การสร้างและการประยุกต์ระบบควบคุมจีโนฟัซซีพีสแควร์ไอดี

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF GENO-FUZZY P^2ID CONTROL SYSTEMS

ธีรนันท์ ตั้งเจริญสุข
TERANUN TANGCHAROENSUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งทางราง
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างและการประยุกต์ระบบควบคุมจีโนฟัซซีพีสแควร์ไอดี

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF GENO-FUZZY P^2ID CONTROL SYSTEMS

ธีรนันท์ ตั้งเจริญสุข

TERANUN TANGCHAROENSUK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....74563
วัน,เดือน,ปี.....- 3 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

IMPLEMENTATION AND APPLICATION OF GENO-FUZZY P^2ID CONTROL SYSTEMS

TERANUN TANGCHAROENSUK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INFORMARION ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MOMGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างและการประยุกต์ระบบควบคุมจีโนฟัซซีพีสแควร์ไอดี
นักศึกษา	นายธีรนันท์ ตั้งเจริญสุข
รหัสนักศึกษา	46061310
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปิติเขต สู้รักษา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างและการประยุกต์ตัวควบคุมแบบ Fuzzy P^2ID Controller ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุ์ศาสตร์ (Genetic Algorithms) เรียกระบบนี้ว่า Geno-fuzzy P^2ID Control Systems และประยุกต์ใช้งานจริงกับหุ่นยนต์แบบข้อต่ออ่อนตัว (Flexible joint robot arm) อีกทั้งยังทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมดังกล่าวโดยการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน (Chaos) เข้ามาในระบบ ซึ่งจากการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์และจากการทดลองนั้นพบว่าการควบคุมหุ่นยนต์แบบข้อต่ออ่อนตัวโดยการใช้ตัวควบคุมแบบ Fuzzy P^2ID Controller ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์นั้น ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วและแม่นยำกว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมโดยผู้ใช้และยังสามารถขจัดสัญญาณรบกวนอลวนได้เป็นอย่างดี

Thesis Title	Implementation and Application of Geno-fuzzy P^2ID Control Systems
Student	Mr. Teranun Tangcharoensuk
Student ID.	46061310
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pitikhate Sooraksa

ABSTRACT

This thesis proposes implementation and application of a geno-fuzzy PI^2D controller, which is a fuzzy PI^2D controller tuning automatically by using genetic algorithm. The controlled system is then applied for controlling a flexible joint robot arm in the presence of chaotic disturbance. According to computer simulation and experimental results, the implementation is successfully valid. The finding indicates that the geno-fuzzy controller outperforms the manual tuning. In addition, the controlled system is effectively able to cope with the chaotic disturbance.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและให้คำปรึกษาเกี่ยวกับแนวคิดหลักการ ในการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมจริงให้มีความถูกต้อง ข้อคิดเห็น คำเสนอแนะอันมีค่า และให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์จาก รศ.ดร. ปีติเขต สู้รักษา ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดระยะเวลาของการเรียนจนกระทั่งข้าพเจ้ามีโอกาสประสบความสำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจในการเรียน และการทำวิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ นักศึกษาปริญญาโทที่ให้คำแนะนำเป็นอย่างดีตลอดมา ขอบคุณพี่ ๆ น้องๆ บริษัท DTAC ฝ่าย Core network แผนก Implementation and Improvement ที่ให้กำลังใจจนสามารถทำงานวิจัยได้เป็นผลสำเร็จในที่สุดซึ่งคุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ธีรนันท์ ตั้งเจริญสุข

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....IX

สารบัญรูป.....X

บทที่1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....2

1.3 สมมุติฐานเบื้องต้น.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....2

