฟัซซีได้รับความนิยมก็คือ เป็นระบบที่ยืดหยุ่นได้ดีและเป็นระบบที่มีขั้นตอนการทำที่ง่ายไม่ว่าจะเป็นส่วนของฟัซซีฟิเคชัน, การกำหนดกฎ แม้ว่าการทำดีฟัซซีฟิเคชันอาจแตกต่างกันออกไป [7] ด้วยเซตของฟัซซีสามารถนำมาจัดรูปแบบและตรวจสอบได้อย่างง่าย [8] จึงเป็นที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้หลายรูปแบบเช่นใช้ร่วมกับวิธีการควบคุมแบบคงทน [9] ปัญญาประดิษฐ์เครือข่ายประสาทเทียม ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีนี้ โดยทั่วไปไม่ต้องการแบบจำลองระบบที่ถูกต้องในการออกแบบตัวควบคุม

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซีได้แก่ [10] Cela และ Hamam มีการนำการควบคุมคงทนแบบฟัซซีมาใช้ในการค้นหาเส้นทางของหุ่นยนต์ [11] Liu และ Lewis ได้ประยุกต์ตรรกศาสตร์ฟัซซีในการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบอ่อนตัว [12] [13] Neyer และ Gorez ได้ปรับเปลี่ยนยุทธศาสตร์การควบคุมที่ใช้แบบจำลองฟัซซีเป็นพื้นฐาน [14] Jamshidi และคณะ ได้นำการควบคุมแบบฟัซซีที่เป็นลำดับชั้นมาใช้ [16] [15] Segino และ Nuhida [17] ได้นำ

ตรรกศาสตร์ฟัซซีมาใช้ควบคุมรถยนต์ให้วิ่งไปตามทางโค้งมุมฉาก Zhang [18] ได้ประยุกต์การควบคุมแบบฟัซซีในระบบหุ่นยนต์อัตโนมัติและ Pham [19] ได้ประยุกต์เทคนิคการจำลองฟัซซีแบบไดนามิกส์ [20] ใช้ในการเทียบท่าของเรือ แล้วนำมาใช้ในแขนหุ่นยนต์หลายข้อต่อ [21] Tang และ Chen ได้ประยุกต์ตัวควบคุมความทนทานแบบฟัซซีพีไอในการแก้ปัญหาค้นหาเส้นทางของแขนหุ่นยนต์ด้วยความไม่แน่นอนที่สูงขึ้นของค่าพารามิเตอร์หลาย ๆ ค่า [22] Upadhyaya และ Chen ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีซึ่งใช้สมการกำลังสองในแนวเส้นตรง (LQ) ในแขนหุ่นยนต์ที่ไม่แน่นอน [23] และยังได้มีการออกแบบและสร้างตัวควบคุมที่มีพื้นฐานจาก ฟัซซีพีดี และ ฟัซซีพีไอ ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยภาระแบบสถิต(static load) [24] และตัวควบคุมฟัซซีแบบพีดีนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีกับเครื่องที่เป็นระบบเซอร์โว [30,31] ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีและประยุกต์ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ด้วยภาระที่แปรผันไปตามเวลาซึ่งทำให้เกิดค่าไม่แน่นอนขึ้น

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีได้กล่าวไว้ใน [25] แม้ว่าผลดีและประสบความสำเร็จแต่ยังต้องการปรับปรุง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจำนวนของอินพุตมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อจำนวนของอินพุตของระบบฟัซซีเพิ่มขึ้น [38] มิติของกฎพื้นฐานก็จะเพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกัน ดังนั้นการรักษากฎพื้นฐานจึงใช้เวลามากขึ้น

ในการออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี [42] ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้อาจจะแตกต่างจากตัวควบคุมฟัซซีโดยทั่วไปหรือแบบพีไอดี ตัวอื่น ๆ โดยมีสิ่งต่าง ๆ ต่อไปนี้ [32-36]

1) การออกแบบนี้ได้อนุรักษ์โครงสร้างเชิงเส้นเดิมของตัวควบคุมแบบพีไอและพีดี แต่มีเกนที่ไม่คงที่อยู่คือเกนพีไอดีที่เป็นฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้นขึ้นกับสัญญาณอินพุต ซึ่งมีความสามารถในการปรับแต่งตัวเองในการแสดงผลเส้นทางสู่ค่าเป้าหมาย นอกจากนั้นเกนฟัซซีที่เปลี่ยนแปลงได้เหล่านี้ทำให้ตัวควบคุมฟัซซี มีความทนทาน ที่มีเวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและมีค่าพุ่งเกินน้อยลง

2) การออกแบบตัวควบคุมอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เที่ยงตรงของตัวควบคุมฟัซซี พีสแควร์ไอดีแบบดิจิตอล ซึ่งได้มาจากกฎการควบคุมฟัซซี

3) ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเป็นฟังก์ชันสามเหลี่ยมแบบง่าย ๆ ที่มีกฎถ้า-แล้ว เพียง 4 ข้อ

4) ผลของกระบวนการควบคุมแบบมาตรฐานฟัซซีคือการทำ ฟัซซิฟาย, การกำหนดกฎ และ ดีฟัซซิฟาย ได้ผลเป็นเซตของสูตรการควบคุม ดังนั้น จึงไม่จำเป็นที่จะใช้กระบวนการเลือกค่าจากตารางกฎ (fuzzification-rule-defuzzification)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อปรับปรุงระบบควบคุมที่สามารถใช้งานได้จริงและเป็นทางเลือกใหม่ ในการประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม

2) ประยุกต์รวมระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี และฟัซซีพีไอ มาทำงานเป็นแบบไฮบริดจ์เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) นำระบบที่ออกแบบมาทดลองจริง โดยการทดลองประกอบไปด้วย การควบคุมตำแหน่งของดีซีมอเตอร์โดยมีภาระเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา และควบคุมความเร็วของดีซีเซอร์โวมอเตอร์

2) ทำการทดลองจากระบบควบคุมที่ออกแบบและทดลองควบคู่ไปกับระบบพีไอดีดั้งเดิม

1.4 ขั้นตอนของงานวิจัย

1) ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2) ศึกษาเอกสารและข้อมูลที่รวบรวมได้

3) ออกแบบระบบควบคุม และเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

4) ทำการทดลองจากระบบควบคุมที่ออกแบบและทดลองควบคู่ไปกับระบบพีไอดีดั้งเดิม

5) สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 สมมติฐานเบื้องต้น

1) คุณสมบัติฟัซซีพีดี จะมีช่วงเวลาขึ้น (rise time) เข้าหาเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว

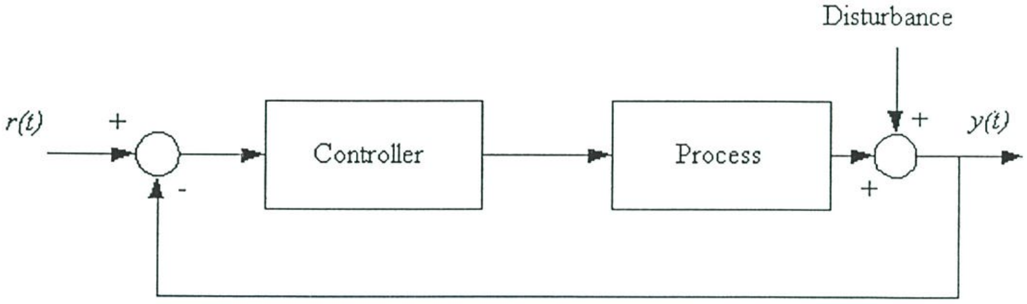
2) คุณสมบัติของฟัซซีพีไอจะมีช่วงเวลาเข้าที่ (settle time) ได้ดี

3) เมื่อนำคุณสมบัติของระบบทั้งสองมาทำงานรวมกันโดยผ่านการเลือกช่วงเวลาการใช้งาน (ระบบไฮบริดจ์) จะทำให้ระบบมีความสามารถทั้งใน (1) และ (2)

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวควบคุมแบบดั้งเดิม

ตัวควบคุมแบบป้อนกลับได้ออกแบบมาเพื่อจัดการกับเอาต์พุตของระบบที่ต้องการความถูกต้องมากขึ้น และถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในเชิงอุตสาหกรรมและติดตามเป้าหมาย รูปที่ 2.1 แสดง ระบบควบคุมป้อนกลับ



รูปที่ 2.1 ตัวควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไปในกระบวนการต่อเนื่อง

2.1.1 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่นิยมใช้ในกระบวนการเชิงอุตสาหกรรม โดยใช้ค่าความผิดพลาดค่าอินทิกรัลของค่าผิดพลาด และอนุพันธ์ของสัญญาณค่าผิดพลาดมาใช้ในการควบคุม ค่าปริมาณทั้งสามค่านี้จะนำมาคูณกับค่าคงเพื่อปรับแต่ง แล้วนำค่ามารวมกันเป็นเอาต์พุตของตัวควบคุม ($u_{pid}(t)$) ดังแสดงในสมการที่ 2.1 โดยในสมการนี้เกนพี (K_p) เป็นค่าคงที่ในการปรับแต่งในส่วนของปฏิภาค เกนไอ (K_i) เป็นค่าคงที่ในการปรับแต่งในส่วนของอินทิกรัล เกนดี (K_d) เป็นค่าคงที่ในการปรับแต่งในส่วนของการอนุพันธ์ ค่าความผิดพลาด ($e(t)$) เป็นค่าที่แตกต่างกันระหว่างค่าเป้าหมาย ($r(t)$) และค่าตัวแปรของกระบวนการ ($y(t)$) ณ เวลา t ถ้าค่าผิดพลาดมีค่ามาก หรือ ค้างอยู่ ณ เวลาหนึ่ง หรือ เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ตัวควบคุมจะให้ค่าเอาต์พุตออกมามาก ในทางกลับกันหากค่าตัวแปรกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายในเวลาหนึ่ง เกนควบคุมก็จะคงค่าไว้โดยการปรับแต่งจนกระทั่งได้เอาต์พุตของระบบตามต้องการ

$$u_{pid}(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot (\int e(t)dt) + K_d \cdot (\frac{d}{dt}e(t)) \qquad (2.1)$$

สมการ 2.1 จากอัลกอริทึมพีไอดีทั้งสองรูปแบบนี้จะได้ค่าเอาต์พุต ($u_{pid}(t)$) ที่ตรงกับค่าล่าสุดของเป้าหมาย ($r(t)$) ตัวแปรกระบวนการ ($y(t)$) และค่าผิดพลาดระหว่างทั้งสองตัวนี้คือ $e(t)=r(t) - y(t)$

2.1.2 เทคนิคการปรับแต่งพารามิเตอร์ในส่วนเอาต์พุตของระบบ

ในการวิเคราะห์ปัญหาการปรับแต่งจะเกี่ยวข้องกันกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการที่สัมพันธ์ของตัวแปรกระบวนการต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงบวกกับค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมในครั้งก่อน ๆ ค่าสุ่มมีอิทธิพลต่อตัวแปรกระบวนการจากแหล่งจ่ายสามารถนำมารวมกันเป็นตัวแปรโหลด ($l(t)$) ดังในสมการที่ 2.2 ในแบบจำลองนี้อธิบายถึงกระบวนการที่ประกอบไปด้วยค่าเกนเค (K) ค่าคงที่เวลา (T) เวลาสิ้นสุด (d) ค่าเกนในกระบวนการแสดงถึงขนาดของตัวควบคุมที่มีผลต่อค่าตัวแปรในกระบวนการ

$$y(t) = K \cdot u_{pid}(t-d) - T(\frac{d}{dt}y(t)) + l(t) \tag{2.2}$$

สมการที่ 2.2 ค่าตัวแปรกระบวนการ $y(t)$ เป็นฟังก์ชันของค่าอนุพันธ์บวกกับค่าเอาต์พุตตัวแรกจากตัวควบคุม ($u_{pid}(t-d)$) และค่าตัวแปรโหลดแบบสุ่ม ($l(t)$) ตัวควบคุมพีไอดีสำหรับกระบวนการนี้สามารถนำมาปรับให้สอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ K ,T และ d ได้ ค่าเวลาสิ้นสุด d แสดงถึงค่าหน่วงเวลาในหลาย ๆ กระบวนการที่มีตัวตรวจจับของตัวควบคุมอยู่ สมการที่ 2.2 เป็นสมการที่ง่ายที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลาย สมการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการใด ๆ ก็ตามที่มีค่าตัวแปรที่แปรเปลี่ยนไปตามค่าพารามิเตอร์

2.2 ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์ฟัซซี

2.2.1 บทนำ

ทฤษฎีเซตฟัซซีเป็นแนวคิดทางคณิตศาสตร์ที่คิดขึ้นโดย ศาสตราจารย์ L.A. Zadeh ในปี 1965 แนวคิดนี้ช่วยปรับปรุงและขยายผลทฤษฎีเซตดั้งเดิม ในบทนี้จะทบทวนความคิดพื้นฐานของทฤษฎีเซตฟัซซีเพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีที่ใช้ในการคำนวณ ในแต่ละขั้นตอนในการสร้างตัวควบคุมตรรกศาสตร์ฟัซซี

2.2.2 ทฤษฎีตรรกศาสตร์ฟัซซี

ตรรกศาสตร์ฟัซซี [37,38] เป็นตรรกศาสตร์ที่ให้ความจริงในช่วง [0,1] ซึ่งต่างจากตรรกศาสตร์แบบดั้งเดิมที่มีค่าความจริงเพียงสองค่าคือถูกหรือผิด

2.2.3 การคำนวณแบบฟัซซี

ในการคำนวณแบบฟัซซี มีวิธีที่ใช้มากมายขึ้นอยู่กับนิยามการสร้างระบบฟัซซี เช่นใน [26] จะอ้างการคำนวณโดยอาศัยบรรทัดฐานสามเหลี่ยม (T-norms) และ บรรทัดฐานร่วม (S-norms) ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์ในการสร้างฟัซซีตัวเชื่อมแอน (and) และออ (or) สำหรับการนิยามแบบอื่น ๆ อาจดูได้จาก [27]

ในบางครั้งผู้ออกแบบระบบฟัซซีอาจจะสับสนในทางเลือกการออกแบบที่มีมากมายตามที่ทฤษฎีฟัซซีเซตได้นิยามไว้ ดังนั้นการเปรียบเทียบชั้นมูลฐานและนิยามอ้างอิงที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็น ใน [8,28] การสร้างแบบบรรทัดฐานสามเหลี่ยมและบรรทัดฐานร่วม Gupta และ Qi [29] ได้เปรียบเทียบโดยใช้โครงสร้างตัวควบคุมชนิดพีไอ (PI) ที่มีอินพุตสองตัวและเอาต์พุตหนึ่งตัว แต่การทดลองยังไม่ได้ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ระหว่างการเปรียบเทียบ อย่างน้อยตัวควบคุมควรจะถูกปรับแต่งอย่างดีก่อนที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน แต่ในการทดลองของ Chen [28] ที่เป็นการทดลองที่คล้ายกันซึ่งสามารถทำได้ดีกว่า

2.2.4 คำนิยามเซตฟัซซี

ให้ U เป็นเซตเอกภพสัมพันธ์ แสดงไว้ด้วย $\{u\}$ ซึ่งสามารถเป็นไปอย่างต่อเนื่อง U เรียกว่าสากลเอกภพ และ u แสดงถึง ส่วนทั่วไปของ U

เซตฟัซซี F ในสากลเอกภพ U อธิบายลักษณะได้ด้วยฟังก์ชันการเป็นสมาชิก μ_F ซึ่งมีค่าในช่วง [0,1] เซตฟัซซีอาจจะถูกมองเป็นหลักทั่ว ๆ ไปของแนวคิดเซตธรรมดาที่ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกมีเพียงสองค่าคือ {0,1} ดังนั้น เซตฟัซซี F ใน U อาจจะเป็นเซตคู่ลำดับของส่วนทั่วไป u และ ชั้นของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเซตฟัซซี F สามารถเขียนได้ดังนี้

$$F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U\}$$
$$F = \int_U \mu_F(u)/u \qquad (2.3)$$
$$F = \sum_{i=1}^{n} \mu_F(u_i)\,/\,u_i$$

2.2.5 การปฏิบัติการทางทฤษฎีเซตฟัซซี

เซตฟัซซีมีการปฏิบัติการที่เหมือนกันที่สามารถประยุกต์ไปสู่เซตคริส์ป ซึ่งเป็นสับเซตของเซตฟัซซี ให้ A และ B เป็นเซตฟัซซี สองตัวใน U ที่มีฟังก์ชัน μ_A และ μ_B ตามลำดับ การปฏิบัติการทฤษฎีเซตของยูเนียน (Union) อินเตอร์เซคชัน (Intersection) คอมพลีเมนท์ (Complement), โดยฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจะกำหนดความสัมพันธ์ตัวอื่น ๆ ของเซตฟัซซี

ยูเนียน (Union) : ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_{A \cup B}$ ของ ยูเนียน $A \cup B$ ไปตามจุดที่กำหนดไว้ทุก ๆ $u \in U$ โดยที่

$$\mu_{A\cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \tag{2.4}$$

อินเตอร์เซคชัน : ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก $\mu_{A\cap B}$ ของอินเตอร์เซคชัน $A \cap B$ ไปตามจุดที่กำหนดไว้ทุก ๆ $u \in U$ โดยที่

$$\mu_{A\cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \tag{2.5}$$

คอมพลีเมนท์ : ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของคอมพลีเมนท์ของเซตฟัซซี A ไปตามจุดที่กำหนดไว้ทุก ๆ $u \in U$ โดยที่

$$\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u) \tag{2.6}$$

ผลคูณคาร์ทีเซียน (Cartesian Product) : ถ้า $A_1,...,A_n$ เป็นเซตฟัซซีใน $U_1,...,U_n$ ตามลำดับ ผลคูณคาร์ทีเซียนของ $A_1,...A_n$ คือ เซตฟัซซีในช่องว่างผลคูณ $U_1 x \dots x U_n$ กับฟังก์ชันการเป็นสมาชิก

$$\mu_{A_1\times\ldots\times A_n}(u_1,u_2,\ldots,u_n) = \min\{\mu_{A_1}(u_1),\ldots,\mu_{A_n}(u_n)\}$$

หรือ (2.7)

$$\mu_{A_1\times\ldots\times A_n}(u_1,u_2,\ldots,u_n) = \mu_{A_1}(u_1).\mu_{A_2}(u_2)\ldots\mu_{A_n}(u_n)$$

ฟัซซีรีเลชัน (Fuzzy Relation) : ความสัมพันธ์ฟัซซี n-ray เป็นเซตฟัซซีใน $U_1 x \dots x U_n$ และแสดงได้ว่า

$$R_{U_1\times\ldots\times U_n} = \{((u_1,\ldots,u_n), \mu_R(u_1,\ldots,u_n)) \mid (u_1,\ldots,u_n) \in U_1 \times \ldots \times U_n\} \tag{2.8}$$

ซับสตาร์คอมโปซิชัน (Sup-Star Composition) : ถ้า R และ S เป็นความสัมพันธ์ใน $U \times V$ และ $V \times W$ ตามลำดับ ส่วนประกอบของ R และ S เป็นความสัมพันธ์ ฟัซซี ที่แสดงได้โดย $R \circ S$ และถูกกำหนดไว้ว่า

$$R \circ S = \{[(u,w), \sup_v(\mu_R(u,v) * \mu_S(v,w))], u \in U, v \in V, w \in W\} \tag{2.9}$$

ที่ * ไว้สามารถเป็นตัวโอเปอเรเตอร์ใด ๆ ก็ได้ในชั้นของเทอมสามเหลี่ยม กล่าวคือ ค่าน้อยที่สุด, ผลคูณพีชคณิต(algebraic product) บราดน์โปรดัก (bounded product) หรือ ดราสติกโปรดัก (drastic product) [28-30]

2.2.6 ตัวแปรทางภาษาและเซตฟัซซี

ตัวเลขฟัซซี (Fuzzy number): ตัวเลขฟัซซี *F* ในสากลต่อเนื่อง *U* นั่นคือ เส้นจำนวนจริง เป็นเซตฟัซซี *F* ในทางปกติและทางโค้ง ตัวอย่างเช่น ประโยชน์ของเซตฟัซซีให้พื้นฐานสำหรับวิถีระบบของการปรับตัวเลข (Manipulation)

$$\max_{u \in U} \mu_F(u) = 1, (normal)$$
$$\mu_F(\lambda u_1 + (1-\lambda)u_2) \geq \min(\mu_F(u_1), \mu_F(u_2)), (convex)$$
$$: u_1, u_2 \in U, \lambda \in [0,1]$$

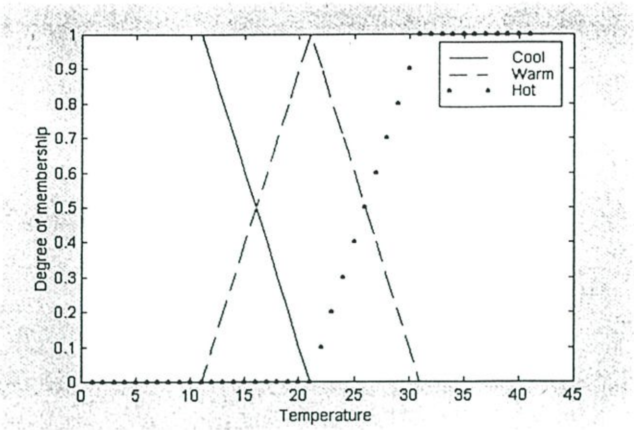
เซตฟัซซีสามารถแสดงได้เป็นตัวแปรทางภาษาได้ ตัวแปรภาษาซึ่งมีค่าเป็นเลขฟัซซีหรือมีค่าไว้กำหนดในทางภาษา

ตัวแปรทางภาษา: ถูกกำหนดลักษณะโดยห้าเท่า (*x*, *T(x)* , *U*) โดยที่ *x* คือชื่อตัวแปร *T (x)* เป็นเซตเทอมของ *x* ซึ่งเป็นเซตค่าทางภาษาของ *x* โดยแต่ละค่าเป็นตัวเลขฟัซซี ที่กำหนดไว้ใน *U*

ตัวอย่างเช่น ถ้า อุณหภูมิ (Temperature) ตีความเป็นตัวแปรทางภาษา แล้วเซตเทอม *T* (Temperature) จะได้ว่า

T(อุณหภูมิ) = {เย็น, อุ่น, ร้อน}

แต่ละเทอมใน *T* (Temperature) ถูกกำหนดลักษณะโดยเซตฟัซซี ในสากลของการบรรยาย *U=[0,40]* โดย “Cool” คือ “อุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศา” “Warm” คือ “อุณหภูมิประมาณ 20 องศา” และ “Hot” คือ “อุณหภูมิสูงกว่า 32 องศา ” เทอมเหล่านี้มีลักษณะเป็นเซตฟัซซี ซึ่งฟังก์ชันการเป็นสมาชิกได้แสดงไว้ใน รูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมของอุณหภูมิฟัซซีด้วยเซตสามตัว

2.2.7 ตรรกศาสตร์ฟัซซีและการหาเหตุผลมาประมาณค่า

ในแง่ของตรรกศาสตร์ฟัซซีและการหาเหตุผลมาประมาณค่า มีกฎในการวินิจฉัยทางการแสดงนัยทางฟัซซีที่สำคัญสองกฎ มีชื่อว่า Generalized modus ponens (GMP) และ generalized modus tollens (GMT)

อ้างหลักฐานที่ 1 : *x* เป็น *A*
อ้างหลักฐานที่ 2: ถ้า *x* เป็น *A* แล้ว *y* เป็น *B*

ผลที่ได้ : *y* เป็น *B* (GMP) (2.10)

อ้างหลักฐานที่ 1 : *y* เป็น *B*
อ้างหลักฐานที่ 2 : ถ้า *x* เป็น *A* แล้ว *y* เป็น *B*

ผลที่ได้ : *x* เป็น *A* (GMT) (2.11)

การอนุมานแสดงนัยทางฟัซซีมีพื้นฐานมาจากกฎที่ประกอบกันขึ้นของการวินิจฉัยการหาเหตุผลในการประมาณค่าที่คิดค้นขึ้นโดย Zadeh ในปี คศ. 1973 เซตฟัซซี *A* , *A'* , *B* , *B'* นำมาใช้โดยตัวแปรทางภาษา *x*, *y* แทนที่เซตคริส์ป GMP ถูกลดไปสู่ "modus ponens" เมื่อ *A=A'* และ *B=B'* ซึ่งมีสัมพันธ์ใกล้ชิดกับการอนุมานที่ขับข้อมูลไปข้างหน้าที่เป็นประโยชน์ใน FLC GMT ลดไปสู่ "modus tollens" เมื่อ *B'=not B* และ *A'=not A* ซึ่งมีสัมพันธ์ใกล้ชัดกับการอนุมานที่ขับเป้าหมายไปข้างหลังซึ่งใช้ในระบบผู้เชี่ยวชาญ โดยเฉพาะในวงการวินิจฉัยทางการแพทย์

กฎที่ประกอบกัน Sup-Star ของการอนุมาน: ถ้า *R* เป็นความสัมพันธ์ใน *U x V* และ *x* เป็นเซตฟัซซี ใน *U* แล้วกฎที่ประกอบกัน Sup-Star ของการอนุมานอ้างได้ว่า

$$y = x \circ R \tag{2.12}$$

เซตฟัซซี *y* ใน *v* ถูกพิสูจน์โดย *x* จะได้ว่า $\{x \circ R\}$ ที่ $\circ$ เป็นการประกอบกันแบบ sup-star ของ *x* และ *R* ถ้า star แทนตัวโอเปอเรเตอร์ที่น้อยที่สุด แล้วข้อกำหนดนี้จะลดกฎส่วนประกอบกันของการอนุมานของ *Zadeh*

2.2.8 ตัวโอเปอเรเตอร์ฟัซซิฟิเคชัน

ตัวโอเปอเรเตอร์ฟัซซิฟิเคชันมีผลกระทบของการเปลี่ยนรูปข้อมูลแบบคริส์ปไปสู่เซตฟัซซีโดยมีสัญลักษณ์ว่า

$$x=fuzzifier(x_o) \tag{2.13}$$

ซึ่ง x_o เป็นค่าอินพุตคริส์ปจากกระบวนการหนึ่ง *x* เป็นเซตฟัซซี และ ฟัซซีฟายเออร์ แทนตัวโอเปอเรเตอร์ฟัซซิฟิเคชัน

2.2.9 ตัวโอเปอเรเตอร์เชื่อมประโยค

ตัวควบคุมแบบตรรกศาสตร์ฟัซซี (FLC) ประกอบไปด้วยเซตของกฎการควบคุมแบบฟัซซี ที่มีสัมพันธ์กันโดยแนวคิดคู่ของการแสดงนัยแบบฟัซซีและกฎส่วนประกอบกัน sup-star ของการอนุมาน กฎการควบคุมแบบฟัซซีเหล่านี้ถูกรวมเข้าด้วยกันโดยใช้ตัวเชื่อมประโยค "*and*" และ "*also*"

ด้วยเหตุที่กฎการควบคุมแบบฟัซซีถูกแทนด้วยความสัมพันธ์กันแบบฟัซซี พฤติกรรมทั้งหมดของระบบฟัซซีถูกกำหนดลักษณะโดยความสัมพันธ์กันทางฟัซซีเหล่านี้ ในอีกแง่หนึ่ง ระบบฟัซซีสามารถถูกกำหนดลักษณะโดยความสัมพันธ์กันทางแบบเดี่ยวซึ่งเป็นการประกอบกันของความสัมพันธ์กันทางฟัซซีในเซตกฎ การรวมกันในคำถามที่มีตัวเชื่อม "*also*" แทนด้วยสัญลักษณ์ได้ว่า

$$R = also\ (R_1, R_2, \ldots, R_i, \ldots R_n) \tag{5.14}$$

โดยที่ "also" แทนตัวเชื่อมประโยค

2.2.10 ตัวโอเปอเรเตอร์คอมโพสิท

เพื่อวินิจฉัยเอาต์พุต *z* จากสถานะกระบวนการที่ให้มา *x* ,*y* และความสัมพันธ์กันแบบฟัซซี *R* กฎที่ประกอบกันแบบ sup-star ของการอนุมานถูกประยุกต์เป็น

$$z = y \circ (x \circ R) \tag{5.15}$$

โดยที่ $\circ$ เป็นการประกอบแบบ sup-star

2.2.11 ตัวโอเปอเรเตอร์ดิฟัซซิฟิเคชัน

เอาต์พุตของกระบวนการการอนุมานคือเซตฟัซซีโดยเฉพาะการกระจายการควบคุมที่เป็นไปได้ การควบคุมแบบไม่เป็นฟัซซี (คริสป์) จะนำมาใช้ในการควบคุมแบบออนไลน์ ผลที่สุดแล้ว ก็ต้องดีฟัซซีฟายการควบคุมแบบฟัซซี หรือ เอาต์พุตโดยอนุมานจากอัลกอริทึมการควบคุมฟัซซี กล่าวคือ

$$Z_o = defuzzifier(Z) \tag{5.16}$$

โดยที่ Z_o เป็นเอาต์พุตที่มีการควบคุมแบบฟัซซีและตัวดีฟัซซีฟายเป็นตัวโอเปอเรเตอร์ในการดีฟัซซีฟิเคชัน

2.2.12 ภาวะเงื่อนไขฟัซซีและกฎการควบคุมฟัซซี

พฤติกรรมพลวัตของระบบฟัซซีใน FLC ถูกกำหนดลักษณะโดยเซตของกฎการอธิบายทางภาษาที่มีพื้นฐานมาจากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญ โดยความรู้ของผู้เชี่ยวชาญจะมีรูปแบบดังนี้

ถ้า (ภาวะเงื่อนไข) แล้ว (ผลที่ตามมาที่สามารถอนุมานได้)

ด้วยเหตุที่สิ่งที่เกิดขึ้นและผลที่ตามมาของกฎ ถ้า-แล้ว เหล่านี้ประสานเข้ากันกับแนวคิดแบบฟัซซี (ในเทอมทางภาษา) โดยจะเรียกว่าภาวะเงื่อนไขฟัซซี โดยสิ่งที่เกิดขึ้นเป็นเงื่อนไขในโดเมนแอพพลิเคชัน ส่วนผลที่ตามมาเป็นกิริยาการควบคุมของระบบ กฎการควบคุมแบบฟัซซีได้ให้ทางสะดวกในการแสดงความหมายของแนวทางในการควบคุมและความรู้หลัก ตัวแปรทางภาษาหลายตัวอาจจะสัมพันธ์กับสิ่งที่เกิดขึ้นและผลสรุปของกฎเหล่านี้ ในกรณีระบบจะกลายเป็นระบบฟัซซีที่มีหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) ตัวอย่างเช่นในกรณีของระบบฟัซซีที่มีอินพุตสองตัวแต่มีเอาต์พุตเพียงอันเดียว (MISO) กฎการควบคุมแบบฟัซซีจะมีรูปแบบดังนี้

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

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

... .

....

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

โดยที่ *x, y , z* เป็นตัวแปรทางภาษาที่แสดงถึงตัวแปรสองตัวในขั้นกระบวนการและตัวแปรหนึ่งตัวในการควบคุมตามลำดับ A_i ; B_i; C_i เป็นค่าทางภาษาของตัวแปรทางภาษา *x, y* และ *z* ในการบรรยายสากล *U, V* และ *W* ตามลำดับ โดย *i=1,2,...,n* ตัวเชื่อมประโยค "also" ได้เชื่อมกฎต่าง ๆ เป็นเซตหรือเป็นกฎพื้นฐาน กฎการควบคุมแบบฟัซซี เช่น *"if (x is* A_i *and y is* B_i*) then (z is* C_i*)"* ถูกสร้างโดยความเกี่ยวพันแบบฟัซซี (ความสัมพันธ์แบบฟัซซี) R_i ซึ่งกำหนดได้ดังนี้

$$\mu_{R_i} \cong \mu_{(A_i and B_i \to C_i)}(u,v,w) = [\mu_{A_i}(u) and \mu_{B_i}(v)] \to \mu_{C_i}(w)$$

โดยที่ A_i และ B_i เป็นเซตฟัซซี $A_i \times B_i$ ใน $U \times V$

$$R_i \cong (A_i and B_i) \to C_i$$

เป็นการแสดงนัยแบบฟัซซี (ความสัมพันธ์) ใน $U \times V \times W$ และ $\longrightarrow$ เป็นเครื่องหมายที่แสดงถึงฟังก์ชันความเกี่ยวพันแบบฟัซซี

2.2.13 **ความคิดหลักของ FLC**

ในส่วนนี้จะเสนอความคิดหลักของ FLC ในรูปที่ 2.3 ได้แสดงลักษณะภายนอกพื้นฐานของ FLC ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน คือ fuzzification interface, knowledge base, decision-making logic, defuzzification inference

Fuzzification interface เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันดังนี้

1) วัดค่าตัวแปรอินพุต

2) แสดงการกะขนาดที่ย้ายช่วงค่าตัวแปรอินพุตให้ตรงกันกับการบรรยายสากล

3) แสดงฟังก์ชันฟัซซิฟิเคชันที่เปลี่ยนข้อมูลอินพุตไปเป็นค่าทางภาษาที่เหมาะสมซึ่งอาจจะมองได้ว่าเป็นป้ายฉลากติดหน้าเซตฟัซซี

Knowledge base ประกอบด้วยความรู้ของโดเมนแอพพลิเคชันและเป้าหมายในการเข้ามาควบคุม ซึ่งประกอบไปด้วย "ฐานข้อมูล" และ "กฎพื้นฐานในการควบคุมทางภาษา (ฟัซซี)"

หนึ่ง) ฐานข้อมูลจะให้ข้อกำหนดที่ต้องใช้ในกฎการควบคุมทางภาษาและการปรับข้อมูลแบบฟัซซีใน FLC

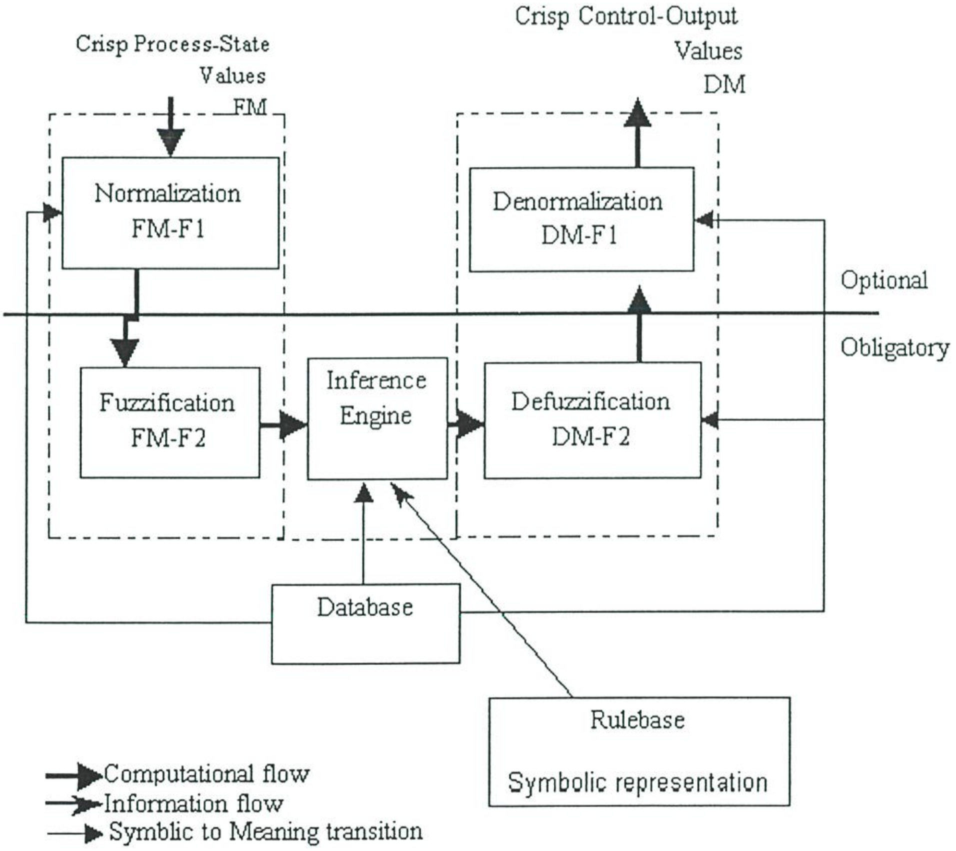
สอง) กฎพื้นฐานกำหนดลักษณะเป้าหมายในการควบคุมและนโยบายในการควบคุมของผู้เชี่ยวชาญในขอบข่ายนั้นในวิถีทางของเซตกฎการควบคุมทางภาษา

Decision-making logic เป็นแก่นของ FLC ที่มีความสามารถในการเลียนแบบการตัดสินใจของมนุษย์โดยใช้พื้นฐานแนวคิดทางฟัซซี ความเกี่ยวพันกัน และกฎการอนุมานในตรรกศาสตร์ฟัซซี

Defuzzification inference แสดงฟังก์ชันดังนี้

1) กะขนาดที่เปลี่ยนช่วงตัวแปรเอาต์พุตให้เข้ากันได้กับการบรรยายสากล

2) ดีฟัซซีฟายที่ให้การควบคุมแบบไม่เป็นฟัซซี จากการควบคุมแบบอนุมาน



รูปที่ 2.3 ลักษณะภายนอกพื้นฐานของ FLC [30]

ตัวดีฟัซซีฟายได้เปลี่ยนการควบคุมแบบฟัซซีที่อนุมานได้มาเป็นแบบคริส์ป โดยใช้กลยุทธ์ทางดีฟัซซีฟาย 3 ข้อคือ

(1) วิธีเกณฑ์มากสุด: เกณฑ์มากสุดได้สร้างจุดที่ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของกิริยาการควบคุมแบบฟัซซีไปถึงค่ามากสุด ดั่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.4.ก

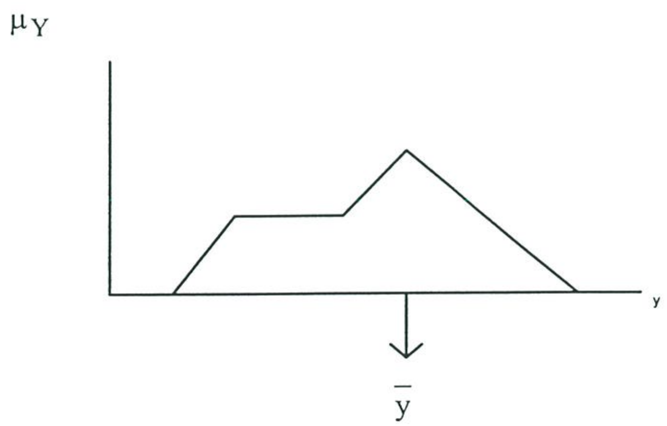
(2) ค่ากลางของวิธีมากสุด: ค่ากลางของแผนการมากสุดได้จัดการกิริยาการควบคุมซึ่งแสดงค่ากลางของกิริยาการควบคุมภายในทั้งหมด ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของการควบคุมเหล่านี้จะขึ้นไปถึงค่ามากสุด ในกรณีของแบบไม่ต่อเนื่อง กิริยาการควบคุมอาจแสดงได้ว่า

$$\bar{y} = \frac{\sum_{j=1}^{n} y_j}{n} \tag{2.17}$$

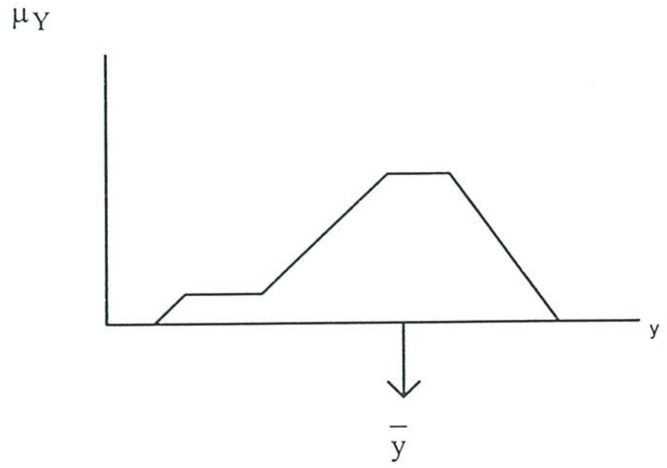
โดยที่ y_j เป็นค่าคริส์ปที่ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกได้ไปถึงค่ามากสุด และ n เป็นจำนวนค่าคริส์ป ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.4.ข

(3) วิธีหาจุดศูนย์กลางโน้มถ่วงหรือศูนย์กลางมวล: แผนการแบบกลางได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวางได้จัดการศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของพื้นที่ที่เกี่ยวพันกับเส้นโค้งฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4.ค

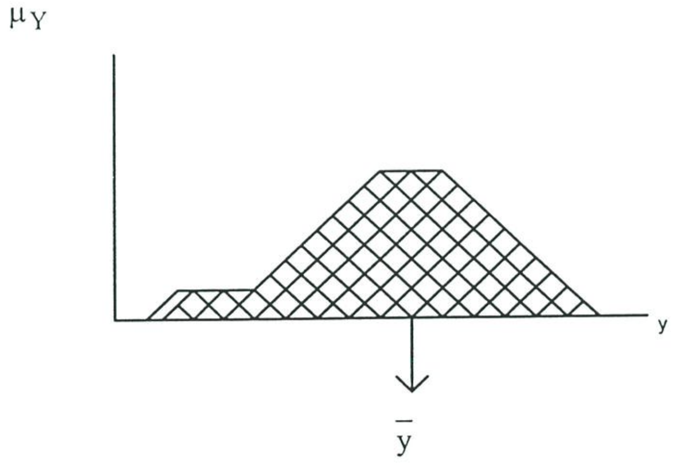
$$\bar{y} = \frac{\int \mu_Y(y).y dy}{\int \mu_Y(y) dy} \tag{2.18}$$



รูปที่ 2.4.ก วิธีเกณฑ์มากสุด



รูปที่ 2.4.ข ค่ากลางของวิธีมากสุด

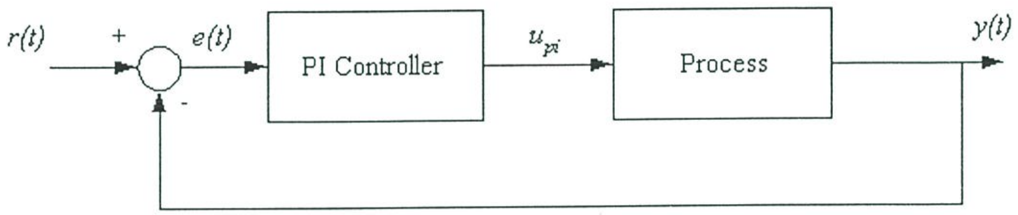


รูปที่ 2.4.ค วิธีแบบหาจุดศูนย์กลางมวล

บทที่ 3
การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างฟัซซีพีไอ และเทคนิคการออกแบบฟัซซีพีไอ การทำฟัซซิฟิเคชัน กฎควบคุม ดีฟัซซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมพีไอแบบดั้งเดิมให้เป็นระบบดิจิตอลพีไอแล้วทำการเพิ่มระบบฟัซซีเข้าไป ซึ่งระบบฟัซซีนี้จะยังคงอนุรักษ์โครงสร้างเดิมของระบบพีไอแบบดั้งเดิมไว้

3.1 การออกแบบจากระบบควบคุมพีไอแบบดั้งเดิม



รูปที่3.1 ระบบควบคุมแบบพีไอ

จากพื้นฐานโครงสร้างของระบบพีไอแบบดั้งเดิม รูปที่ 3.1 จะได้สมการเอาต์พุตของระบบเป็นรูปโดเมนเวลา (time domain) ดัง

$$u_{pi}(t) = K_p \; e(t) + K_i \; \int e(t)dt \tag{3.1}$$

โดยที่ K_p และ K_i เป็นเกน

e(t) เป็น ค่าสัญญาณผิดพลาด

เปลี่ยนเป็นรูปเอสโดเมน(s domain) จะได้

$$U_{PI}(s) = K_p \; E(s) + K_i \; \frac{E(s)}{s} \tag{3.2}$$

ในสมการที่ 3.3 สามารถเปลี่ยนเป็นดิสครีท (discrete) โดยใช้สมการไบลิเนียทรานฟอร์ม (bilinear transform) $s = \frac{2}{T}\left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right]$ เมื่อ T>0 คือเวลาการสุ่ม (sampling time) จะได้ในรูปของโดเมนความถี่ซี (z-domain) ดังนี้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$U_{PI}(z) = \left(K_p - \frac{K_i T}{2} + \frac{K_i T}{1 - z^{-1}} \right) E(z) \tag{3.3}$$

กำหนดให้

$$k_p = K_p - \frac{K_i T}{2}, \qquad k_i = K_i T$$

ทำการแปลงกลับโดยอาศัยซีอินเวอร์ททรานฟอร์ม (Invert z-transform) จะได้

$$u_{pi}(nT) - u_{pi}(nT - T) = k_p[e(nT) - e(nT - T)] + k_i Te(nT)$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = k_p e_v(nT) + k_i e_p(nT)$$

เมื่อ

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{u_{pi}(nT) - u_{pi}(nT - T)}{T}$$

จะได้

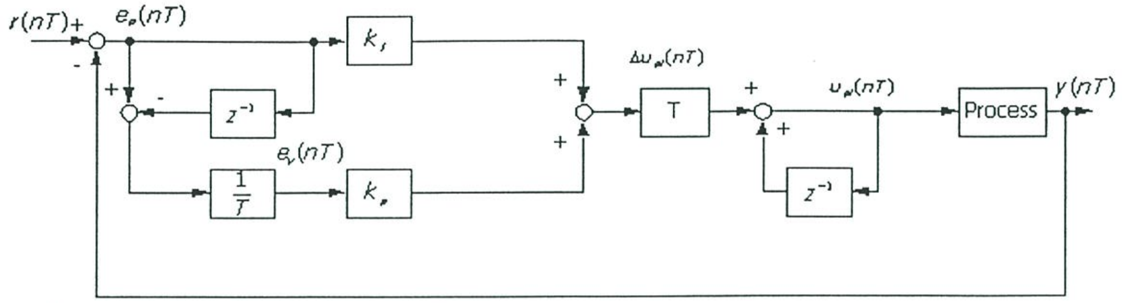
$$u_{pi}(nT) = u_{pi}(nT - T) + T\Delta u_{pi}(nT) \tag{3.4}$$

ในการออกแบบระบบฟัซซีพีไอจะทำเทอมของ $T\Delta u_{pi}(nT)$ จะเป็นเทอมของระบบฟัซซีคือ $k_{upi}\Delta u_{pi}(nT)$ จะได้

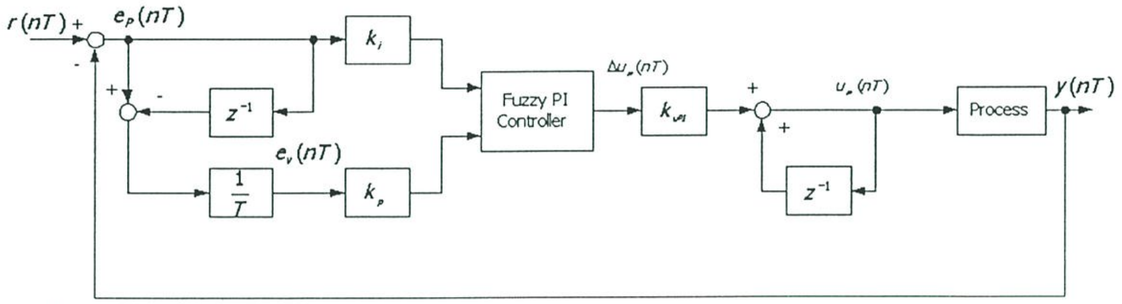
$$u_{pi}(nT) = u_{pi}(nT - T) + k_{upi}\Delta u_{pi}(nT) \tag{3.5}$$

เมื่อ k_{upi} เป็นค่าเกน

45886



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมแบบดิจิตอลพีไอ



รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ

3.2 การทำฟัซซิฟิเคชัน

ระบบฟัซซีจากรูปที่ 3.3 เป็นระบบแบบสองอินพุตที่ประกอบไปด้วยค่าสัญญาณผิดพลาด (error signal) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด (rate of change) ดังนี้

$$e_p(nT) = r(nT) - y(nT) \tag{3.6}$$

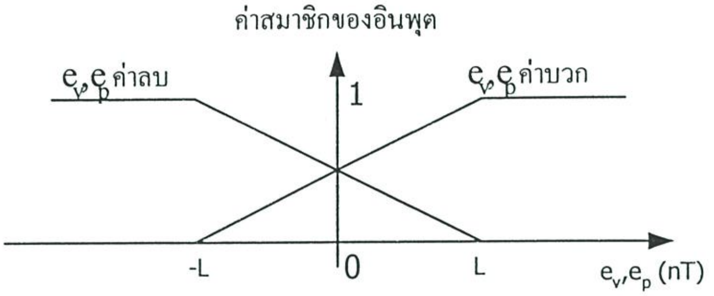
$$e_v(nT) = \dot{r}(nT) - \dot{y}(nT) \tag{3.7}$$

ในระบบฟัซซีจะได้สมการค่าสัญญาณผิดพลาดและค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาดดังนี้

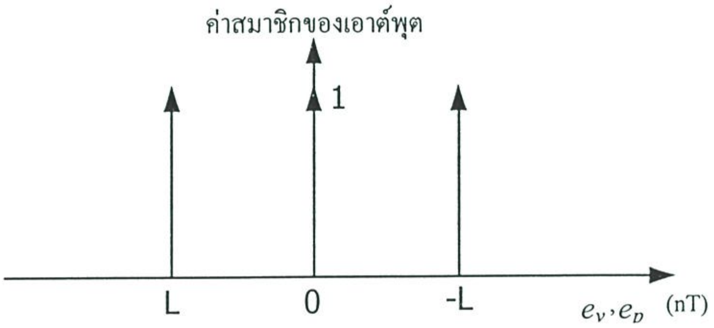
$$e_p(nT) = e(nT) \tag{3.8}$$

$$e_v(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \tag{3.9}$$

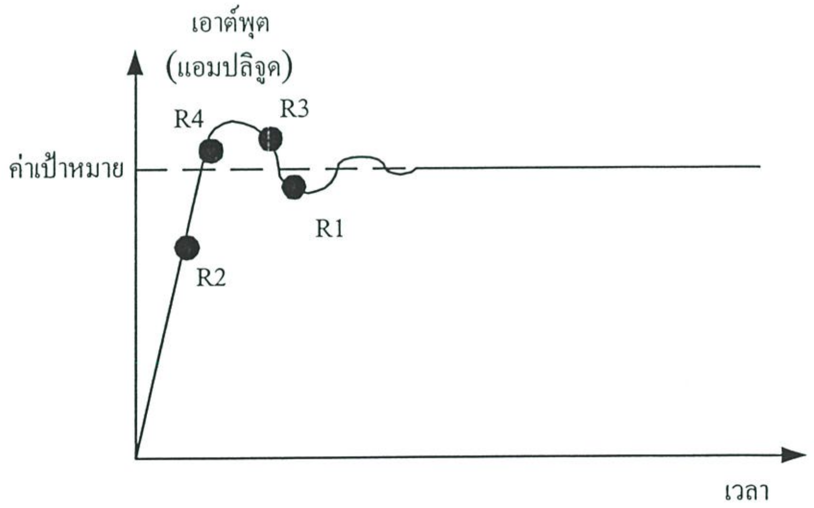
ในระบบฟัซซีพีไอที่มีสองอินพุต เพื่อเป็นการกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตและฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยกำหนดค่าคงที่ $L>0$



รูปที่ 3.4 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในฟัซซีพีไอ



รูปที่ 3.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตในฟัซซีพีไอ



รูปที่ 3.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีไอ

3.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีไอ

การกำหนดกฎของระบบฟัซซีพีไอโดยใช้ฟังก์ชันสมาชิกในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดกฎต่าง ๆ ของฟัซซีในตารางที่ 3.1 เพื่อให้เข้าใจง่ายจะทำการเลือกฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจากรูปที่ 3.5 และกำหนดกฎจากรูปที่ 3.6

ตารางที่ 3.1 กฎของระบบฟัซซีพีไอ

กฎข้อที่	e_p	e_v	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1(R1)	p	p	L
2(R2)	p	n	0
3(R3)	n	p	0
4(R4)	n	n	$-L$

ในตารางที่ 3.1 นี้ $e_p = r\text{-}y$ ดังนั้น $e_v = 0\text{-}y$ โดย

e_p คือค่าสัญญาณผิดพลาด

e_v คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

r คือค่าคงที่ของค่าเป้าหมาย

y คือเอาต์พุต

เอาต์พุตของระบบฟัซซีพีไอคือ $\Delta u_{pi}(nT)$ และ " $e_p \cdot p$ " จะหมายถึงค่าตำแหน่งสัญญาณผิดพลาดที่เป็นบวกและ " $o \cdot p$ " หมายถึงเอาต์พุตเป็นบวก ในการคำนวณจากกฎในตารางที่ 3.1 จะใช้ "AND" หมายถึง ตรรกกศาสตร์ซาเดแอน (Zadeh's logical "AND") จากกฎในตารางที่ 3.1 เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นจะอธิบายกฎต่าง ๆ จากรูปที่ 3.6 ดังนี้

กฎที่ 1 (R1) จากตารางจะพบว่า $e_p \cdot p$ คือค่าสัญญาณผิดพลาดทางบวกและ $e_v \cdot p$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาดทางบวก โดยที่ r>y เป็นการควบคุมโดยการกลับทิศของสัญญาณ

กฎที่ 2 (R2) จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณอยู่ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เป็นช่วงระยะการไต่ขึ้นของระบบ ในกฎข้อที่ 2 นี้จะไม่มีการควบคุม เนื่องจากสัญญาณจะไต่เข้าหาค่าเป้าหมายตามธรรมชาติเอง

กฎที่ 3 (R3) จากรูปที่ 3.6 ทิศทางของสัญญาณจะวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมาย จึงไม่ต้องควบคุมเหมือนกฎข้อที่ 2

กฎที่ 4 (R4) เป็การควบคุมเพื่อให้สัญญาณกลับทิศ จากตารางที่ 3.1 จะได้ $e_p \cdot n$ และ $e_v \cdot n$ จะมีเอาต์พุต $\Delta u_{pi}(nT)$ เป็นค่าลบเนื่องจาก $r<y$

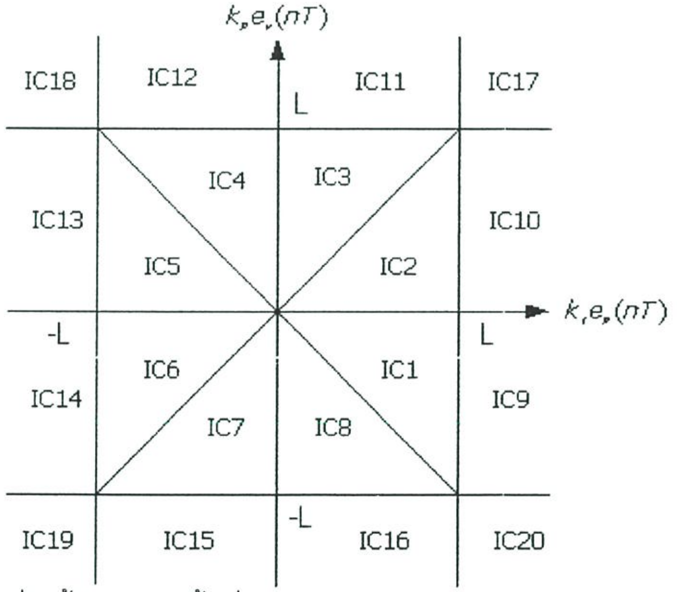
3.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีไอ

การทำดีฟัซซิฟิเคชันนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่จะนำเสนอนี้จะใช้วิธีค่าเฉลี่ยกลาง " center of mass" หลังจากที่ผ่านขบวนการนี้แล้วจะได้ค่าตัวเลขค่าเดียวซึ่งก็คือค่าเอาต์พุตของระบบพีไอโดยมีสมการดีฟัซซิฟิเคชันดังนี้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\sum \text{สมาชิกทางอินพุต} \times \text{เอาต์พุตที่เข้าคู่กับสมาชิกทางอินพุต}}{\sum \text{สมาชิกทางอินพุต}}$$

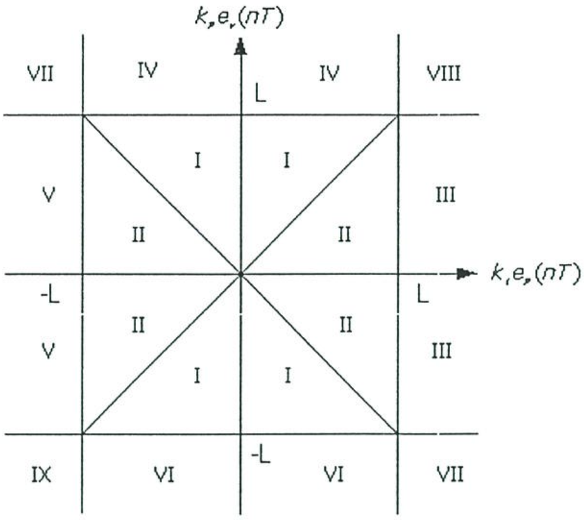
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\mu_1 u_1 + \mu_2 u_2 + \mu_3 u_3 + \mu_4 u_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4} \qquad (3.10)$$

ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอที่ออกแบบมีทั้งหมด สองอินพุตที่ประกอบไปด้วย e_p และ e_v จากกฎในตารางที่ 3.1 จะจำแนกพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ ดังรูปที่ 3.7 จากรูปจะกำหนดให้ฟังก์ชันสมาชิกของสัญญาณผิดพลาดเป็นแกนนอนคือ $k_i e_p(nT)$ และกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณผิดพลาดอยู่ในแกนตั้งคือ $k_p e_v(nT)$ ถ้าสัญญาณตกอยู่ที่เส้นแบ่งพื้นที่หรือจุดกลางระหว่างพื้นที่ ให้เลือกพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ระหว่างสัญญาณตกอยู่มาใช้



รูปที่ 3.7 แสดงพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ของระบบฟัซซีพีไอ

จากรูปที่ 3.7 จะได้สมการประจำพื้นที่ทั้งหมด 20 สมการ (การหาสมการประจำพื้นที่ทั้ง 20 พื้นที่ ดูในภาคผนวก ก.) และมีพื้นที่ที่มีสมการเหมือนกัน 9 พื้นที่และสามารถแบ่งพื้นที่ได้ใหม่ได้เป็นดังรูปที่ 3.8 ลดสมการประจำพื้นที่ได้เหลือเพียง 9 สมการดังนี้



รูปที่ 3.8 แสดงพื้นที่ของระบบฟัซซีพีไอ

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p|e_v(nT)|)}$$ ในพื้นที่ I

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i|e_p(nT)|)}$$ ในพื้นที่ II

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) + L}{2}$$ ในพื้นที่ III

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2}$$ ในพื้นที่ IV

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) - L}{2}$$ ในพื้นที่ V

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) - L}{2}$$ ในพื้นที่ VI

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0$$ ในพื้นที่ VII

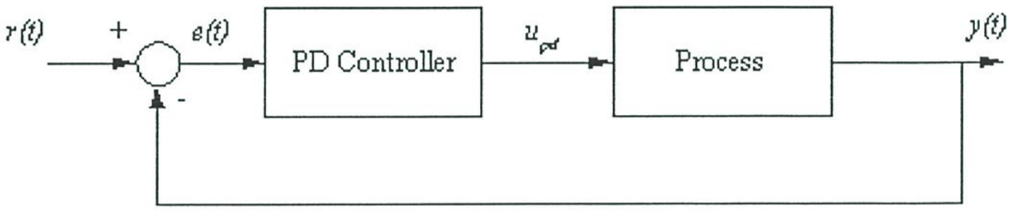
$$\Delta u_{pi}(nT) = L$$ ในพื้นที่ VIII

$$\Delta u_{pi}(nT) = -L$$ ในพื้นที่ IX

บทที่ 4
การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างฟัซซีพีดี และเทคนิคการออกแบบฟัซซีพีดี การทำฟัซซิฟิเคชันกฎควบคุม ดีฟัซซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมพีดีแบบดั้งเดิมให้เป็นระบบดิจิตอลพีดีแล้วทำการเพิ่มระบบฟัซซีเข้าไป ซึ่งระบบฟัซซีนี้จะยังคงอนุรักษ์โครงสร้างเดิมของระบบพีดีแบบดั้งเดิมไว้

4.1 การออกแบบจากระบบควบคุมพีดีแบบดั้งเดิม



รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมแบบพีดี

จากพื้นฐานโครงสร้างของระบบพีดีแบบดั้งเดิม รูปที่ 4.1 จะได้สมการเอาต์พุตของระบบได้ดังนี้

$$u_{pd} = (K_p + sK_d)E(s) \tag{4.1}$$

โดยที่ K_p และ K_d เป็นค่าเกน

E(s) เป็น ค่าสัญญาณผิดพลาด

ในสมการที่ 4.1 สามารถเปลี่ยนเป็นแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้การแปลงแบบไบลิเนียทรานฟอร์ม $s = \frac{2}{T}\left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right]$ เมื่อ *T>0* คือเวลาสุ่ม จะได้ในรูปของโดเมนความถี่ดังนี้

$$U_{PD}(z) = \left(K_p + \frac{2K_d}{T}\left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right]\right)E(Z)$$

กำหนดให้ $k_p = K_p$ และ $k_d = \frac{2}{T}K_d$ และทำการหาอินเวอร์ทซีทรานฟอร์มจะได้

$$u_{pd}(nT) + u_{pd}(nT - T) = k_p[e(nT) + e(nT - T)] + K_d[e(nT) - e(nT - T)] \quad (4.2)$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = k_p e_p(nT) + k_d e_v(nT) \quad (4.3)$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{u_{pd}(nT - T) + u_{pd}(nT - T)}{T}$$

จะได้สมการค่าผิดพลาด

$$e_p(nT) = \frac{e(nT) + e(nT - T)}{T} \quad (4.4)$$

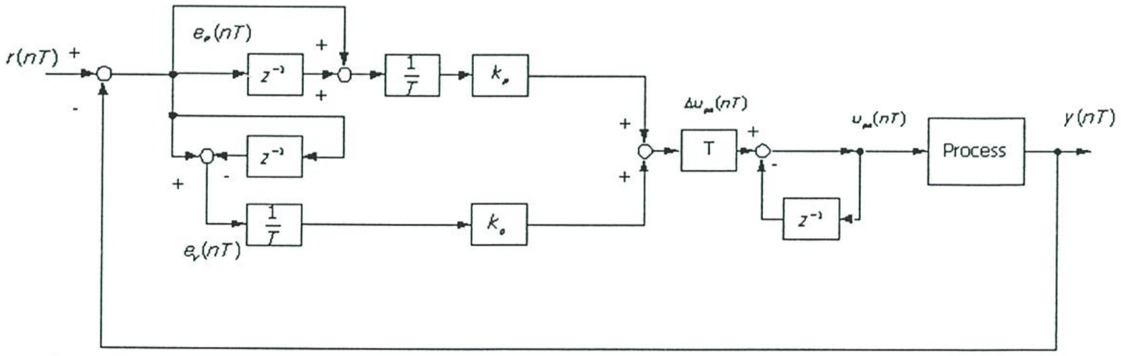
และอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาด

$$e_v(nT) = \frac{e(nT) - e(nT - T)}{T} \quad (4.5)$$

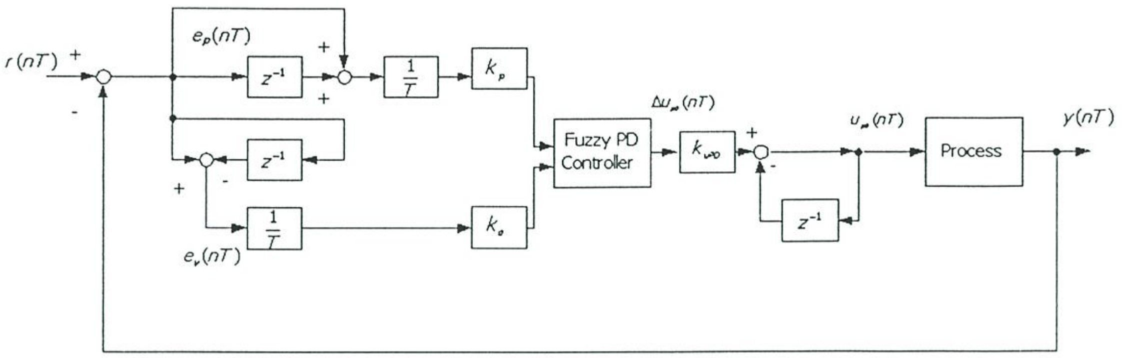
ดังนั้นจะได้

$$u_{pd}(nT) = -u_{pd}(nT - T) + k_{upd}\Delta u_{pd}(nT) \quad (4.6)$$

เมื่อ k_{upd} เป็นค่าเกน



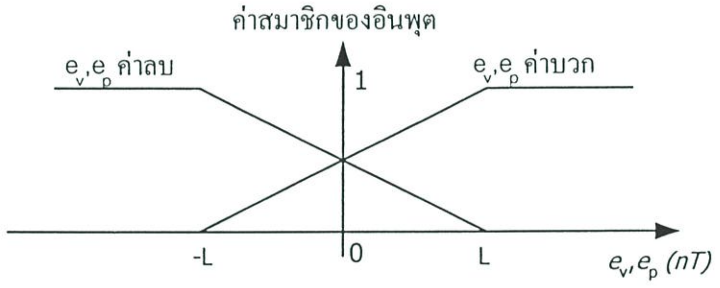
รูปที่ 4.2 ระบบควบคุมแบบดิจิตอลพีดี



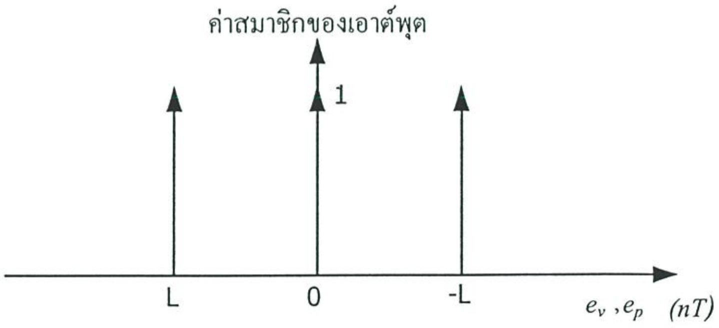
รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี

4.2 การทำฟัซซิฟิเคชัน

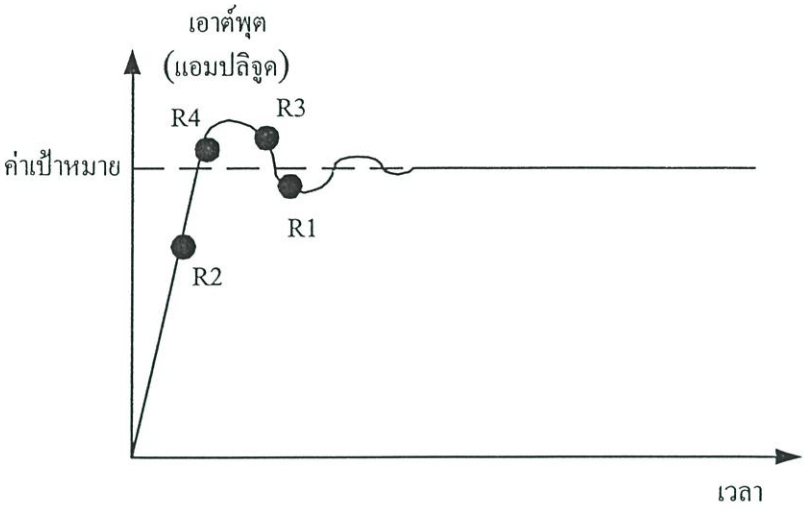
จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 สามารถเขียนสมการฟังก์ชันสมาชิกทางอินพุต และสมการฟังก์ชันสมาชิกทางเอาต์พุตได้ดังรูปที่ 4.3และ 4.4



รูปที่ 4.4 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในฟัซซีพีดี



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตในฟัซซีพีดี



รูปที่ 4.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีดี

4.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีดี

การกำหนดกฎของระบบฟัซซีพีดีโดยใช้จากฟังก์ชันสมาชิกในหัวข้อที่ 4.2 โดยกำหนดกฎต่าง ๆ ของฟัซซีในตารางที่ 4.1 เพื่อให้เข้าใจง่ายจะทำการเลือกฟังก์ชันสมาชิกของเอาต์พุตจากรูปที่ 4.5 และกำหนดกฎจากรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 กฎของระบบฟัซซีพีดี

กฎข้อที่	e_p	e_v	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1(R1)	*p*	*p*	*0*
2(R2)	*p*	*n*	*L*
3(R3)	*n*	*p*	*-L*
4(R4)	*n*	*n*	*0*

ในตารางที่ 4.1 นี้ $e_p = r\text{-}y$ ดังนั้น $e_v = 0\text{-}y$ โดยที่

e_p คือค่าสัญญาณผิดพลาด

e_v คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

r คือค่าคงที่ของค่าเป้าหมาย

y คือเอาต์พุต

เอาต์พุตของระบบฟัซซีพีดีคือ $\Delta u_{pi}(nT)$ และ " $e_p \cdot p$ " จะหมายถึงค่าตำแหน่งสัญญาณผิดพลาดที่เป็นบวกและ " $o \cdot p$ " หมายถึงเอาต์พุตเป็นบวก ในการคำนวณจากกฎในตารางที่ 4.1 จะใช้

“AND” หมายถึง ตรรกกศาสตร์ซาเดแอน (Zadeh's logical “AND”) จากกฎในตารางที่ 4.1 เพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นจะอธิบายกฎต่าง ๆ จากรูปที่ 4.6 ดังนี้

กฎที่ 1 (R1) จากตารางจะพบว่า $e_p \cdot p$ คือค่าสัญญาณผิดพลาดทางบวกและ $e_v \cdot p$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาดทางบวก โดยที่ $r>y$ ไม่ต้องควบคุมเพราะสัญญาณจะกลับทิศโดยธรรมชาติ

กฎที่ 2 (R2) จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณอยู่ในช่วงเริ่มต้นการทำงาน เป็นช่วงระยะการไต่ขึ้นของระบบ ในกฎข้อที่ 2 นี้จะมีการควบคุม เนื่องจากสัญญาณจะไต่เข้าหาค่าเป้าหมายได้เร็วยิ่งขึ้น

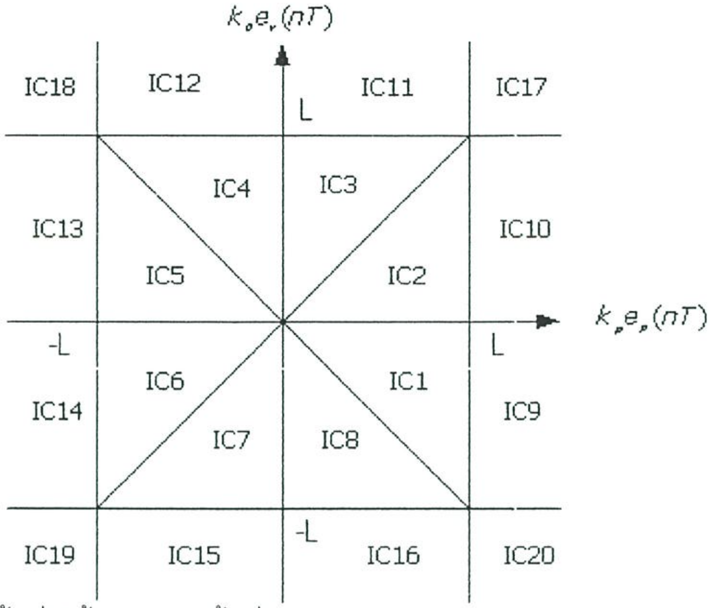
กฎที่ 3 (R3) จากรูปที่ 4.6 ทิศทางของสัญญาณจะวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมาย จึงต้องควบคุมเหมือนกฎข้อที่ 2

กฎที่ 4 (R4) สัญญาณจะกลับทิศ จากตารางที่ 4.1จะได้ $e_p \cdot n$ และ $e_v \cdot n$ จะมีเอาต์พุต $\Delta u_{pi}(nT)$ เป็นค่าลบเนื่องจาก $r<y$ จึงไม่ต้องควบคุม

4.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีดี

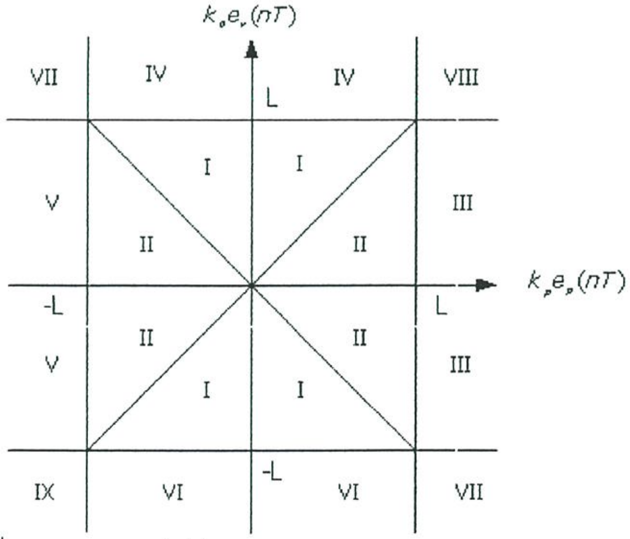
การทำดีฟัซซิฟิเคชันนั้นมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่จะนำเสนอนี้จะใช้วิธีจุดศูนย์กลางมวล หลังจากที่ผ่านขบวนการนี้แล้วจะได้ค่าตัวเลขค่าเดียวซึ่งก็คือค่าเอาต์พุตของระบบพีดี โดยทำเหมือนฟัซซีพีไอในหัวข้อ 4.4

ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดีที่ออกแบบมีทั้งหมดสองอินพุตที่ประกอบไปด้วย e_p และ e_v จากกฎในตารางที่ 4.1 จะจำแนกพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ ดังรูปที่ 4.7 จากรูปจะกำหนดให้ฟังก์ชันสมาชิกของสัญญาณผิดพลาดเป็นแกนนอนคือ $k_p e_p(nT)$ และกำหนดฟังก์ชันสมาชิกของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณผิดพลาดอยู่ในแกนตั้งคือ $k_d e_v(nT)$ ถ้าสัญญาณตกอยู่ที่เส้นแบ่งพื้นที่หรือจุดกลางระหว่างพื้นที่ ให้เลือกพื้นที่ใดก็ได้ที่อยู่ระหว่างสัญญาณตกอยู่มาใช้



รูปที่ 4.7 แสดงพื้นที่ได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ของระบบฟัซซีพีดี

จากรูปที่ 4.7 จะได้สมการประจำพื้นที่ทั้งหมด 20 สมการ (การหาสมการประจำพื้นที่ทั้ง 20 พื้นที่ ดูในภาคผนวก ข.) และมีพื้นที่ที่มีสมการเหมือนกัน 9 พื้นที่และสามารถแบ่งพื้นที่ได้ใหม่ได้เป็นดังรูปที่ 4.8 ลดสมการประจำพื้นที่ได้เหลือเพียง 9 สมการดังนี้



รูปที่ 4.8 แสดงพื้นที่ของระบบฟัซซีพีดี

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d|e_v(nT)|)}$$ ในพื้นที่ I

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) + k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_p|e_p(nT)|)}$$ ในพื้นที่ II

$$\Delta u_{pd}(nT) = -\frac{k_d e_v(nT) + L}{2}$$ ในพื้นที่ III

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) - L}{2}$$ ในพื้นที่ IV

$$\Delta u_{pd}(nT) = -\frac{k_d e_v(nT) - L}{2}$$ ในพื้นที่ V

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) + L}{2}$$ ในพื้นที่ VI

$$\Delta u_{pd}(nT) = L$$ ในพื้นที่ VII

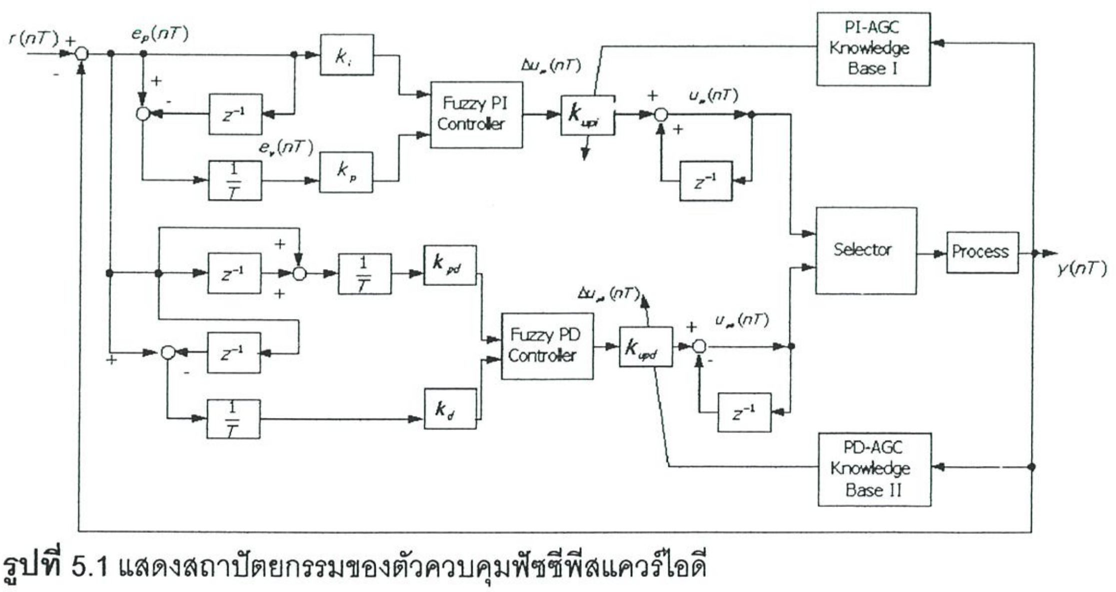
$$\Delta u_{pd}(nT) = -L$$ ในพื้นที่ VIII

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0$$ ในพื้นที่ IX

บทที่ 5
ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี

5.1 บทนำ

จากประสบการณ์ของผู้วิจัยในการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอและฟัซซีพีดีข้างต้น ฟัซซีพีดีให้การตอบสนองได้เร็วกว่าฟัซซีพีไอ ส่วนฟัซซีพีไอให้ผลที่สถานะอยู่ตัว (steady state) ได้ดีกว่า [36] จากความจริงพื้นฐานนี้ เราได้ตั้งกฎทั่วไปสำหรับการสลับการใช้ระหว่างตัวควบคุมสองตัวนี้ โดยเราเรียกกฎนี้ว่าตัวเลือก ในบทนี้ตัวเลือกจะเป็นตัวเลือกการทำงานคือตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีไว้ทำงานเริ่มต้นของกระบวนการแล้วสลับเป็นตัวควบคุมฟัซซีพีไอเมื่อกระบวนการได้ไปถึงจุดที่ตั้งไว้ในย่าน สภาวะเสถียรฟัซซีพีไอจะหยุดการทำงานถ้าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าเป้าหมาย (set point) มาก หากเอาต์พุตของกระบวนการได้ออกไปจากย่านสภาวะเสถียร ตัวอย่างเช่น ต่ำกว่า 90% ของค่าเป้าหมายฟัซซีพีดีจะทำงานอีกครั้งหนึ่ง ในทางปฏิบัติ สามารถนำมารวมและตั้งกฎการสลับได้ ด้วยเหตุนี้เราจะเรียกขบวนการควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี และจะเพิ่มการป้อนกลับภายในจากค่าอินพุตที่ผ่านเข้าไปในกล่องปรับเกนอัตโนมัติ (Automatic gain control block) เพื่อปรับค่าพาพรามิเตอร์ k_u ดังแสดงในรูปที่ 5.1 เพื่อเร่งเอาต์พุตของกระบวนการ จะเห็นได้ว่าค่าเกน k_u นำมาใช้ได้ทั้ง k_{upi} และ k_{upd} ในหัวข้อที่ 5.2 ได้อธิบายถึงการวิเคราะห์และการสังเคราะห์ของกฎการสลับและการเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับกล่องปรับเกนอัตโนมัติโดยอาศัยสเถียรภาพแบบ Bounded-Input-Bounded-Output (BIBO stability sense) สำหรับใช้คอมพิวเตอร์มาจำลองการทำงานของระบบควบคุมนี้จะ นำมาอธิบายไว้ในหัวข้อย่อย 5.3 ต่อไป



รูปที่ 5.1 แสดงสถาปัตยกรรมของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี

5.2 การออกแบบกฎการสลับและกล่องปรับเกนอัตโนมัติ

สำหรับการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี จะสร้างในรูปซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์เหมือนการสร้างตัวควบคุมใน [39,40] ตัวเลือกที่แสดงในรูปที่ 5.1 เป็นเซตของกฎทางตรรกะสำหรับการสลับกันระหว่างตัวควบคุมฟัซซีสองตัวควบคุม อาจจะเกิดข้อคำถามขึ้นได้ว่าขบวนการการควบคุมนี้การสลับและกล่องปรับเกนอัตโนมัติสามารถประกันความมีเสถียรภาพได้หรือไม่ ไม่ต้องสงสัยเลยว่าสัญญาณการควบคุมที่ไม่ต่อเนื่องที่ช่วงเวลาการสลับอาจจะทำให้เกิดข้อสงสัยในความเสถียรภาพได้ ประเด็นที่แพร่หลายทั่วไปเหล่านี้สามารถอธิบายให้ชัดเจนได้ดังนี้

1. ทฤษฎีเกนน้อย (small gain theorem) เสถียรภาพท้องถิ่นของตัวควบคุมฟัซซีพีไอและพีดีประกันโดยใน [32] และ [41] ตามลำดับ
2. ความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมทั้งหมดในขณะนี้ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของตัวเลือกและกล่องปรับเกนอัตโนมัติเราจึงกำหนดหลักการออกแบบที่มีบนพื้นฐานของการประกันความมีเสถียรภาพสำหรับส่วนประกอบเพิ่มเติมทั้งสองนี้ ความมีเสถียรภาพของระบบการสลับการควบคุมนี้สามารถนำมาตัดสินใจและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกฎการสลับและกล่องปรับเกนอัตโนมัติ

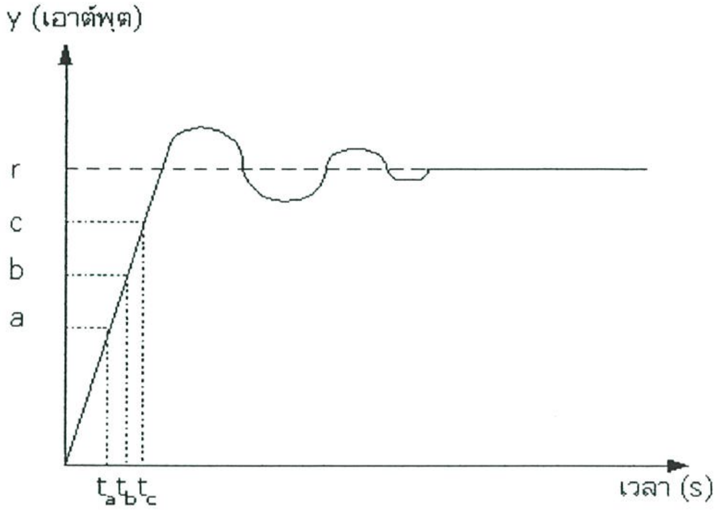
เพื่อทำความเข้าใจในระบบควบคุมให้ลึกซึ้งมากขึ้นเราจะเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบควบคุมการสลับแบบดิจิตอลออกมาได้ว่า

$$x(nT+T) = Gx(nT) + H\sum_{i=1}^{2} u_i(nT)\delta_i(nT) \tag{5.1}$$

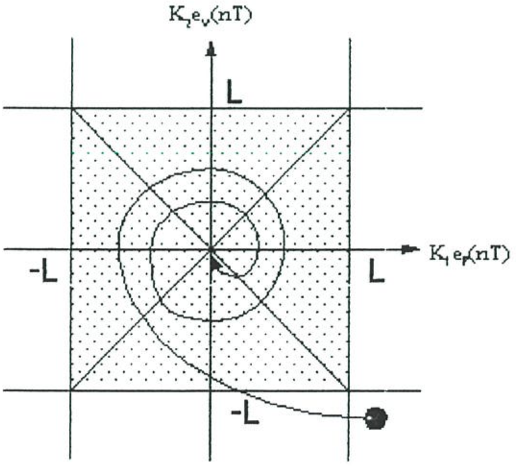
ซึ่ง $x(nT)$ เป็นเวกเตอร์สถานะ (state vector) ที่เวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete nT) ส่วน G เป็นเมตริกซ์ระบบ และ H เป็นเมตริกซ์อินพุตสำหรับระบบที่เวลาไม่ต่อเนื่อง ในที่นี้ u เป็นค่าอินพุตควบคุม โดยที่ $i=1$ แทนการทำงานของการควบคุมฟัซซีพีดี $i=2$ แทนการทำงานของการควบคุมฟัซซีพีไอ $\delta_i(nT)$ เป็นตัวแปรทางตรรกะในรูปแบบของ Kronecker's delta ตัวแปรทางตรรกะมีค่าเป็น 1 $\delta_i(nT)=1$ หากระบบทำงาน และเท่ากับ 0 หากหยุดทำงาน จะเห็นได้ว่าในทุกเวลา nT ใด ๆ มีเพียงดัชนีเดียวที่ถูกเลือกให้อยู่ ซึ่งอาจจะใช้สมการที่ 5.1 มาเริ่มต้นการวิเคราะห์เสถียรภาพแบบ BIBO ดังใน [41]

การวิเคราะห์เสถียรภาพโดยวิธีกราฟสามารถนำมาใช้ในการออกแบบกฎการสลับการควบคุม โดยเริ่มจากการพิจารณาวิถีโคจรของเอาต์พุตกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 5.2 ในรูปที่ 5.2 r เป็นจุดค่าเป้าหมาย a, b และ c แทนเอาต์พุตที่เวลา t_a, t_b และ t_c ตามลำดับ สอดคล้องกับรูปที่ 5.2 เมื่อเราดูที่วิถีโคจรของค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส (error-phase plane) ที่ได้แสดงไว้ใน

รูปที่ 5.3 เพื่อวางหลักในการใช้เครื่องหมายในรูปที่ 5.3 k_1 แทน k_p หรือ k_i ส่วน k_2 แทน k_d และ k_p แทนสำหรับการควบคุมฟัซซีพีดีและฟัซซีพีไอ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจำนวนของวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของแผนภาพของวิถีค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส ในรูปที่ 5.3 ได้สอดคล้องกับระยะเวลาของสภาวะชั่วครู่คลื่นไซน์ (transient sine-wave) อย่างรูปร่างของวิถีเอาต์พุตในรูปที่ 5.2 เมื่อระบบมาถึง สภาวะเสถียร วิถีค่าความผิดพลาดจะตกอยู่ในจุดศูนย์กลางของระนาบเฟส (phase plane)



รูปที่ 5.2 วิถีเอาต์พุตกับเวลา

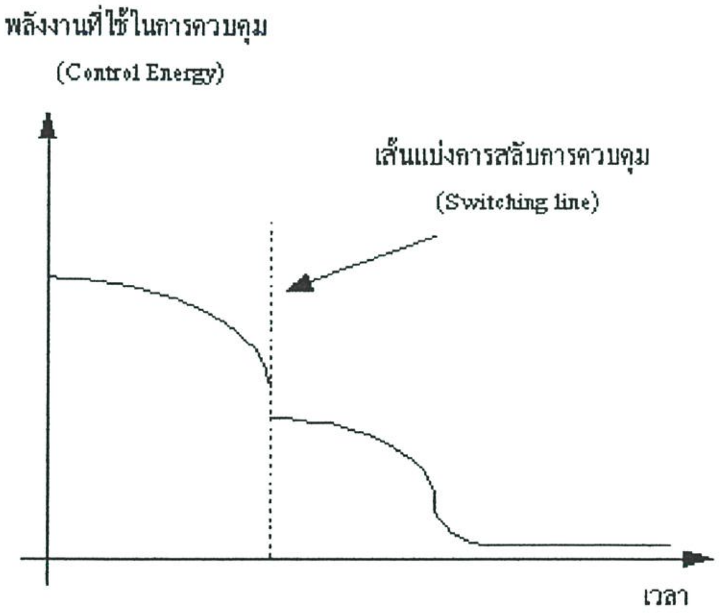


รูปที่ 5.3 วิถีความค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส

ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 5.2 ว่าผู้ออกแบบสามารถเลือกเวลาการสลับได้ตามต้องการ ตัวอย่างเช่น เราอาจจะออกแบบ เวลาสลับ 90/10, 90/10 นี้แทนการให้ตัวควบคุมฟัซซีพีดีทำงานขึ้นไปถึง 90% ของ ค่าเป้าหมาย และให้ ฟัซซีพีไอทำงานที่เหลือ หรือ 10% ของระบบ ในการวิเคราะห์นี้ เรา

ให้กำหนดพื้นที่การสลับให้อยู่ที่จุด *b* ในรูปที่ 5.2 เป็นภาพประกอบ และจะใช้รูปนี้เป็นตัวอย่างต่อไปจากนี้

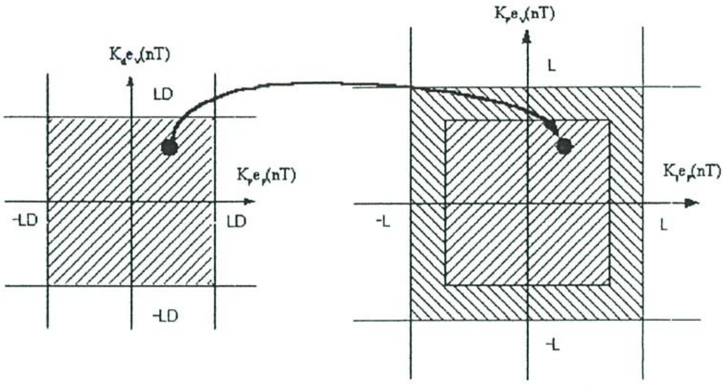
เพื่อประกันเสถียรภาพแบบ BIBO ที่จุดสลับการควบคุม พลังงานที่ควบคุมฟัซซีพีไอจะต้องน้อยกว่าพลังงานของฟัซซีพีดี ถึงแม้ว่าจะมีความไม่ต่อเนื่องของการควบคุมทั้งสองจะเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ ก็ยังไม่อาจจะนำระบบเข้าสภาวะที่ไม่เสถียร เพราะพลังงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอซึ่งเป็นตัวควบคุมที่สองถูกจำกัดมีให้ค่าต่ำกว่าตัวควบคุมแรก และบังคับให้อัตราของการเปลี่ยนแปลงพลังงานมีทิศทางลดลงลดลง จุดสลับถูกนำมาพิจารณาร่วมกับระยะช่วงเวลาขึ้นการควบคุมแบบฟัซซีพีดีทำงานโดยควบคุมเร่งในช่วงเวลาขึ้น ส่วนการควบคุมฟัซซีพีไอช่วยปรับเอาต์พุตของระบบให้มีความคงทนต่อการรบกวน อินพุตการควบคุมในการวิเคราะห์การสลับสามารถนำมาแสดงให้เห็นและสรุปย่อข้อความข้างต้นดังในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แนวคิดการกำหนดพลังงานการควบคุมสำหรับระบบการสลับ

ด้วยเหตุที่การควบคุมเพื่อการขับเคลื่อนเอาต์พุตของระบบไปสู่สภาวะเสถียรนั้นขึ้นอยู่กับค่าขนาดของความผิดพลาดและอัตราความผิดพลาด โดยตัวควบคุมจะให้เกนสอดคล้องกับสถานการณ์นี้ เกนจะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่แนววิถีทางโคจรเอาต์พุตนั้นอยู่ จะสังเกตได้ว่าหากเลือกเส้นสลับที่ใกล้เขตสภาวะเสถียร หรือใช้เกนเกณฑ์การเลือกแบบ 90/10 แนววิถีจะตกอยู่ในพื้นที่ภายในสี่เหลี่ยม *LxL* (ดูภาพที่ 5.3 ประกอบ) เพื่อประกันควบคุมตามแนวคิดพลังงานระหว่างช่วงการเปลี่ยนแปลง จะเลือกให้ค่าค่าพารามิเตอร์ของความเป็นสมาชิก

(membership function) ของตัวควบคุมฟัซซีพีดี หรือ *LD* ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าพารามิเตอร์ของฟัซซีพีไอ เงื่อนไขบังคับดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การสลับการควบคุมการทำงานจากฟัซซีพีดีไปยังฟัซซีพีไอ

เพื่อให้แนววิถีโคจรเอาต์พุตบนระนาบเฟสความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีถูกจำกัดเขตไว้ในกรอบสี่เหลี่ยมของ *LDxLD* ก่อนการเปลี่ยนไปสู่เขต *LxL* ของระนาบเฟสความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอเราจะให้

$$K_p e_p < LD \text{ และ } K_d e_v < LD \qquad (5.2)$$

พิจารณารูปที่ 5.2 ให้ *b* เป็นเอาต์พุตที่จุดสลับการควบคุม *a* และ *c* เป็นค่าที่ขั้นถอยหลังและขั้นไปข้างหน้าหนึ่งค่าเวลาสุ่ม *T* แล้วเรานำข้อมูลเหล่านี้มาแทนในรูปที่ 5.2 แทนการใช้สมการที่ 5.2 จะได้ว่า

$$k_p b < LD \text{ และ } K_d \frac{(c-a)}{2T} < LD \qquad (5.3)$$

ในสมการที่ 5.3 เราเลือกเวลาเชิงไม่ต่อเนื่อง $t_a=nT-T$, $t_b=nT$ และ $t_c=nT+T$ ด้วยช่วงค่าเวลาสุ่มที่เท่ากับ *T* โดยสมมุติอินพุตแบบเส้นตรงไปทีละค่าในลำดับของเวลาที่ต่อเนื่องกันมา $t_a=nT-T$, $t_b=nT$ และ $t_c=nT+T$

เพื่อความแน่ใจว่าอินพุตที่ควบคุมช่วงการเปลี่ยนแปลงระหว่างตัวควบคุมทั้งสองนี้อยู่ในย่านเสถียร จึงต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ k_{upd} และ k_{upi} โดยเลือกให้ค่าพารา

มิเตอร์ที่ออกแบบมาเหล่านี้สอดคล้องกับเสถียรภาพแบบ BIBO ดังนั้นจึงเลือก $k_{upi} \le k_{upd}$ ซึ่งจะได้ $k_{upd}\Delta u_{pi} \le k_{upi}\Delta u_{pd}$ เนื่องจาก $\Delta u_{pi} \le \Delta u_{pd}$ อยู่ในช่วงเวลาขึ้นซึ่งสอดคล้องกับกฎข้อที่ 2 ในตารางกฎในบทที่ 3 และ 4 ดังกล่าวไว้ข้างต้นเพราะการเพิ่มขึ้นของสัญญาณอินพุตในการควบคุมของฟัซซีพีไอจะน้อยกว่าของฟัซซีพีดีในช่วง เวลาขึ้นเสมอ โดยอาศัยความจริงนี้จะได้พีชคณิตง่าย ๆ ได้

$$\left\| u_{pi}(nT) + K_{upi}\Delta u_{pi}(nT) \right\|_2 < \left\| -u_{pd}(nT) + K_{upd}\Delta u_{pd}(nT) \right\|_2$$