1.6 ขั้นตอนของงานวิจัย.....2

บทที่2 การทดลองเบื้องต้น.....4

2.1ตัวควบคุมแบบพีซีพีดี.....4

2.1.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีพีดี.....4

2.1.2 การทำพีซีฟีเคชั่น.....6

2.1.3 การกำหนดกฎของพีซีพีดี.....7

2.1.4 การทำดีพีซีฟีเคชันของพีซีพีดี.....9

2.2 ตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ.....10

2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีพีไอ.....10

2.2.2 การทำพีซีฟีเคชั่น.....12

2.2.3 การกำหนดกฎของพีซีพีไอ.....13

2.2.4 การทำดีพีซีฟีเคชันของพีซีพีไอ.....15

2.3 ตัวควบคุมแบบพีซีพีแสควร์ไอดี.....16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่3 กระบวนการทางพันธุ์ศาสตร์.....19
3.1 การแทนที่ประชากร.....20
3.2 ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันฟิสเนส.....21
3.3 การคัดเลือก.....22
3.3.1การคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่ม.....23
3.4 การรวมตัวของยีน.....23
3.4.1การรวมตัวของยีนโดยใช้ค่าจริง.....23
3.5 การกลายพันธ์.....24
3.6 การแทนที่.....24

บทที่4 ผลการจำลองและการทดลอง.....26
4.1 แบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว.....26
4.1.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว.....26
4.1.2 สมการปริภูมิสถานะ(State-Space).....27
4.2 การจำลองการควบคุมแขนกลข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์.....28
4.2.1 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา..... 28
4.2.2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญกับการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา.....32
4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์.....37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....47
4.4 การทำงานของระบบ.....47
4.5 การทดลองระบบจริง.....48
4.5.1 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา....49
4.5.2 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา.....54
4.5.3 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70 , 80, 90 องศา.....59
4.5.4 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา.....64
4.5.5 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา.....70
4.5.6 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ และความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา.....75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.7 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา.....77

4.5.8 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา.....79

4.5.9 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา.....81

4.5.10 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศาตามลำดับ.....83

บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....86

5.1 สรุปผลการทดลอง.....86

5.2 ข้อแนะนำในการวิจัย.....86

5.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย.....87

5.4 แนวทางพัฒนาในอนาคต.....87

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....88

ภาคผนวก ก การควบคุมความเร็วมอเตอร์.....91

ภาคผนวก ข ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....95

ประวัติผู้เขียน.....100

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 กฎของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี....8

2.2 กฎของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ....14

4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ไม่ได้ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญ....28

4.2 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญโดยจำลองด้วยคอมพิวเตอร์....30

4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญ....33

4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์....33

4.5 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยจำลองด้วยคอมพิวเตอร์....35

4.6 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ซึ่งทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยจำลองโดยคอมพิวเตอร์....40

4.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวที่ขจัดสัญญาณรบกวนอลวนในรูป logistic map แล้ว....43

4.8 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยจำลองโดยคอมพิวเตอร์....46

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ระบบควบคุมอนาล็อกพีดีแบบดั้งเดิม....4

2.2 ระบบควบคุมดิจิตอลพีดีแบบดั้งเดิม....6

2.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี....6

2.4.ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีดี....7

2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีดี....7

2.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีดี....8

2.7 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของฟัซซีพีดี....9

2.8 ระบบควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดังเดิม....10

2.9 ระบบควบคุมดิจิตอลพีไอแบบดังเดิม....12

2.10 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ....12

2.11ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีไอ....13

2.12 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีไอ....13

2.13 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีไอ....14

2.14 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของฟัซซีพีไอ....15

2.15 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี....17

2.16 วิถีเอาท์พุตเทียบกับเวลา....18

2.17 วิถีค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส....18

3.1 โครงสร้างกระบวนการทางพันธุ์ศาสตร์....20

3.2 วิธีการคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่ม....23

3.3 โฟลว์ชาร์ตโปรแกรมทางพันธุศาสตร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีแสควร์ไอดี....25

4.1 แบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะภาระเปลี่ยนตามเวลา....26

4.2 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ....29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ....29