จาก $u_{pi}(nT) = u_{pi}(nT - T) + ku_{pi}\Delta u_{pi}(nT)$,   และ $u_{pd}(n) = -u_{pd}(nT - T) + k_{upd}\Delta u_{pd}(nT)$
จะได้ว่า

$$\left\| u_{pi}(nT + T) \right\|_2 < \left\| u_{pd}(nT + T) \right\|_2 \qquad (5.4)$$

สมการที่ 5.4 บ่งนัยความหมายว่าพลังงานในการควบคุมของฟัซซีพีไอจะน้อยกว่าของฟัซซีพีดีดังที่กล่าวมาแล้วอีกทั้งยังเป็นเงื่อนไขบังคับของรูปที่ 5.4 โดยใช้นิพจน์ทางคณิตศาสตร์แทนที่การแทนด้วยภาพกราฟฟิค

จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เงื่อนไขที่พอจะเป็นเกณฑ์ในการเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับกฎในการสลับของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีสามารถนำมาสรุปเป็นทฤษฎีที่ 1 ได้ดังนี้

ทฤษฎีที่ 1: เงื่อนไขเพียงพอที่ใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับการสลับตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี เพื่อประกันเสถียรภาพแบบ BIBO คือ

1. เสถียรภาพเฉพาะที่ของตัวควบคุมฟัซซีพีไอและฟัซซีพีดีแต่ละตัว การเลือกค่าพารามิเตอร์โดยอาศัย ทฤษฎีเกนน้อย (Small Gain Theorems) ใน [32] และ [41]

2. เอาต์พุตค่าที่สุ่มสามครั้งติดกันมาคือ $y=a$,b และ c โดยกำหนดให้ b เป็นเอาต์พุตจุดสลับการควบคุม สามารถใช้กำหนดเงื่อนไขแบบเพียงพอสำหรับเสถียรภาพ ณ จุดสลับโดย $k_p\,(r-b) < LD$ และ $k_d(c-a) < LD$ โดย k_p , k_d และ LD เป็นค่าพารามิเตอร์ควบคุมที่อยู่ในเงื่อนไขที่ (1)

3. ค่าพารามิเตอร์ความเป็นสมาชิกฟังก์ชัน LD ของตัวควบคุมฟัซซีพีดี จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า L ของฟัซซีพีไอ $LD \le L$

4. กฎการสลับการควบคุมสำหรับการกำหนดค่าเกน AGC ณ จุดเปลี่ยนการควบคุมกำหนดให้ $k_{upi} \le k_{upd}$

ในการจะออกแบบตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีจะอาศัยเงื่อนไขทั้งสี่ข้างต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะแสดงการจำลองในหัวข้อถัดไป

เราได้กำหนดกรอบในการเลือกกฎการสลับตัวควบคุมไว้แล้ว ต่อจากนี้อธิบายถึงกล่องเกนอัตโนมัติ (AGC) ที่ปรากฏในรูปที่ 5.1 จากรูปที่ 5.1 L, k_p, k_d k_i และค่าพารามิเตอร์ k_{upi} และ k_{upd} เป็นค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้นำมาใช้เป็นเกนในการเร่งเพื่อขยายสัญญาณควบคุม จากการสังเกตพบว่าค่า k_{upd}/k_{upi} ยิ่งมากเท่าไร ความเร็วในการตอบสนองของภาวะชั่วครู่/สถานะอยู่ตัวยิ่งมากขึ้นเท่านั้น การวิเคราะห์นี้ร่วมกับการนำกฎการควบคุมอย่างง่ายในการกำหนดค่า k_{upi}/k_{upd} นี้เป็นกฎพื้นฐานในการปรับการควบคุมอัตโนมัติด้วยลักษณะการสลับระหว่างการตอบสนองที่ต้องการของระบบให้เร็วหรือช้า กฎ 5 ข้อง่าย ๆ สำหรับการปรับค่า AGC อาจจะรวมการออกแบบเพื่อให้การแสดงผลของระบบดีขึ้น โดยขึ้นอยู่กับความจำเป็นที่เป็นไปได้ของการนำไปใช้

กฎข้อที่ 1: ถ้าผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ มีค่าต่ำกว่า α_1% ของค่าที่ต้องการแล้ว ค่า k_{upd} จะเพิ่มขึ้น β_1%

กฎข้อที่ 2: ถ้าผลตอบสนองสถานะอยู่ตัวมีค่าต่ำกว่า α_2% ของค่าที่ต้องการแล้ว ค่า k_{upi} จะเพิ่มขึ้น β_2%

กฎข้อที่ 3: ถ้าผลตอบสนองภาวะชั่วครู่ มีค่าสูงกว่า γ_1% ของค่าที่ต้องการและเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ค่า k_{upd} จะลดลง η_1%

กฎข้อที่ 4: ถ้าผลตอบสนองสถานะอยู่ตัว มีค่าสูงกว่า γ_2% ของค่าที่ต้องการและเสี่ยงต่อเสถียรภาพของระบบแล้ว ค่า k_{upd}/k_{upi} จะลดลง η_2%

กฎข้อที่ 5:ในกรณีอื่น ๆ ค่าของ k_{upd} และ k_{upi} รักษาไว้คงเดิม

กฎทั้ง 5 ข้อนี้ร่วมกับการวิเคราะห์ข้างต้นจะสามารถนำมาทำให้เป็นเกณฑ์พื้นฐานสำหรับปรับเกน k_{upd} และ k_{upi} โดยอาศัยแนวทางจากกฎทั้ง 5 ข้อนี้จะสามารถกำหนดกฎได้อีกมากเท่าที่ต้องการ ค่าเปอร์เซนต์ของα_1, α_2, γ_1 และ γ_2 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่จะต้องออกแบบ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงเกน k_{upi}/k_{upd} ที่นำเสนอในหัวข้อนี้ได้นำมาแสดงโดยการจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ในหัวข้อถัดไป

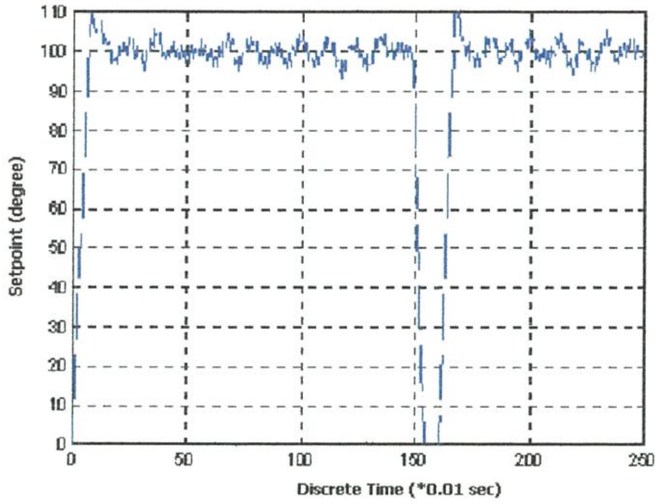
5.3 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

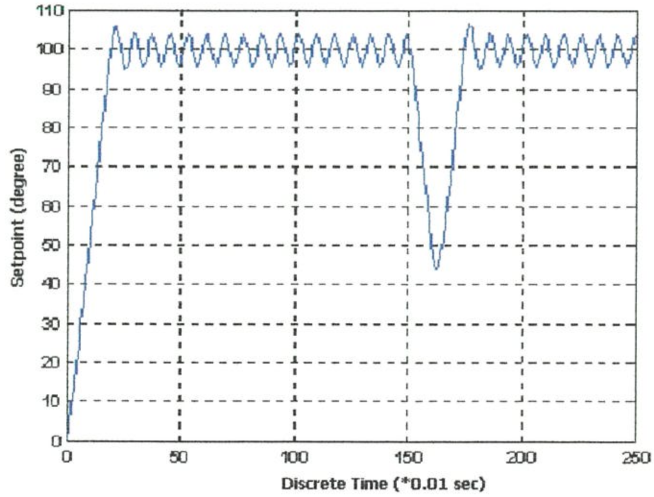
เพื่อพิสูจน์แนวคิดและหลักการคิดออกแบบ เราจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนใน [40] ซึ่งมีในรูป

$$
\begin{aligned}
&I_1 \ddot{\theta}_1(t) + M(t)\ell g \sin[\theta_1(t)] + \vec{K}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] = 0 \\
&I_2 \ddot{\theta}_2(t) - \vec{K}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] = u(t)
\end{aligned}
\tag{5.5}
$$

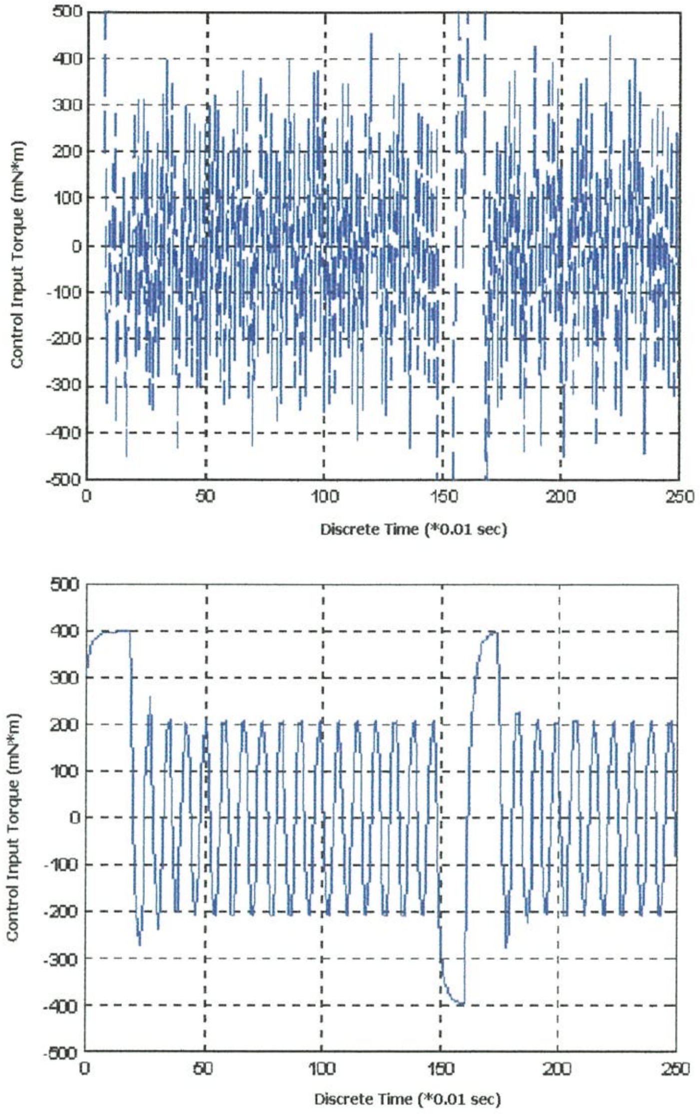
โดยที่ $I_1 = 0.030\ (kgm^2)$, $I_2 = 0.001(kgm^2)$, $\boldsymbol{Mg\ell} = 0.800\ (Nm)$, $\vec{K} = 31.00\ (Nm/rad)$ สำหรับตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีมีค่า $k_p=0.1$, $k_i=0.12$, $k_{pd} = 0.1$,$k_d=0.1$, $k_{upd}=22$ $k_{upi} = 1.8$ และ $LD = 100$, $L= 610$, $\alpha_1=\alpha_2= 10$, $\beta_1= -10$, $\beta_2= -10$, $\gamma_1 =\gamma_2=10$, $\eta_1= 100$, $\eta_2= 500$, $T=0.01$ และการจัดพื้นที่การสลับที่ใช้ ณ ที่นี้เป็นแบบ 90/10

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองการควบคุมความตำแหน่งมอเตอร์มีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา รูปที่ 5.6 รูปบนเป็นผลการจำลองด้วยค่าพารามิเตอร์ก่อนมีการใช้กล่องปรับเกนอัตโนมัติและรูปล่างเป็นผลการจำลองมีการใช้กล่องปรับเกนอัตโนมัติซึ่งมีการรบกวน ณ เวลา 1.5 วินาที ในรูปที่ 5.7 แสดงสัญญาณควบคุมทางอินพุตของรูปที่ 5.6 ในรูปที่ 5.7 รูปบนเป็นผลก่อนมีการใช้กล่องปรับเกนอัตโนมัติและรูปล่างเป็นผลการจำลองมีการใช้กล่องปรับเกนอัตโนมัติ ผลการจำลองพิสูจน์ผลของกระบวนการควบคุมได้ผลตามที่มุ่งหมายไว้ เป็นแนวทางสำหรับการทดลองในบทต่อไป





รูปที่ 5.6 ผลจำลองการตอสนองการควบคุมตำแหน่งตำแหน่งมอเตอร์มีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา



รูปที่ 5.7 ค่าการใช้พลังงานทางอินพุตในรูปที่ 5.6

บทที่ 6

ผลการทดลอง

6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองเพื่อทดสอบตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนั้นแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การทดลองควบคุมตำแหน่งกับมอเตอร์กระแสตรงโดยมีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา และการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการทดลองควบคู่ไปกับตัวควบคุมแบบพีไอดี

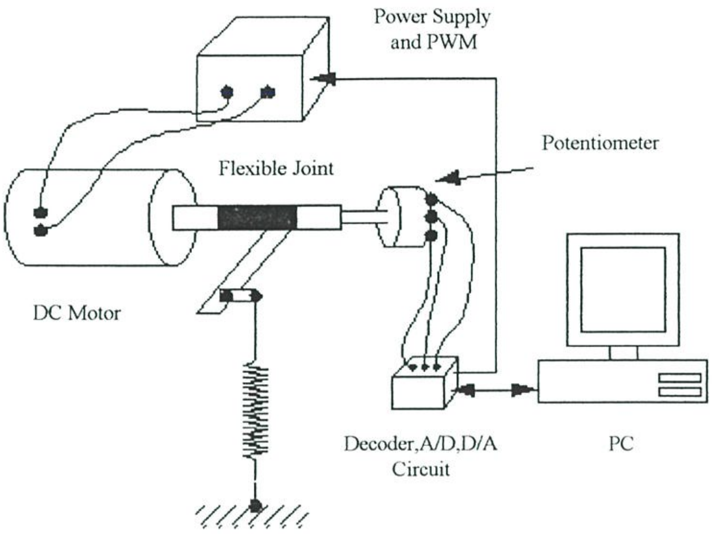
อุปกรณ์ที่ใช้ทำการทดลองมีดังต่อไปนี้

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของ ซันโยเดนกิ รุ่น ซุบเปอร์ ยู

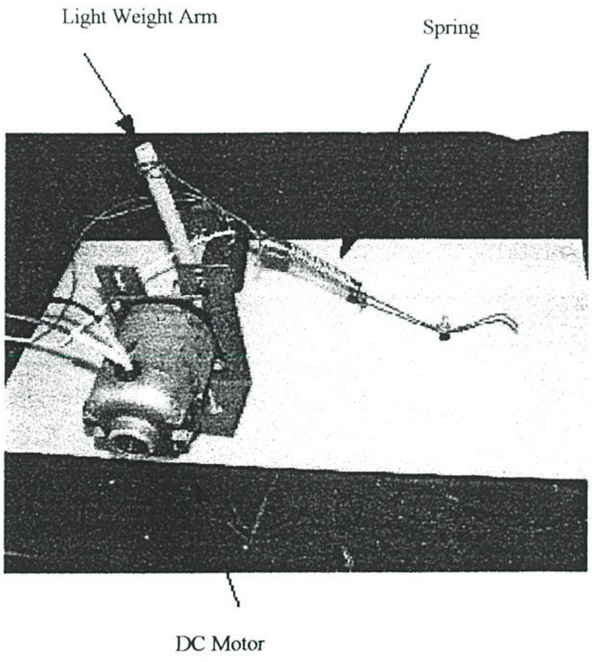
(75 VDC/3000 rpm)

3. ภาระสปริง
4. ISA การ์ด อินพุตเอาต์พุต
5. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
6. วงจรกำลังขับมอเตอร์
7. วงจรการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM)
8. วงจรแปลงความถี่เป็นโวลต์
9. โพเทนชิออมิเตอร์
10. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

6.2 การทดลองการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะภาระเปลี่ยนตามเวลา



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 6.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองรูป (ก.) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองการควบคุมตำแหน่งรูป (ข.) แสดงการจัดตั้งเครื่องมือจริงที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง จากรูป ที่ 6.1 การประมวลผลของค่าตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อให้ระบบควบคุมได้ทำงาน จะกระทำในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งหมด การทดลองจะใช้แท่งพลาสติกติดกับภาระที่เป็นสปริงเพื่อจำลองว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทางเข้าออกที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายนอกและคอมพิวเตอร์คือ 308h, 309h, 30Ah ซึ่งติดต่อทาง ISA โดยใช้ การ์ด ISA การบันทึกผลโดยใช้การเก็บข้อมูลเข้าทางคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยมีค่าเวลาสุ่มในการเก็บเท่ากับ 0.003 วินาที ผลการทดลองได้ทำควบคู่ไปกับระบบควบคุมแบบพีไอดีโดยวิธีการลองถูกลองผิด และสำหรับการควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี เลือกค่าเกนที่ทดลองโดยใช้วิธีลองผิดลองถูกอาศัยแนวทางการเลือกจากทฤษฎีที่ 1 ในบทที่ 5

รูปที่ 6.2 ถึง 6.4 เป็นการทดลองควบคุมตำแหน่งที่ 100, 120 และ 140 (จากค่า 8 บิต) ตามลำดับและใช้ค่าเกนในตารางที่ 6.1 และ 6.2 และผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 6.3 และ 6.4 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4

ค่าเป้าหมาย	k_p	k_i	k_{upi}	L	k_{pd}	k_d	k_{upd}	LD	T
100	1	1	1	100	10	1	1	100	0.1
120	10	2	1	100	20	0.1	5	50	0.1
140	20	5	2	50	100	1	5	20	0.2

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของกล่องปรับเกนอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีมีค่าคือ

$\alpha_1 = 20,\ \alpha_2 = 10,\ \beta_1 = 25,\ \beta_2 = 10,\ \gamma_1 = \gamma_2 = 10,\ \eta_1 = 20,\ \eta_2 = 25$

ตารางที่ 6.2 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4

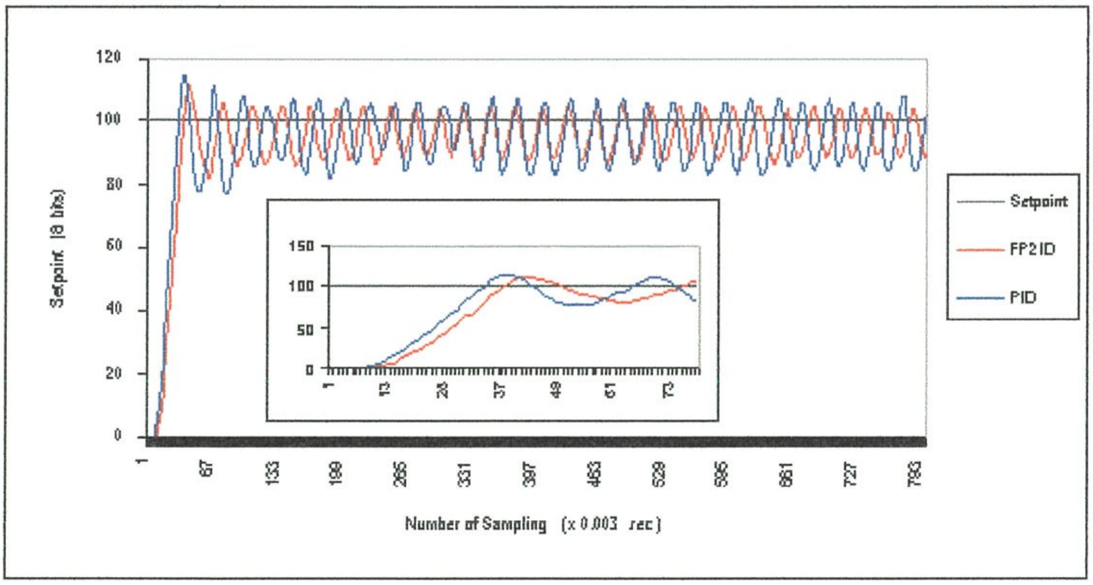
ค่าเป้าหมาย	K_p	K_i	K_d
100	20	0.01	10
120	60	1	10
140	120	0.01	30

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายและค่าเกนในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4

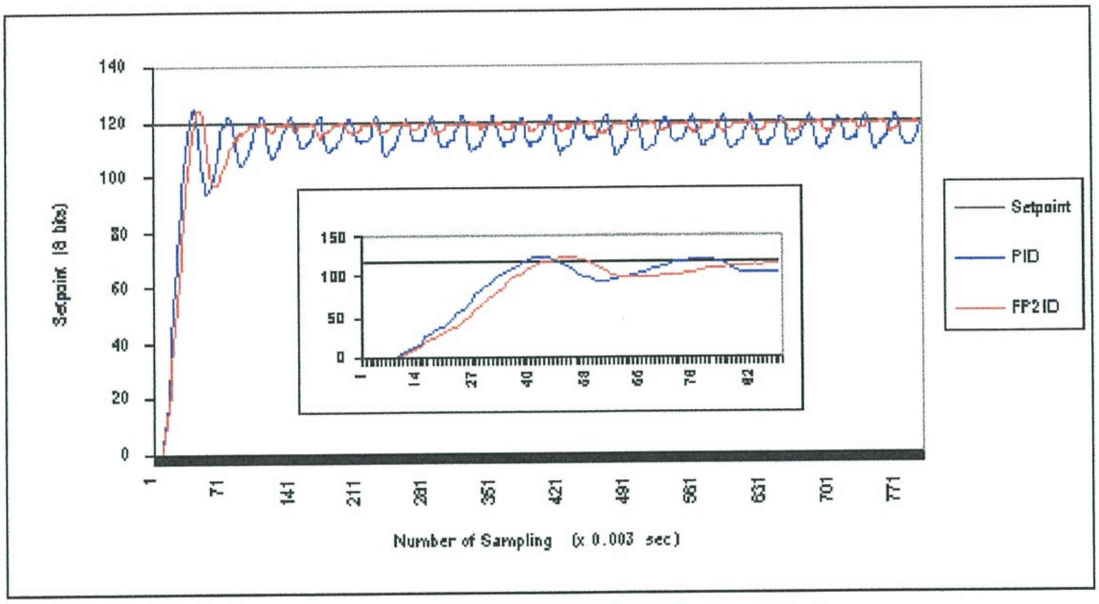
ค่าเป้าหมาย	t_r (วินาที)	t_d (วินาที)	t_s (5%)	การแกว่ง (%)
100	0.069	0.081	∞	$\pm$ 12
120	0.078	0.087	0.294	$\pm$ 4
140	0.124	0.09	0.72	$\pm$ 4

ตารางที่ 6.4 ผลการทดลองของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายและค่าเกนในรูปที่ 6.2 ถึง 6.4

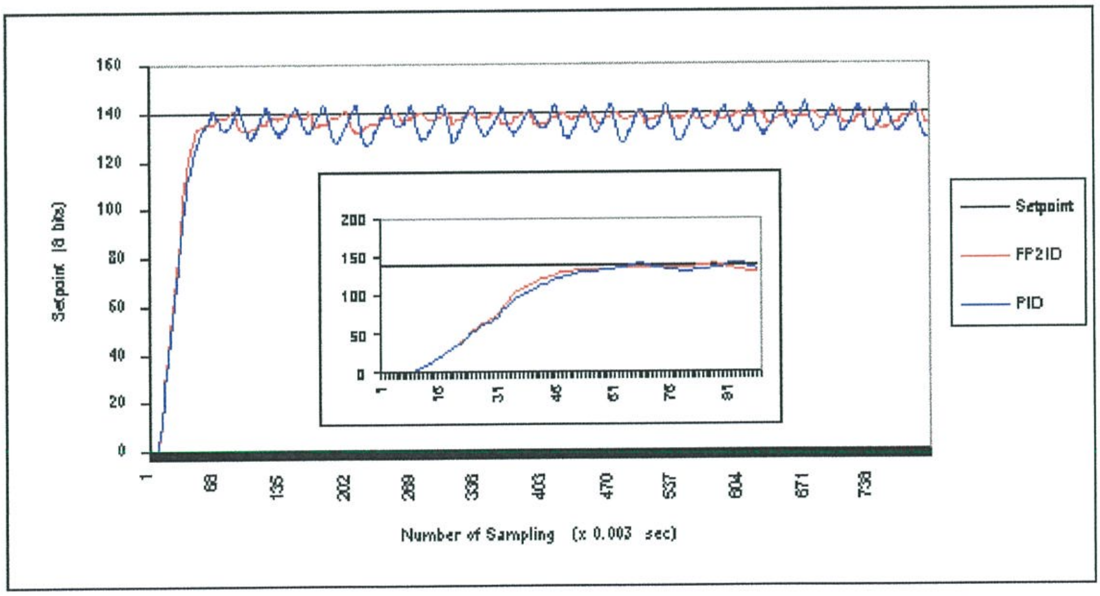
ค่าเป้าหมาย	t_r (วินาที)	t_d (วินาที)	t_s (5%)	การแกว่ง (%)
100	0.06	0.075	∞	$\pm$ 16
120	0.066	0.078	∞	$\pm$ 10
140	0.124	0.093	∞	$\pm$ 11



รูปที่ 6.2 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 100



รูปที่ 6.3 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 120



รูปที่ 6.4 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ค่าเป้าหมาย 140

ผลการทดลองในรูปที่ 6.2, 6.3 และ 6.4 นั้นตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ค่าเป้าหมายต่าง ๆ มีช่วงเวลาขึ้นที่ดี แต่ในการทดลองดังกล่าวการทดสอบที่สำคัญคือการแกว่งจะเห็นได้ว่าการทดลองทั้ง 3 รูปข้างต้นนั้นเมื่อค่าเป้าหมายมีค่ามากขึ้นความไม่เป็นเชิงเส้นยิ่งมากขึ้นตาม ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดียังสามารถทำงานได้ค่อนข้างดีและค่าการแกว่งยังมีค่าน้อย

จากรูปที่ 6.5 ถึง 6.8 เป็นการทดลองการควบคุมตำแหน่งของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยการทดลองปรับเปลี่ยนค่าเป้าหมาย 3 ค่า คือ ที่ตำแหน่งที่ 150, 100 และ 120 โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าตำแหน่งค่าตามเวลาและคงค่าเกนเดิมเอาไว้ แสดงค่าเกนในตารางที่ 6.5 และ 6.6

ตารางที่ 6.5 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในการทดลองรูปที่ 6.5 ถึง 6.8

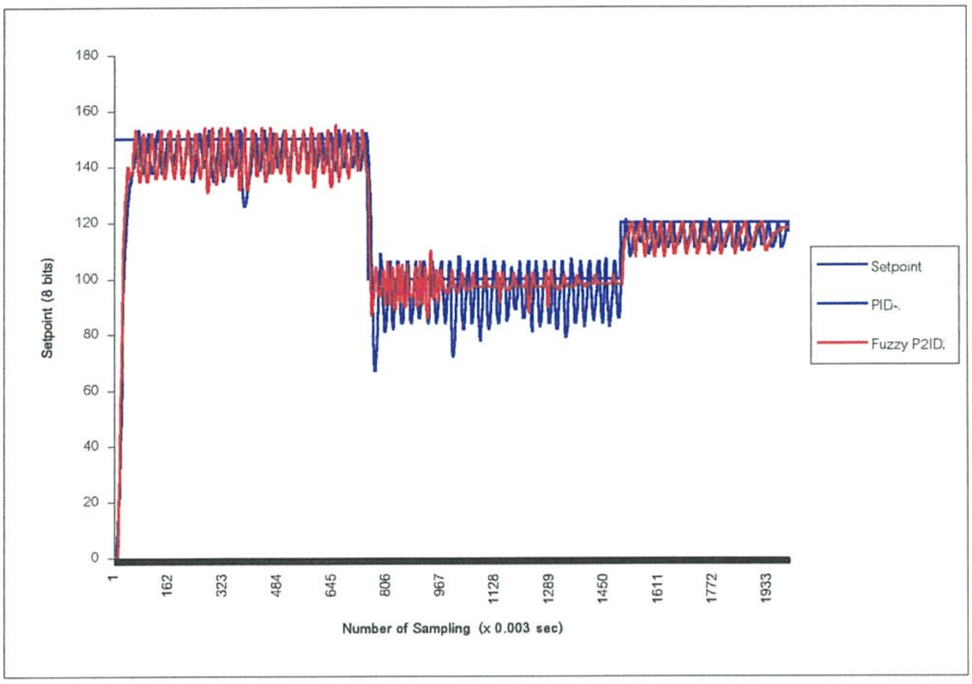
การทดลองรูปที่	k_p	k_i	k_{upi}	L	k_{pd}	k_d	k_{upd}	LD	T
6.5	20	5	1	200	10	0.5	5	100	0.2
6.7	10	1	1	200	20	0.01	5	100	0.2
6.8	1	1	1	100	15	0.001	5	50	0.1

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของกล่องปรับเกนอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีมีค่าคือ

$\alpha_1 = 20$, $\alpha_2 = 10$, $\beta_1 = 25$, $\beta_2 = 10$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 10$, $\eta_1 = 20$, $\eta_2 = 25$

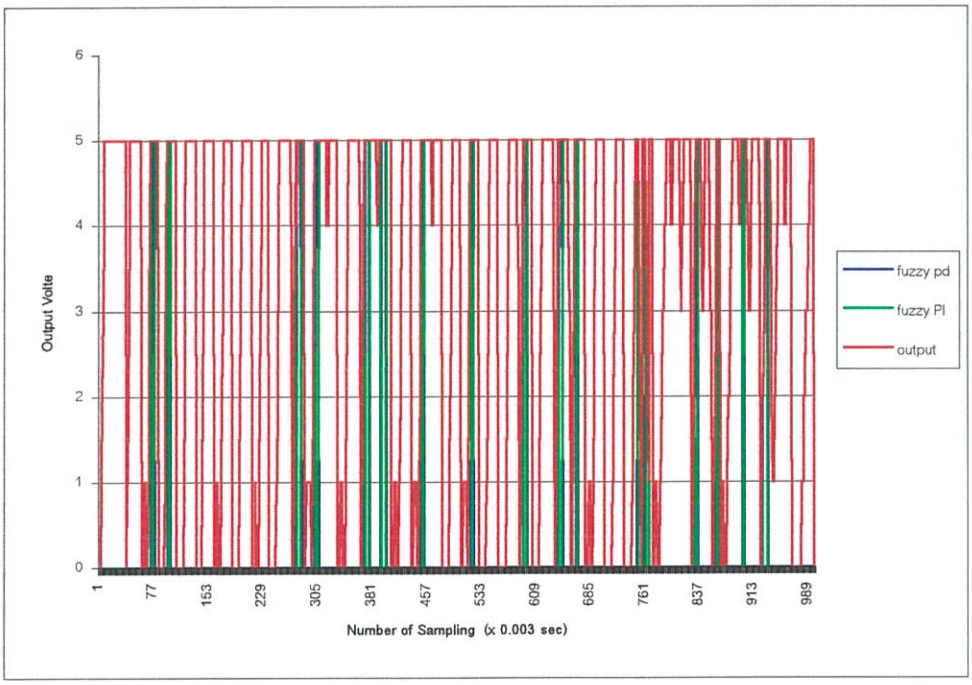
ตารางที่ 6.6 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในการทดลองรูปที่ 6.5 ถึง 6.8

การทดลองรูปที่	K_p	K_i	K_d
6.5	20	0.01	10
6.7	60	1	10
6.8	120	0.01	30

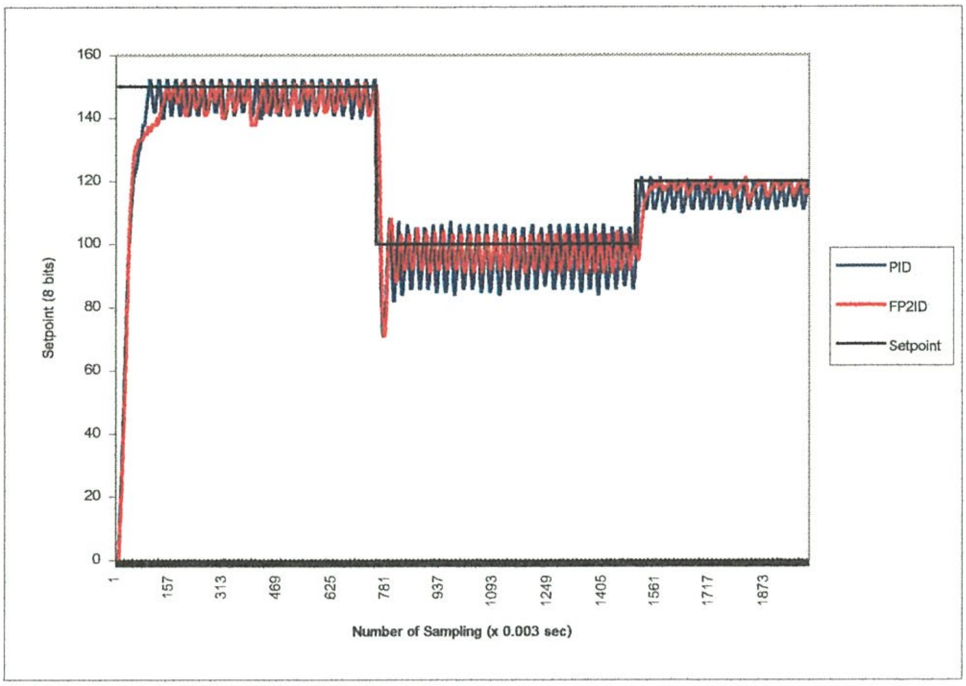


รูปที่ 6.5 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา

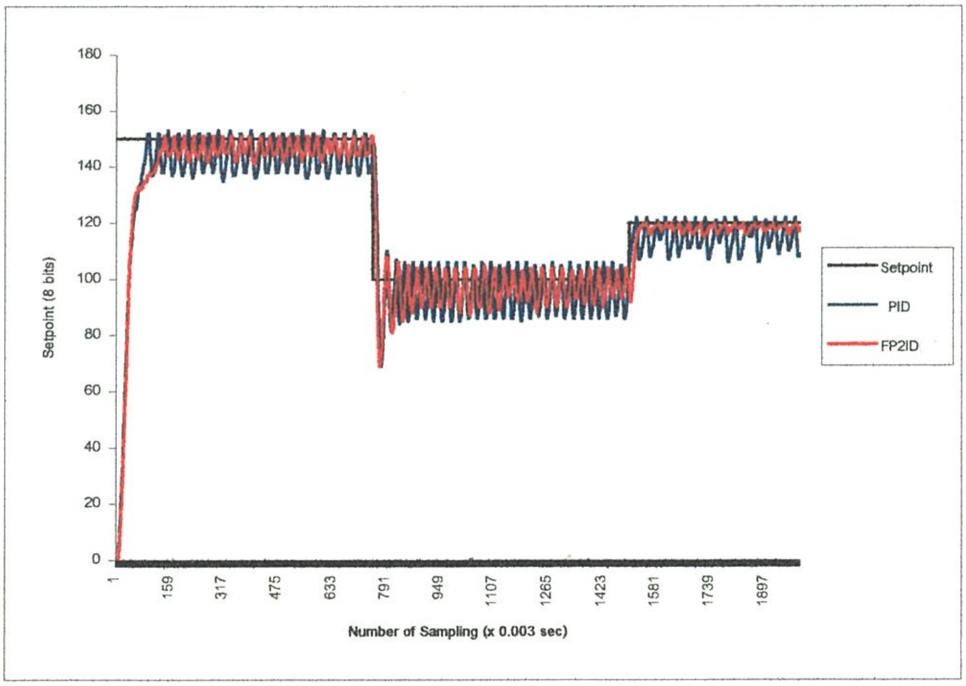
ในรูป 6.6 เป็นสัญญาณควบคุมทางด้านเอาต์พุตของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี (อินพุตควบคุมของกระบวนการ), และเอาต์พุตที่ถูกเลือกระหว่างฟัซซีทั้งสองระบบนี้จะเห็นได้ว่าเอาต์พุตที่ออกมาอยู่ในเงื่อนไข 10/90 ในบทที่ 5



รูปที่ 6.6 แสดงค่าสัญญาณทางเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีของรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.7 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา



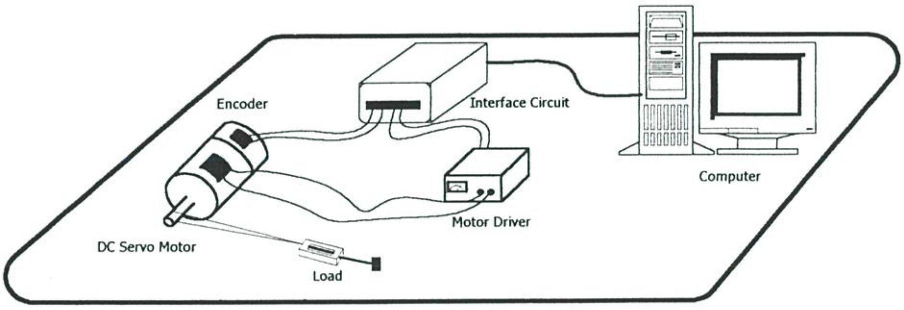
รูปที่ 6.8 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา

จากการทดลองการควบคุมตำแหน่งที่มีภาระเปลี่ยนแปลงตามเวลา ตั้งแต่ในรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.8 ไม่ว่าจะเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดียังสามารถทำงานได้

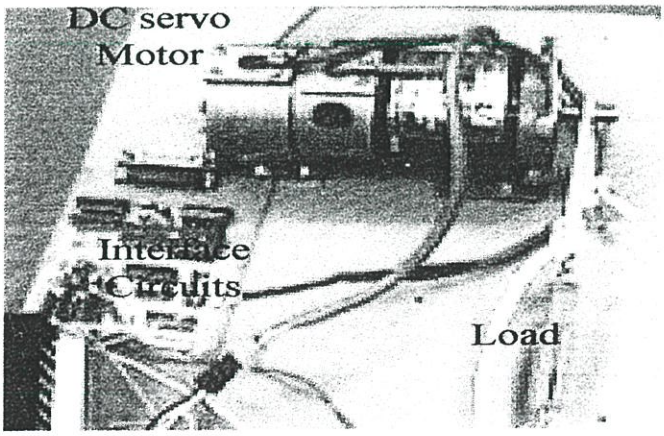
ในภาระดังกล่าว ซึ่งข้อดีของระบบควบคุมแบบพีไอดีมีช่วงเวลาขึ้นที่ดีแต่การแกว่งยังมีค่ามากอยู่ และควบควบคุมที่ออกแบบขึ้นมานั้นมีค่าการแกว่งที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจในการหาค่าพารามิเตอร์แบบลองผิดลองถูก ทั้งระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นจะให้ผลที่ดีกว่านี้ ถ้าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสองหามาด้วยวิธีแบบอื่นที่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

6.3 การทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ขั้นตอนการทดลอง จากรูป ที่ 6.9 การประมวลผลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อให้ระบบควบคุมได้ทำงาน จะกระทำในคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั้งหมด การทดลองนี้ใช้เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงเพื่อควบคุมความเร็วรอบโดยจำลองภาระโดยใช้ภาระสปริงในการขัดจังหวะในการหมุนของมอเตอร์ ทางเข้าออก (I/O port) ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายนอกและคอมพิวเตอร์ คือ 308h, 309h และ 30Ah ซึ่งติดต่อทาง ISA โดยใช้ การ์ด ISA การบันทึกผลโดยใช้การเก็บข้อมูลเข้าทางคอมพิวเตอร์ส่วนบุคลโดยมีค่าเวลาในการเก็บผลการทดลองเท่ากับ 0.4 วินาที



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 6.9 แสดงอุปกรณ์ที่ทำการทดลองควบคุมความเร็วเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รูป (ก.) แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ทางการทดลอง รูป (ข.) แสดงภาพทางกายภาพที่ใช้ทำการทดลอง

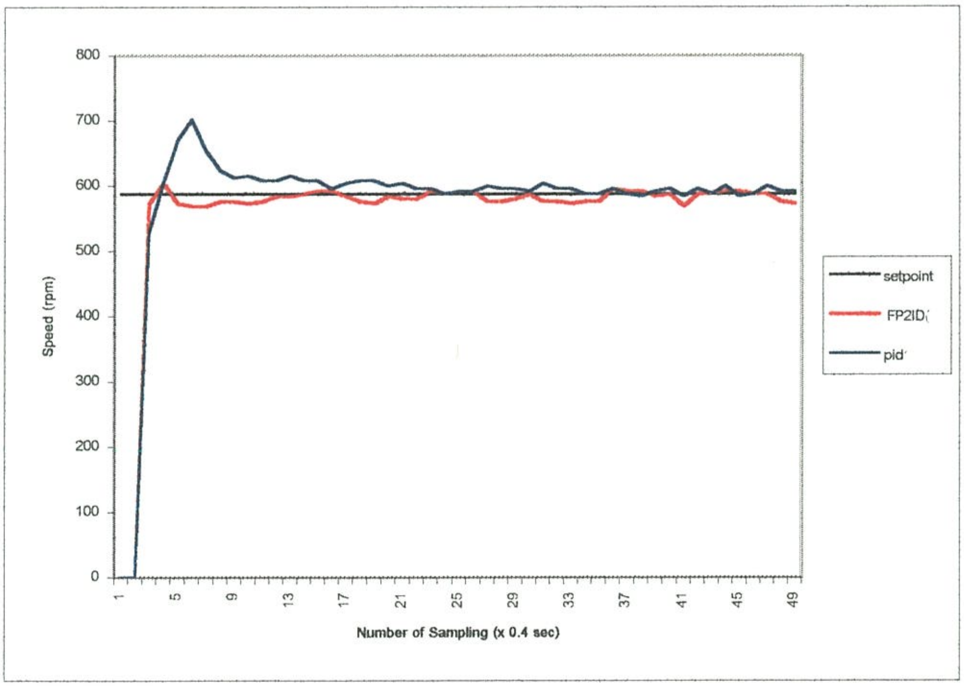
ผลการทดลองในรูปที่ 6.10 แสดงผลตอบสนองการควบคุมความเร็วเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงขณะไม่มีภาระ ที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 588 รอบต่อวินาที ใช้ค่าเกนในตารางที่ 6.7 และ 6.8 และผลการทดลองในตารางที่ 6.9

ตารางที่ 6.7 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.10

ค่าเป้าหมาย (รอบต่อนาที)	k_p	k_i	k_{upi}	L	k_{pd}	k_d	k_{upd}	LD	T
588	20	5	1	200	10	0.5	5	100	0.2

ตารางที่ 6.8 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.10

ค่าเป้าหมาย (รอบต่อนาที)	K_p	K_i	K_d
588	0.1	0.1	0.1

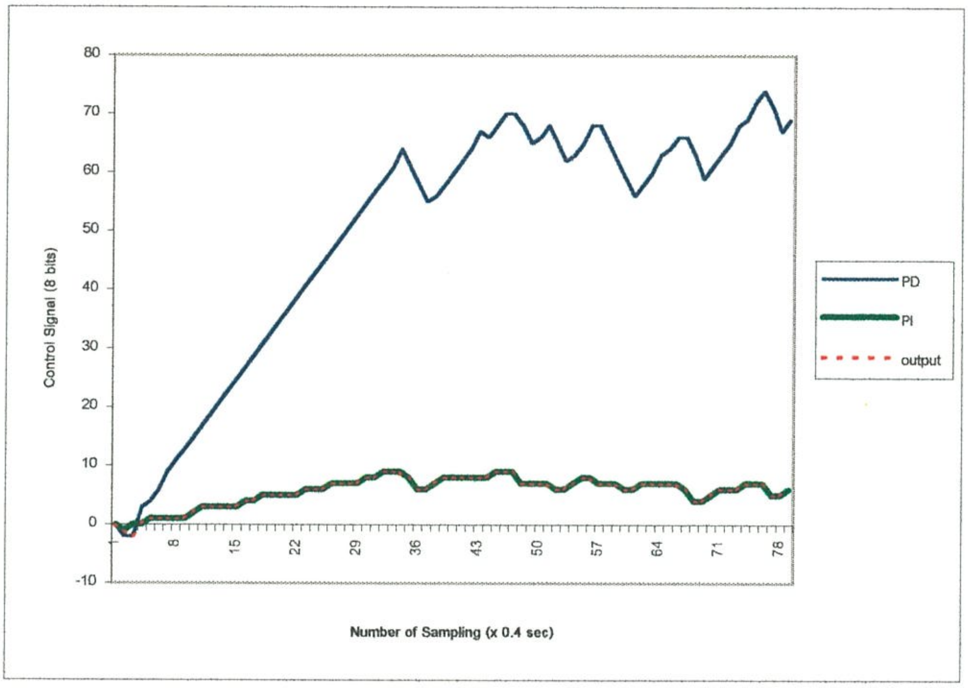


รูปที่ 6.10 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีขณะไม่มีภาระ

ตารางที่ 6.9 ผลการทดลองในรูปที่ 6.10

ตัวควบคุม	t_r (วินาที)	t_d (วินาที)	t_s (5%)	MP (%)
ฟัซซีพีสแควร์ไอดี	0.4	0.88	1	2.55
พีไอดี	0.4	0.88	6.8	19.8

และในรูปที่ 6.11 จะแสดงสัญญาณควบคุมทางอินพุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ใช้ทดลองในรูปที่ 6.10 เป็นการสลับการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีไปเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ



รูปที่ 6.11 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.10

ผลการทดลองในรูปที่ 6.12 และ 6.14 แสดงผลตอบสนองการควบคุมความเร็วเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงขณะมีภาระ 2 กิโลกรัม (ภาระสปริง) ที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 588 รอบต่อวินาที และ 392 รอบต่อวินาที ใช้ค่าเกนของตัวควบคุมในตารางที่ 6.10 และ 6.11 และได้ผลการทดลองในตารางที่ 6.12 และ 6.13

ตารางที่ 6.10 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14

การทดลองรูปที่	k_p	k_i	k_{upi}	L	k_{pd}	k_d	k_{upd}	LD	T
6.12	5	1	1	5	3	0.01	1	9	0.1
6.14	5	5	1	5	2	0.01	1	5	0.1

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของกล่องปรับเกนอัตโนมัติของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีมีค่าคือ

$\alpha_1 = 20,\ \alpha_2 = 10,\ \beta_1 = 25,\ \beta_2 = 10,\ \gamma_1 = \gamma_2 = 10,\ \eta_1 = 20,\ \eta_2 = 25$

ตารางที่ 6.11 ค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอในรูปที่ 6.12 และ 6.14

การทดลองรูปที่	K_p	K_i	K_d
6.12	0.5	0.1	0.1
6.14	0.01	0.5	0.03

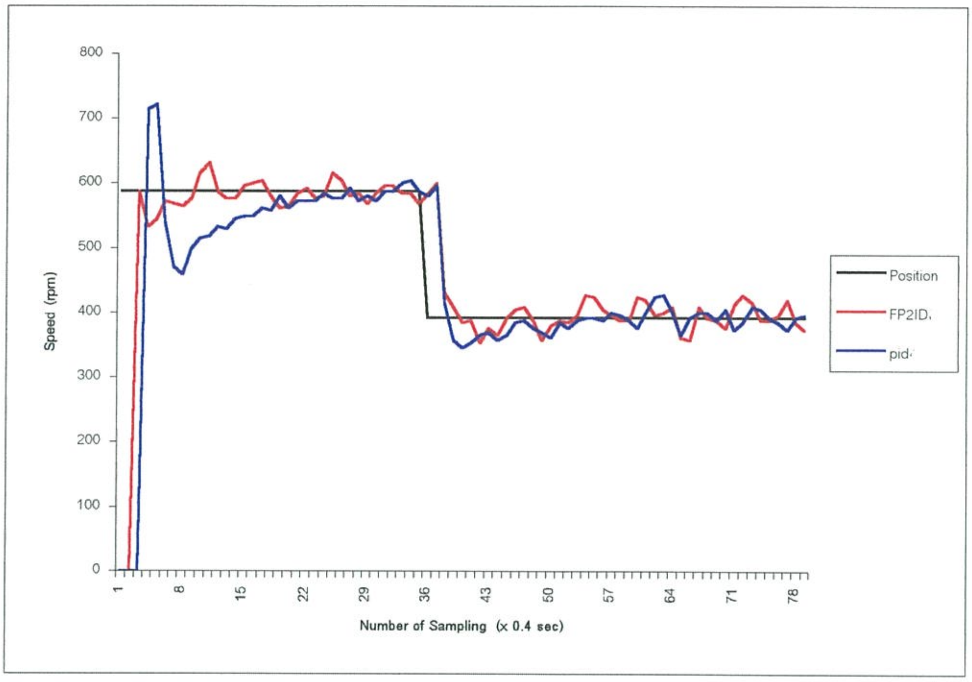
ตารางที่ 6.12 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14

ค่าเป้าหมาย (รอบต่อวินาที)	t_r (วินาที)	t_d (วินาที)	t_s (5%)	MP (%)
588 (ในรูปที่ 6.12)	0.4	0.8	4.08	8.33
392 (ในรูปที่ 6.12)	0.4	0.96	6	12.04
588 (ในรูปที่ 6.14)	0.4	0.8	2.4	4.59
392 (ในรูปที่ 6.14)	0.4	0.96	4.4	3.06

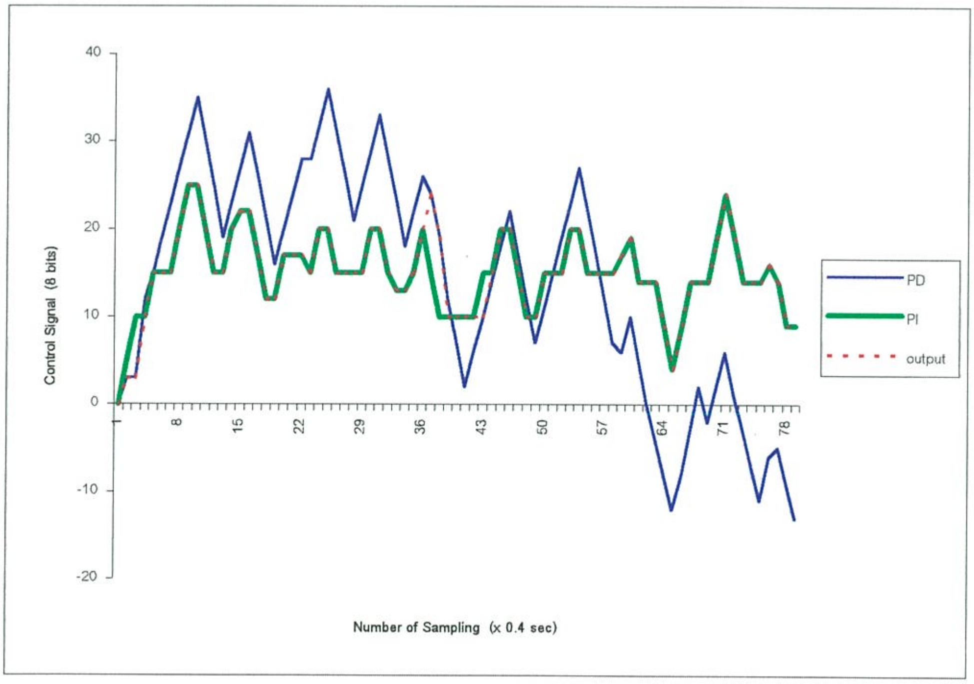
ตารางที่ 6.13 ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปที่ 6.12 และ 6.14

ค่าเป้าหมาย (รอบต่อวินาที)	t_r (วินาที)	t_d (วินาที)	t_s (5%)	MP (%)
588 (ในรูปที่ 6.12)	0.4	1.12	8.76	23.12
392 (ในรูปที่ 6.12)	0.4	0.96	6.4	12.24
588 (ในรูปที่ 6.14)	0.4	1.12	4.8	1.19
392 (ในรูปที่ 6.14)	0.4	0.96	5.6	8.16

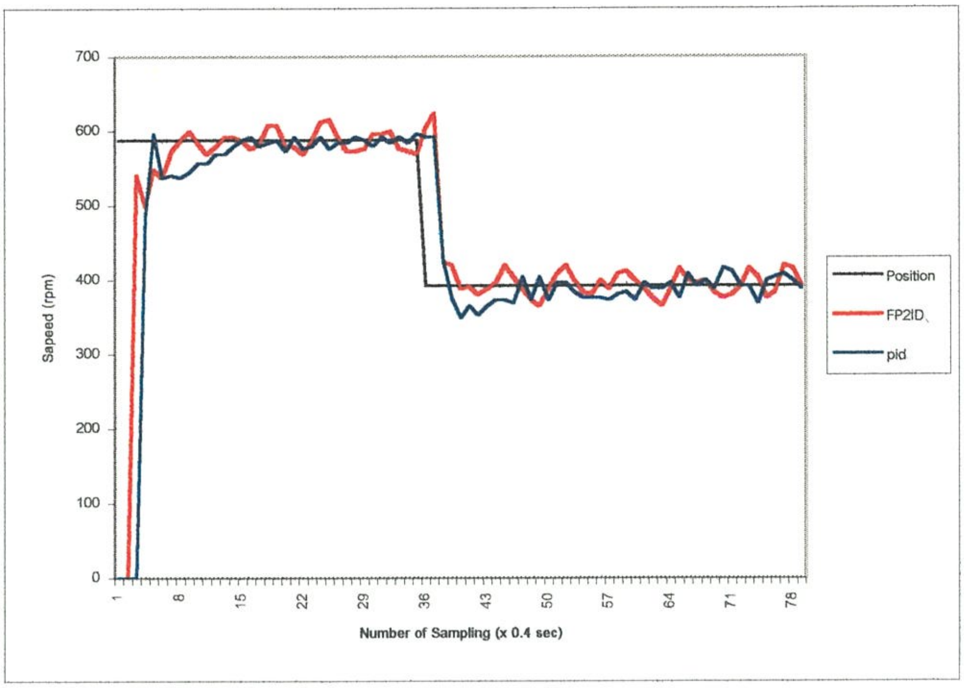
ผลการทดลอง ในรูปที่ 6.10 ถึงรูปที่ 6.15 ผลที่ได้ทั้งตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถทำงานได้ดีทั้งคู่และผลตอบสนองของระบบจะให้ผลที่ดีกว่านี้ถ้าใช้วิธีหาค่าพารามิเตอร์แบบวิธีแบบอื่น ๆ ซึ่งการทดลองทั้งหมดใช้วิธีแบบลองผิดลองถูก ระบบฟัซซีที่ได้ออกแบบจึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง



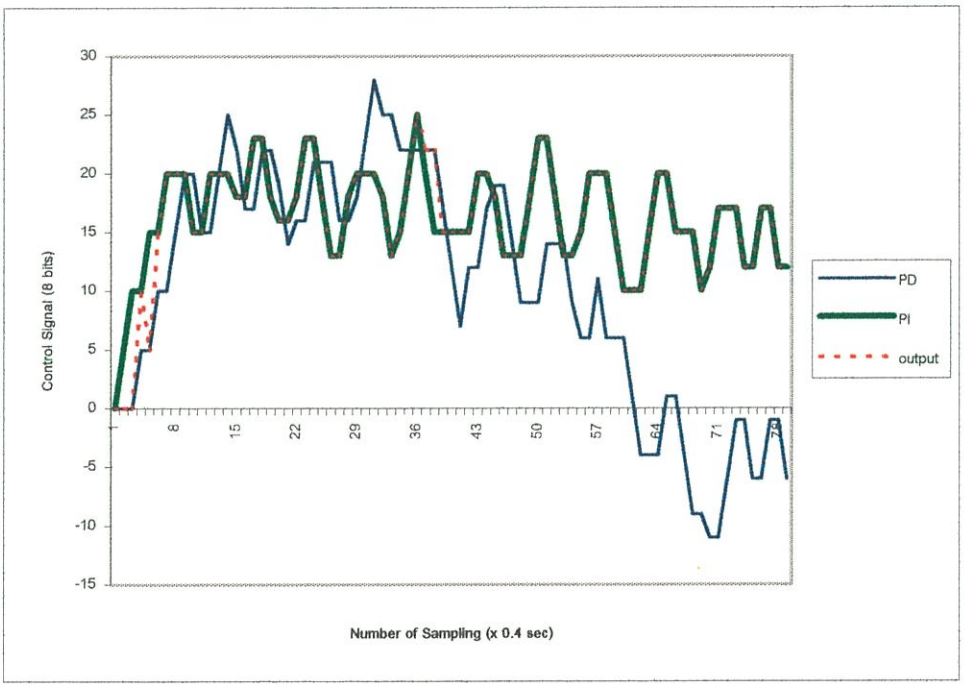
รูปที่ 6.12 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีขณะมีภาระ 2 กิโลกรัม



รูปที่ 6.13 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.14 แสดงรูปผลตอบสนองของการควบคุมความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างฟัซซีพีสแควร์ไอดีและตัวควบคุมแบบพีไอดีขณะมีภาระ 2 กิโลกรัม



รูปที่ 6.15 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในรูปที่ 6.14

บทที่ 7
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนี้ เป็นการสร้างตัวควบคุมขึ้นมาเพื่อใช้งานได้จริงและนำมาทดลองจริงเพื่อนำมาใช้ควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีภาระเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา ภาระที่ได้ทำการทดลองดังกล่าวจะใกล้เคียงกับระบบที่เป็นลักษณะที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น และไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่แน่นอนได้ นอกจากนี้ยังได้นำมาทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การทดลองทั้งสองแบบนี้ได้นำเอาผลที่ได้มาทดลองควบคู่กับการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิม

7.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีภาระเป็นแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา ผลของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนั้นให้ผลตอบสนองที่ดี แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตำแหน่งอ้างอิง และเมื่อค่าของค่าเป้าหมายมีค่ามากขึ้น (เมื่อดึงสปริงมากขึ้น) ความไม่เป็นเชิงเส้นก็จะมีมากขึ้นตามด้วย อย่างไรก็ดีตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนี้จะปรับเปลี่ยนเกนเป็นแบบไม่เชิงเส้นตามด้วยทำให้ระบบมีการควบคุมปรับสภาพไปตามภาระที่เปลี่ยนไป

สำหรับการทดลองการควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น โดยทำการทดลองทั้งแบบไม่มีภาระและมีภาระ 2 กิโลกรัม ซึ่งทั้งตัวควบคุมแบบพีไอดีและตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีสามารถทำงานได้ดีแต่ในช่วงที่มีภาระนั้นตัวควบคุมแบบพีไอดีมีการประวิงเวลาที่ค่อนข้างมากเนื่องจากระบบพีไอดีเป็นแบบเชิงเส้นและการทดลองที่ใช้จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้มอเตอร์เพียง 12 โวลต์ เวลาในการสุ่มของโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองมีค่าค่อนข้างมาก (0.4 วินาที) เนื่องจากถ้าใช้เวลาในการสุ่มที่เร็วจะทำให้การควบคุมความเร็วมีผลไม่ดีเท่าที่ควร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการใช้งานด้วย ในส่วนของเงื่อนไขในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในทฤษฎีที่ 1 ในบทที่ 5 เงื่อนไขทั้ง 5 ข้อนั้นเป็นเพียงเงื่อนไขเพียงพอ (Sufficient conditions) ที่ไม่จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามนี้ เพราะเงื่อนไขนี้เป็นเพียงการรับประกันว่าระบบจะทำงานแบบมีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบหรือผู้ที่นำไปใช้สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่อยู่นอกเงื่อนไขมาใช้งานได้ และระบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีนี้สามารถปรับประยุกต์ที่จะสลับให้ระบบฟัซซีพีไอทำงานก่อนระบบฟัซซีพีดีได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ได้นำเสนอเพื่อเป็นทางเลือกใหม่ ในส่วนของกล่องปรับเกนอัตโนมัติจะมีหรือไม่มีก็ได้ เพราะกล่องนี้เป็นเพียงตัวที่ปรับเปลี่ยนค่าเอาต์พุตของฟัซซีพีไอและฟัซซีพีดี ซึ่งในบางครั้งกระบวนการที่ไม่ต้องการช่วงเวลาไต่ขึ้นที่รวดเร็วก็ไม่อาจจำเป็นต้องใช้กล่องเกนอัตโนมัตินี้

ผลการทดลองที่ได้ ระบุเป็นนัยแนวโน้มที่ดีในการนำเอาวิธีการควบคุมที่นำเสนอนี้ไปประยุกต์และเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ได้กับระบบต่าง ๆ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอย่างเช่นตัวขับระบบหุ่นยนต์ที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ดูการประยุกต์ใช้ในภาคผนวก ค.และ ง.) ซึ่งทั้งระบบควบคุมแบบพีไอดีหรือระบบควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดียังสามารถทำงานได้ดี แต่การเลือกใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซีมาใช้งานนั้นจะสามารถควบคุมได้ทั้งระบบที่เป็นแบบเชิงเส้นและระบบไม่เป็นแบบเชิงเส้น

7.2 ข้อแนะนำในการวิจัย

การออกแบบและการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนี้ ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบไฮบริจด์ที่ผสมกันระหว่างระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอและระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี โดยมีตัวเลือกเป็นตัวที่เลือกสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ออกไปใช้ในการควบคุม ดังนั้นการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนี้จึงมุ่งเน้นประกันเสถียรภาพการเลือกตัวควบคุม [42] เท่านั้น เพราะในระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอและระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดีมีการประกันความเสถียรภาพในระดับท้องถิ่น [20,32,41]

7.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

1. มอเตอร์ไฟฟ้าที่นำมาใช้ในการวิจัยทั้งหมดเป็นของเก่าทั้งหมด และหาค่าพารามิเตอร์ที่แน่นอนได้ยาก

2. เครื่องมือวัดที่ใช้วัดผลการทดลองยังไม่ได้มาตรฐานเท่าที่ควร เพราะใช้การเก็บค่าหน่วยที่ออกมาจึงเป็นค่าจำนวนของการสุ่ม (Number of Sampling)

3. การทดลองการควบคุมความเร็วเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นว่าผลตอบสนองมีการแกว่งของสัญญาณ เนื่องมาจากภาคแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟตรงยังคงมีค่าความผิดพลาด

7.4 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

การปรับปรุงในอนาคตนั้นเนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ออกแบบมานั้นมีค่าพารามิเตอร์ที่ค่อนข้างมากจึงส่งผลให้ทำการปรับแต่งมีความซับซ้อนอาจใช้จีเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) หรือโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) มาปรับแต่งค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าเกนที่ดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] L. A. Zadeh. **Fuzzy set information and control.** 8^{th} Ed. 1965, pp.338-353.

[2] E. H. Mandani. "Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant." Proc. IEE, 121, 1974. pp.1585-1588.

[3] D. Driankov, H. Hellendoorrn, and M. Reinfrank, **An Introduction to Fuzzy control.** : Springer-Verlag, 1996.

[4] C. T. Lin and C. S. G. Lee, **Neural Fuzzy Systems.** : Prentice Hall, 1966.

[5] L. C. Jain, R. P. Jonhnson, Y. Takenfuji, and L. A. Zadeh. **Knowledge Based Intelligent Techniques in Industry.** FL. : CRC Press, 1999.

[6] C. von Altrock, **Fuzzy logic and Neurofuzzy Application Explained.** NJ. : Prentice Hall, Upper Saddle River, 1995.

[7] G. Chen and T. T. Pham. **Introduction to Fuzzy set, Fuzzy Logic and Fuzzy Control System.** FL, : CRC Press, Boca Raton, USA 2000.

[8] R. Jager. " Fuzzy logic in Control." PhD. Thesis of Technische Universitiet Delft, June 1995.

[9] Z. Qu and M. Dawson. **Robust Tracking Control of Robot Manipulators.** New York. : IEEE Press, 1996.

[10] G. Chen and Y. H. Joo. **Introduction to Fuzzy Control Systems," book chapter, in The Handbook of Applied Computational Intelligence.** ed. by M. L. Padgett, N. B. Karayiannis, and L. A. Zadeh, FL, : CRC Press, Boca Raton, 2001.

[11] A. Cela and Y. Hamam. "A fuzzy robust controller for trajectory tracking of robotic systems." in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf., Intell. RobotsSyst., 1992. pp. 767–774.

[12] K. Liu and F. L. Lewis. "Hybrid feedback linearization/fuzzy logic control of a flexible link manipulator." J. Intell. Fuzzy Syst., vol. 2, no. 4,1994. pp. 325–336.

[13] K. Liu, and F. L. Lewis. "Fuzzy logic-based navigation controller for an autonomous mobile robot." in Proc. IEEE Int. Conf. Syst. Man., Cybern., SanAntonio, TX, 1994. pp. 1782–1789.

[14] M. De Neyer and R. Gorez. "Fuzzy and quantitative model-based control systems for robotic manipulators." Int. J. Syst. Sci., vol. 24, no. 10,1993. pp.1863–1883.

[15] K. K. Humbla and M. Jamshidi. "Control of robotic manipulator using fuzzy logic." in Proc. 3rd Int. Conf. Fuzzy Syst., 1994. pp. 518–523.

[16] M. R. A. Totonchi, M. Jamshidi, and N. Vadiee. "A hierarchical fuzzy controller using line-curvature feature extraction for a single link flexible arm." in Proc. 3rd Int. Conf. Fuzzy Syst., 1994. pp. 524–529.

[17] M. Segino and M. Nishida. "Fuzzy control of model car." Fuzzy SetsSyst., vol. 16, 1985. pp. 110–113.

[18] J. Zhang. "Applications of fuzzy logic control in autonomous robot systems." Int. J. Syst. Sci., vol. 24, no. 10, 1993. pp. 1885–1904.

[19] T. T. Pham, J. J. Weiss, and G. Chen. "Optimal fuzzy logic control for docking a boat." in Proc. 2nd Int. Wkshp. Fuzzy Logic Applicat., College Station, TX, Dec. 2–4, 1992. pp. 66–73.

[20] G. Chen. "Conventional and fuzzy PID controllers: An overview." Int.J. Intell. Contr. Syst., vol. 1, no. 2. 1996. pp. 235–246.

[21] T. T. Pham and G. Chen. "Optimal fuzzy control systems with applications multilink manipulators." in Proc. EXPERSYS'94, Houston, TX,Dec. 1–2, Jan. 1994. pp. 531–536

[22] W. Tang and G. Chen. "A robust fuzzy PI controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties." in Proc. FUZZ-IEEE'94, Orlando, FL, June 26–July 2, 1994. pp. 1554–1559.

[23] M. Upadhyaya and G. Chen. "Fuzzy LQ controller design for a robot arm with joint-flexibility uncertainties." in Proc. EXPERSYS'94,Houston, TX, Dec. 1–2, 1994. pp. 511–518.

[24] H. A. Malki and D. Feigenspan. "DC motor control using fuzzy proportional derivative technique." in Proc. NAFIPS/IFIS/NASA'94, San Antonio, TX, Dec. 1–2, 1994.

[25] H. X. Li, H. B. Gatland, and A. W. Green. " Fuzzy variable structure control." IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics---Part B: Cybernetics, 27, 1977. pp. 306-312.

[26] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfank. **An Introduction to Fuzzy Control**. : Springer-Verlag, 1996.

[27] D. Kincaid and W.Cheney. **Numerical Analysis.** CA. Brooks/Cole Publishing Company. : Passific Grove, 1991.

[28] C. L. Chen, S. N. Wang, C. T. Hsieh, and F. Y. Cheng. " Theoretical analysis of crisp-type fuzzy logic controller using various t-norm. sum-gravity inference methods." IEEE Trans. on Fuzzy Systems, no. 6. 1998. pp. 122-136.

[29] M. M. Gupta and J. Qi. " Design of fuzzy logic controller based on generalized T-operators." Fuzzy Sets and Systems, no. 40, 1991. pp. 473-489.

[30] J. Franssila and H. N. Koivo. "Fuzzy control of an industrial robot in transporter environment." IEEE Int. on Industrial Electronics, Control, Instrument, and Automation, IECON'92, San Dieo, CA, USA, November 9-13, 1992. pp. 624-629.

[31] A. Makkon and H. N. Koivo. " Fuzzy control of a nonlinear servomotor model." 3rd Int. Workshop on Advance Motion Control, Berkeley, CA, USA, Mar. 20-23, 1994. pp.833-841.

[32] H. A. Malki, H. Li, and G. Chen. "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems." IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 2, 1994. pp. 245–254.

[33] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley. "Fuzzy control theory: A nonlinear case." Automatica, vol. 26, no. 3, 1990. pp. 513–520.

[34] T. Pattaradej, K. Chumsawee, and P. Sooraksa. "Fuzzy PI with Gain Scheduling Control for a Flexible Joint Robot." Int. Conf., on Control, Automation and Systems (16thKACC), Jeju Korea, 2001. pp.671-674.

[35] T. Pattaradej, P. Sooraksa, and G. Chen. "Implementation of A Modified Fuzzy Proportional-Integral Computer Aided Control for DC Servo Motors." The Second Int. Conf., on Intelligent Technologies, Bangkok Thailand, 2001, 2001. pp. 85-90.

[36] T. Pattaradej, P. Chandang, M. Lertwatechahakul, P. Sooraksa, and G. Chen. "A Speed Evaluation for Conventional PID and Fuzzy Controllers." The Second Int. Conf., on Intelligent Technologies, Bangkok Thailand, 2001, 2001. pp. 91-96,

[37] G. J. Klir, **Fuzzy Set and Fuzzy Logic: Theory and Applications.** : Prentice Hall, 1995.

[38] Y. C. Hsu and G. Chen. **Fuzzy dynamical modeling and control techniques for nonlinear processes with applications to multi-input multi-output systems.** in Fuzzy Theory: Systems Technology and Applications, ed. by C. T. Leondes, New York. : Academic Press, vol. 1, 1999. pp. 47-86.

[39] C. M. Liaw and S. Y. Cheng. "Fuzzy two-degrees-of-freedom speed controller for motor drives." IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 42, no. 2, 1995. pp 209-216.

[40] H. A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan and G. Chen. "Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying load." IEEE Trans. on Control System Technology, vol. 5, no. 12, 1997. pp. 371-378.

[41] G. Chen and H. Ying, "BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control systems," J. of Intel. Fuzzy Syst., vol. 5, 1997. pp. 3-21.

[42] P. Sooraksa, T. Pattatradej and G Chen. "Design and implementation of fuzzy P^2ID for handlebars control bicycle robot." Integrated Computer-Aides Engineering, vol. 9, no. 4, 2002. pp. 319-331.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

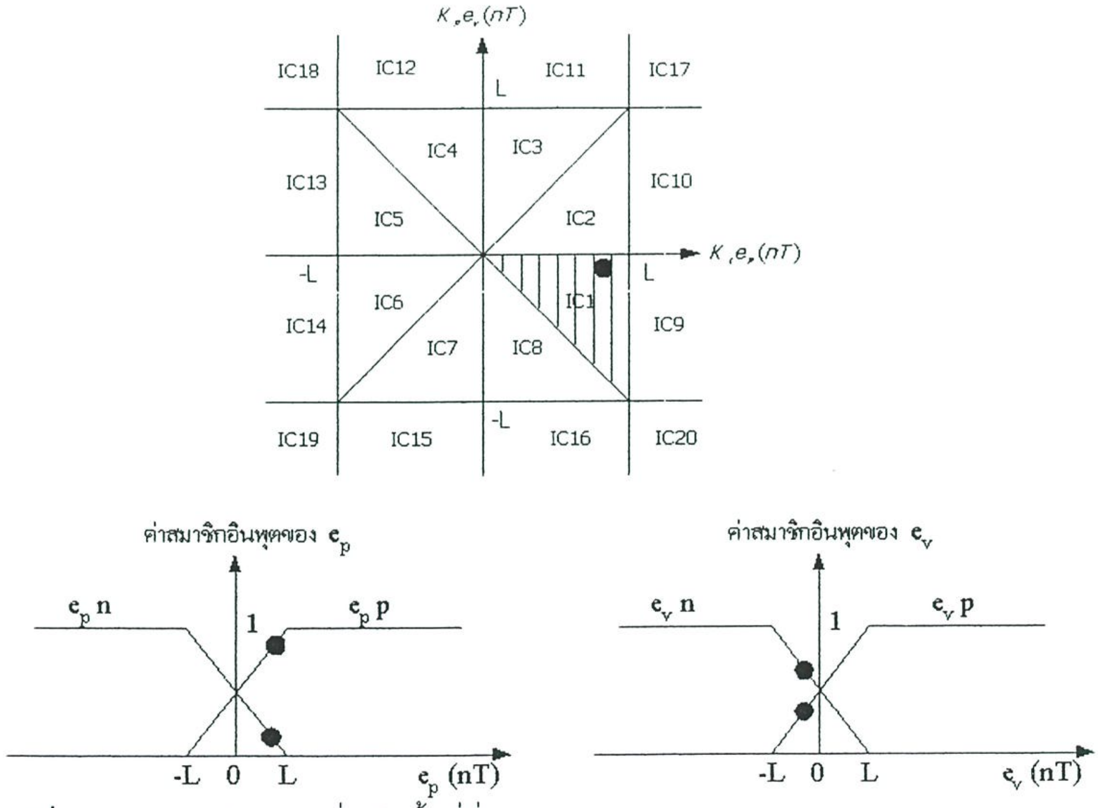
การหาสมการประจำพื้นที่ของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอในบทที่ 3

การหาสมการประจำพื้นที่ต่าง ๆ โดยที่ $o \cdot n = -L, o \cdot z = 0, o \cdot p = L$ และได้สมการที่นำไปคำนวณทั้ง 20 พื้นที่ดังต่อไปนี้

$$e_p \cdot p = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2L} \qquad e_p \cdot n = -\frac{k_i e_p(nT) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{k_p e_v(nT) + L}{2L} \qquad e_v \cdot n = -\frac{k_p e_v(nT) + L}{2L}$$

1. **พื้นที่ที่** 1 (IC1)



รูปที่ ผ.ก.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1

จากรูปที่ ผ.ก.1 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 1 ในตารางที่ ผ.ก.1 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.1 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 1

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

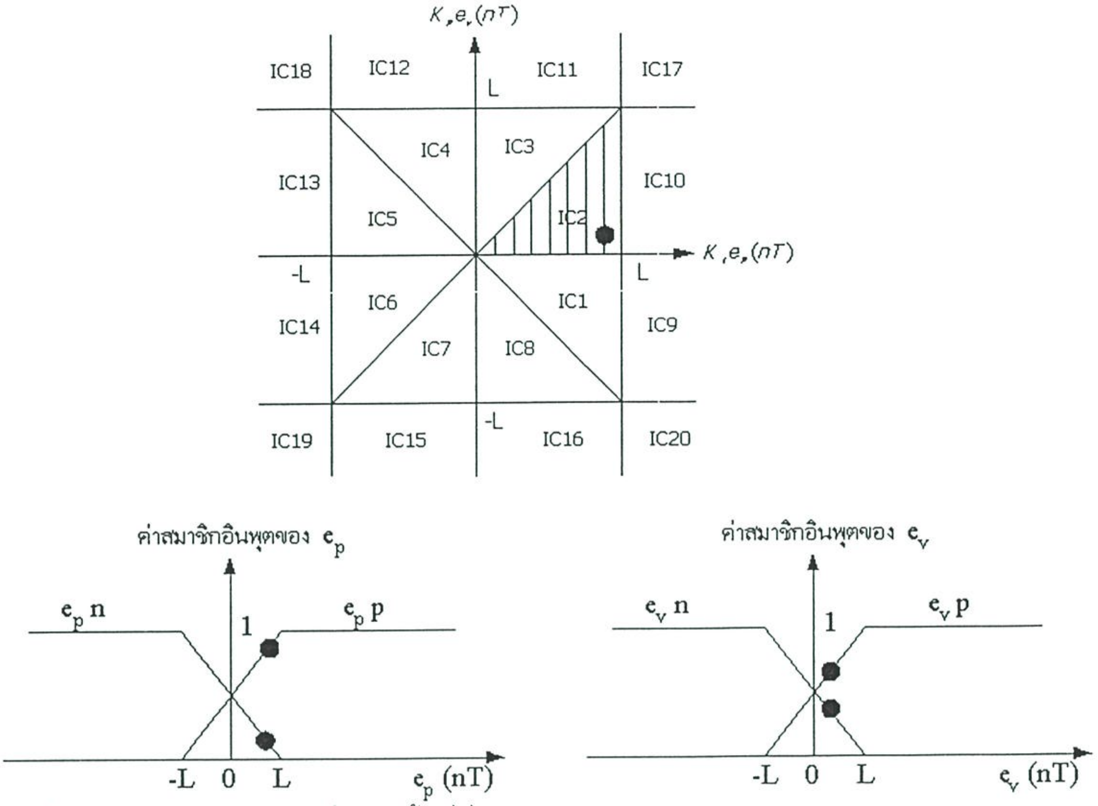
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)} \tag{1}$$

2. **พื้นที่ที่** 2 (IC2)



รูปที่ ผ.ก.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2

จากรูปที่ ผ.ก.2 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 2 ในตารางที่ ผ.ก.2 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.1 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 2

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

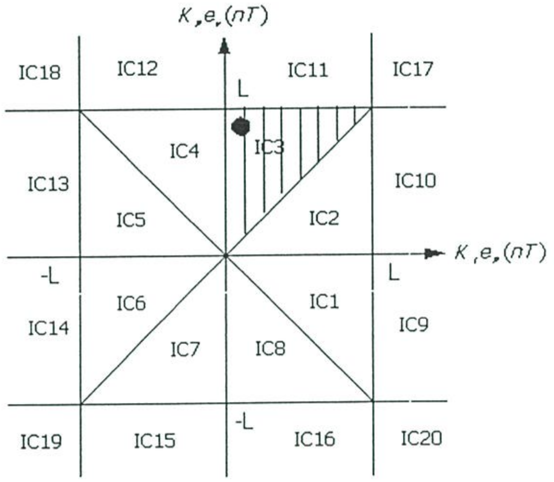
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

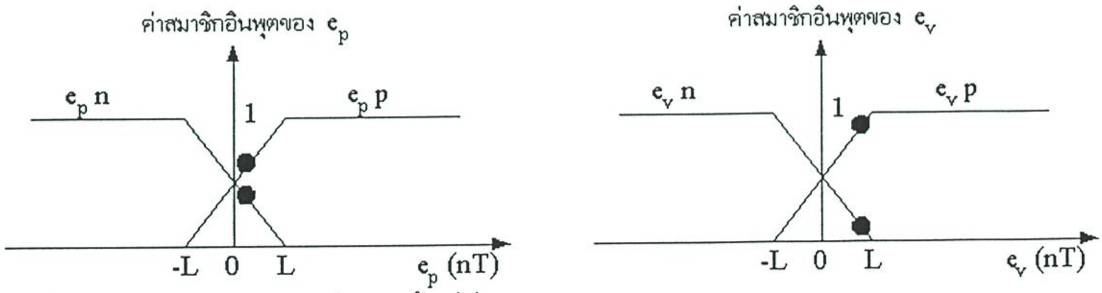
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i |e_p(nT)|)} \quad (2)$$

3. **พื้นที่ที่** 3 (IC3)





รูปที่ ผ.ก.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3

จากรูปที่ ผ.ก.3 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 3 ในตารางที่ ผ.ก.3 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.3 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 3

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

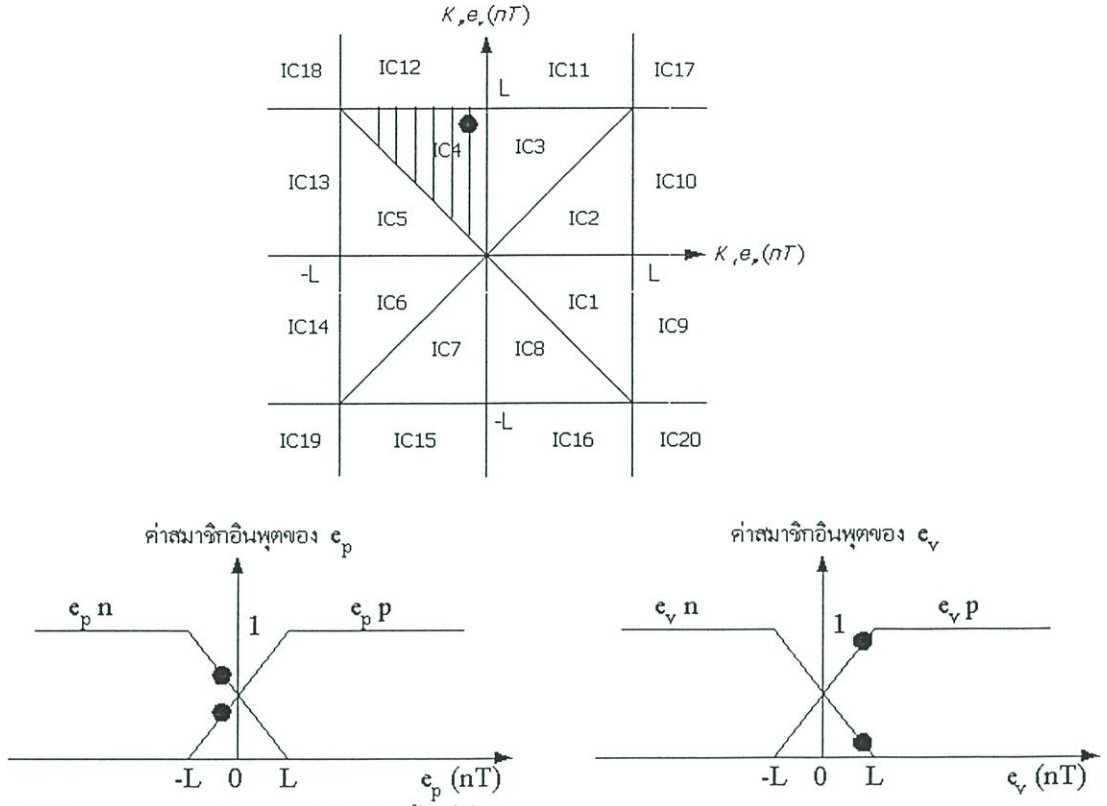
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{-k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \qquad (3)$$

4. **พื้นที่ที่** 4 (IC4)



รูปที่ ผ.ก.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4

จากรูปที่ ผ.ก.4 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 4 ในตารางที่ ผ.ก.4 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.4 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 4

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

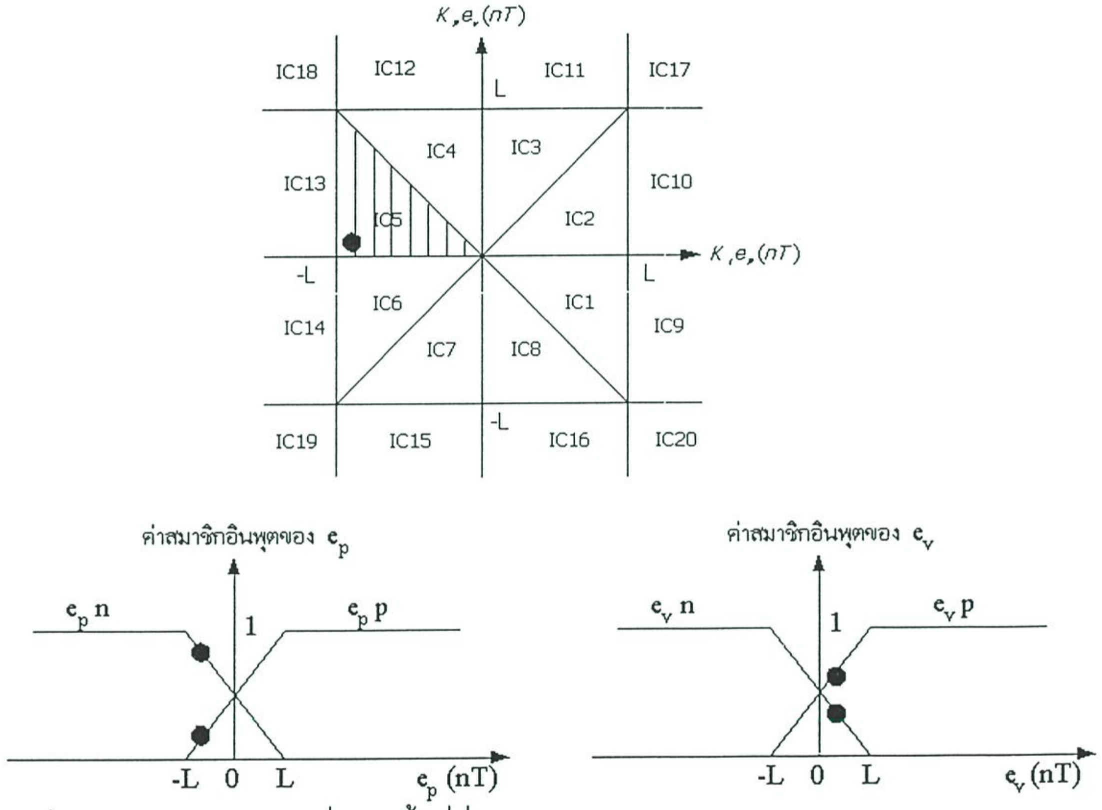
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{-k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \quad (4)$$

5. **พื้นที่ที่** 5 (IC5)



รูปที่ ผ.ก.5 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5

จากรูปที่ ผ.ก.4 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 5 ในตารางที่ ผ.ก.4 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.5 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 5

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

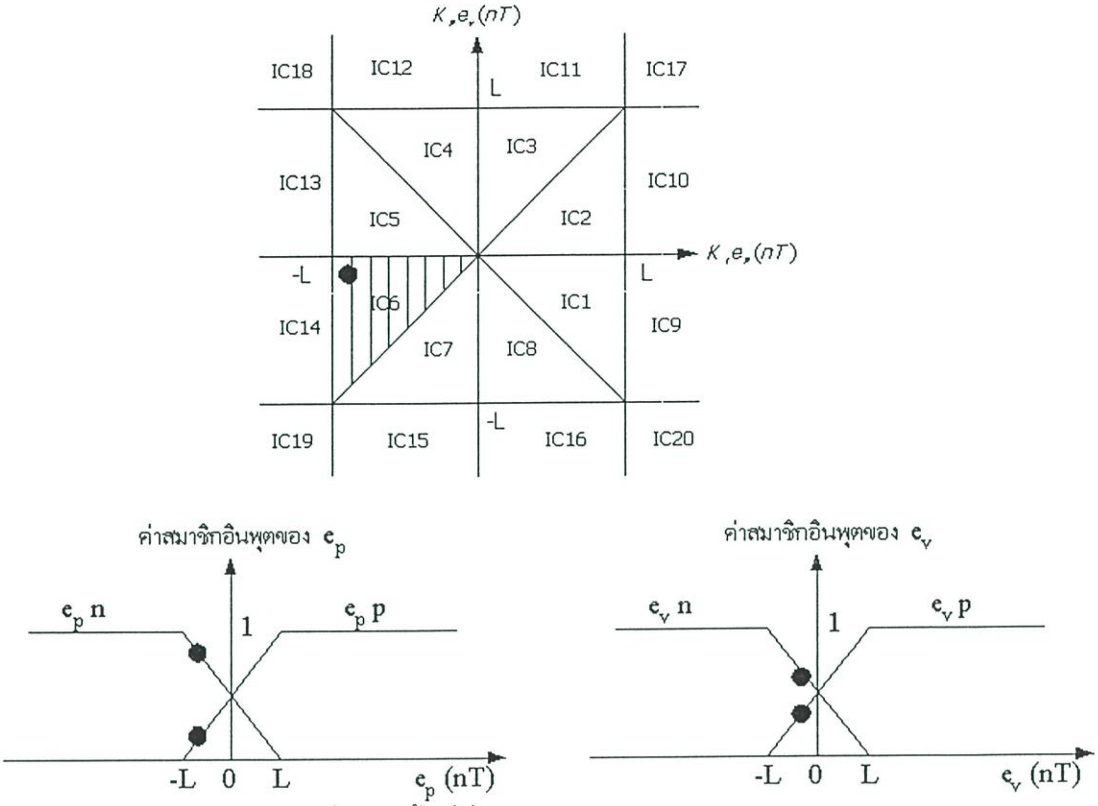
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L + k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_i e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i|e_p(nT)|)} \qquad (5)$$

6. **พื้นที่ที่** 6 (IC6)



รูปที่ ผ.ก.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6

จากรูปที่ ผ.ก.6 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 6 ในตารางที่ ผ.ก.6 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.6 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 6

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

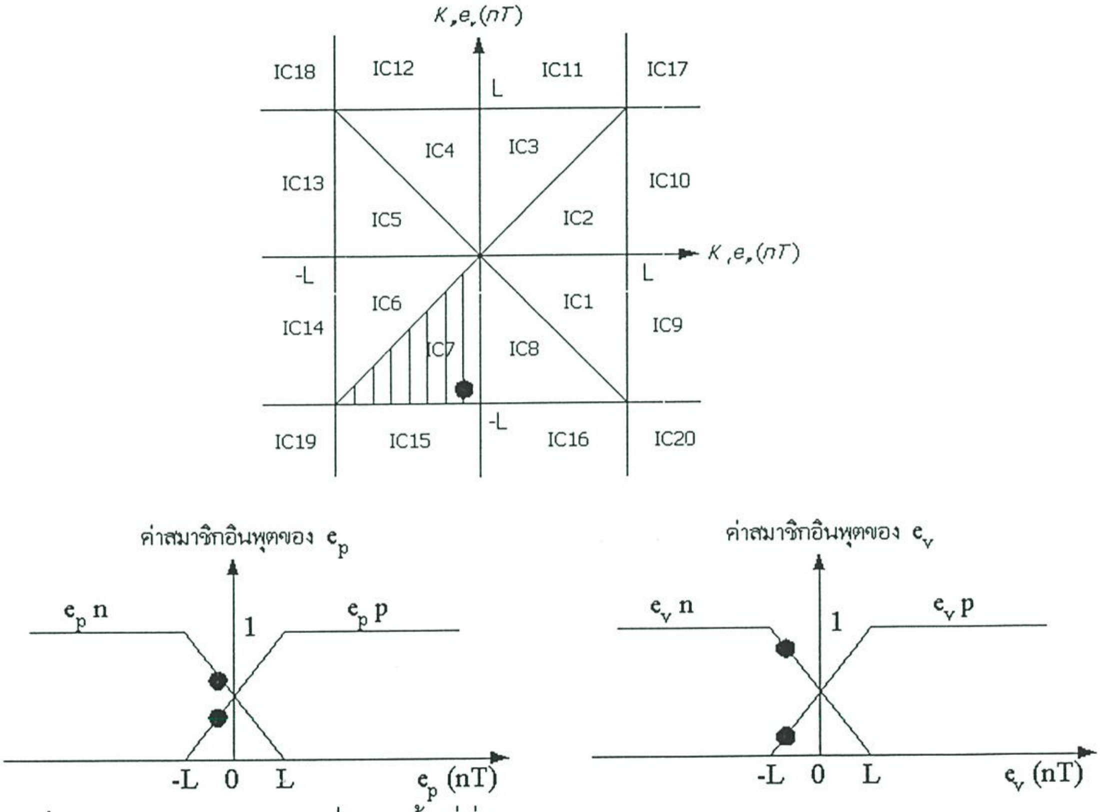
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L) + (-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L + k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_i e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_i|e_p(nT)|)} \quad (6)$$

7. **พื้นที่ที่** 7 (IC7)



รูปที่ ผ.ก.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7

จากรูปที่ ผ.ก.7 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 7 ในตารางที่ ผ.ก.7 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.7 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 7

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

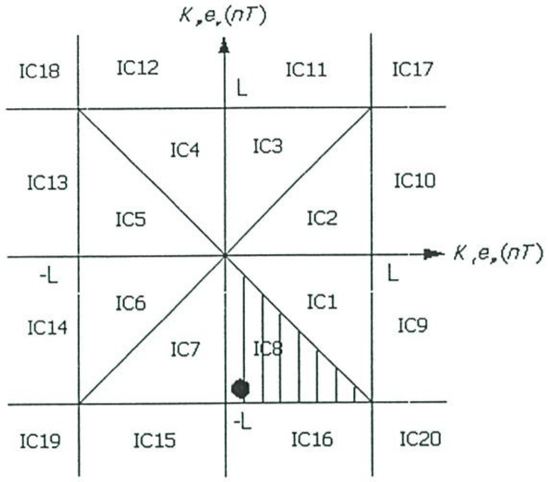
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT) + L)(L) + (-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L + k_p e_v(nT) + L - k_i e_p(nT) + L + k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

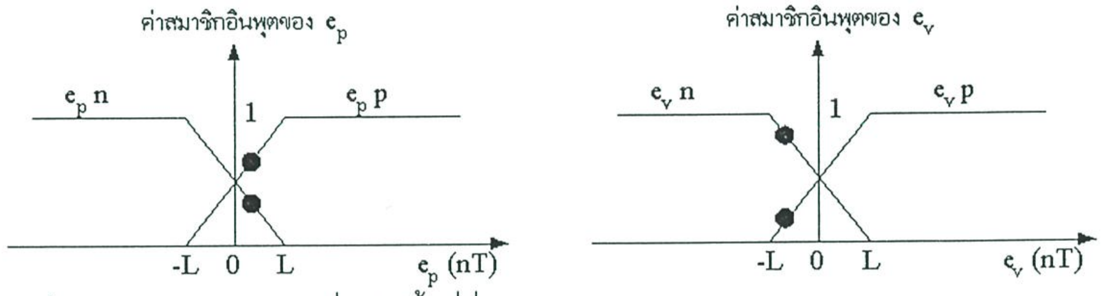
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_p e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p |e_v(nT)|)} \qquad (7)$$

8. **พื้นที่ที่** 8 (IC8)





รูปที่ ผ.ก.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8

จากรูปที่ ผ.ก.8 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 8 ในตารางที่ ผ.ก.8 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.8 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 8