4.4 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ....30

4.5 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศาของรูปที่ 4.2....31

4.6 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศาของรูปที่ 4.3....31

4.7 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศาของรูปที่ 4.4....32

4.8 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์....34

4.9 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์....34

4.10 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์....35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.8.....36
4.12 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.9.....36
4.13 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.10.....37
4.14 สัญญาณอลวนในรูป logistic map.....38
4.15 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา.....39
4.16 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา.....39
4.17 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา.....40
4.18 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.15.....41
4.19 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.16.....41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.20 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.17.....42

4.21 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา.....43

4.22 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา.....44

4.23 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา.....44

4.24 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมาย ที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.21.....45

4.25 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.22.....45

4.26 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.23.....46

4.27 บล็อกการทำงานของระบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว.....47

4.28 แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวที่ใช้ทดลองจริง.....48

4.29 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ.....49

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.30 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ.....50

4.31 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล แบบ ข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ.....50

4.32 ผลสัญญาณควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.29.....51

4.33 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.29.....51

4.34 ผลสัญญาณควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของ แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80องศา ของรูปที่ 4.30.....52

4.35 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.30.....52

4.36 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.31.....53

4.37 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุม ตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.31.....53

4.38 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ.....54

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.39 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ.....55

4.40 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ.....56

4.41 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.38.....56

4.42 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.38.....56

4.43 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.39.....57

4.44 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.39.....57

4.45 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.40.....58

4.46 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.40.....58

4.47 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์.....59

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.48 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์.....60

4.49 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์.....60

4.50 ผลสัญญาณการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.47.....61

4.51 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.47.....61

4.52 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.48.....62

4.53 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.48.....62

4.54 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.49.....63

4.55 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.49.....63

4.56 สัญญาณรบกวนอลวน logistic map ในระบบจริง.....64

4.57 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา.....65

4.58 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา.....65

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.59 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา.....66
4.60 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อน
ตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.57.....67
4.61 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.57.....67
4.62 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.58.....68
4.63 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.58.....68
4.64 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.59.....69
4.65 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.59.....69
4.66 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา.....70
4.67 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา.....71
4.68 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา.....71
4.69 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่ง
มอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา
ของรูปที่ 4.66.....72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.70 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.66.....72
4.71 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่ง
มอเตอร์ของ แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา
ของรูปที่ 4.67.....73
4.72 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.67.....73
4.73 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่ง
มอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา
ของรูปที่ 4.68.....74
4.74 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อน
ตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.68.....74
4.75 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ.....75
4.76 ผลสัญญาณ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.75.....76
4.77 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนอง
การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
ค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.75.....76
4.78 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกล
แบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์
โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ.....77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.79 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.78 78

4.80 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.78 78

4.81 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ 79

4.82 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.81 80

4.83 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.81 81

4.84 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ 81

4.85 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.84 82

4.86 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.84 82

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.87 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์.....83

4.88 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.87.....84

4.89 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.87.....85

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ และเครื่องจักรกลอัตโนมัตินั้นมีประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาประเทศทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งจะพบมากโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้ง ในงานสำรวจสถานที่ที่อันตรายต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการใช้กำลังงาน ลดความเสี่ยงและประหยัดพลังงานของมนุษย์ จากประโยชน์ที่กล่าวมานั้นผู้วิจัยได้เลือกหุ่นยนต์ชนิดที่เป็นแขนกลมาทำการศึกษา ซึ่งแบบจำลองแขนกลที่นำมาศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว โดยที่ผู้วิจัยจะนำมาสร้างจริง โดยใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์มาควบคุมการทำงาน