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

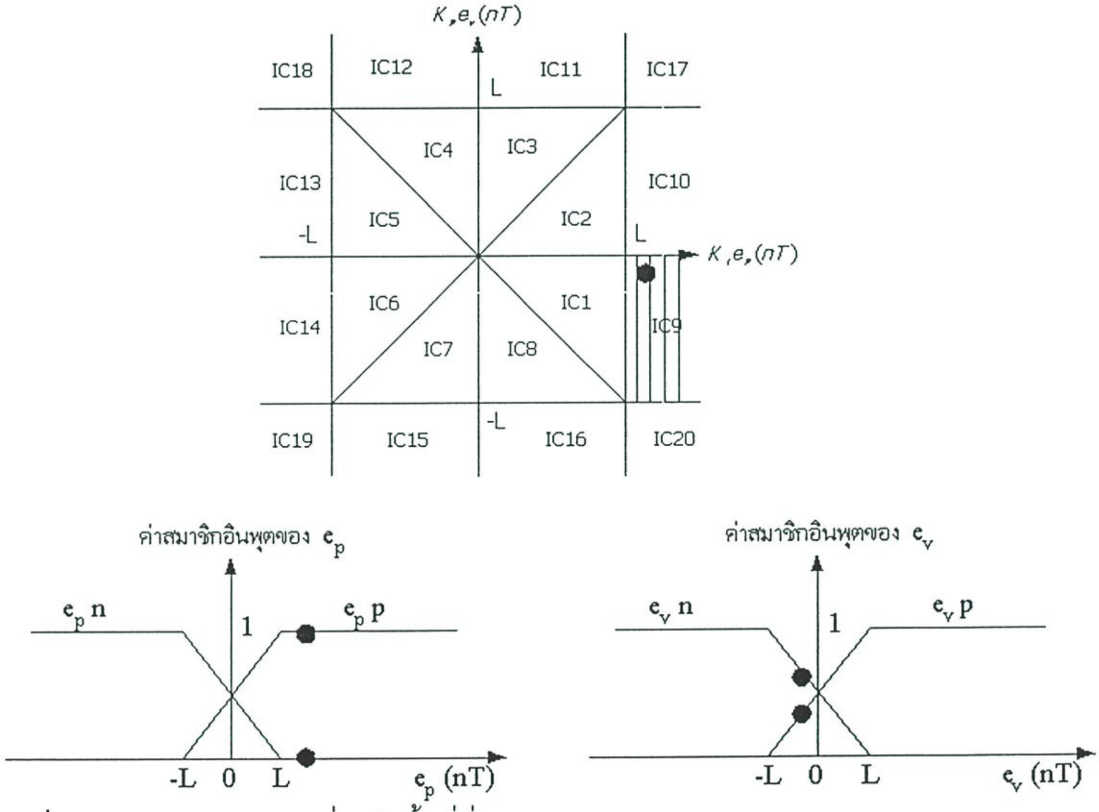
$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT)+L)(L)+(-k_i e_p(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT)+L+k_p e_v(nT)+L-k_i e_p(nT)+L+k_i e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L + k_p e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \le 0$ จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L[k_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2(2L - k_p|e_v(nT)|)} \quad (8)$$

9. **พื้นที่ที่** 9 (IC9)



รูปที่ ผ.ก.9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9

จากรูปที่ ผ.ก.9 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 9 ในตารางที่ ผ.ก.9 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.9 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 9

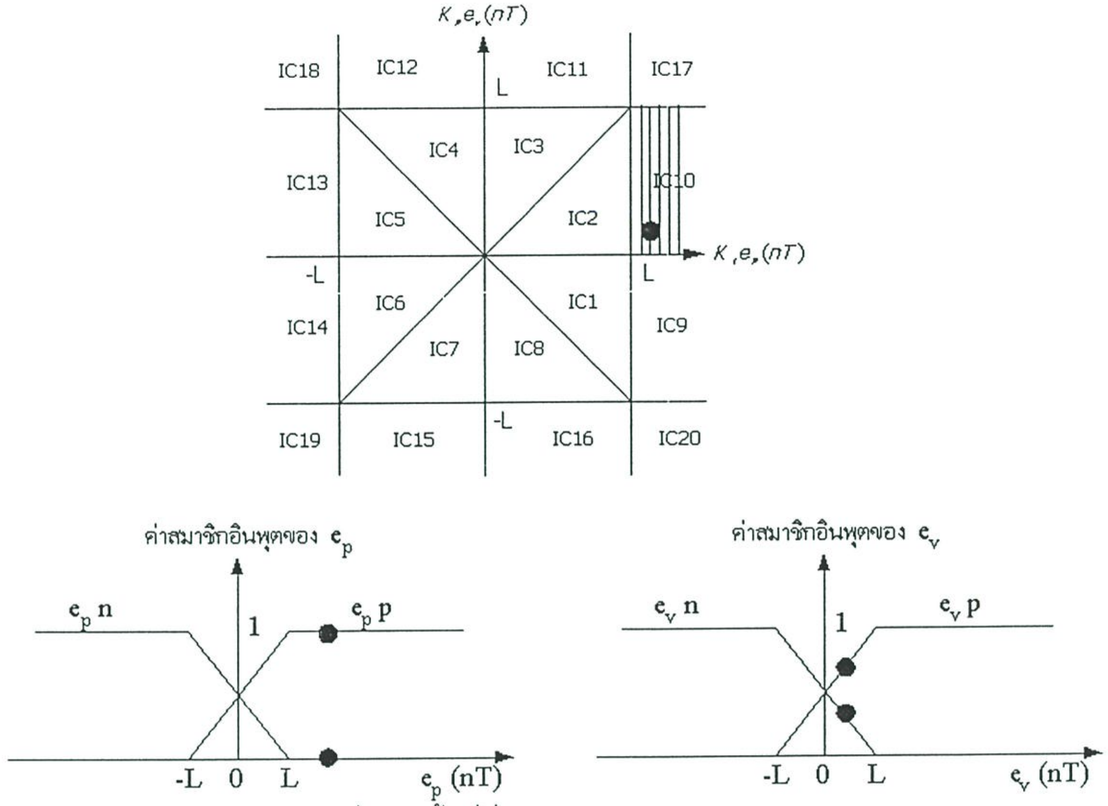
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	0	0
4	n	n	0	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L + k_p e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) + L}{2} \tag{9}$$

10. **พื้นที่ที่** 10 (IC10)



รูปที่ ผ.ก.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10

จากรูปที่ ผ.ก.10 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 10 ในตารางที่ ผ.ก.10 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.10 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 10

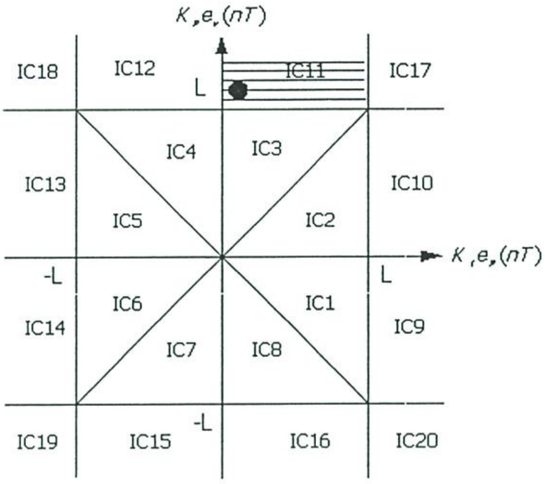
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	L
2	p	n	$e_v \cdot n$	0
3	n	p	0	0
4	n	n	0	$-L$

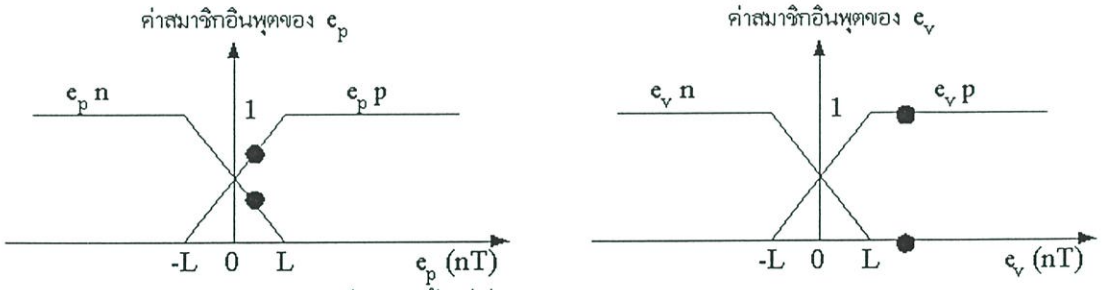
จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_v(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L + k_p e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) + L}{2} \tag{10}$$

11. **พื้นที่ที่** 11 (IC11)





รูปที่ ผ.ก.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11

จากรูปที่ ผ.ก.11จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 11 ในตารางที่ ผ.ก.11 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.11 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 11

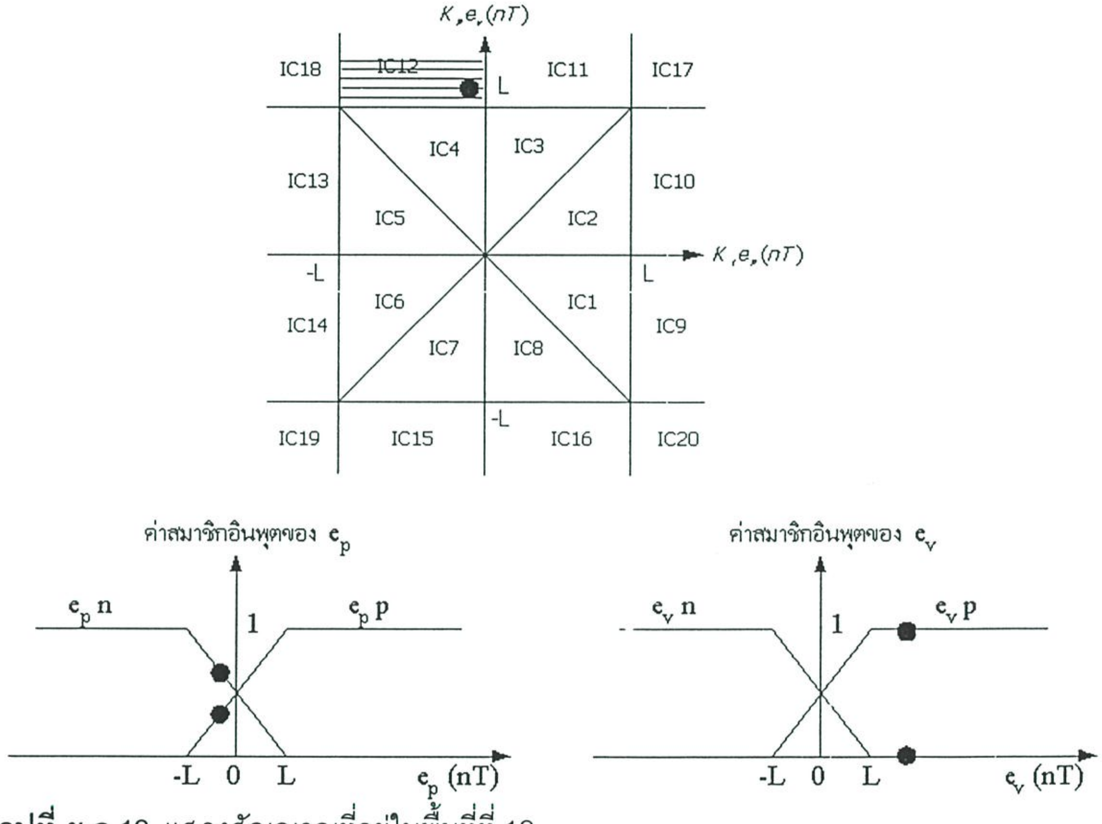
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	0	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	0	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2} \qquad (11)$$

12. **พื้นที่ที่** 12 (IC12)



รูปที่ ผ.ก.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12

จากรูปที่ ผ.ก.12 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 12 ในตารางที่ ผ.ก.12 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.12 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 12

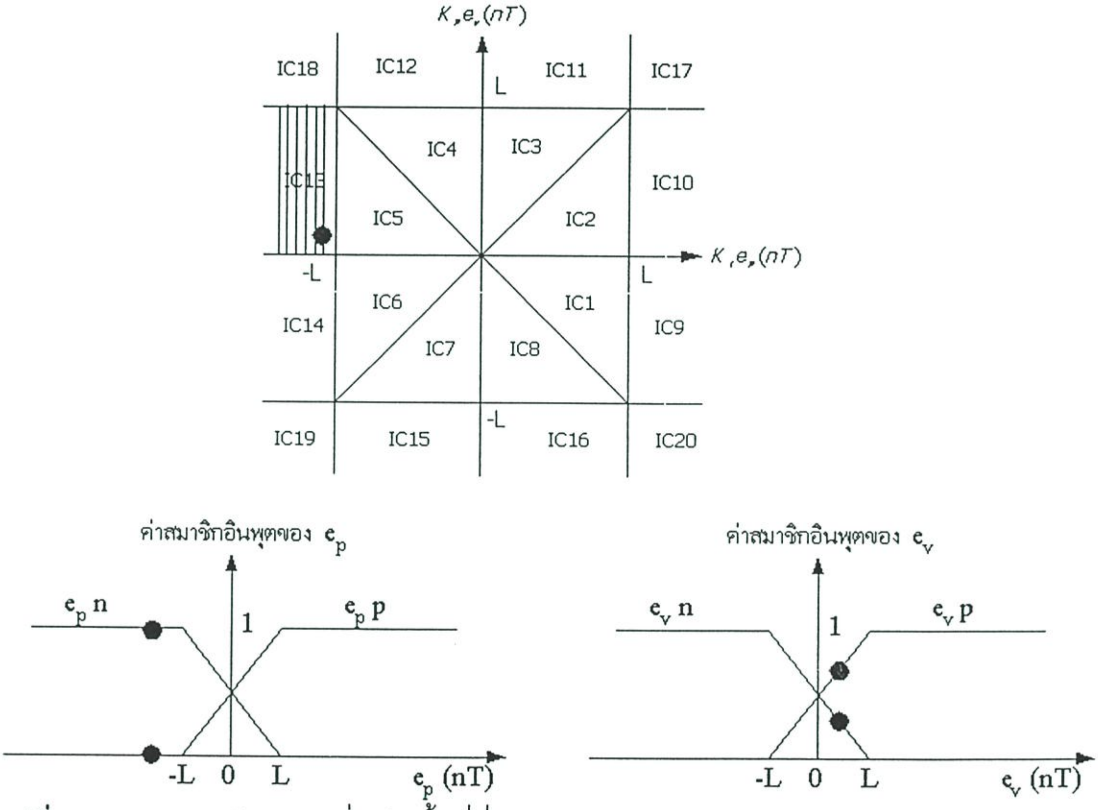
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	L
2	p	n	0	0
3	n	p	$e_p \cdot n$	0
4	n	n	0	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(k_i e_p(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) + L}{2} \quad (12)$$

13. **พื้นที่ที่** 13 (IC13)



รูปที่ ผ.ก.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13

จากรูปที่ ผ.ก.13 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 13 ในตารางที่ ผ.ก.13 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.13 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 13

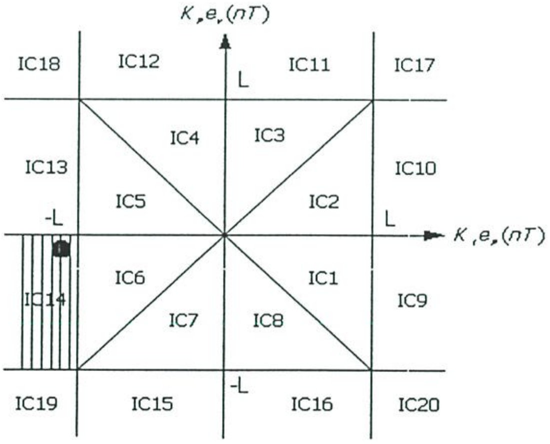
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	L
2	p	n	0	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

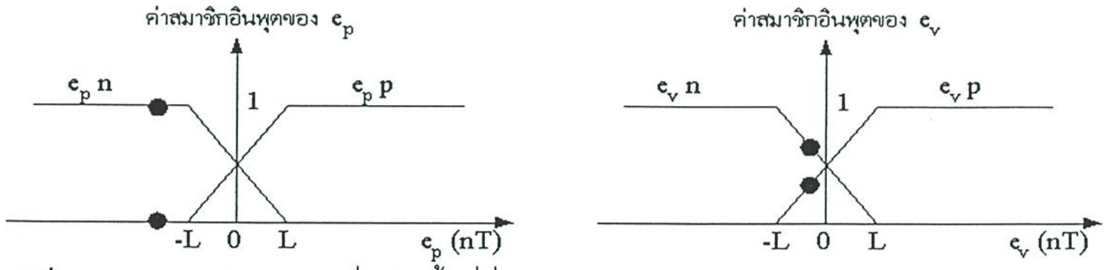
จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) - L}{2} \tag{13}$$

14. **พื้นที่ที่** 14 (IC14)





รูปที่ ผ.ก.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14

จากรูปที่ ผ.ก.14 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 14 ในตารางที่ ผ.ก.14 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.14 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 14

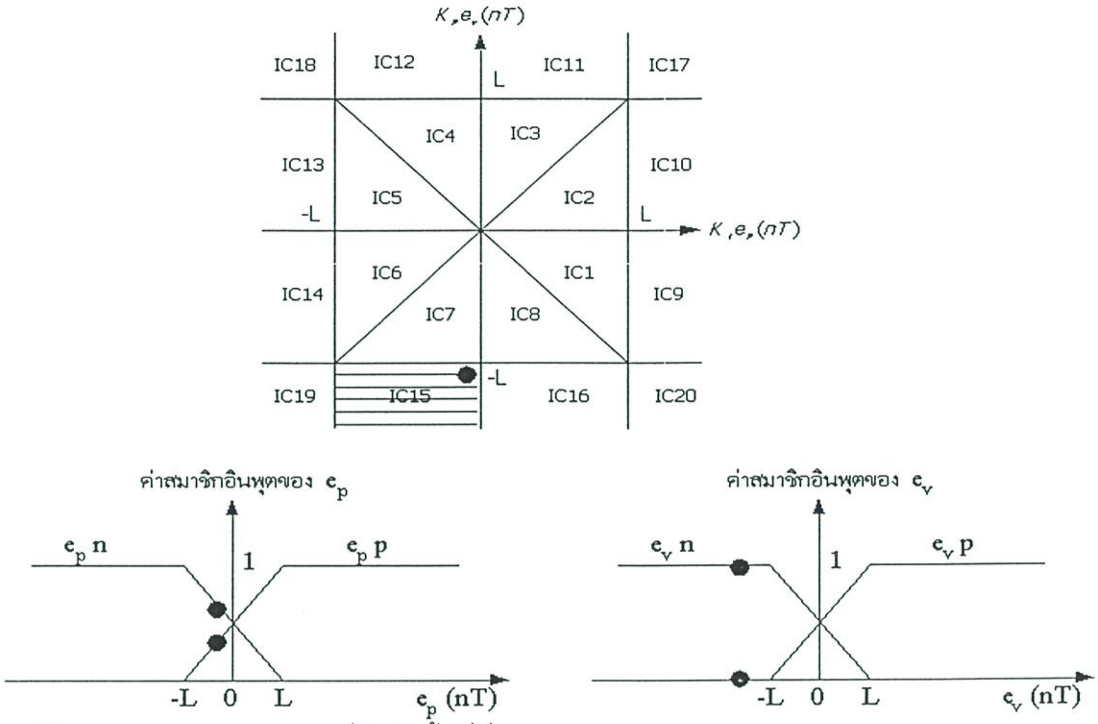
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	L
2	p	n	0	0
3	n	p	$e_v \cdot p$	0
4	n	n	$e_v \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_p e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_v(nT) + L - k_p e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_p e_v(nT) - L}{2} \tag{14}$$

15. **พื้นที่ที่** 15 (IC15)



รูปที่ ผ.ก.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15

จากรูปที่ ผ.ก.15 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 15 ในตารางที่ ผ.ก.15 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.15 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 15

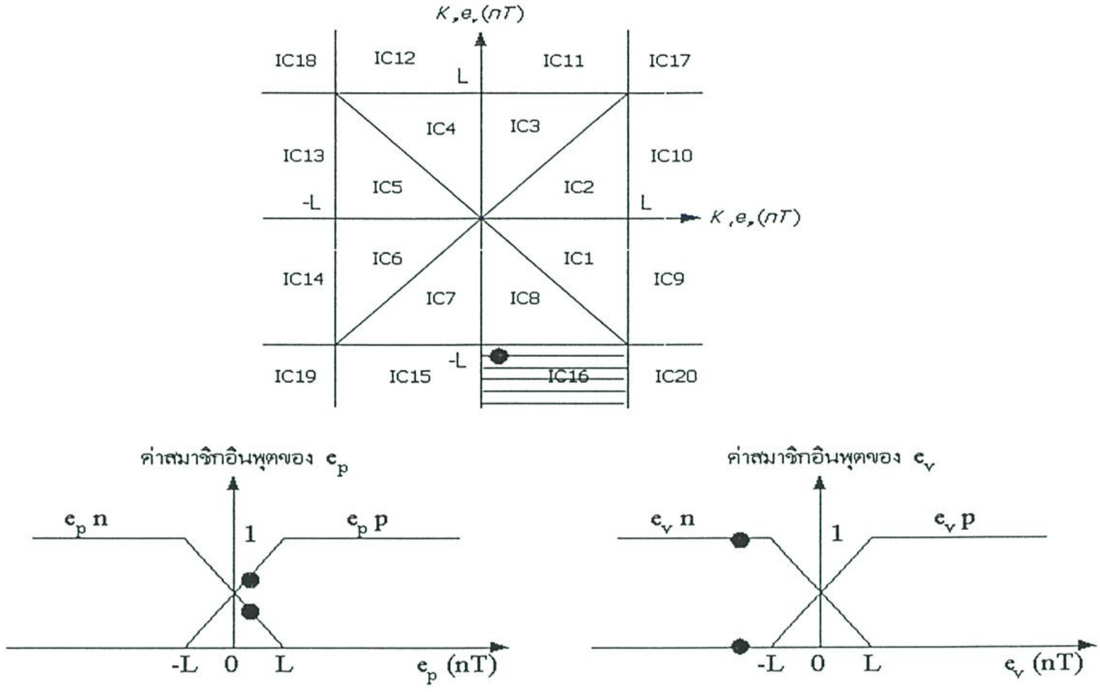
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	0	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \qquad (15)$$

16. **พื้นที่ที่** 16 (IC16)



รูปที่ ผ.ก.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16

จากรูปที่ ผ.ก.16 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 16 ในตารางที่ ผ.ก.16 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.16 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 16

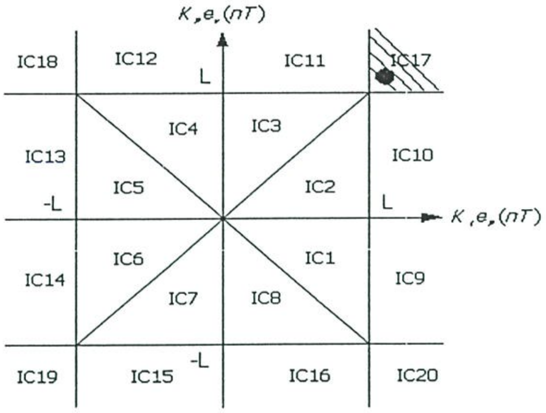
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	L
2	p	n	$e_p \cdot p$	0
3	n	p	0	0
4	n	n	$e_p \cdot n$	$-L$

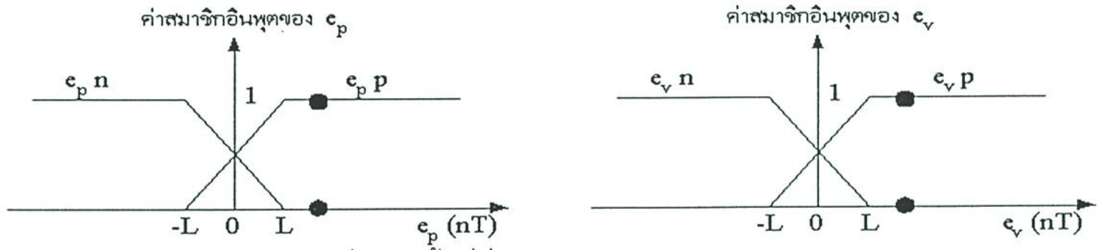
จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_i e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_i e_p(nT) + L - k_i e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{k_i e_p(nT) - L}{2} \qquad (16)$$

17. **พื้นที่ที่** 17 (IC17)





รูปที่ ผ.ก.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17

จากรูปที่ ผ.ก.17 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 17 ในตารางที่ ผ.ก.17 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.17 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 17

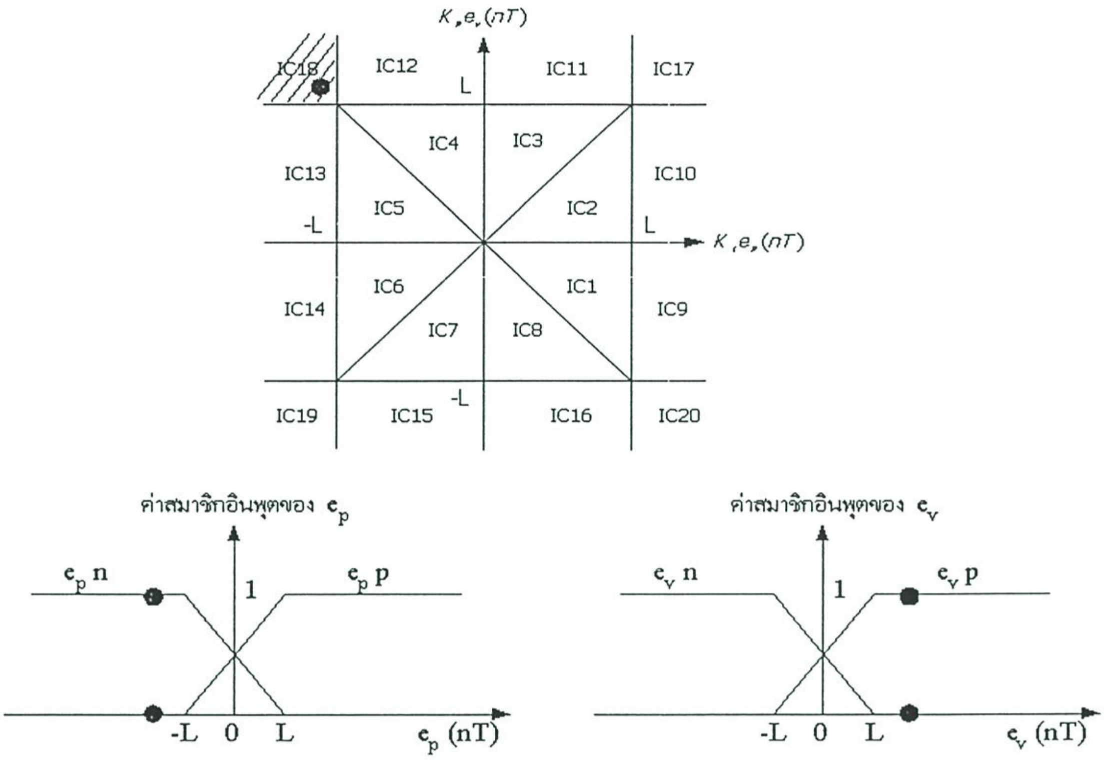
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	*p*	*p*	1	*L*
2	*p*	*n*	0	*0*
3	*n*	*p*	0	*0*
4	*n*	*n*	0	*-L*

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times L$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = L \qquad (17)$$

18. **พื้นที่ที่** 18 (IC18)



รูปที่ ผ.ก.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18

จากรูปที่ ผ.ก.18 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 18 ในตารางที่ ผ.ก.18 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.18 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 18

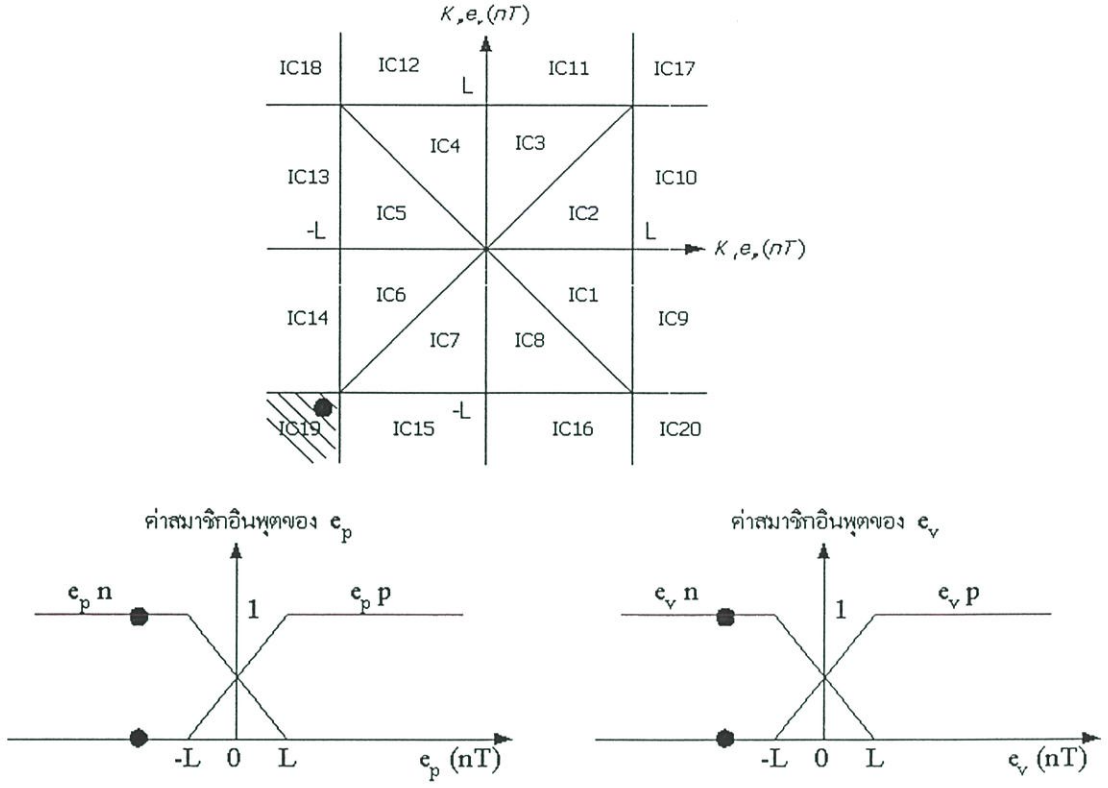
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	L
2	p	n	0	0
3	n	p	1	0
4	n	n	0	$-L$

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times 0$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0 \qquad (18)$$

19. **พื้นที่ที่** 19 (IC19)



รูปที่ ผ.ก.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19

จากรูปที่ ผ.ก.19 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 19 ในตารางที่ ผ.ก.19 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.19 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 19

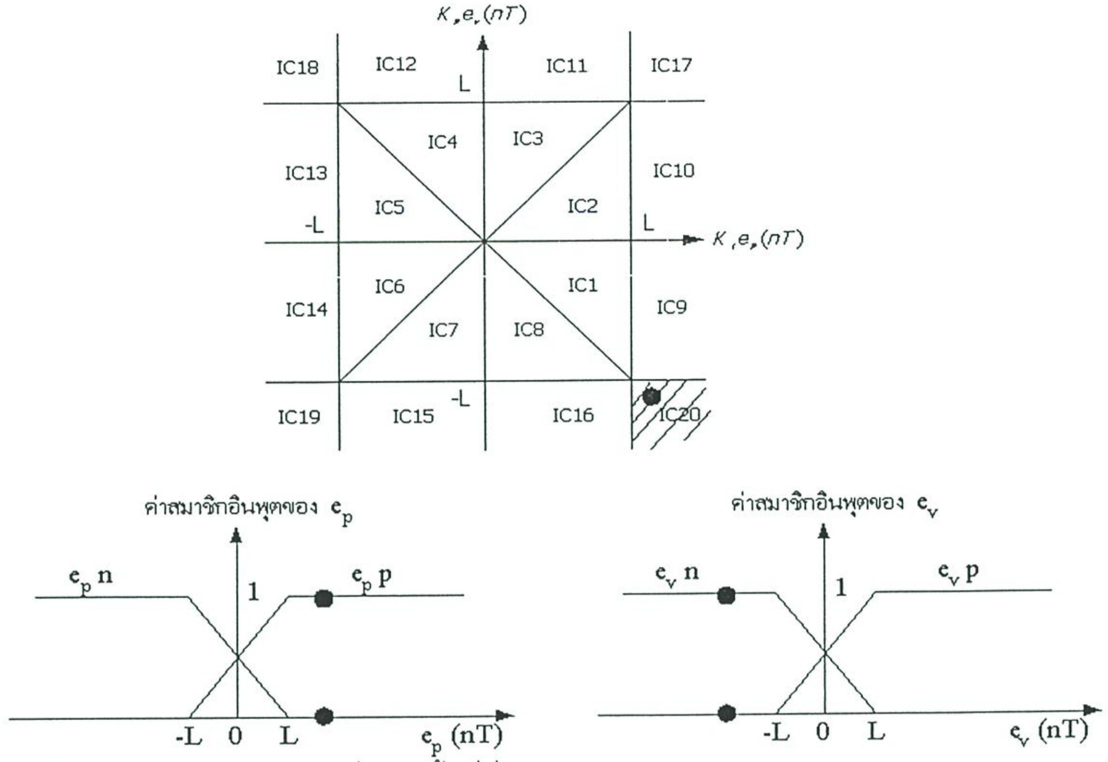
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	*p*	*p*	0	*L*
2	*p*	*n*	0	*0*
3	*n*	*p*	0	*0*
4	*n*	*n*	1	*-L*

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times (-L)$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = -L \qquad (19)$$

20. **พื้นที่ที่** 20 (IC20)



รูปที่ ผ.ก.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20

จากรูปที่ ผ.ก.20 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 20 ในตารางที่ ผ.ก.20 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ก.20 กฎของระบบฟัซซีพีไอในพื้นที่ที่ 20

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	*p*	*p*	0	*L*
2	*p*	*n*	1	*0*
3	*n*	*p*	0	*0*
4	*n*	*n*	0	*-L*

จะได้

$$\Delta u_{pi}(nT) = 1 \times 0$$

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0 \qquad (20)$$

ภาคผนวก ข.

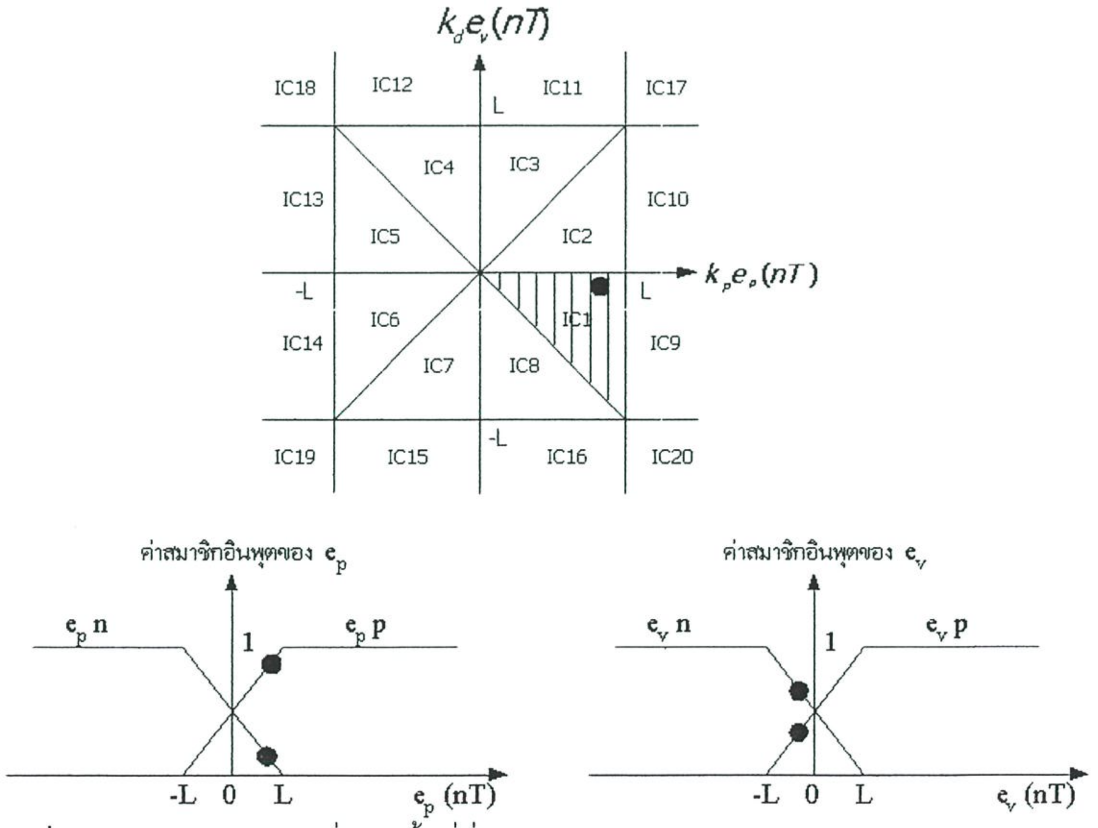
การหาสมการประจำพื้นที่ของระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี ในบทที่ 4

การหาสมการประจำพื้นที่ต่าง ๆ โดยที่ $o \cdot n = -L, o \cdot z = 0, o \cdot p = L$ และได้สมการที่นำไปคำนวณทั้ง 20 พื้นที่ดังต่อไปนี้

$$e_p \cdot p = \frac{k_p e_p(nT) + L}{2L} \qquad e_p \cdot n = -\frac{k_p e_p(nT) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{k_d e_v(nT) + L}{2L} \qquad e_v \cdot n = -\frac{k_d e_v(nT) + L}{2L}$$

1. **พื้นที่ที่** 1 (IC1)



รูปที่ ผ.ข.1 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 1

จากรูปที่ ผ.ข.1 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 1 ในตารางที่ ผ.ข.1 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.1 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 1

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

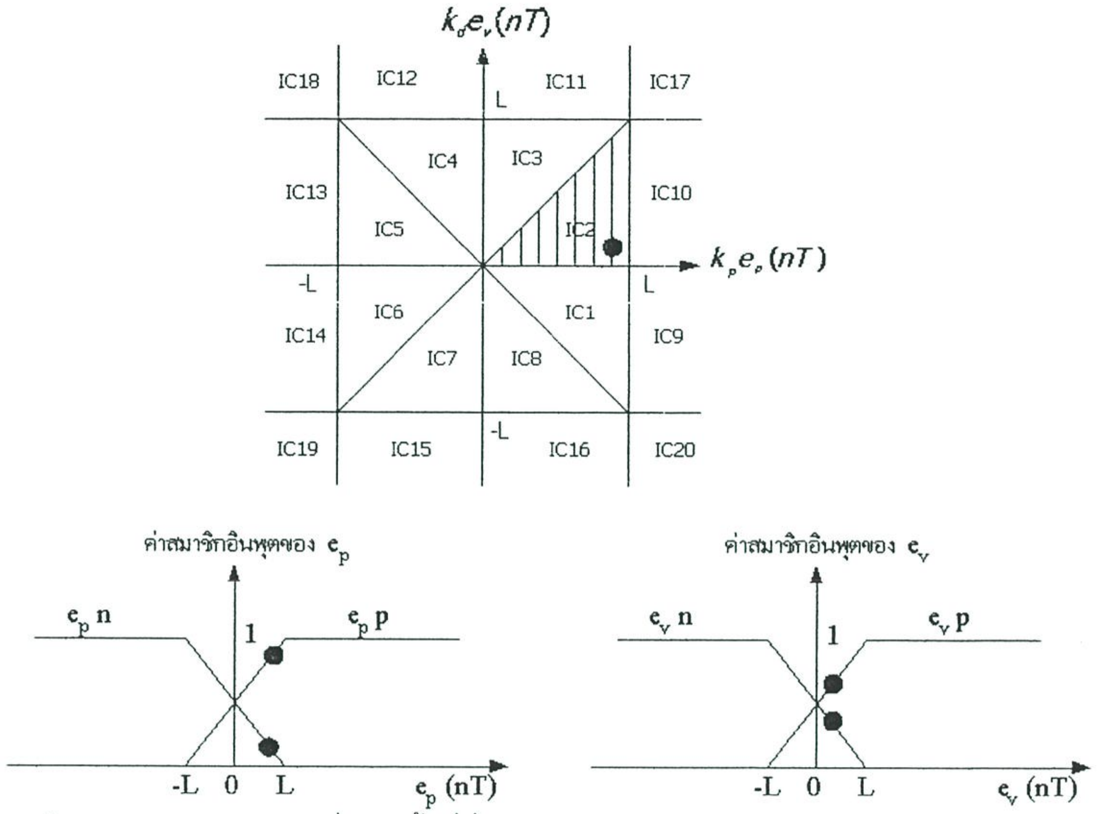
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_d e_v(nT)+L)(L)+(-k_p e_p(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT)+L-k_d e_v(nT)+L-k_p e_p(nT)+L-k_p e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_p e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)+k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_p|e_p(nT)|)} \tag{1}$$

2. **พื้นที่ที่** 2 (IC2)



รูปที่ ผ.ข.2 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 2

จากรูปที่ ผ.ข.2 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 2 ในตารางที่ ผ.ข.2 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.2 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 2

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

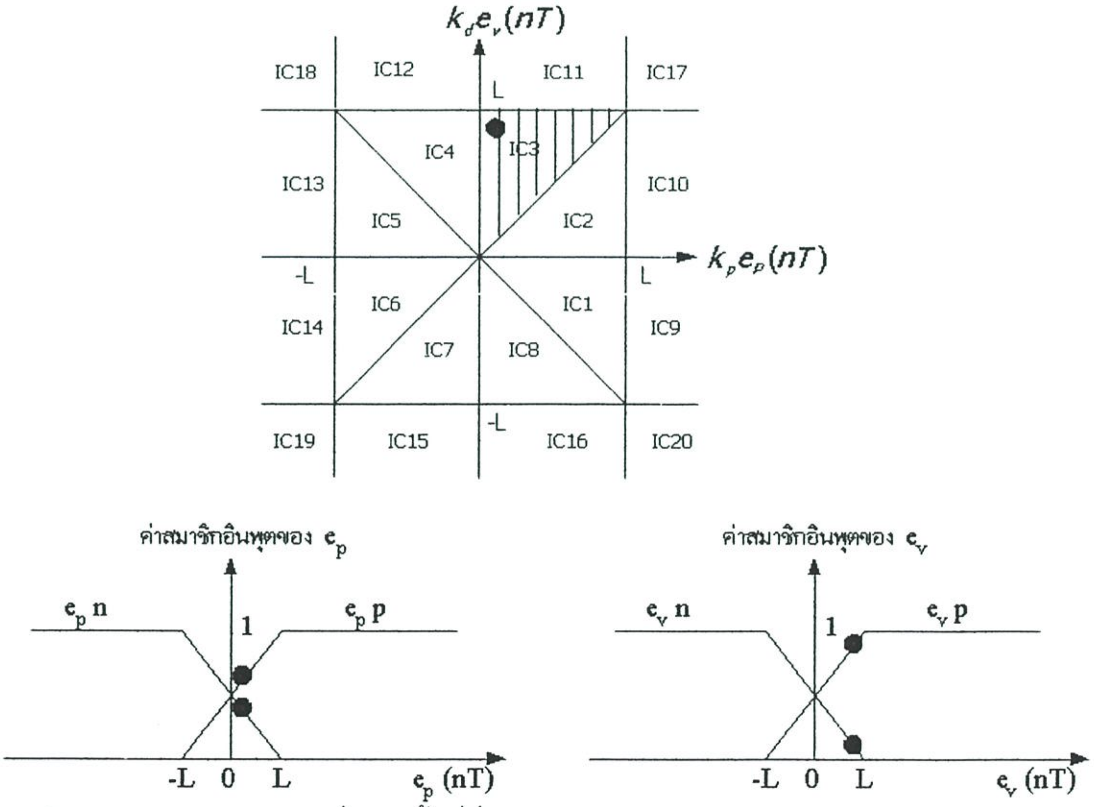
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_d e_v(nT)+L)(L)+(-k_p e_p(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT)+L-k_d e_v(nT)+L-k_p e_p(nT)+L-k_p e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_p e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)+k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_p|e_p(nT)|)} \qquad (2)$$

3. **พื้นที่ที่** 3 (IC3)



รูปที่ ผ.ข.3 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 3

จากรูปที่ ผ.ข.3 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 3 ในตารางที่ ผ.ข.3 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.3 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 3

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

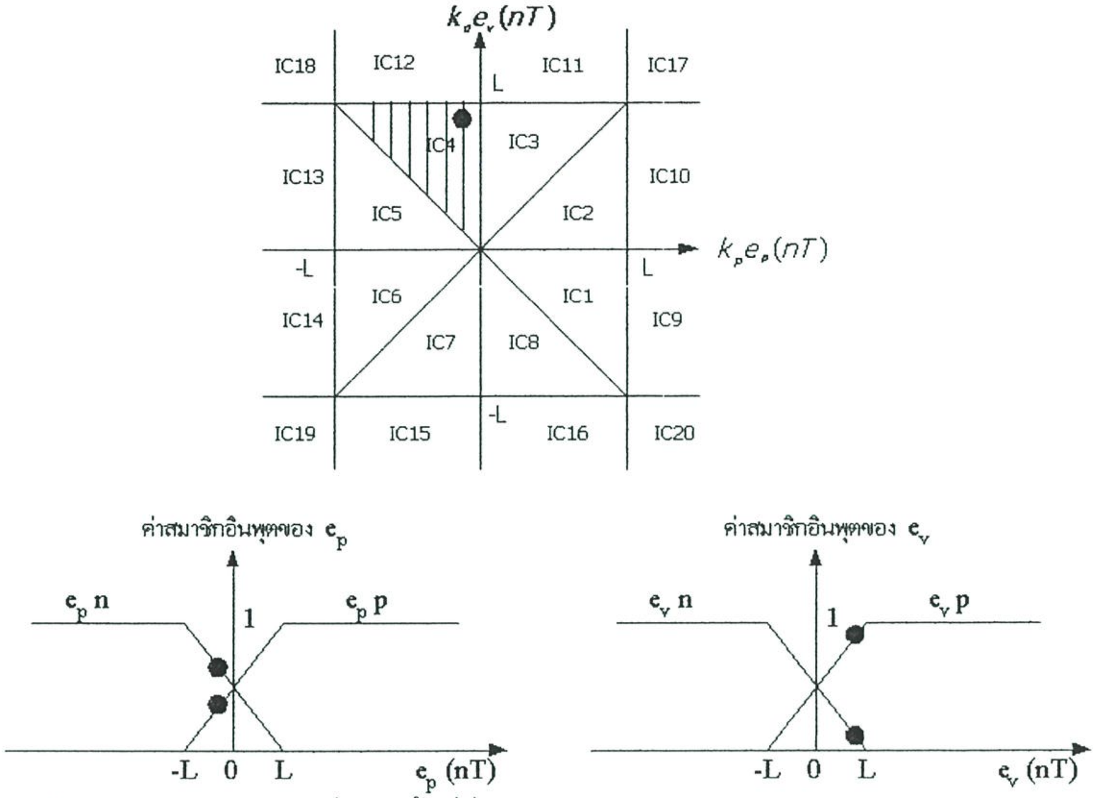
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_p e_p(nT)+L)(-L)+(-k_d e_v(nT)+L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT)+L-k_d e_v(nT)+L-k_p e_p(nT)+Lk_d e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_d e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_d |e_v(nT)|)} \tag{3}$$

4. พื้นที่ที่ 4 (IC4)



รูปที่ ผ.ข.4 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 4

จากรูปที่ ผ.ข.4 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 4 ในตารางที่ ผ.ข.4 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.4 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 4

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

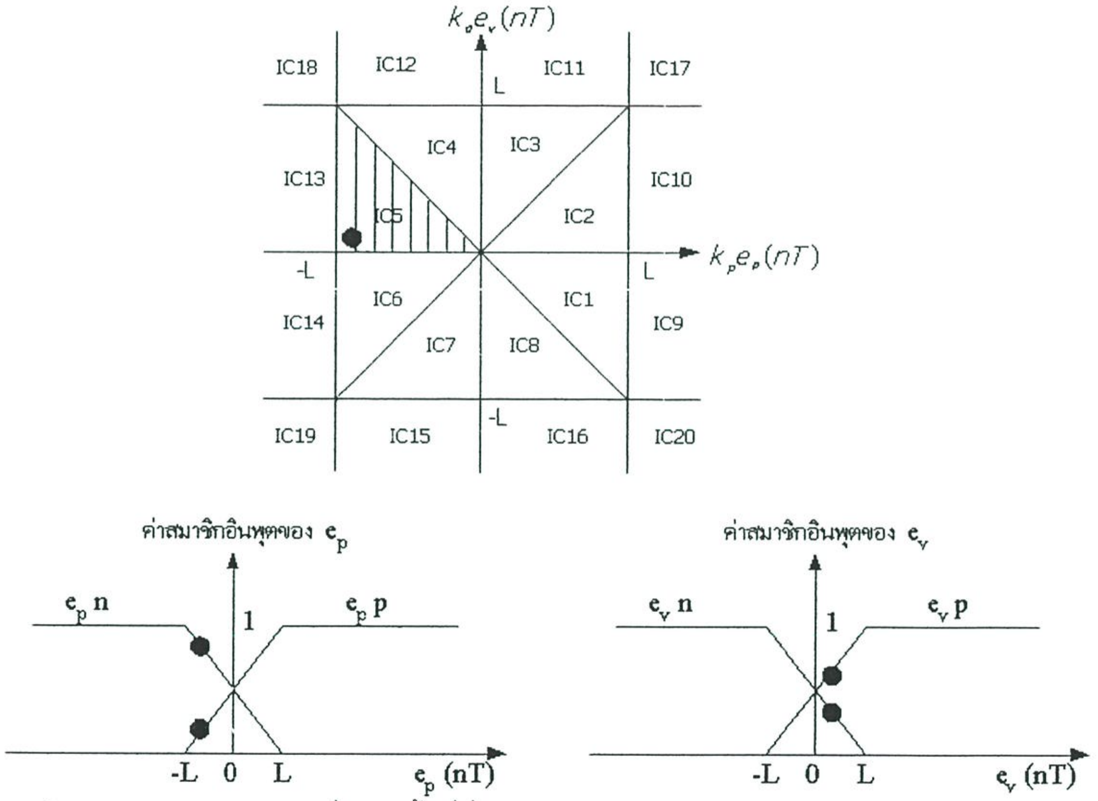
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_p e_p(nT)+L)(-L)+(-k_d e_v(nT)+L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT)+L-k_d e_v(nT)+L-k_p e_p(nT)+Lk_d e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \geq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d |e_v(nT)|)} \quad (4)$$

5. **พื้นที่ที่** 5 (IC5)



รูปที่ ผ.ข.5 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 5

จากรูปที่ ผ.ข.5 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 5 ในตารางที่ ผ.ข.5 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.5 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 5

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

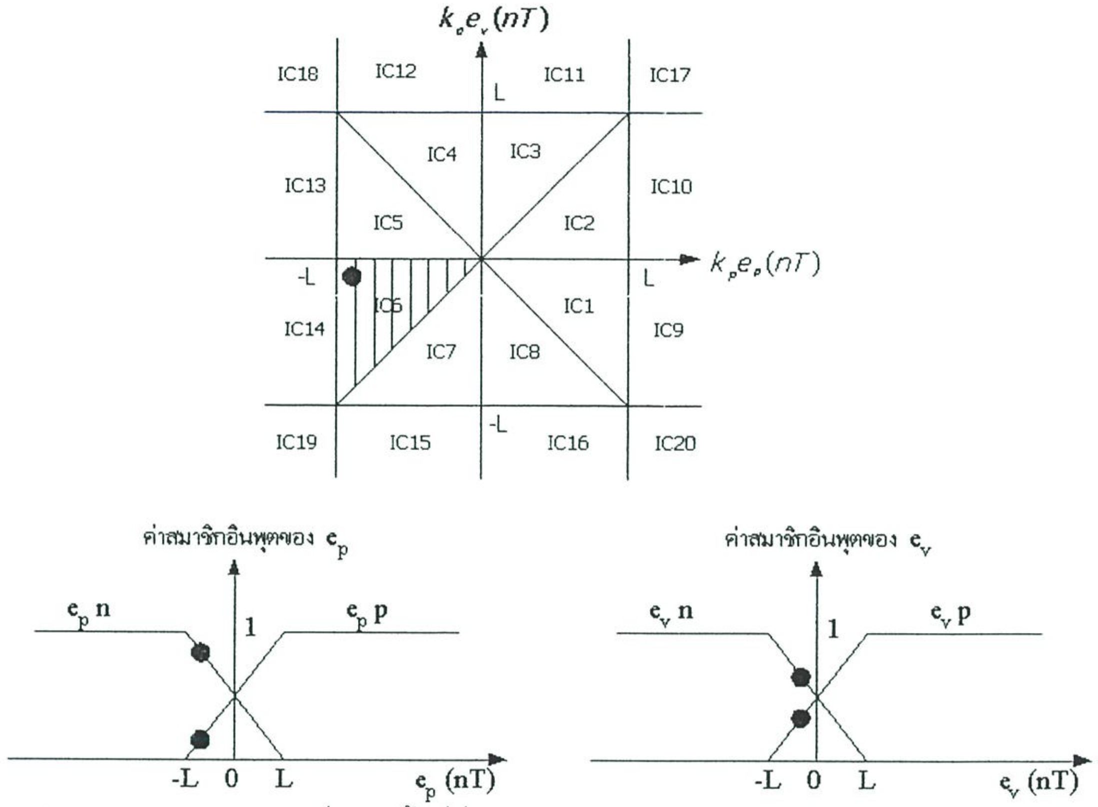
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT)+L)(L)+(k_d e_v(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT)+L+k_p e_p(nT)+L+k_d e_p(nT)+L-k_d e_p(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L+k_p e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT)-k_d e_v(nT)]}{2(2L-k_p|e_p(nT)|)} \qquad (5)$$

6. พื้นที่ที่ 6 (IC6)



รูปที่ ผ.ข.6 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 6

จากรูปที่ ผ.ข.6 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 6 ในตารางที่ ผ.ข.6 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.6 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 6

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

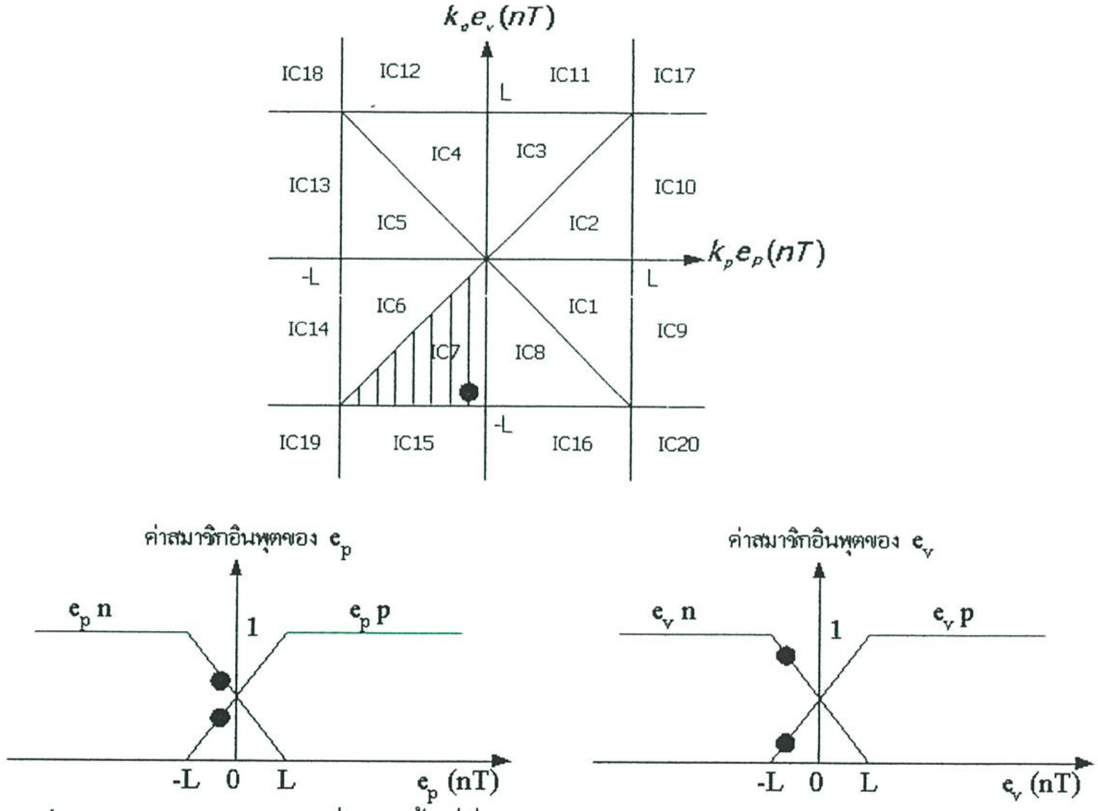
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT) + L)(L) + (k_d e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT) + L + k_p e_p(nT) + L + k_d e_p(nT) + L - k_d e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L + k_p e_p(nT))}$$

ที่ $e_p \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_p|e_p(nT)|)} \quad (6)$$

7. **พื้นที่ที่** 7 (IC7)



รูปที่ ผ.ข.7 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 7

จากรูปที่ ผ.ข.7 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 7 ในตารางที่ ผ.ข.7 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.7 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 7

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

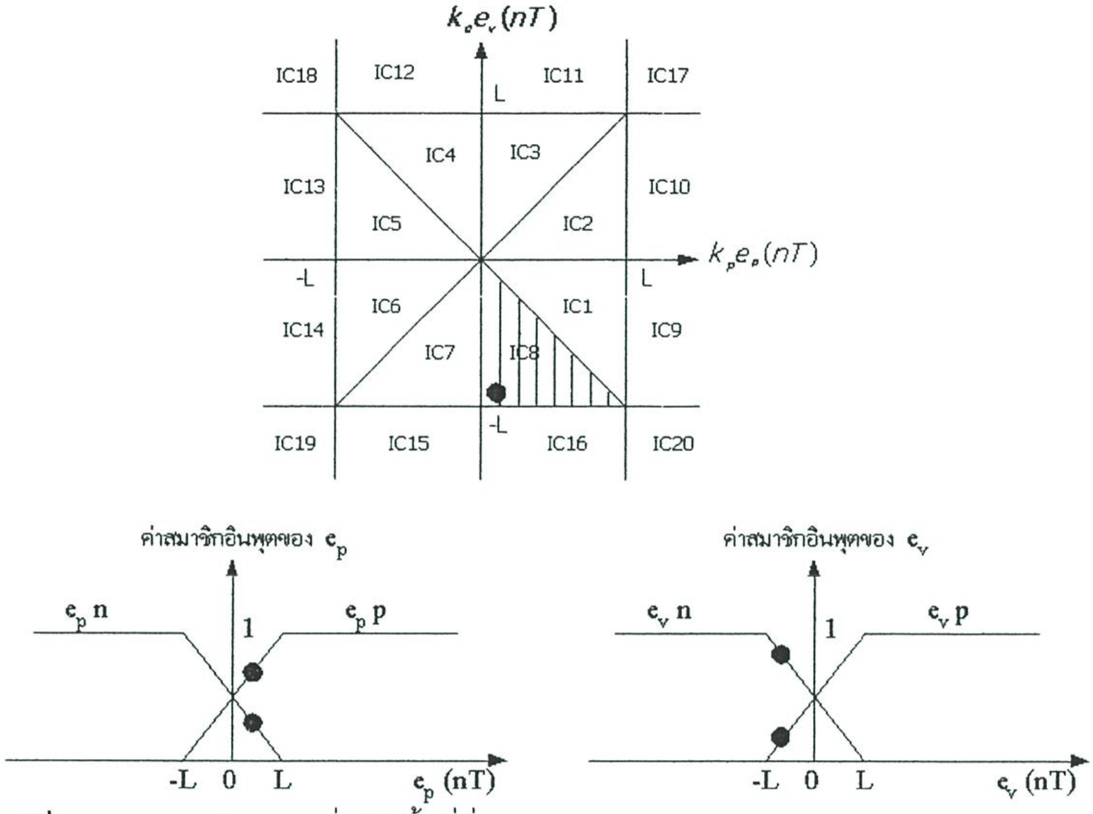
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT) + L)(L) + (-k_d e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L + k_d e_v(nT) + L + k_d e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L + k_d e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d |e_v(nT)|)} \qquad (7)$$

8. **พื้นที่ที่ 8 (IC8)**



รูปที่ ผ.ข.8 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 8

จากรูปที่ ผ.ข.8 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 8 ในตารางที่ ผ.ข.8 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.8 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 8

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

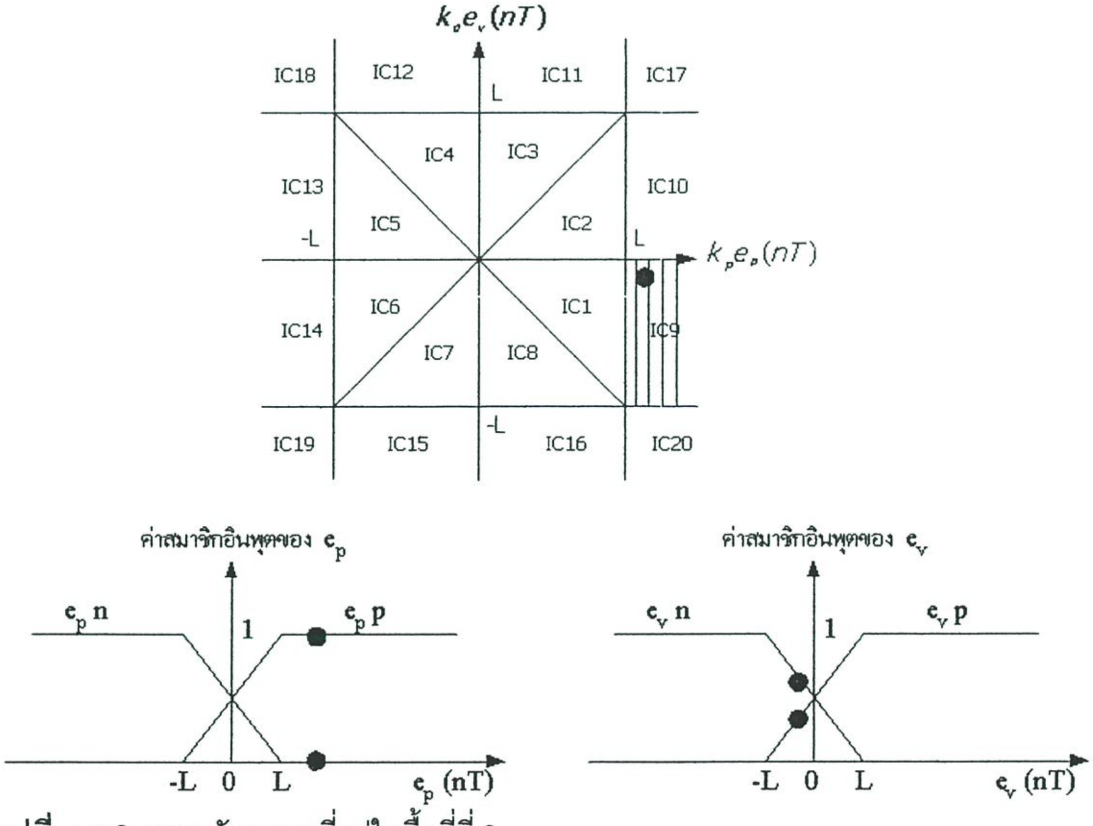
$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT)+L)(L)+(-k_d e_v(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT)+L-k_p e_p(nT)+L+k_d e_v(nT)+L+k_d e_v(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L + k_d e_v(nT))}$$

ที่ $e_v \leq 0$ จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L[k_p e_p(nT) - k_d e_v(nT)]}{2(2L - k_d|e_v(nT)|)} \quad (8)$$

9. **พื้นที่ที่** 9 (IC9)



รูปที่ ผ.ข.9 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 9

จากรูปที่ ผ.ข.9 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 9 ในตารางที่ ผ.ข.9 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.9 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 9

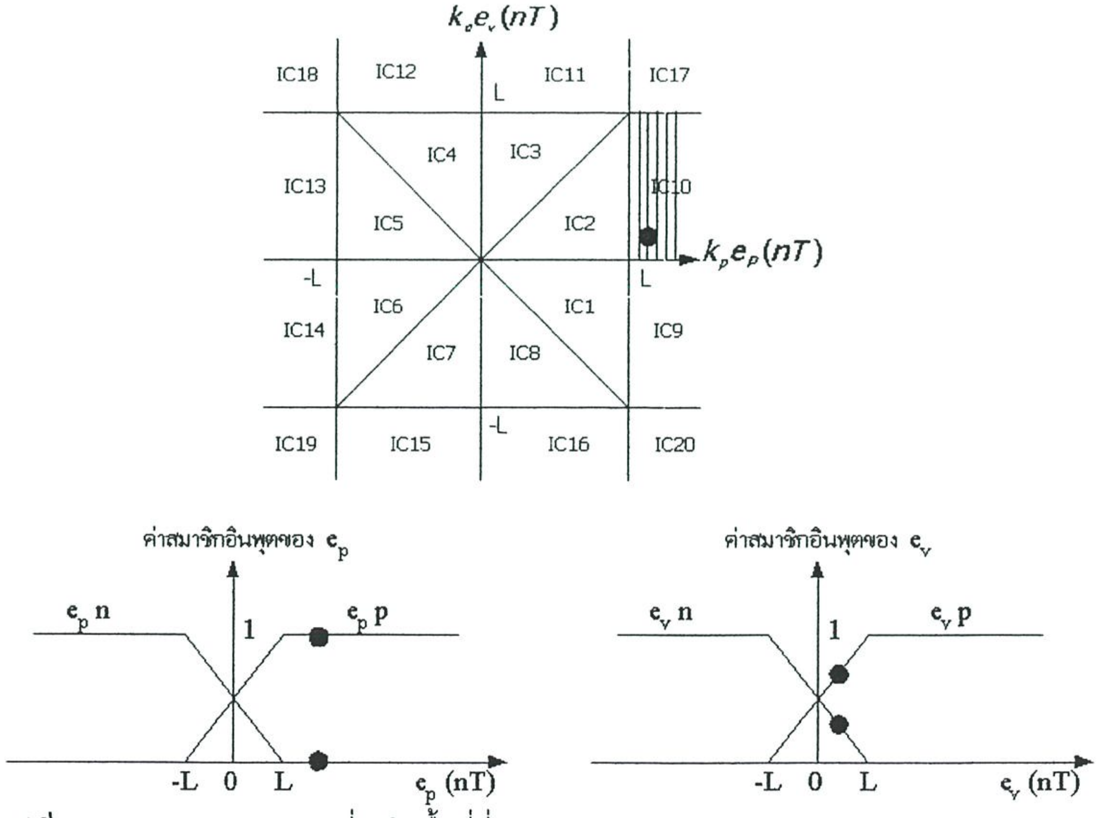
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	0	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_d e_v(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT) + L - k_d e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = -\frac{k_d e_v(nT) + L}{2} \qquad (9)$$

10. **พื้นที่ที่** 10 (IC10)



รูปที่ ผ.ข.10 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 10

จากรูปที่ ผ.ข.10 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 10 ในตารางที่ ผ.ข.10 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.10 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 10

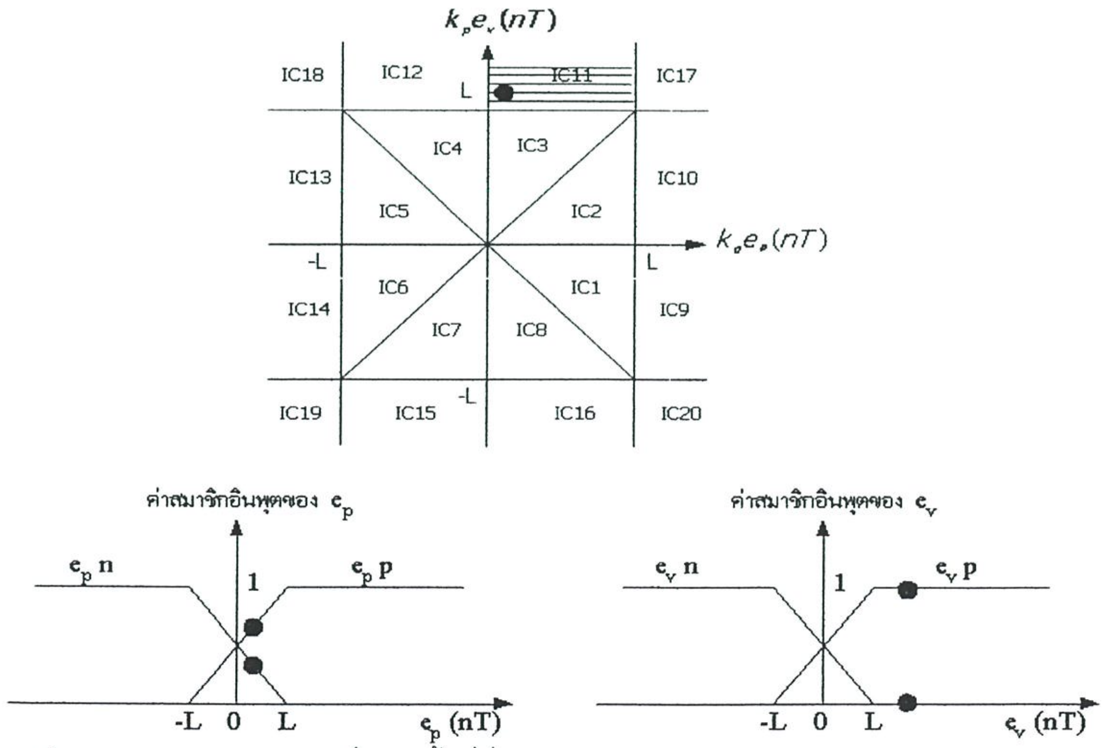
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_v \cdot p$	0
2	p	n	$e_v \cdot n$	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	0	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_d e_v(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT) + L - k_d e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = -\frac{k_d e_v(nT) + L}{2} \qquad (10)$$

11. พื้นที่ที่ 11 (IC11)



รูปที่ ผ.ข.11 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 11

จากรูปที่ ผ.ข.11 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 11 ในตารางที่ ผ.ข.11 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.11 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 11

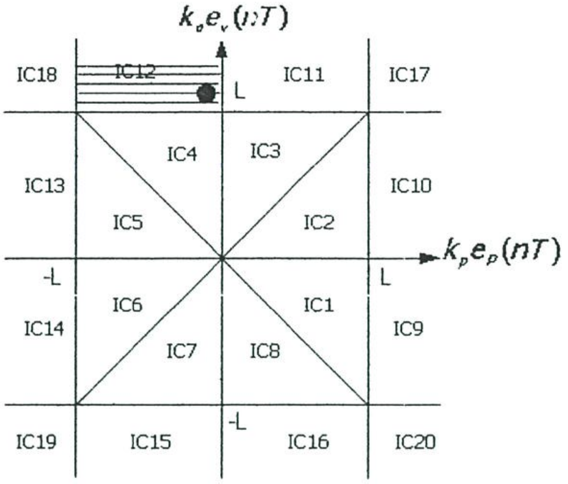
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	0	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	0	0

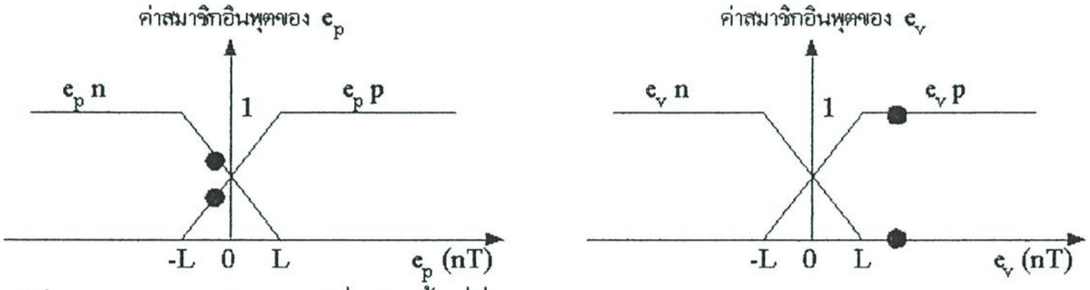
จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(-k_p e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) - L}{2} \tag{11}$$

12. **พื้นที่ที่** 12 (IC12)





รูปที่ ผ.ข.12 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 12

จากรูปที่ ผ.ข.12 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 12 ในตารางที่ ผ.ข.12 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.12 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 12

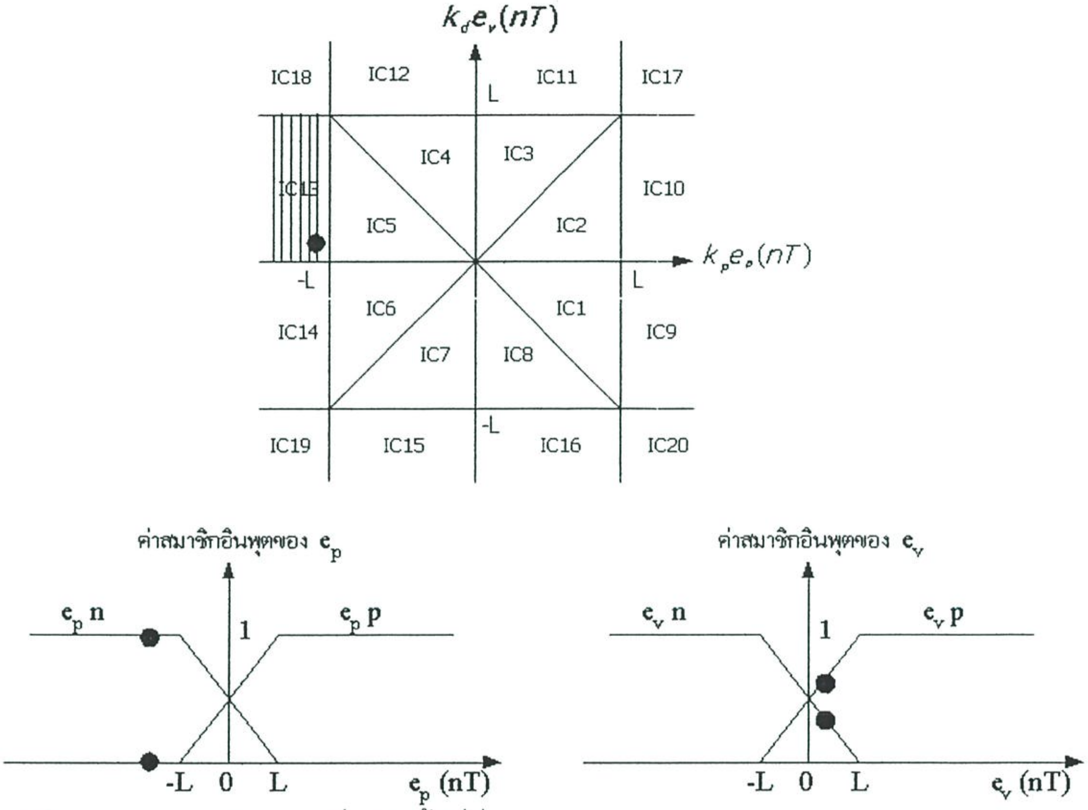
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	$e_p \cdot p$	0
2	p	n	0	L
3	n	p	$e_p \cdot n$	$-L$
4	n	n	0	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\frac{(-k_p e_p(nT) + L)(-L)}{2L}}{\frac{k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) - L}{2} \qquad (12)$$

13. **พื้นที่ที่** 13 (IC13)



รูปที่ ผ.ข.13 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 13

จากรูปที่ ผ.ข.13 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 13 ในตารางที่ ผ.ข.13 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.13 กฎของระบบฟัซซีซี่พีดีในพื้นที่ที่ 13

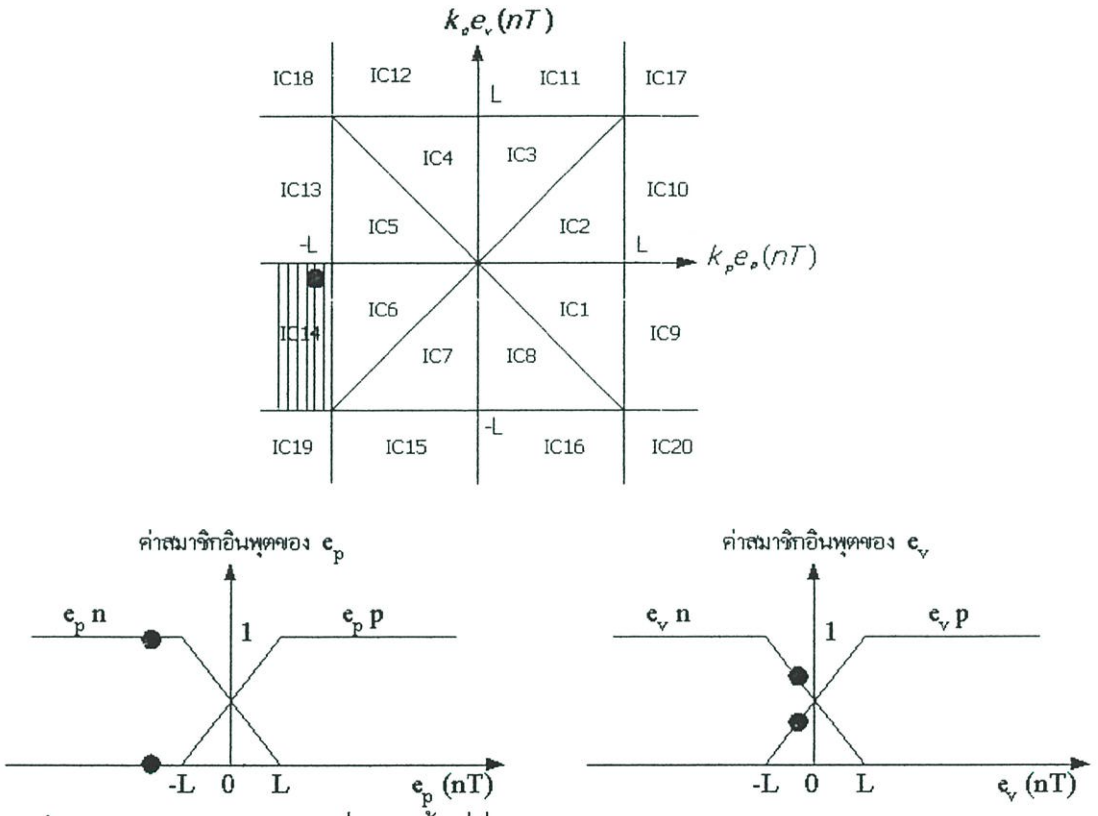
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	0	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_d e_v(nT) + L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT) + L - k_d e_v(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = -\frac{k_d e_v(nT) - L}{2} \tag{13}$$

14. พื้นที่ที่ 14 (IC14)



รูปที่ ผ.ข.14 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 14

จากรูปที่ ผ.ข.14 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 14 ในตารางที่ ผ.ข.14 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.14 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 14

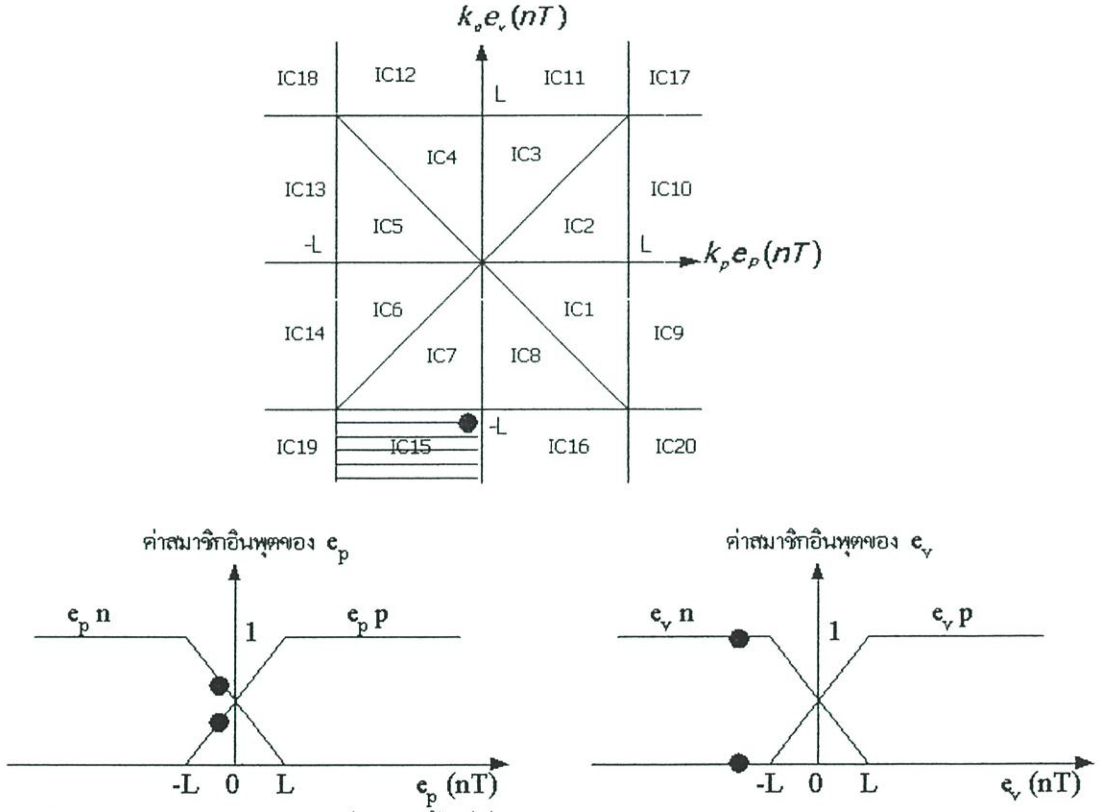
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	0	L
3	n	p	$e_v \cdot p$	$-L$
4	n	n	$e_v \cdot n$	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT)=\frac{\dfrac{(k_d e_v(nT)+L)(-L)}{2L}}{\dfrac{k_d e_v(nT)+L-k_d e_v(nT)+L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT)=-\frac{k_d e_v(nT)-L}{2} \qquad (14)$$

15. พื้นที่ที่ 15 (IC15)



รูปที่ ผ.ข.15 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 15

จากรูปที่ ผ.ข.15 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 15 ในตารางที่ ผ.ข.15 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.15 กฎของระบบฟัซซีซี่พีดีในพื้นที่ที่ 15

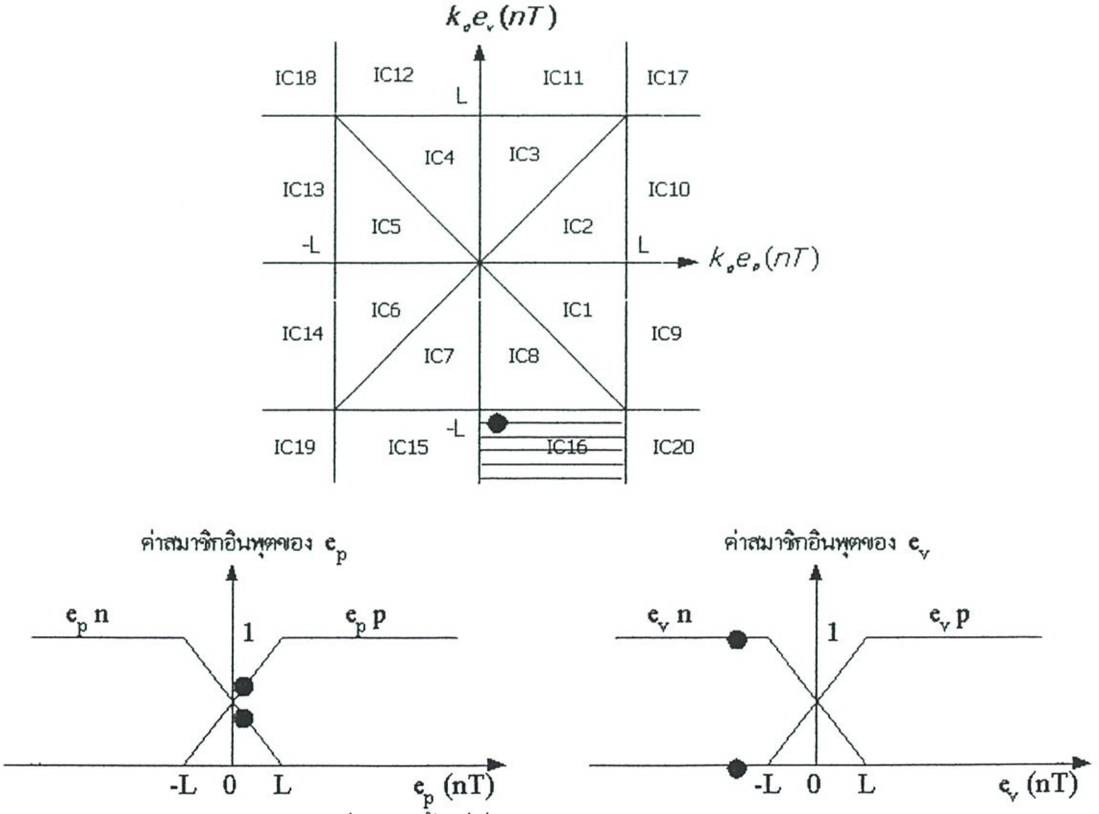
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \wedge e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) + L}{2} \tag{15}$$

16. **พื้นที่ที่** 16 (IC16)



รูปที่ ผ.ข.16 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 16

จากรูปที่ ผ.ข.16 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 16 ในตารางที่ ผ.ข.16 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.16 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 16

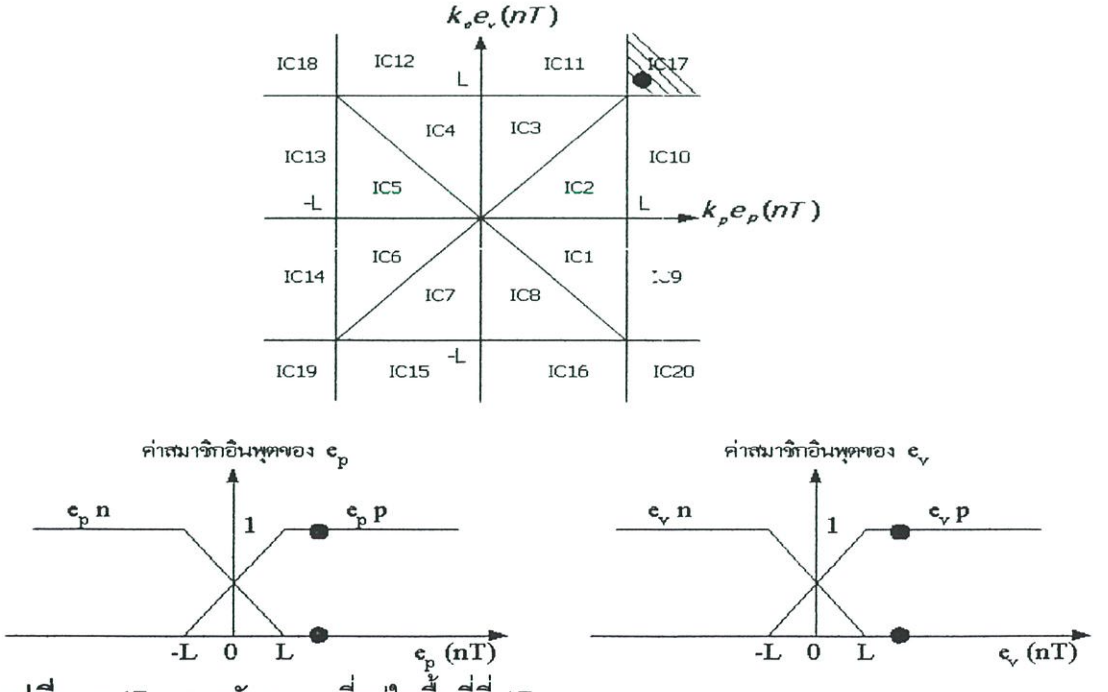
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	$e_p \cdot p$	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	$e_p \cdot n$	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{\dfrac{(k_p e_p(nT) + L)(L)}{2L}}{\dfrac{k_p e_p(nT) + L - k_p e_p(nT) + L}{2L}}$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{k_p e_p(nT) + L}{2} \qquad 4.22$$

17. **พื้นที่ที่** 17 (IC17)



รูปที่ ผ.ข.17 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 17

จากรูปที่ ผ.ข.17 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 17 ในตารางที่ ผ.ข.17 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.17 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 17

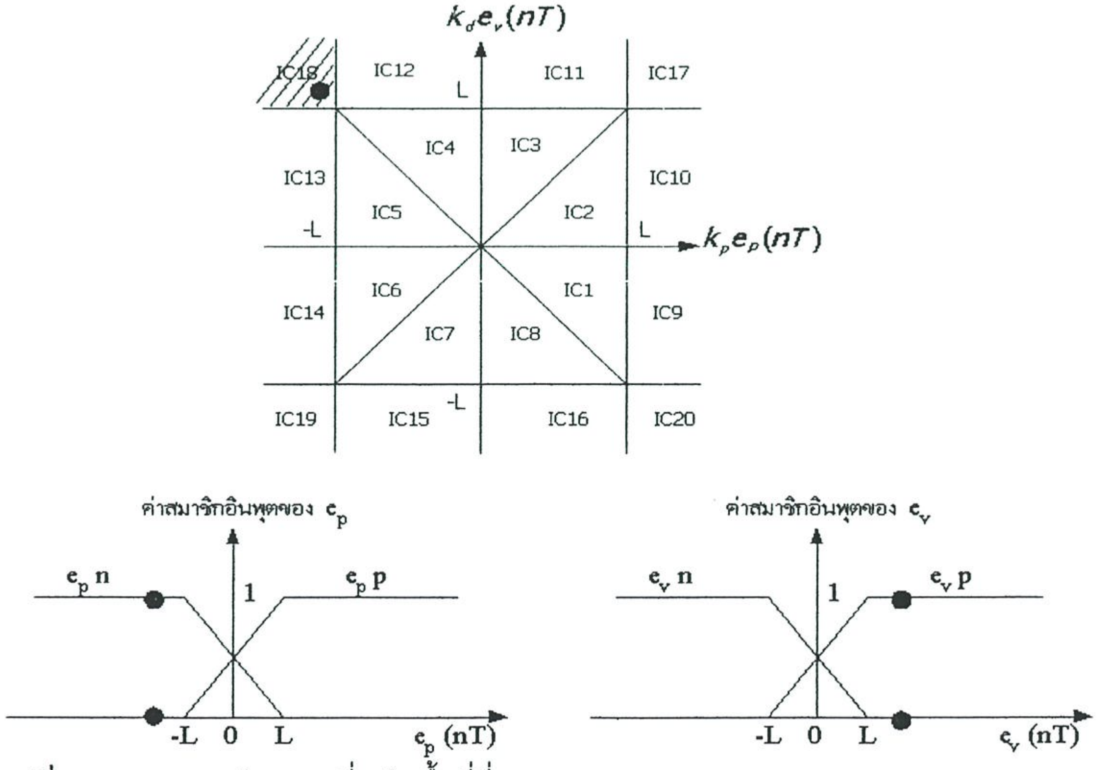
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	*p*	*p*	1	*0*
2	*p*	*n*	0	*L*
3	*n*	*p*	0	*-L*
4	*n*	*n*	0	*0*

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = 1 \times 0$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0 \qquad (17)$$

18. พื้นที่ที่ 18 (IC18)



รูปที่ ผ.ข.18 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 18

จากรูปที่ ผ.ข.18 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 18 ในตารางที่ ผ.ข.18 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.18 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 18

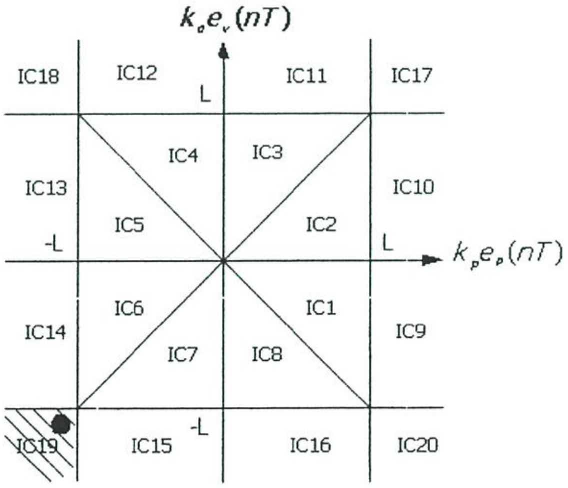
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	0	L
3	n	p	1	$-L$
4	n	n	0	0

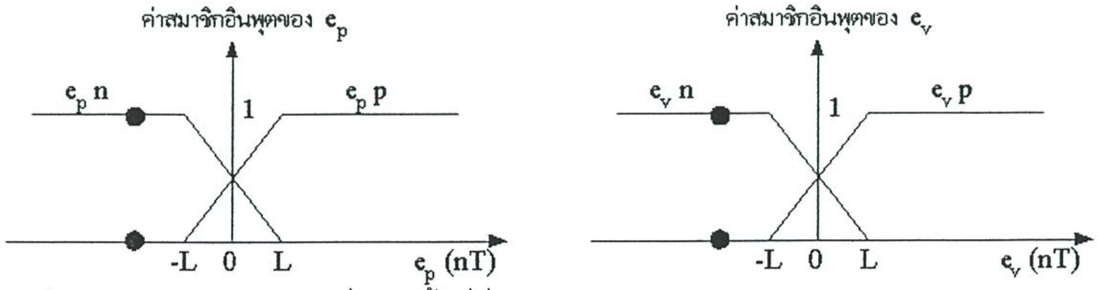
จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = 1 \times -L$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = -L \tag{18}$$

19. **พื้นที่ที่** 19 (IC19)





รูปที่ ผ.ข.19 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 19

จากรูปที่ ผ.ข.19 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 19 ในตารางที่ ผ.ข.19 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.19 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 19

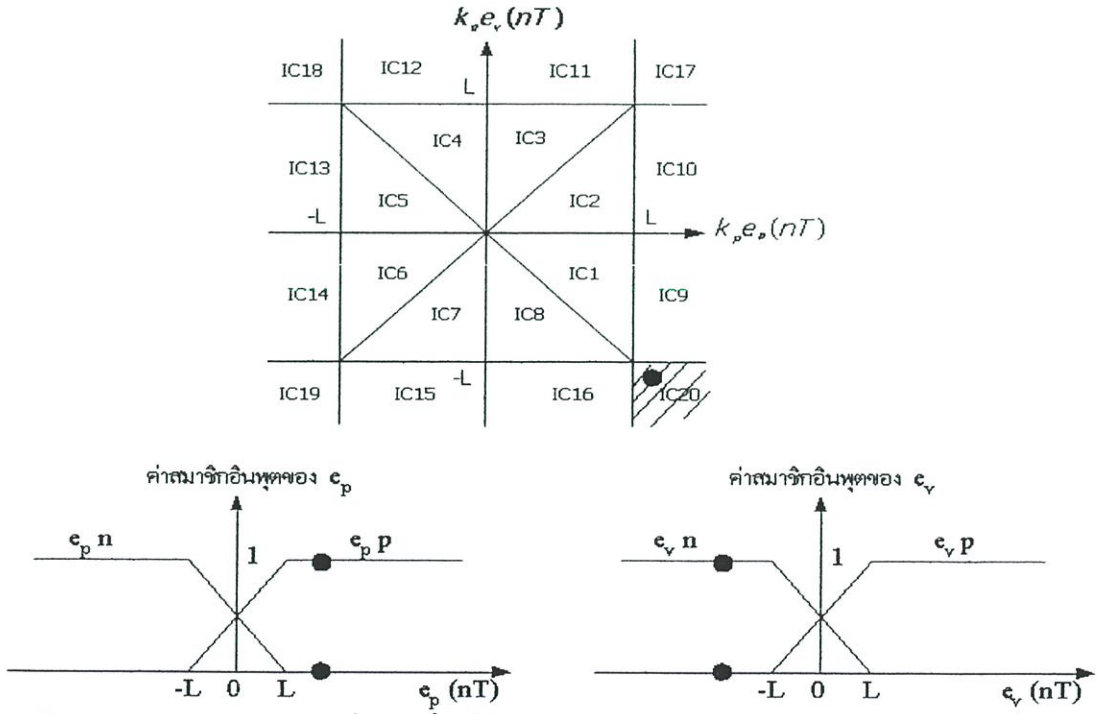
กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	0	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	1	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = 1 \times 0$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0 \qquad (19)$$

20. **พื้นที่ที่** 20 (IC20)



รูปที่ ผ.ข.20 แสดงสัญญาณที่อยู่ในพื้นที่ที่ 20

จากรูปที่ ผ.ข.20 จะได้ตารางกฎในพื้นที่ที่ 20 ในตารางที่ ผ.ข.20 ดังนี้

ตารางที่ ผ.ข.20 กฎของระบบฟัซซีพีดีในพื้นที่ที่ 20

กฎข้อที่	e_p	e_v	$\mu(e_p \Lambda e_v)$	เอาต์พุตที่ถูกเลือก
1	p	p	0	0
2	p	n	1	L
3	n	p	0	$-L$
4	n	n	0	0

จะได้

$$\Delta u_{pd}(nT) = 1 \times L$$

$$\Delta u_{pd}(nT) = L \qquad (20)$$

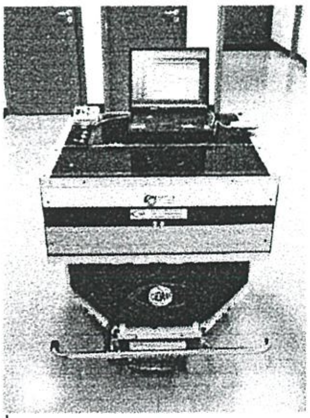
ภาคผนวก ค.

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีในไมโครคอนโทรลเลอร์

ในกระบวนการควบคุม ตัวควบคุมแบบพีไอดีแบบดั้งเดิมได้นำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง จากรายงานวิจัยหลายฉบับได้ลงความเห็นว่าการควบคุมแบบฟัซซีให้ผลออกมาดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีดั้งเดิมแต่ข้อดีของตัวควบคุมแบบพีไอดีคือใช้ง่ายกว่าตัวควบคุมแบบอื่น รวมไปถึงอัลกอริทึมพีไอดีใช้จำนวนบรรทัดในการเขียนโค้ดเพียงไม่กี่บรรทัด ในขณะที่การควบคุมแบบฟัซซีต้องมีการตั้งกฎพื้นฐาน ในรูปแบบตาราง ซึ่งต้องใช้พื้นที่ในหน่วยความจำมากกว่า จึงเกิดคำถามขึ้นมาว่า หากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ทำให้โค้ดที่ยาวมาก ๆ ไม่สามารถนำมาทำให้เป็นผลได้ จะเกิดอะไรขึ้น จากตัวอย่างหนึ่งของตัวควบคุมฟัซซี พีไอที่พัฒนาขึ้นโดย Chen ได้ให้ผลตอบสนองในภาวะชั่วครู่ที่รวดเร็ว และทนทานเมื่ออยู่ในสถานะอยู่ตัว ซึ่งการทำงานนี้ได้ใช้การควบคุมจากคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย แต่ตัวควบคุมนี้ได้ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ 89c51 และใช้ตัวประมวลผล (Compiler) ยี่ห้อ Keil Elektronik รุ่น 2 V2.20 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ง่ายในการใช้งานร่วมกับฟัซซีลอจิกและราคาถูก แต่ยังคงคุณสมบัติที่ดีในการทนทานและการแสดงผลค้นหาเส้นทางแบบไม่เป็นเส้นตรงเอาไว้

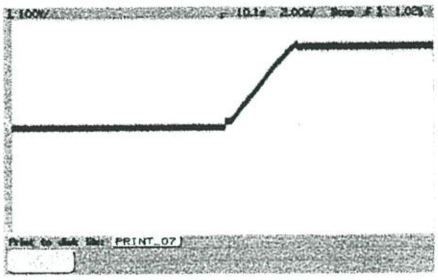
การทดลองและการใช้งานจริง

เพื่อให้ตัวควบคุมที่ออกแบบมาสามารถนำไปใช้ได้จริง ในหุ่นยนต์ Multi-purpose Autonomous Robust Carrier for Hospitals (MARCH)



รูปที่ ผ.ค.1 หุ่นยนต์ MARCH II ที่ใช้ในการทดสอบ

ในรูปที่ ผ.ค. 1 ได้นำมาใช้สำหรับการควบคุมค้นหาเส้นทางโดยอัตโนมัติ โดยตัวควบคุมนี้ได้ใช้ในส่วนของการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยหุ่นยนต์ได้ถูกกำหนดให้หมุนที่ 120 องศาเมื่อตัวเซนเซอร์ 4 ตัวจาก 5 ตัวตรวจจับเส้นทางไม่เจอ ในกรณีนี้ไม่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของการหมุนของมอเตอร์กับการโหลดของหุ่นยนต์ไว้ หุ่นยนต์ตัวนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 89c51 จากการวัดด้วยเครื่องวัดออสซิโลสโคป Agilent 54622D ซึ่งแสดงในรูปที่ ผ.ค. 2 ให้เห็นว่ามีผลการตอบสนองภาวะชั่วครู่ที่ดี และไม่มีความผิดพลาดในช่วงสถานะอยู่ตัว



รูปที่ ผ.ค.2 การตอบสนองต่อการหมุนในหุ่นยนต์ MARCH II

ภาคผนวก ง.

หุ่นยนต์ MARCH

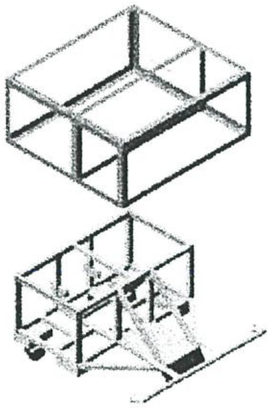
(Multi-purpose Autonomous Robust Carrier for Hospitals)

MARCH II เป็นหุ่นยนต์อัตโนมัติที่เป็นผู้ช่วยทำงานในโรงพยาบาล โดยพัฒนาให้มีฟังก์ชันที่มีความน่าเชื่อถือ ความมั่นคง และฉลาดกว่า MARCH I โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้หุ่นยนต์ตัวนี้จะสามารถเดินไปตามเส้นทางที่กำหนดได้และเดินขนานไปตามกำแพงได้ในกรณีที่เส้นทางเกิดการสูญเสีย หลบหลีกจากการชนวัตถุอื่น ควบคุมได้ในระยะไกล สื่อสารกันได้กับหน่วยงานกลาง ค้นหาเส้นทาง และสร้างความบันเทิง เช่น เล่นเกม เล่นเพลง

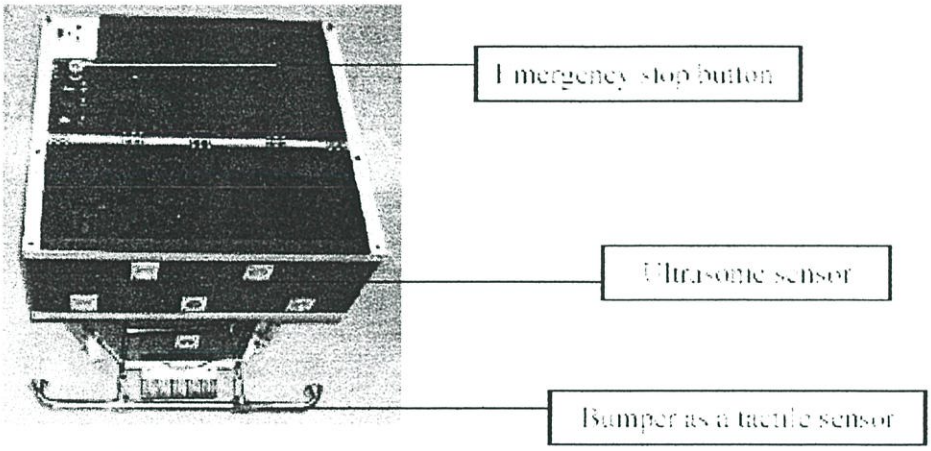
MARCH I

MARCH I เป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ในโรงพยาบาลที่พัฒนาขึ้นโดย Center for Intelligent Design, Automation and Manufacturing (CIDAM), City University of Hong Kong โดยโครงการได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่องตลอดสองปีที่ผ่านมาเพื่อให้หุ่นยนต์อัตโนมัติอเนกประสงค์ตัวนี้สามารถขนส่งของได้ภายในโรงพยาบาล ซึ่งเกิดประโยชน์ต่อพนักงานในโรงพยาบาลที่ไม่ต้องเสียเวลาในการเดินทางไปส่งของ ทำให้พนักงานมีเวลาในการดูแลและบริการคนไข้ได้มากขึ้น หุ่นยนต์ตัวนี้มีน้ำหนัก 80 กิโลกรัม มีความสามารถในการบรรทุกได้ถึง 300 กิโลกรัม หุ่นยนต์มีขนาดยาว 0.8 เมตร กว้าง 0.8 เมตร และสูง 1.5 เมตร

หุ่นยนต์สามารถค้นหาเส้นทางไปตามทางเดินได้ และสามารถบรรทุกวัสดุต่าง ๆ ไปด้วยได้ เช่น ยา เข็มฉีดยา อาหารหรือ เครื่องมือแพทย์ไว้ที่หลังหุ่นยนต์ โดยจะเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาทีจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งโดยอาศัยเครื่องหมายเป็นตัวบอก การค้นหาเส้นทางและการเคลื่อนที่ขนานกำแพง ระบบที่ใช้ในการมองเห็นเป็นกล้องแบบซีซีดีได้นำมาใช้กับหุ่นยนต์ซึ่งสามารถตรวจจับและควบคุมหุ่นยนต์ในระยะไกลได้โดยผ่านเครือข่ายแลนไร้สายความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต แต่ MARCH I จำเป็นต้องปรับปรุงในด้านความเร็วในการตอบสนอง การติดต่อสื่อสารให้หลากหลายทาง และควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ด้วยเหตุนี้ MARCH II จึงออกแบบมาเพื่อเพิ่มความสามารถให้มาขึ้นและให้เป็นระบบควบคุมอัจฉริยะที่ใช้งานได้เต็มประโยชน์มากขึ้น



รูปที่ ผ.ง.1 โครงสร้างของ MARCH I



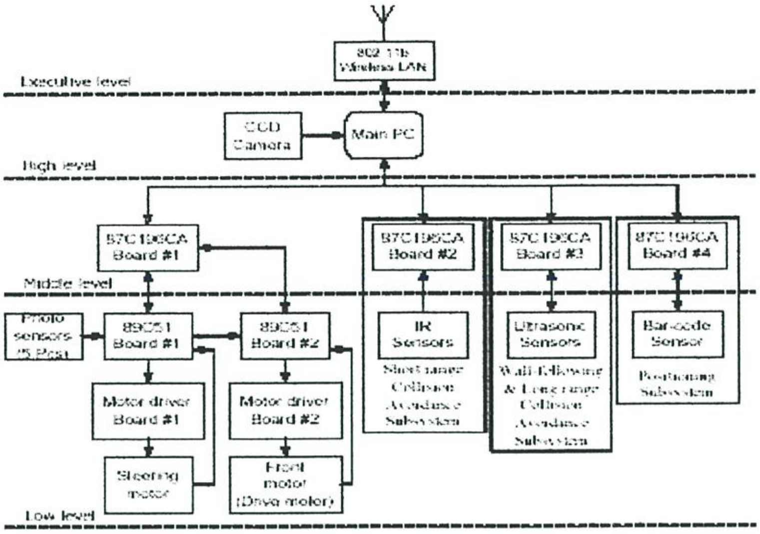
รูปที่ ผ.ง.2 ภาพด้านบนของMARCH I

MARCH II

MARCH II ได้ออกแบบขึ้นมาใหม่โดยยังคงโครงสร้างเดิมของ MARCH I เอาไว้แต่จะออกแบบ วงจรอิเล็กทรอนิกส์และระบบการมองเห็นขึ้นมาให้ทันสมัยมากขึ้น

ระบบทั้งหมดประกอบไปด้วยระดับที่แยกไว้ 4 ระดับแบ่งได้ดังนี้ ระดับส่วนกลาง ในส่วนนี้มนุษย์จะควบคุม ระดับสูง จะควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ระดับกลาง จะควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุม 87C196CA ผ่าน CAN-bus และระดับล่าง ควบคุมด้วย 89C51 ในแต่ละระดับจะทำงานแยกส่วนกัน เพื่อให้ชั้นที่สูงกว่าสามารถสั่งการชั้นที่ต่ำกว่าได้และตรวจสอบระบบได้ง่าย

รูปที่ ผ.ง.3 แสดงแผนภาพของระบบที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ จะเห็นได้ว่าระดับกลางและระดับชั้นที่สูง ๆ จะมีโครงสร้างเหมือนกับโครงสร้างในตัวหุ่นยนต์ MARCH I ระดับอื่นถัดมาจะเป็นการออกแบบขึ้นมาใหม่โดยเพิ่มเทคโนโลยี CAN เข้ามาช่วยทำงาน



รูปที่ ผ.ง.3 บล๊อคไดอะแกรมของสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ของระบบทั้งหมดใน MARCH II

ระดับชั้นต่าง ๆ

ระดับล่าง

การควบคุมแบบฟัซซีเพื่อนำมาใช้ในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางและเคลื่อนที่ขนานไปตามกำแพง โดยใช้ตัวตรวจจับเส้นทาง IR 5 ตัวในการอ้างถึงมุมในเส้นทางของระบบย่อยในการขับเคลื่อนและการเลี้ยว ในการค้นหาเส้นทางสามารถหลีกเลี่ยงการชนด้วยระบบย่อยที่รับสัญญาณจากตัวตรวจจับเหนือเสียงสำหรับย่านยาว และตัวตรวจจับ IR สำหรับย่านสั้น หรือจากสวิทช์ที่กันชนเพื่อป้องกันความปลอดภัยในระหว่างการปฏิบัติงาน ระบบย่อยในการหลีกเลี่ยงการชนนี้จะใช้โดยตัวควบคุมกฎพื้นฐาน ตัวอ่านบาร์โค้ดจะบอกถึงตำแหน่งของหุ่นยนต์ภายในแผนกของโรงพยาบาล เช่น เตียงคนไข้ โดยระบบการมองเห็นจะบอกว่าอยู่ที่ห้องไหน

ระดับกลาง

ในระดับนี้จะใช้ฮาร์ดแวร์ 2 ตัว ตัวแรกคือตัวเครือข่าย CAN ที่ติดตั้งในตัวประมวลผลหลักของคอมพิวเตอร์ อีกตัวหนึ่งคือไมโครคอนโทรลเลอร์รวมกับ CAN ซึ่งจะให้ CAN ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในระดับที่ต่ำกว่า

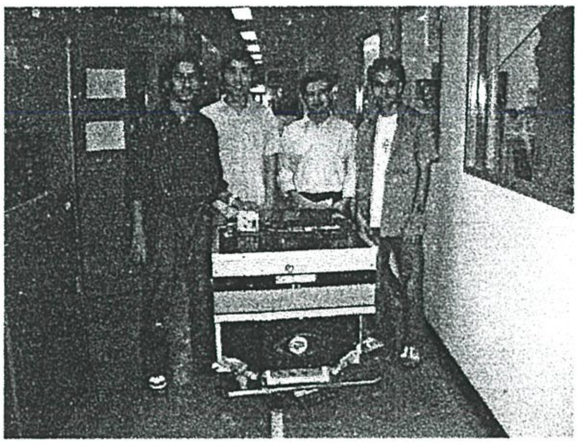
ระดับสูง

ในระดับนี้จะทำงานในส่วนของเครื่องคอมพิวเตอร์ ในระบบการมองเห็นจะให้ภาพที่กำหนดให้เป็นข้อมูลอินพุต การรู้จำภาพนั้นได้จะใช้เทคนิคการรู้จำ

ระดับส่วนกลาง

หากระดับชั้นที่ต่ำกว่าเกิดมีอะไรผิดพลาดขึ้นมา จะมีการเตือนไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์ในระดับส่วนกลางเพื่อบอกจุดที่เกิดความผิดพลาด และสามารถบอกผู้ควบคุมผ่านเครือข่ายแลน

ไร้สายได้ นอกจากนี้ยังสามารถตรวจจับระยะไกลผ่านกล้องซีซีดี ในระดับนี้จะใช้ฟังก์ชันการทำงานการเข้าถึงในระยะไกล การรับรู้ข้อมูล ระหว่างตัวหุ่นยนต์ คนไข้และผู้ควบคุมการทำงาน



รูปที่ ผ.ง.4 แสดงหุ่นยนต์ MARCH II และคณะผู้สร้าง

ภาคผนวก จ.
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] T. Pattaradej and P.Sooraksa. "A Position Control for two-link Flexible Robot Arms," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol.17, No.1, March 2000, pp.55-60.

[2] Thana Pattaradej , Puwanach Dumrongporn and Pitikhate Sooraksa. "Basic concept of a Low-cost Biped Robot," *Student Conference Research and Development (SCOReD 2001)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001, Paper No. 191.

[3] P. Damrongporn; T. Pattaradej and P. Sooraksa, "An Appropriated Degree-of-Freedom Functional and Kinematics for Biped Robots," *Student Conference Research and Development (SCOReD 2001)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001, Paper No. 192.

[4] Thana Pattaradej, Ketsara Chumsawee, and Pitikhate Sooraksa. "Fuzzy PI with Gain Scheduling Control for a Flexible Joint Robot," *International Conference on Control, Automation and Systems (16thKACC),* Jeju Korea, pp.671-674, 2001

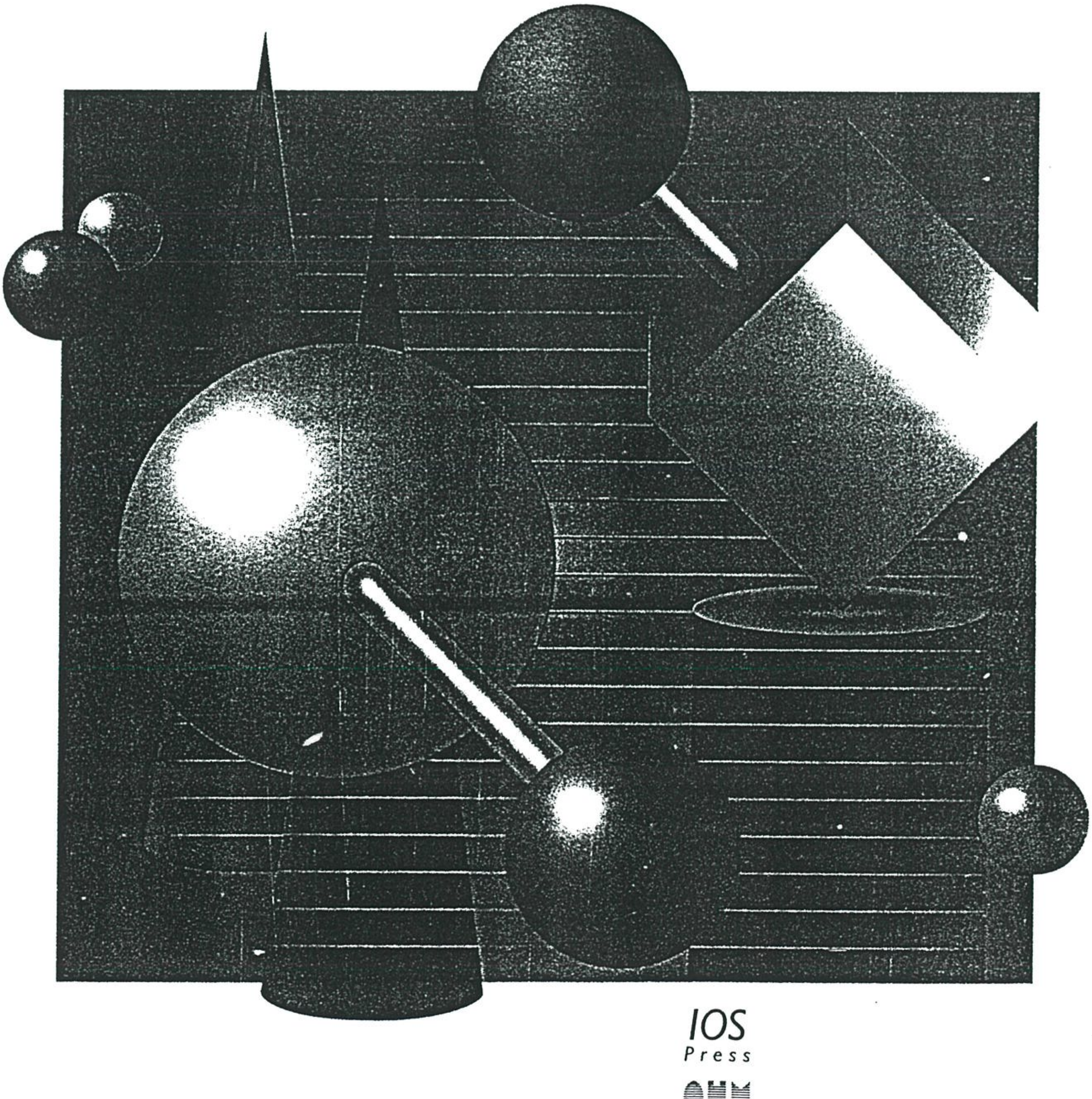
[5] Thana Pattaradej, Pitikhate Sooraksa, and Guanrong Chen "Implementation of A Modified Fuzzy Proportional-Integral Computer Aided Control for DC Servo Motors," *The Second International Conference on Intelligent Technologies*, Bangkok Thailand, pp. 85-90, 2001.

[6] Thana Pattaradej, Prakob Chandang, Mayuree Lertwatechahakul, Pitikhate Sooraksa, and Guanrong Chen "A Speed Evaluation for Conventional PID and Fuzzy Controllers,"*The Second International Conference on Intelligent Technologies*, Bangkok Thailand, pp.91-96, 2001.

[7] Pitikhate Sooraksa, **Thana Pattaradej**, Guanrong Chen "Design and Implementation of Fuzzy P^2ID Controller for Handlebar Control of a Bicycle Robot," *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 319-331, 2002.

INTEGRATED COMPUTER-AIDED ENGINEERING

Editor-in-Chief: Hojjat Adeli



IOS Press
Ohmsha

Volume 9, Number 4, 2002
ISSN 1069-2509

LAST NUMBER OF THIS VOLUME

INTEGRATED COMPUTER-AIDED ENGINEERING
Volume 9, Number 4, 2002

Abstracted/Indexed in: Compendex Plus, CompuMath, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Engineering Index, INSPEC, ISI Alerting Services, PaperChem, Science Citation Index Expanded (Web of Science)

CONTENTS

Z. Mammeri
Guaranteeing hard real-time traffic constraints with ATM networks 291

P. Sooraksa, T. Pattaradej and G. Chen
Design and implementation of fuzzy P^2ID controller for handlebar control of a bicycle robot 319

L. Cheng and I. Marsic
Java-based tools for accurate bandwidth measurement of Digital Subscriber Line networks 333

Y. Xu, Q.L. Ding and C.C. Ko
Dynamic channel reservation in satellite-based wireless personal communication networks 345

S.-B. Cho
Fusion of neural networks with fuzzy logic and genetic algorithm 363

U. Prisco and G. Giorleo
Review article: Overview of current CAT systems 373

Author Index Volume 9 (2002) 389

VISIT OUR WEBSITE ON HTTP://WWW.IOSPRESS.NL

INTEGRATED COMPUTER-AIDED ENGINEERING

Editor-in-Chief

Hojjat Adeli
College of Engineering
The Ohio State University
470 Hitchcock Hall
2070 Neil Avenue
Columbus, OH 43210-1275
USA

Editorial Advisory Board

J.D. Carothers
University of Arizona, USA

C.Y. Chang
National Chiao Tung University, Taiwan, ROC

T.S. Dillon
La Trobe University, Australia

J. Dongarra
University of Tennessee, USA

M.S. El Naschie
University of Cambridge, UK

D.J. Evans
University of Technology, Loughborough, UK

M. Gini
University of Minnesota, USA

E.M. Greitzer
Massachusetts Institute of Technology, USA

M.F. Iskander
University of Hawaii, USA

M. Kivikoski
Tampere University of Technology, Finland

W. Kuo
Texas A&M University, USA

M.H. Mickle
University of Pittsburgh, USA

M. Morari
Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland

C.D. Mote, Jr.
University of Maryland, USA

L. Motus
Tallinn Technical University, Estonia

D.H. Norrie
University of Calgary, Canada

P. Papalambros
University of Michigan, USA

M.E. Pate-Cornell
Stanford University, USA

J.C. Pomerol
University of Pierre and Marie Curie, France

C.V. Ramamoorthy
University of California-Berkeley, USA

J.R. Rice
Purdue University, USA

M.A. Salichs
University Carlos III of Madrid, Spain

G. Salvendy
Purdue University, USA

A. Schill
Dresden University of Technology, Germany

S.G. Tzafestas
National Technical University of Athens, Greece

G. Yagawa
University of Tokyo, Japan

H.T.Y. Yang
University of California-Santa Barbara, USA

H. Yoshikawa
Kyoto University, Japan

L.A. Zadeh
University of California-Berkeley, USA

L. Zheng
Tsinghua University, China

Assistant Editor-in-Chief

Anahita Adeli

Aims and Scope

Integrated Computer-Aided Engineering is a peer-refereed journal devoted to integration of leading-edge and emerging computer technologies for innovative solutions of engineering problems. The journal presents a true interdisciplinary forum for innovative computer-aided engineering (CAE). It will also publish novel industrial applications of CAE. The areas covered by the journal include *biologically inspired computing*, *cognitive modeling*, *concurrent engineering*, *data engineering*, *distributed computing*, *fuzzy systems*, *genetic algorithms*, *intelligent and adaptive systems*, *knowledge engineering*, *machine learning*, *mechatronics*, *neurocomputing*, *object-oriented systems*, *parallel processing*, *symbolic processing*, and *virtual reality*. Original research papers covering integration of various computer technologies are particularly welcome.

©2002 *IOS Press*. All rights reserved

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher, IOS Press, Nieuwe Hemweg 6B, 1013 BG Amsterdam, The Netherlands. No responsibility is assumed by the Publisher for any injury and/or damage to persons or property as a matter of products liability, negligence or otherwise, or from any use or operation of any methods, products, instructions or ideas contained in the material herein. Although all advertising material is expected to conform to ethical standards, inclusion in this publication does not constitute a guarantee or endorsement of the quality or value of such product or of the claims made of it by its manufacturer.

Special regulations for readers in the USA. This journal has been registered with the Copyright Clearance Center, Inc. Consent is given for copying of articles for personal or internal use, or for the personal use of specific clients. This consent is given on the condition that the copier pays through the Center the per-copy fee stated in the code on the first page of each article for copying beyond that permitted by Sections 107 or 108 of the US Copyright Law. The appropriate fee should be forwarded with a copy of the first page of the article to the Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, USA. If no code appears in an article, the author has not given broad consent to copy and permission to copy must be obtained directly from the author. This consent does not extend to other kinds of copying, such as for general distribution, resale, advertising and promotion purposes, or for creating new collective works. Special written permission must be obtained from the publisher for such copying.

IOS Press, Nieuwe Hemweg 6B, 1013 BG Amsterdam, The Netherlands, Fax: +31 20 620 34 19; Tel.: +31 20 688 33 55

Printed in the Netherlands

1069-2509/02/$8.00

Integrated Computer-Aided Engineering 9 (2002) 319–331
IOS Press

Design and implementation of fuzzy P^{2}ID controller for handlebar control of a bicycle robot

Pitikhate Sooraksa[a,*], Thana Pattaradej[a] and Guanrong Chen[b]
[a]*Department of Information Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand*
E-mail: kspitikh@kmitl.ac.th
[b]*Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong SAR, P.R. China*
E-mail: gchen@ee.cityu.edu.hk

Abstract. This paper presents the design and implementation of a new fuzzy proportional-integration plus fuzzy proportional-derivative control scheme, named the fuzzy P^{2}ID controller hereafter, for controlling the handlebar of a bicycle robot with time-varying load (disturbance). The fuzzy P^{2}ID controller combines some advantages of the fuzzy PI controller and the ones of the fuzzy PD controller, which can compensate their individual shortcomings. Detailed design is described, along with the implementation of the integrated computer-aided designed bicycle control system. Functionally, the controller is a nonlinear controller with variable gains, providing the expected fast response and robustness. Structurally, it is an embedded version of a conventional PI controller and a PD controller, which has an additional fuzzy control block, where a switching rule of control signal is also implemented. Experimental results show the effectiveness of the new control scheme for controlling the handlebar of a bicycle robot, built from "off-the-shelf" parts with completely unknown hardware parameters. Comparison tests among several existing fuzzy controllers as well as the conventional PID controller have been conducted, so as to evaluate the superior performance of the new scheme. This new control scheme can be directly applied to general robotic systems and other industrial processes under similar physical conditions.

1. Introduction

In the last three decades, fuzzy logic control has evolved as an alternative or complementary to the conventional control strategies in various engineering areas [15], particularly in robotics [5,11,14]. Fuzzy control theory usually provides nonlinear controllers that are capable of performing differernt complex nonlinear control actions [2,3], even for uncertain nonlinear systems [7]. Unlike conventional controls, designing a fuzzy logic controller does not require precise knowledge of the system model such as the poles and zeroes of the system transfer functions. Imitating the way of human learning, the trial error and the rate of the error are two crucial inputs for the design of such a fuzzy control system.

It was reported that PID controllers are still the major controllers used in the industry today [2]. On the other hand, it has also been shown that a hybrid scheme of fuzzy control and PID control has superior performance over individual conventional and fuzzy control algorithms [1,6,10,16]. Motivated by these facts, in this paper, we design and implement a fuzzy P^{2}ID controller, based on the successful fuzzy PI controller and fuzzy PD controller developed earlier by Chen et al. [3, 4,8]. The fuzzy PI and fuzzy PD controllers are derived from a practical approach of a conventional digital PI and PD controllers, as shown in Fig. 1.

To validate the efficiency of the new control scheme

*Corresponding author.

ISSN 1069-2509/02/$8.00 © 2002 – IOS Press. All rights reserved

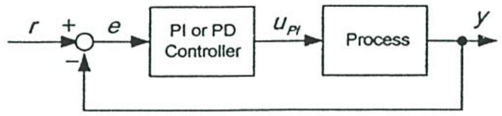


Fig. 1. A conventional PI/PD continuous-time control system.

under a complex and significantly uncertain environment, we applied the new algorithm to the control of the handlebar of a bicycle robot driven by a DC motor, which has completely unknown parameters. The readers are referred to [12,13] for more detailed theory and design of the "in-house-built" bicycle robot used for the current study. In this paper, our objective is focused on the design and implementation of the new hybrid fuzzy controller. More specifically, a fuzzy P^2ID controller is introduced, in which a computer-aided control system is used to track a reference input voltage. The aim of control is to achieve simultaneously a fast rise time and a minimum steady-state error with robustness within an acceptable tolerance, for which it is known that the fuzzy PD controller can handle the former while the fuzzy PI controller can deal with the latter. It is noticed that the fast rise time and robustness are crucial for this bicycle system because the robot can collide on obstacles if the control action is too slow; or even in the case of slight collision it should be able to self-adjust the system so as to continue the motion. Zero steady-state error may not be an absolutely necessary criterion for this task if the tracking output can be guaranteed to be within an acceptable tolerance for the motion of the bicycle.

This paper is organized as follows. Section 2 describes the derivation of the fuzzy control law and the basic framework of the fuzzy PI controller, including fuzzification, control rule base establishment, and defuzzification. Section 3 provides similar discussion as in Section 2, but for the fuzzy PD controller. Section 4 then illustrates the proposed fuzzy P^2ID control scheme, along with its switching criteria. Section 5 shows its corresponding hardware implementation and experimental results. Finally, Section 6 concludes the paper.

2. The fuzzy PI controller

In this section, we briefly describe the design of the fuzzy PI controller: its mathematical derivation and technical aspects. The fuzzy PI controller is actually a specially-designed conventional digital controller. Detailed analysis and derivation of this controller is referred to [4].

We first describe the design principle and basic structure of the fuzzy PI controller. The output of the digital fuzzy PI controller in the discrete time-domain, as can be easily verified from Fig. 2, is given by

$$u_{PI}(nT) = u_{PI}(nT-T) + Ku_{PI}\Delta u_{PI}(nT) \quad (1)$$

where $T > 0$ is the sampling time, K_P and K_I are the proportional and integral gains, respectively, and Ku_{PI} is a fuzzy control gain to be determined later in the design. In Fig. 2, $e(nT)$ is the tracking error signal at the n-th sampling time. The fuzzy logic control part has a single output, called the incremental control output, and is given by

$$\Delta u_{PI}(nT) = K_P e_v(nT) + K_I e_p(nT) \quad (2)$$

where

$$\Delta u_{PI}(nT) = \frac{U_{PI}(nT) - u_{PI}(nT-T)}{T} \quad (3)$$

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

$$e_p(nT) = e(nT) \quad (5)$$

Here, $\Delta u_{PI}(nT)$ is the incremental control output, $e_p(nT)$ the error signal, and $e_v(nT)$ the rate of change of the error signal.

2.1. *Fuzzification*

The fuzzy PI control part employs two inputs: the tracking error signal (position), $e_p(nT)$, and the rate of change of the error signal (velocity), $e_v(nT)$. The fuzzy PI control part has a single output, called the incremental control output, and is denoted by $\Delta u_{PI}(nT)$. The input and output membership functions of the fuzzy PI controller (inside the box of Fig. 2) are shown in Figs 3 and 4, respectively, where the constant $L > 0$ is chosen by the designer and is fixed after being determined.

2.2. *Control rule base*

Using the aforementioned membership functions, the following control rules (shown in Table 1) are established for the fuzzy PI control part. Note that we let the output membership functions be singletons here for the simplicity of design.

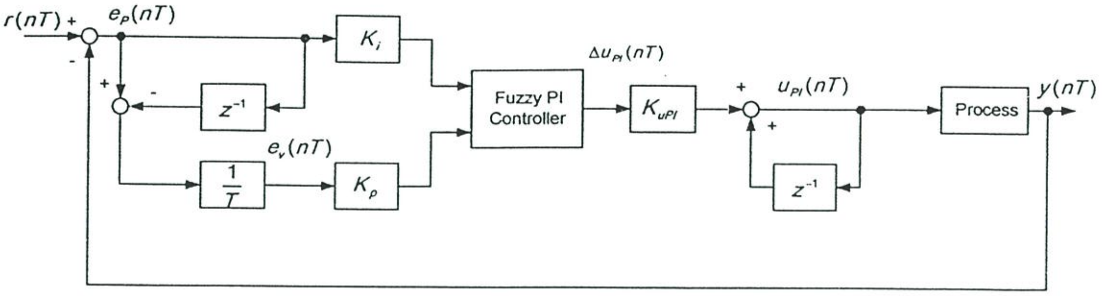


Fig. 2. The fuzzy PI control system.

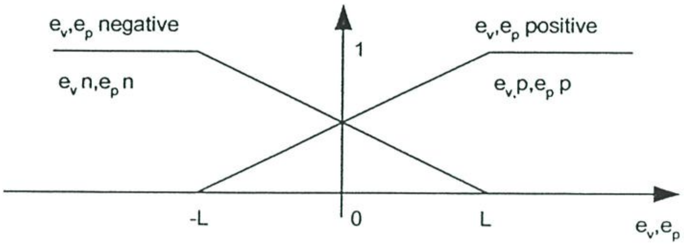


Fig. 3. The input membership functions for the fuzzy control part.

In Table 1, $e_p := r - y$ is the error; where if r is a constant then $e_v = \dot{e}_p = 0 - \dot{y} = -\dot{y}$ is the rate of the error. Here, "PI-output" is the control output $\delta u(nT)$, "$e_p.p$" means "position error positive" and "$o.p$" means "output positive" etc. Also, "AND" is the Zadeh's logical "AND." These four rules together yield the control actions for this fuzzy PI control part (Table 1).

The formulation of these rules can be understood as follows [4].

Rule 1 (R1): From Table 1, we get $e_p.p$ (the error is positive) and $e_v.p$ (the rate of error is positive) over the interval of $r > y$, which controls y to run on the positive direction toward r.

Rule 2 (R2): The system starts to work in the interval where y is uncontrolled climbing naturally.

Rule 3 (R3): Similar to Rule 2 (R2), when $e_p.n$ and $e_v.p$, the system runs freely without control, where the system output is coming back by itself toward the setting point.

Rule 4 (R4): It is the inverse control under condition $e_p.n$ and $e_v.n$, when y passes through $r(y > r)$ on this interval, so we must control it to turn back toward r.

2.3. Defuzzification

In the defuzzification step, the commonly used "center of mass" formula is employed to defuzzify the incremental control of the fuzzy logic control part. The defuzzification formula is

$$\begin{aligned}\Delta u_{PI}(nT) = {} & [\Sigma\{\text{membership of input} \\ & \times\text{output corresponding to} \\ & \text{the membership of input}\}]/ \\ & [\Sigma\{\text{membership of input}]\end{aligned} \tag{6}$$

For the fuzzy PI controller, the value-ranges of the two inputs, the errors, and the rates of change of the errors, are decomposed into twenty adjacent input-combination regions as shown in Fig. 5(a). This figure is understood as follows: We put the membership function of the error signal over the horizontal $K_i e_p(nT)$-axis, and put the membership function of the rate of change of the error signal over the vertical $K_p e_v(nT)$-axis, on Fig. 5. These two membership functions then overlap and form the third-dimensional picture over the 2-dimensional regions as the top view shown in Fig. 5(a). When we look at region I, for example, if we look rightward to the $K_i e_p(nT)$-axis, we see the domain $[0, L]$ and the membership function (in the third dimension) over $[0, L]$ of the error signal; if we look downward to the $K_p e_v(nT)$-axis, we see the domain

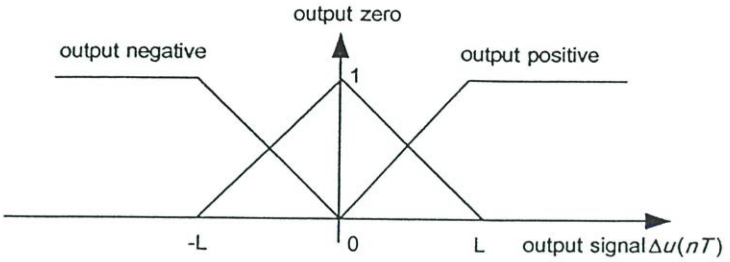


Fig. 4. The output membership functions for the fuzzy logic part. (a) Fuzzy PI input combination regions. (b) Fuzzy PD input combination regions.

Table 1
Fuzzy PI control rule base

Rule	e_p	e_v	$\Delta u_{PI}(nT)$	Selected output
R1	p	p	positive	L
R2	p	n	zero	0
R3	n	p	zero	0
R4	n	n	negative	$-L$

$[-L, 0]$ and the membership function over $[-L, 0]$ of the rate of change of the error signal.

The above control rules, (R1)–(R4), along with the chosen membership functions and the determined regions, are used to generate appropriate fuzzy control actions when the error and rate signals are located within a certain region.

In doing so, we consider the locations of the error $K_i e_p(nT)$ and the rate $K_p e_v(nT)$ in the regions. Let us look at region I, for example, where $e_p(nT)$ is in the range $[0, L]$ and $e_v(nT)$ in $[L, 0]$. For these two signals, we have $e_v \cdot n > 0.5 > e_p \cdot n$. Figure 6 and (R1) together, where Zadeh's logical "AND" is used, lead to $\{\text{error} = e_p \cdot n \text{ AND rate} = e_v \cdot n\} = \min\{e_p \cdot n, e_v \cdot n\} = e_v \cdot n$. The rest of the cases are summarized in Table 2.

It can be verified that the above are true for the four input combinations labeled Regions I. Thus, in Regions I, it follows from the defuzzification Eq. (6) that

$$\Delta u_{PI} = \frac{\mu_1 u_1 + \mu_2 u_2 + \mu_3 u_3 + \mu_4 u_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4}$$

$$\begin{aligned}\Delta u_{PI}(nT) = (&e_p \cdot n \times o \cdot n + e_p \cdot n \times o \cdot z \\ &+ e_v \cdot n \times o \cdot z + e_v \cdot p \times o \cdot p)/ \\ &(e_p \cdot n + e_p \cdot n + e_v \cdot n + e_v \cdot p)\end{aligned}$$

Here, it is important to note that if one follows the above procedure to work through the four segments of Region I, he will find that all cases give the same result of $e_p \cdot n$. To this end, we apply $o \cdot p = L$, $o \cdot n = -L$, $o \cdot z = 0$, and following the straight line formulas obtained from the geometry of Figs 3 and 4:

$$e_p \cdot p = \frac{K_p e_p(n) + L}{2L}$$

$$e_p \cdot n = \frac{-K_p e_p(n) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{K_p e_v(n) + L}{2L}$$

$$e_v \cdot p = \frac{-K_p e_v(n) + L}{2L}$$

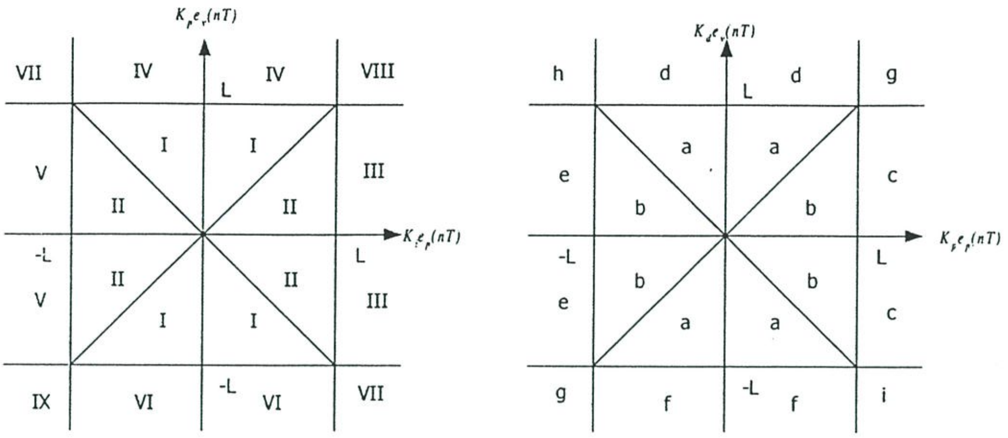
where it should be noted that $e_p(nT) \leqslant 0$ in Regions I, then we arrive at the following result for the four segments of regions I:

$$\Delta u_{PI} = \frac{L[K_i e_p(nT) + k_p e_v(nT)]}{2[2L - K_p|e_v(nT)|]}$$

Working through all regions in the same way, we obtain the following formulas for the twenty regions, which can then be reduced into nine formulas:

$$\begin{aligned}&\Delta u_{PI}(nT) \\ &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_p|e_v(nT)|]} && \text{in region I} \\ &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i|e_p(nT)|]} && \text{in region II} \\ &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] && \text{in region III} \\ &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] && \text{in region IV} \\ &= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) - L] && \text{in region V} \\ &= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) - L] && \text{in region VI} \\ &= 0 && \text{in region VII} \\ &= +L && \text{in region VIII} \\ &= -L && \text{in region IX}\end{aligned}$$

Finally, it is worthwhile mentioning that the stability of this fuzzy PI controller has been analyzed, result-



(a) (b)

Fig. 5. Decomposed regions of the input-combination values: (a) for fuzzy PI control, (b) for fuzzy PD control.

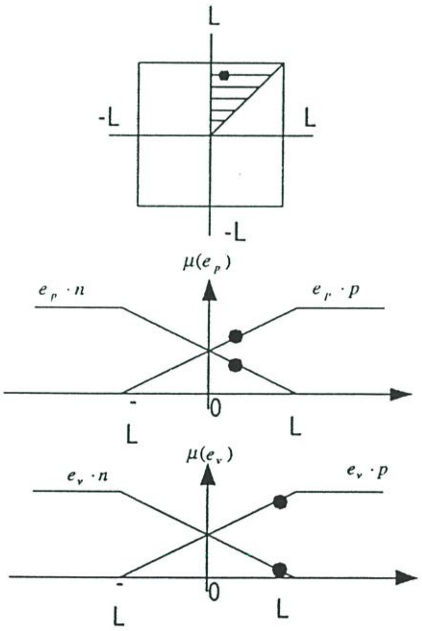


Fig. 6. Marking samples for calculating an equation of region I.

ing in a practical and rigorous mathematical condition, in [4].

3. Fuzzy PD controller

Similar to the derivation of the fuzzy PI controller discussed in the previous section, the fuzzy PD controller, shown in Fig. 7, is described by

Table 2
One control rule base of the fuzzy PI controller

Rule	e_p	e_v	e_p AND e_v
R1	p	p	$e_v \cdot n$
R2	p	n	$e_p \cdot n$
R3	n	p	$e_v \cdot n$
R4	n	n	$e_p \cdot p$

$$u_{PD}(nT) = -u_{PD}(nT - T) + K_{uPD}\Delta u_{PD}(nT) \quad (7)$$

where K_{uPD} is a fuzzy control gain and the incremental control is

$$\Delta u_{PD}(nT) = K_p e_p(nT) + K_d e_v(nT) \quad (8)$$

Detail derivation and stability analysis of this controller is referred to [8].

3.1. Fuzzification

We fuzzify the P and D components of the PD controller individually, in a way similar to the fuzzification of the fuzzy PI controller discussed above. The input and output membership functions of the PD component are also chosen to be the same as that shown in Figs 3 and 4, for simplicity of the design.

The fuzzy PD controller employs two inputs: the average error signal, e_p, and the rate of change of the error signal, e_v. The fuzzy PD controller has a single output, denoted by $\Delta u_{PD}(n)$.

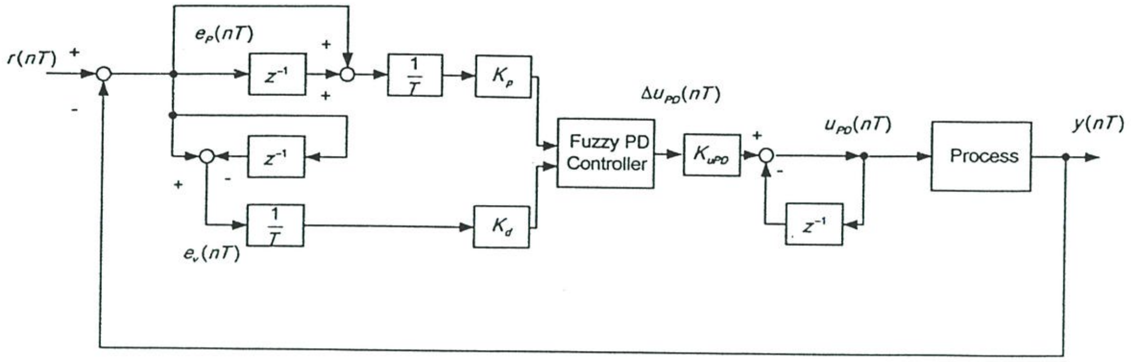


Fig. 7. The fuzzy PD control system.

Table 3
Fuzzy PD control rule base

Rule	e_p	e_v	$\Delta u_{PD}(nT)$	Selected output
R1	p	p	zero	0
R2	p	n	positive	L
R3	n	p	negative	$-L$
R4	n	n	zero	0

3.2. Control rule base

Using the chosen membership functions, the following control rules are established for the fuzzy PD controller, as indicated in Table 3. Here, for simplicity, we use the singleton membership function for the outputs, as the one shown in Fig. 4. In Table 3, the rules can be understood as follows:

Rule 1 (R1): The system starts to work over the interval where y is uncontrolled, climbing naturally.

Rule 2 (R2): From Table 2, we get $e_p.p$ (the error is positive) and $e_v.n$ (the rate of error negative) on the interval where $r > y$, in which the rule controls y to run in the positive direction toward r.

Rule 3 (R3): Under the conditions $e_p.n$ and $e_v.p$, the output y passes through $r (y > r)$ on this interval, so we must control it to turn back toward r.

Rule 4 (R4): It is similar to Rule 1 (R1), for $e_p.n$ and $e_v.n$, we let the system run freely without control. The output signal is coming back toward the set-point, so we let it run by itself.

3.3. Defuzzification

In this step, the "center of mass" formula is employed again to defuzzify the incremental control, as shown in Eq. (6).

Now, by applying the values $o.p = L$, $o.n = -L$, $o.z = 0$, and the following the straight line formulas obtained from the geometry of Figs 3 and 4, we obtain the following nine formulas for the nine reduced input combination regions similar to Fig. 5(b):

$$
\begin{aligned}
\Delta u_{PD}(nT) &= \frac{L[K_p e_p(nT) - K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_d|e_v(nT)|]} && \text{in region a}\\
&= \frac{L[K_i e_p(nT) - K_d e_v(nT)]}{2[2L - K_p|e_p(nT)|]} && \text{in region b}\\
&= \frac{1}{2}[-K_d e_v(nT) + L] && \text{in region c}\\
&= \frac{1}{2}[K_p e_p(nT) - L] && \text{in region d}\\
&= \frac{1}{2}[-K_{di} e_v(nT) - L] && \text{in region e}\\
&= \frac{1}{2}[K_{pi} e_p(nT) + L] && \text{in region f}\\
&= 0 && \text{in region g}\\
&= -L && \text{in region h}\\
&= L && \text{in region i}
\end{aligned}
$$

4. The fuzzy P²ID controller

The proposed Fuzzy P²ID controller is an integrated scheme that combines the fuzzy PI and fuzzy PD control actions, where the advantages of both control actions are utilized to compensate and complement each individual shortcoming.

Based on our long-term experience with these fuzzy PI and fuzzy PD controllers, we found that the fuzzy PD controller has faster rise time than the fuzzy PI controller [18], while the fuzzy PI controler posses better

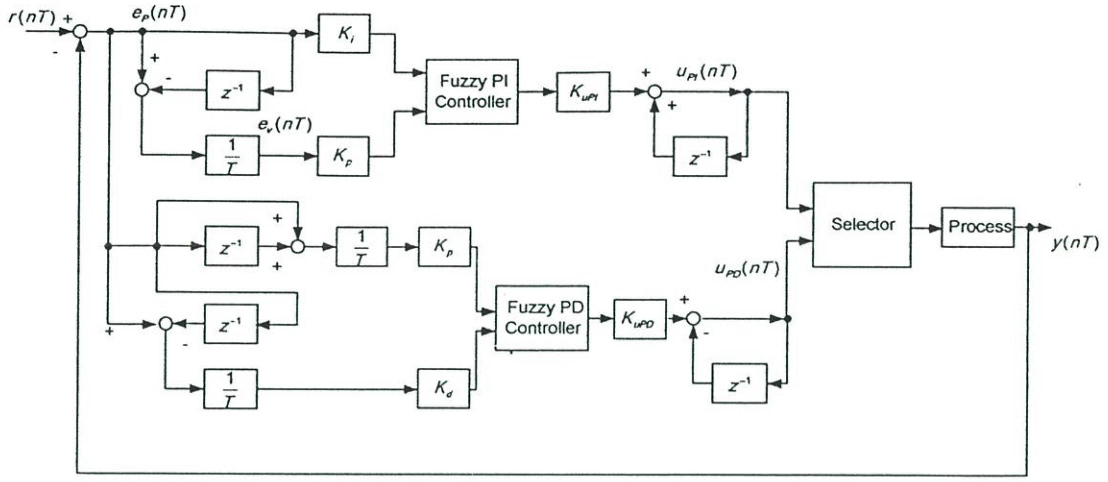


Fig. 8. The fuzzy P^2ID control system.

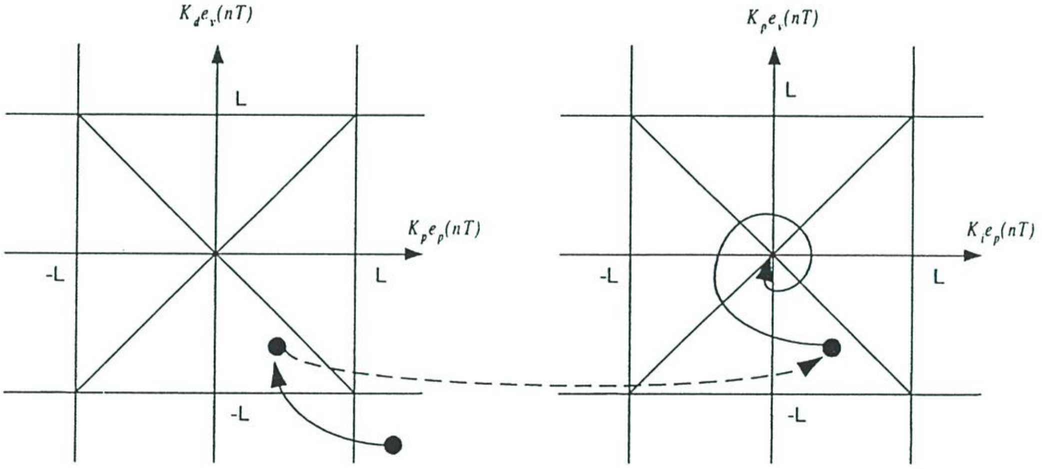


Fig. 9. At the switching point, the error trajectory is mapped from the error-phase plane of the fuzzy PD control to that of the fuzzy PI control.

steady-state accuracy than the other. In fact, this is clear by inspecting the design strategies employed in their control rule bases. Hence, it is expected that if these two controllers are combined together in a suitable way, to form a hybrid structure where an appropriate selecting rule is imposed by switching, then a superior performance over each individual controller may be achieved. With this concept, the architecture of the new control algorithm is developed, as depicted in Fig. 8.

To verify and validate the design, we separate the transient response plane into two shaded areas, which are the domains for lunching the fuzzy PI control action and the fuzzy PD control action, respectively. Conceptually, we assign the boot-up task to the fuzzy PD controller, which is also responsible for bring the output back toward the set-point when the output is beyond the pre-set overshoot limit. The fuzzy PI control, on the other hand, is selected as a second pilot to drive the process output to be within the given tolerance limit, near a certain percentage of the desired steady-state value. The transition point depends on the designer and the process to be controlled.

Since these two individual controllers guarantee their local stability, by the small gain theorem as studied in [4,8], the operations are stable after choosing the gains that satisfy the stability criteria locally but for all times expect at the switching points. With this in mind, we consider only the stability at the switching points. Utilizing the error-phase plane shown in Fig. 5, we can visualize a principle for designing the switching rule in the following way: if we consider the areas inside the

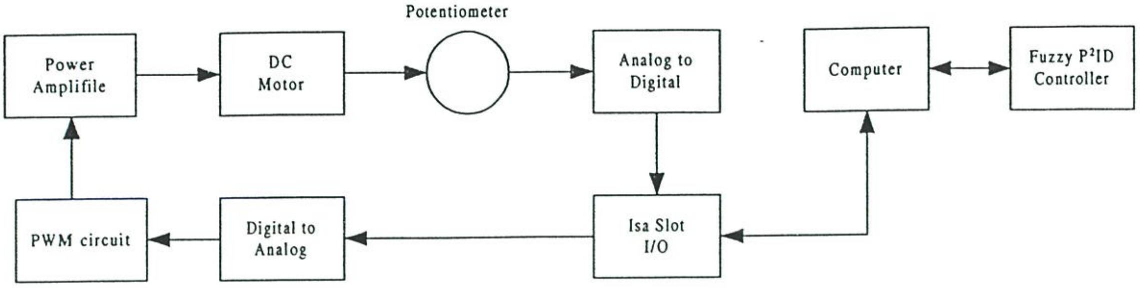


Fig. 10. Block diagram of the hardware setup.

two phase planes as the attraction regions in the sense of bounded input and bounded output (BIBO) stability [4, 8], then at the switching point (see Fig. 9) the change of the control energy at the transition between the two situations must be bounded even though it is inherently discontinuous. Based upon this fact, we must enforce a bounded control transition between the two controllers. In other words, at a switching point, the control energy using by the fuzzy PI controller must be less than that by the fuzzy PD controller.

By inspection of Eq. (7) for region "I" and Eq. (10) for region "a" and with the visual aid of Fig. 9, we can see that if $K_p^{PD} > K_i^{PI}$, $K_p^{PI} > K_d^{PD}$, $k_d^{PD}|e_v(nT)| \ll 2L$, and $K_p^{PI}|e_v(nT)| \ll 2L$, then an energy criterion is met, though at a conservative level. Hereafter, we use superscript to indicate which gain belongs to which controller. Substituting these conditions into those equations in Eqs (7) and (10) in the specified regions "I" and "a", then with a little algebra we can show that . Similarly, by using the same equations and repeating the same on regions "II" and "b", we can also see that if $K_p^{PD} > K_i^{PI}$, $K_p^{PI} > K_d^{PD}$, $k_d^{PD}|e_p(nT)| \ll 2L$, and $K_i^{PI}|e_p(nT)| \ll 2L$, then a similar criterion for bounded control energy is obtained. We now summarize the above analysis and state the switching criteria as follows.

A selector is said to be sufficiently satisfied the bounded conditions in changing control inputs at the transition point or switching point between the fuzzy PD to fuzzy PI controllers, if the following criteria are met:

(a) All gains satisfy the small gain theorem, as specified in [4,8].
(b) $K_p^{PD} > K_i^{PI}$
(c) $K_p^{PI} > K_d^{PD}$
(d) $K_d^{PD}|e_v(nT)| \ll 2L$, and $K_p^{PI}|e_v(nT)| \ll 2L$
(f) $K_p^{PD}|e_p(nT)| \ll 2L$, and $K_i^{PI}|e_p(nT)| \ll 2L$.

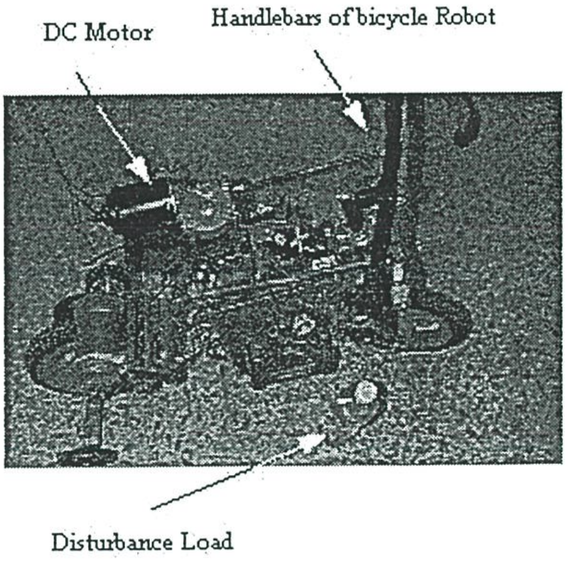


Fig. 11. A robot bicycle.

If these five conditions are met, the bounded trajectory confined in the error-phase planes before/at/ after the transition period between the two planes (shown in Fig. 9) will be guaranteed. Note that condition (a) guarantees the local stability during operation by individual controller, and conditions (b)–(f) are used to guaranteed the stability of the selector at the switching times. Note also that the inequalities in (d) and (f) can be used to calculate the switching times using the sampling outputs corresponding to the two sampling times. The error and the rate of error can be obtained by measuring data from the experiment and by using equations in Eqs (4) and (5).

We will use the above-derived criteria to design a set of control parameters for the proposed control scheme when it is applied to the handlebar of a bicycle robot in the next section.

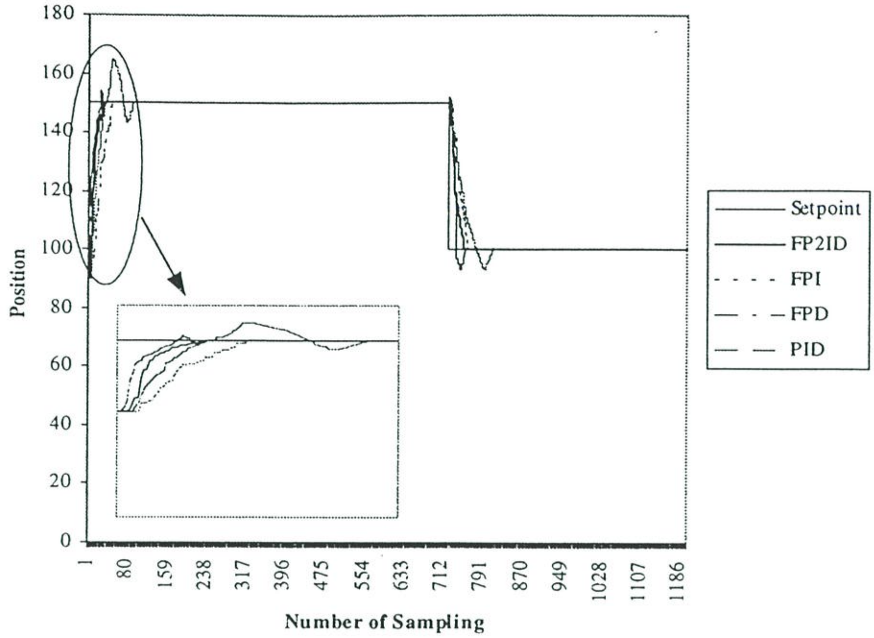


Fig. 12. Tracking performance comparison.

5. Hardware setup and experiment

The apparatus used in this experiment, as shown in Figs 10 and 11, consists of a DC motor connected to the turning unit of a bicycle robot [12,13]. The handlebar of the robot is hanging with a plastic bottle filled with water at one end emulating disturbance loads.

Since we use an "off-the-shelf" motor, all the parameters of the platform are completely unknown. This motor has a built-in plastic gear, which can be considered as a flexible joint. The sensing apparatus in the feedback loop is a potentiometer and an Analog-to-Digital (A/D) converter. The output apparatus consists of a Digital-to-Analog (D/A) converter, a Pulse-Width-Modulation (PWM) circuit, a power amplifier, and a DC servomotor. All electronic circuits and mechanical parts used are "in-house-building", prototyped by the authors.

Since the experiment is focused on the computer-aided control system, not on the robotic machine, the fuzzy P^2ID controller is performed on computer via software implementation. The computer used in this experiment is a 500 MHz AMD K6-2 computer running on the Windows ME operating system. The computer program is written in Turbo C++ version 3.0. The ISA slots No.0308h, No.0309h, No.030Ah [9] are used as ports.

This experiment is set up to partially simulate the situation when the robot bicycle is rolling along a rough road, with uncertain ground disturbances. These effects could disturb the whole dynamic system, including the handlebar of the robot bicycle. To simulate this environment, we used a plastic bottle filled with water at one end and hang it on the handlebar to generate the disturbance input during the experiment (see Fig. 11). We also experimented the case of a bigger disturbance abruptly hitting the handlebar, through impulsive hits onto the handlebar by human hand.

Performance evaluation was carried out via a comparison study for the proposed control scheme and some other existing control schemes, such as the individual fuzzy PI control, fuzzy PD control, and conventional PID control algorithms. Figures 12 and 13 show the experimental results. In Fig. 12, the following control gains were determined by trial-and-error testing. For the conventional PID control, $K_p = 20$, $K_i = 0.1$, $K_d = 5$. This set of PID gains was obtained by fine-tuning several times till we got the best possible results for a fair comparison. For fuzzy PI control, $K_p = 1$, $K_i = 1$, $Ku_{PI} = 1$, and $L = 100$; whereas for the fuzzy PD control, $K_p = 10$, $K_d = 0.1$, $Ku_{PD} = 1$, and $L = 100$. The new fuzzy P^2ID control scheme has the same parameters as the cases of the two individual fuzzy PI and fuzzy PD controllers. We had no difficulty about tuning these fuzzy controllers because we selected the gains based upon the criteria given and discussed in the previous section. We set the sampling time to $T = 0.1$ sec. for

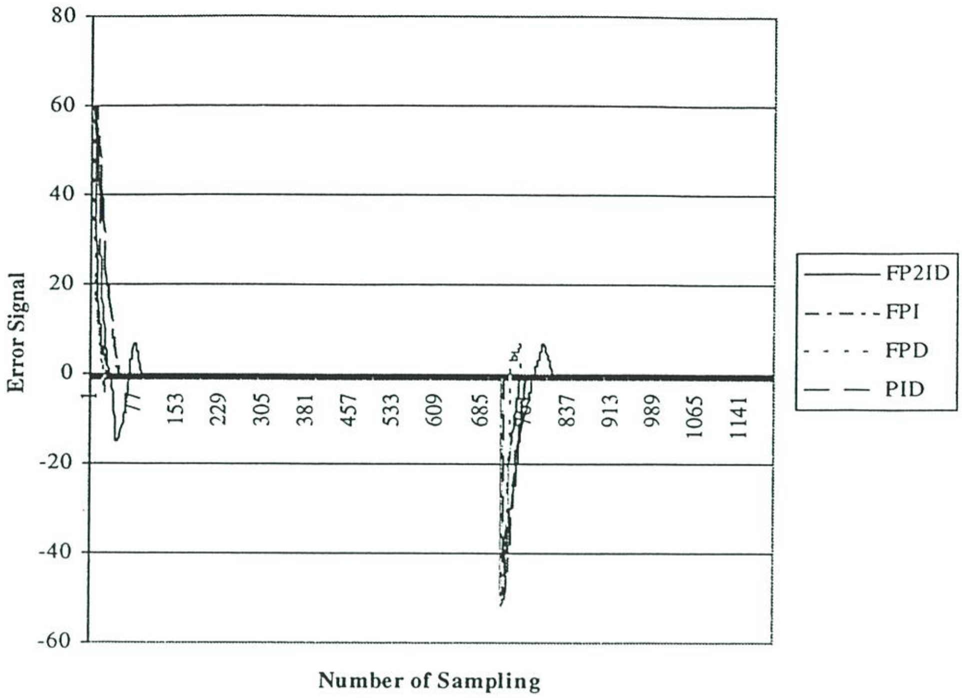


Fig. 13. Tracking errors corresponding to Fig. 12.

all cases. The switching instant between the fuzzy PI and fuzzy PD controllers in the fuzzy P^2ID scheme was set at the point of 5% off the set-point.

It is important to note that each step of the position was set according to the mapping voltage into the new positioning unit. The designer can change this as desired. In this experiment, we mapped 0–5 voltages into 0–255 steps corresponding to an 8-bit representation, according to the limitation of the physical structure of the handlebar. Note also that the initial position was not at 0 but was at around the 90th step, to simulate the real situation when the robot bicycle was in operation. The control signal herein is the one measured at the output from the computer before it was fetched to the PWM circuit, which may be alternatively implemented by using an 89C8051 microcontroller. Note moreover that the x-axes in Figs 12–15 are recorded by using the sampling step of 10 msec for each step, which can be easily converted by using this scaling factor.

According to Fig. 12, the fuzzy P^2ID controller shows superior performance in many aspects over the other competitors in comparison. Figure 13 shows the tracking error signals corresponding to Fig. 12. The individual fuzzy PI controller ranks the third in performance for steady-state tracking but it has no overshoot, and the second is the individual fuzzy PD controller scheme, which however has some overshoot. For the rise time comparison, the fuzzy PD controller is the second, followed by the fuzzy PI controller. The conventional PID controller, however, is the worst one in both rise time and settling time. Note again that steady-state error-free is not a critical point for this test on bicycle motion since for which the rise time and the settling time are more important. If the tracking is within the acceptable tolerance limits and within the required settling time for controlling the balance of the bicycle, then the control scheme can be used to serve the purpose.

Two remarks are in order: First, all control schemes can cope with external uncertainties (generated by the bottle filled with water hung at the handlebar) to some extent. Second, the conventional PID control scheme has the worst overshoot due to its linear control actions on this highly nonlinear and uncertain mechanical system. In addition, its initial position was set to start up around 10 steps higher than that of the other fuzzy control systems. Apparently, this means that the conventional PID has a rise-time response far behind the fuzzy controllers. However, the conventional PID controller can still be used to operate the control of the handlebar of the robot bicycle. This implies that the plant might actually have some significant linear features, at least within the bounded signaling ranges. Nevertheless, there is no guarantee for the strong disturbance

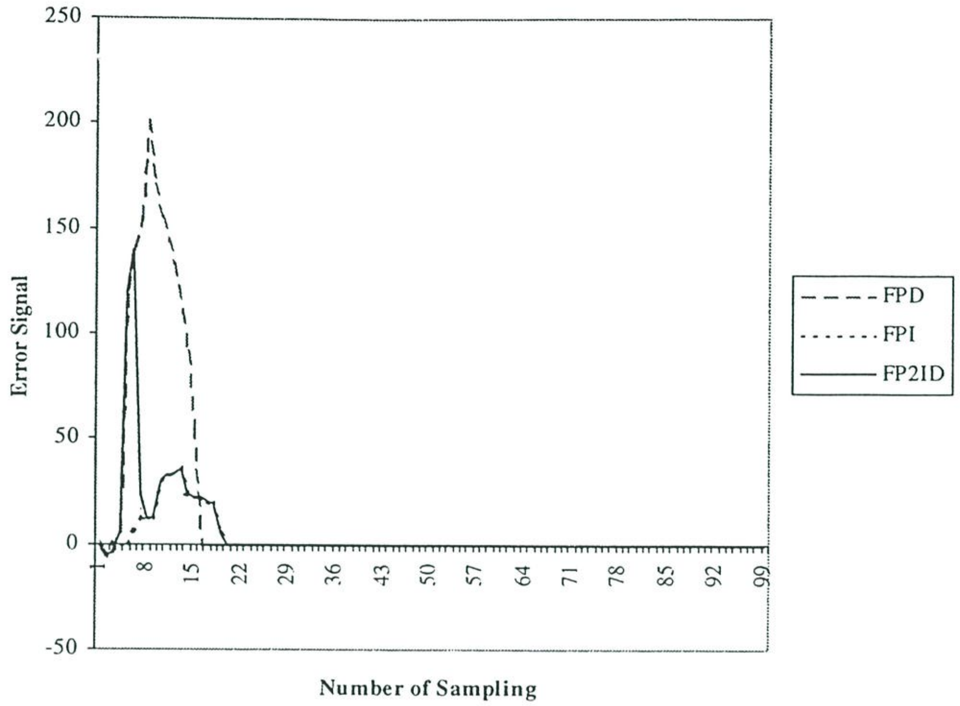


Fig. 14. Control input of the proposed scheme.

cases where the linear PID controller can be tolerated to work as good as the other controllers. Note that the time for controlling the robot bicycle so that it does not fall onto the ground is only 1 sec.; otherwise the bicycle cannot be balanced. The controller's action must be fast enough to cope with this very critical situation.

Figure 14 shows the control input of the proposed fuzzy P^2ID control scheme, corresponding to Fig. 12. The solid line represents control input of the controller, in which there is one part generated by the fuzzy PD unit and the rest by the fuzzy PI unit, in accordance with the designed switching point. As can be seen from the figure, the control input of the proposed control scheme is bounded and less than the one of the individual fuzzy PD controller.

In Fig. 15, the control gains remain the same as those in Fig. 12. In this test, we wanted to compare the robustness performance between the proposed control scheme and the conventional PID controller. This case is emulated when strong impulsive disturbance was applied to the handlebar of the robot bicycle from human-hand pushing. In the experiment, as shown in Fig. 15, we abruptly pushed the handlebar at some discrete time, roughly around the 800-th step, to move it away from the set-point. We found that the two control schemes are adequately robust to regulate the tracking, driving the handlebar back to the set-point in less than 1 sec. Still, the fuzzy controllers have better transient and steady-state responses than the conventional controller. Notice also that the switching between the fuzzy PD and fuzzy PI controllers within the new scheme is smooth. The new control scheme is proved effective and also easy to design, in accordance with the given criteria in Section 4, and can be alternatively used to substitute the conventional PID control in systems like this robot bicycle that have highly non-linearity as well as uncertainties, once again verifying the reports of [7, 10].

6. Conclusions

We have described a new fuzzy P^2ID controller designed by suitably integrated the individual fuzzy PI and fuzzy PD controllers with a switching rule. We have also reported our real performance evaluation and comparison, and summarized its merits and drawbacks as compared to the other comparable fuzzy and conventional PID-type controllers. It turns out that this new control scheme has superior performance over all its competitors, including the individual fuzzy PI and fuzzy PD controllers as well as the conventional PID

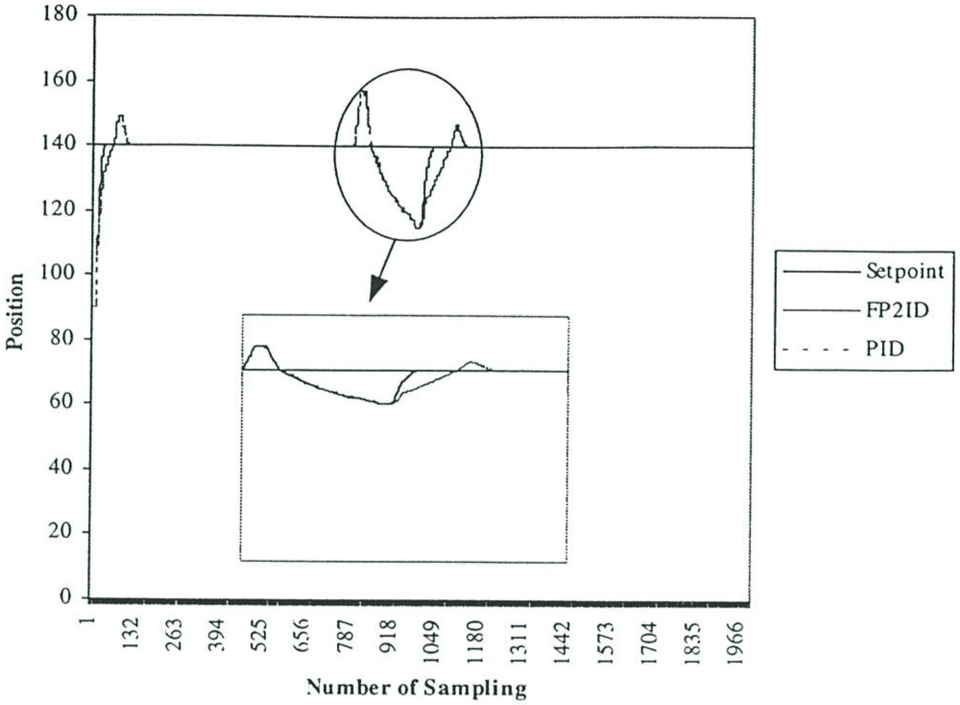


Fig. 15. Impulse disturbances for tracking robust performance testing.

controller. An additional finding is that although all these control schemes are robust to some extent in the presence of uncertainties, unknown parameters, and input disturbances, and yet the new scheme is overall the best among them.

Although our experimental results show the effectiveness and superior performance of the new controller, its online adaptive feature has not yet been carefully investigated. This powerful feature should be further evaluated and upgraded in the new control scheme, thereby making it an even more powerful hybrid controller for real engineering applications.

Acknowledgement

We would like to thank the anonymous reviewers for their valuable comments for the improvement of our original manuscript. This research was partially supported by the Thailand Research Fund under grant PDF/95/44 and the Hong Kong CityU Grant 9360051.

References

[1] B.S. Butkiewicz, System with hybrid fuzzy – conventional PID controller, *IEEE Intl Conf. on Systems, Man, and Cybernetics* 5 (2000), 3705–3709.

[2] G. Chen, Conventionl and fuzzy PID controller: An overview, *Int. J., Intell. Control System* 1 (1996), 235–246.

[3] G. Chen and T.T. Pham, *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, 2000.

[4] G. Chen and H. Ying, BIBO stability of nonlinear fuzzy PI control systems, *J. Intel. Fuzzy Syst.* 5 (1997), 3–21.

[5] Q.P. Ha, Q.H. Nguyen, D.C. Rye and H.F. Durrant-Whyte, Fuzzy sliding-mode controllers with applications, *IEEE Trans. on Industrial Electronics* 48(1) (2001), 38–46.

[6] K. Hirota, *Industrial Applications of Fuzzy Technology*, Springer-Verlag, Tokyo, 1993.

[7] H.A. Malki, D. Feigenspan, D. Misir and G. Chen, Fuzzy PID control of a flexible joint robot arm with uncertainties for time-varying load, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 5(3) (1997), 371–378.

[8] H.A. Malki, H. Li and G. Chen, New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control system, *IEEE Trans. Fuzzy Systems* 2(4) (1994), 345–354.

[9] M.A. Mazadi and J.G. Mazadi, The 80x86 IBM PC & Compatible Computer Volume II: Design and Interfacing of the IBM PC, PS and Compatible, Prentice-Hall, 1995.

[10] D. Misir, H.A. Malki and G. Chen, Design and analysis a fuzzy proportional-integral-derivative controller, *Fuzzy Set and System* 79 (1996), 297-331.

[11] P. Sooraksa and G. Chen, Mathematical modeling and fuzzy control for flexible-link robots, *Comput. and Math Model.* 27(6) (1998), 73–93.

[12] P. Sooraksa and U. Sritheerawirojana, A bicycle robot: Part 1, Modelling and control, *Proc. of ISARC 17th International Symposium on Automation and Robotic in Construction*, 2000, pp. 501–504.

[13] P. Sooraksa, U. Sritheerawirojana, S. Kaopratum, T. Uthairat and V. Monyakul, A bicycle robot: Part 2 System and Imple-

mentation, *Proc. of ISARC 17th International Symposium on Automation and Robotic in Construction*, 2000, pp. 525–528.

[14] M. Uragami, M. Mizumoto and K. Tanaka, Fuzzy robot controls, *J. Cybernet* 6(1) (1976), 39–64.

[15] L.X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, 1997.

[16] Y. Wang and J.D. Birdwell, A nonlinear PID-type controller utilizing fuzzy logic, *Proc. of the IEEE/IFAC Joint Symposium on Computer-Aided Control System Design*, 1994, pp. 89–94.

[17] W.A. Wolovich, *Automatic Control Systems*, Saunders College Pub., Orlando, FL, 1994.

[18] T. Pattaradej, P. Chandang, M. Lertwatechakul, P. Sooraksa and G. Chen, A speed evaluation for conventional PID and fuzzy controllers, *Proc. of the 2nd International Conference on Intelligent Technologies*, 2001, pp. 91–96.

ICCAS 2001

International Conference on Control, Automation and Systems

October, 17~21, 2001

Cheju National University, Jeju Island, Korea

ICASE Institute of Control, Automation and Systems Engineers, Korea

Fuzzy PI with Gain Scheduling Control for a Flexible Joint Robot

Thana Pattaradej., Ketsara Chumsawee., and Pitikhate Sooraksa

Department of Industial Technology and Information Engineering
Faculty of Engineering., King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
3 Chalong Krong Rd., Ladkrabang, Bangkok, Thailand.
(Tel : 66-2-737-3000; Fax : 66-2-326-9084 ; E-mail: kspitikh@kmitl.ac.th, s3061136@kmitl.ac.th)

Abstract-This paper presents the implementation of fuzzy PI gain scheduling controller (FPICGS) for controlling flexible joint robot arms with uncertainties from time-varying load. The term FPICGS is called based on a combination of fuzzy PI control scheme with a set of rule bases. Principle of design for a FPICGS is given along with the implementation of the designed computer aided control system. The experiment reveals an effectiveness of the proposed control scheme for flexible joint robot arms driven by a DC motor hooked with a spring which both parameters are completely unknown parameters. According to performance evaluation and comparison tests among conventional PID, and the proposed control schemes show that the proposed control scheme has superior performance in all aspects. Implication of the work is promisingly implied applications of this computer aided control scheme in robotics and automation

Keywords: computer control, fuzzy control, PID, DC motor, flexible joint robot, gain scheduling

1. Introduction

Convention control system theories have proven to be very effective for systems that can be modeled precisely by mathematical equations. However, they have been found to be inefficient in handling systems that are either too complex or too vague to be described by accurate mathematical models. Some difficult issues, which related to these systems, are inertia, momentum, friction, damping, time lags, oscillations, nonlinearities, and complex structure, etc.

Fuzzy logic control has emerged as an alternative or complement to conventional control strategies in many engineering areas, especially in robotics [1,2]. Fuzzy control theory usually provides nonlinear controllers that are capable of performing various nonlinear control actions [3,4]. If the parameters of the fuzzy controllers are chosen appropriately, it is also possible for them to work for uncertain nonlinear systems [5]. In addition, fuzzy controllers are capable of handling many complex situations such as some control systems with large uncertainties in process parameters and/or systems structures.

In this paper, we design an improved fuzzy PI (proportional-integral) controller (IFPIC) based on the successful fuzzy PI controller developed by following the practical approach of the conventional PI controller (see Fig. 1) design method [6]. Basic characteristics of the proposed design that may differ from other fuzzy or non-fuzzy PI-type controller include the following:

(1) It has the same linear structure as the conventional PI controller, but it has nonconstant gains: the proportional and integral, gains are nonlinear functions of the input signals.

(2) The designed controller is based on the precise mathematical model of a discrete PI controller, from which the fuzzy control law is derived.

(3) Membership functions are simple linear ones with only four fuzzy logic if-then rules for each of the PI control components.

(4) The fuzzification, control-rule execution and defuzzification steps are all embedded in the final product of the fuzzy control law, which is an explicit conventional formula, so that the fuzzification-rules-defuzzification routine is not needed at all the process control steps.

The derivation of the fuzzy control law and the basic framework of the fuzzy PI controller, including the fuzzification, fuzzy control rule base and defuzzification , are shown in detail in the next section.

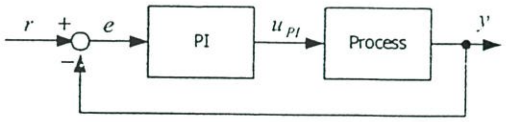


Fig. 1. The conventional continuous-time PI control system.

2. Fuzzy PI Controller with Gain Scheduling

It has been reported in [1,5,7] that fuzzy control has superior performance over the conventional controllers for many systems, particularly for some higher-order, time-delayed, nonlinear, and complex systems. due to its strong capability of handling nonlinearity and uncertainties. To utilize this advantages of fuzzy logic. A new improved fuzzy PI controller with gain scheduling is designed based on the fuzzy PI component in [4]. More detail derivation can also be found in [1,4]. All notations and abbreviation are used exactly the same as [4]. For example, K_P and K_I are the proportional and integral gains respectively, and e is the tracking error signal.

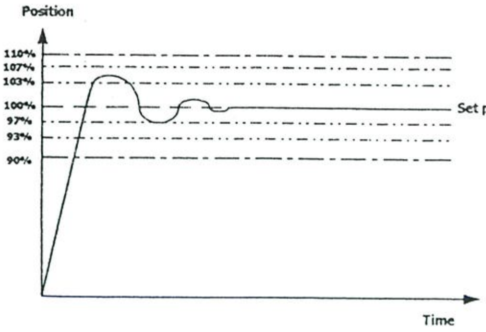


Fig.2. Design Respond FPIGSC.

From Fig 2, it is designed to vary gain Ki, Kp, Kui, by defining the interval to reach the set point rapidly and to achieve a good transient response. The result of the consideration is shown in Fig. 6 for the proposed architecture.
Basic algorithm for designing rule bases of FPIGSC are:
For the first interval, let increases gain to higher the speed in order to arrive to the set point faster.
For the second interval, let decreases gain from the first interval in half because it closes to the set point.
For the third interval, let set a small gain to reduce the overshoot.

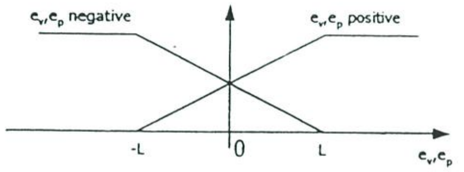


Fig 3.The input membership functions for the fuzzy logic control part.

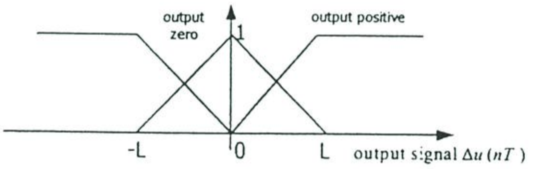


Fig. 4.The output membership functions for the fuzzy logic control part.

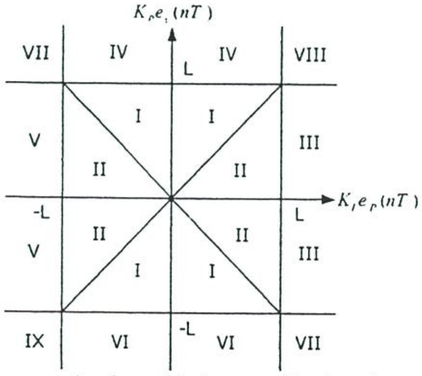


Figure 5. Decomposed regions of the input-combination values.

The input and output membership functions of the fuzzy logic control part are shown in Figure. 3 and 4, respectively. The fuzzy logic control part has a single output, called the incremental control output and is denoted by $\Delta u(nT)$, as shown in Figure. 4, where the constant $L > 0$ is chosen by the designer and is fixed after being determined.
With the method of center of gravity in defuzzification step and simple algebra, we obtain the following nine formulas for the ten IC regions (in Fig 5)

$$
\begin{aligned}
\Delta u_{PI}(nT) &= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_p(nT)|]} && \text{in region 1} \\
&= \frac{L[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)]}{2[2L - K_i |e_v(nT)|]} && \text{in region 2} \\
&= \frac{1}{2}[K_p e_v(nT) + L] && \text{in region 3} \\
&= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) + L] && \text{in region 4} \\
&= \frac{1}{2}[K_i e_v(nT) - L] && \text{in region 5} \\
&= \frac{1}{2}[K_i e_p(nT) - L] && \text{in region 6} \\
&= 0 && \text{in region 7} \\
&= +L && \text{in region 8} \\
&= -L && \text{in region 9}
\end{aligned}
$$

3. Flexible joint Robot

For the flexible-joint model under investigation, however, due to the nonlinearity, flexibility, and uncertainty, this property is not satisfied. Therefore, we need to derive some additional sufficient conditions to modify the controller, so as to guarantee this proportional property. Consider a typical flexible-joint model shown in Fig.7, described by

$$I_1 \ddot{\theta}_1 + mgl\ \sin(\theta_1) + k(\theta_1 - \theta_2) = 0 \qquad (1)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + k(\theta_1 - \theta_2) = u \qquad (2)$$

where u is the torque input , I_1 is the link inertia, I_2 is the motor inertia, m is the mass, g is the gravity constant, l is the length of the link, k is stiffness.
Note that Equation (1) can be rewritten as

$$0 = Y \cdot P + k(\theta_1 - \theta_2) \qquad (3)$$

If the desired link trajectory θ_{1d} and its velocity $\dot{\theta}_{1d}$ are both given, we can estimate the desired motor trajectories θ_{2d} and $\dot{\theta}_{2d}$ using Equation (3):

$Y_d = [\ddot{\theta}_{1d}\ \sin(\theta_{1d})]$ and $\dot{Y}_d = [\dddot{\theta}_{1d}\ \cos(\theta_{1d})]$
Let

$$e_p(nT) = \theta_{2d}(nT) - \theta_2(nT)$$

$$e_v(nT) = \dot{\theta}_{2d}(nT) - \dot{\theta}_2(nT)$$

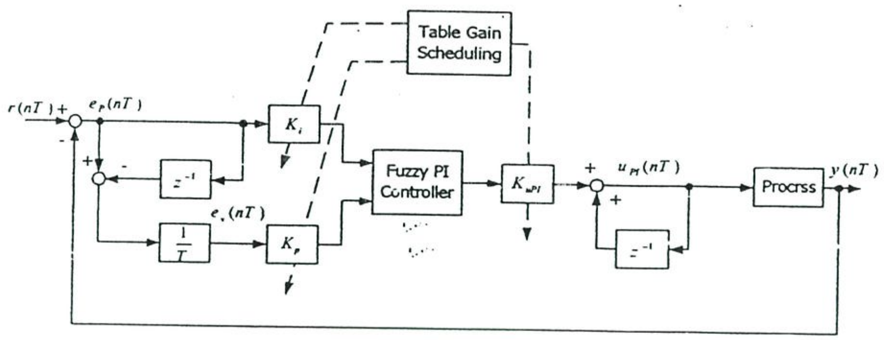


Fig. 6. The FPIGSC system.

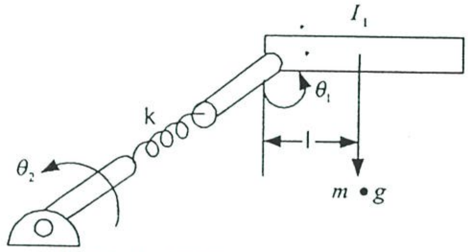


Fig. 7. The flexible-joint system..

Be the inputs to the fuzzy logic control part in Fig 6. If we know both ep(nT) and ev(nT), then we can find the incremental control Δu(nT) according to the formulas described in the last section.

4. Hardware Setup and Experiment

In this experiment, the motor is connected with a lightweight arm, which is made of PVC plastic in cylindrical shape. The time-varying load is a spring connecting at the tip of the PVC arm. Since the motor used here is "off-the-shelf" and the other material including the arm and the spring are the recycle ones, all of these hardware data and parameters are completely unknown with shown in Fig 8. The sensing apparatus for feedback is a potentiometer and an Analog-to-Digital (A/D) converter. The output unit consists of a Digital-to-Analog converter (D/A), a Pulse-Width-Modulation (PWM) circuit, a power Amplifier, and a DC servomotor. The computer used in this experiment is an AMD K6-2, 500MHz with Windows ME OS. The computer program is written in Turbo C++ version 3.0. The ISA slots [8] No.0308h, No.0309h, and No.030Ah are used as ports. Fig. 9 shows step response between the conventional PID and FPICGS. In this figure, the conventional PID has gains Kp = 10, Ki = 0.01, Kd = 1. For FPICGS, it has gains L = 100, T = 0.1 s. From this experiment, we started with the set point is equal to 120, 180, 60 respectively.

5. Conclusion

In this paper, we describe the design and implementation of FPICGS computer aided control system. Simple nine formulas as well as three control rules for improving tracking performance are presented and employed to control the flexible joint robot arms with uncertainties from time-varying load. Experimental results depicts a remarkable performance of the control paradigm promisingly implied that the scheme can be adopted and applied to the robotic systems. By comparison tests between conventional PID with FPICGS, it shows that FPICGS performances better than the conventional PID in all aspects.

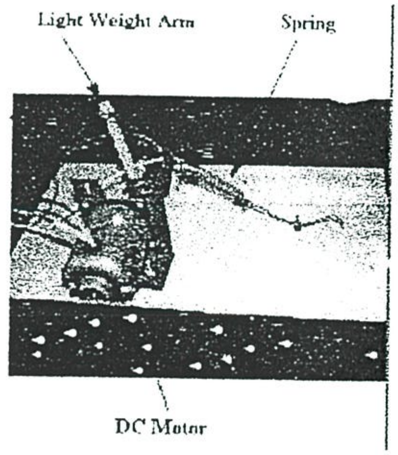


Fig. 8. Physical setup for the robot arm experiment

6. Acknowledgment

This paper is supported by the Thailand Research Fund under grant PDF/95/2544. The authors would like to thank Ms. Nantawadee Paobthong for her help in typing the first draft. Thanks also to Mr. Sakchai Sengsuy for his help during record the experimental results.

References

[1] G. Chen, "Conventionl and fuzzy PID controller: an overview," Int. J. Intell. Control System. pp. 235-246, 1996.
[2] M. Uragami, M. Mizumoto, K. Tanaka, "Fuzzy robot controks," J. Cybernet. , pp. 39-64, 1976.
[3] P. Sooraksa, "Fuzzy PI+D Control for Certain Single Flexible-Link Robot Arms with Damping," EECON 20,Bangkok, November,,pp. 308-312, 1997.
[4] D. Misir, H. A. Malki, and G. Chen, "Design and Analysis a Fuzzy Proportional-Derivative Controller," Fuzzy Set and System, pp.297-314, 1996.

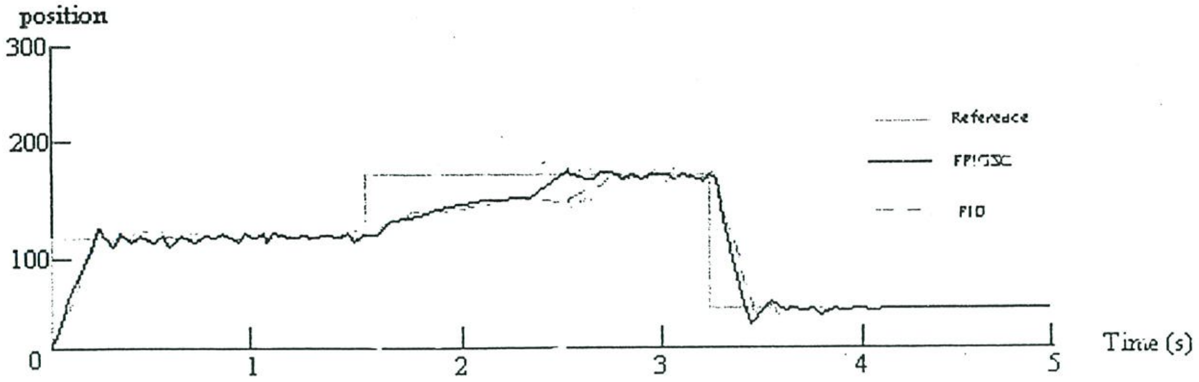


Fig. 9. Tracking performance comparison.

[5] H. A. Malki,D. Feigenspan, D. Misir, G. Chen, "Fuzzy PID control of a flexible joint robot arm with uncertainties form time-varying load," IEEE Trans. Control System Technol. . pp. 371-378, 1997.

[6]W. A. Wolovich, "Automatic Control Systems," Saunders College Pub., Orlando, FL,1994.

[7]H.A. Malki, H. Li, and G. Chen, "New design and stability analysis of fuzzy proportional-derivative control systems," *IEEE Trans*.on Fuzzy Systems, Vol.2, pp. 245-254, 1994.

[8] M. A. Mazadi, J. G. Mazadi, "The 80x86 IBM PC & Compatible Computer Volume II: Design and Interfacing of the IBM PC , PS and Compatible", Prentice-Hall. 1995.

ประวัติผู้เขียน

นาย ธนา ภัทรเดช เกิดเมื่อวันที่ 19 เมษายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับ ปวช.สาขาอิเล็กทรอนิกส์ จากวิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี ระดับ ปวส.สาขาเทคนิคคอมพิวเตอร์ จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ และในปี 2542 ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในช่วงปี 2543-2544 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ 1 บทความ และการประชุมวิชาการนานาชาติ 5 บทความ ในปี 2545 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศซึ่งจัดเป็นเรื่องยาว 1 เรื่อง คือ "Design and Implementation of Fuzzy P^2ID Controller for Handlebar Control of a Bicycle Robot" ในวารสาร Integrated Computer-Aided Engineering (ICAE journal). และในช่วงเดือนมีนาคม-สิงหาคม พ.ศ. 2545 ได้เดินทางไปทำวิจัยที่แผนกวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ City University of Hong Kong ณ เขตปกครองพิเศษฮองกงประเทศจีน รับผิดชอบในการสร้างหุ่นยนต์ MARCH II.