จากการศึกษาค้นคว้าวิจัยในเรื่องของการควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวนั้นพบว่าในการควบคุมทำได้ไม่ราบเรียบเท่าที่ควร [1] เนื่องจากธรรมชาติในการเคลื่อนไหวของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะภาระเปลี่ยนตามเวลานั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น จากปัญหาดังกล่าวจึงได้นำตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ทำงานได้ดีกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น มาควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว โดยที่การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีให้เหมาะสมกับระบบนั้น ใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์ [2], [3] เข้ามาช่วยทำให้ลดความซับซ้อนลง ซึ่งตัวควบคุมฟัซซีพีแสควร์ไอดีนั้นมีพารามิเตอร์หลายตัว จากปัญหาที่เกิดขึ้นได้มีการหาวิธีที่จะมาช่วยในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมจึงได้มีการนำแนวความคิดของวิธีการทางพันธุ์ศาสตร์ เข้ามาประยุกต์ใช้ในการหาค่าเพื่อทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการสร้างจริงและการประยุกต์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ มาควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว (Flexible-joint robot arm) ซึ่งจากการตรวจเอกสารที่ผ่านมายังไม่มีผู้ใดทำมาก่อน อีกทั้งทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมดังกล่าวโดยมีการรบกวนโดยสัญญานอลวน [8] (Chaotic signals)

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ
2. เป็นการนำตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์มาประยุกต์ใช้กับงานจริง
3. เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมเมื่อมีการรบกวนโดยสัญญาณอลวน เพื่อประยุกต์ใช้กับระบบแบบอื่นต่อไป

1.2 สมมติฐานเบื้องต้น

1. แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวเคลื่อนที่ได้ตามเป้าหมาย โดยมีช่วงเวลาขึ้น(rise time) เข้าหาเป้าหมายได้รวดเร็ว
2. มีสภาวะเสถียรที่ดีเมื่อแขนกลอยู่ในตำแหน่งเป้าหมายและช่วงเวลาเข้าที่(setting time) ได้ดี
3. สามารถขจัดการรบกวนจากสัญญาณอลวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. ทฤษฎีของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี
2. เทคนิคและวิธีของการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีทางพันธุ์ศาสตร์

1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำโปรแกรมที่ได้ออกแบบมาทดลองแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นเครื่องมือในการเขียนโปรแกรม
2. นำระบบที่ออกแบบมาทดลองจริง โดยการทดลองโดยควบคุมตำแหน่งของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว
3. สร้างสัญญาณรบกวนอลวนให้กับระบบและทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของระบบโดยใช้ตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้

1.6 ขั้นตอนของงานวิจัย

1. ค้นคว้า รวบรวม ศึกษาเอกสาร และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและทดสอบโปรแกรมทางพันธุศาสตร์
3. ออกแบบโปรแกรมจำลองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี
4. ออกแบบโปรแกรมสัญญาณรบกวนอลวน

5. ทำการจำลองผลโปรแกรมในข้อ 2, 3 และ 4 ด้วยโปรแกรม MATLAB
6. ทำการสร้างแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็น
7. ทำการทดลองจากระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้และทดลองขจัดสัญญาณรบกวนอลวนที่ให้กับระบบ
8. สรุปผล วิจารณ์ผลการทดลอง และเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

บทที่ 2
ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี (Fuzzy P^2ID) [4] และเทคนิคการออกแบบ เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีเป็นการประสานการทำงานกันระหว่างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ(Fuzzy PI) และตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี(Fuzzy PD) โดยที่ตัวควบคุมทั้งสองแบบจะทำงานขนานกัน ซึ่งจะมีสวิทช์ในการเลือกว่าจะให้ตัวควบคุมใดทำงาน เมื่อระบบเริ่มทำงานตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีจะเริ่มทำงานก่อนเนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีให้เวลาในการไต่ขึ้น(Rise Time)ที่เร็วกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ [5] จากนั้นเมื่อถึงจุดสลับการทำงานที่ได้ออกแบบไว้ จะเปลี่ยนให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอทำงานต่อเนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอให้ผลที่สถานะอยู่ตัว (Steady State) ดีกว่า เมื่อกระบวนการได้มาถึงจุดที่กำหนดไว้ในย่านสภาวะเสถียรตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอจะหยุดการทำงานและหากเอาท์พุทของกระบวนการออกไปจากย่านสภาวะเสถียร คือต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นของค่าเป้าหมายตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีจะทำงานอีกครั้งหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จึงเรียกกระบวนการควบคุมนี้ว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี

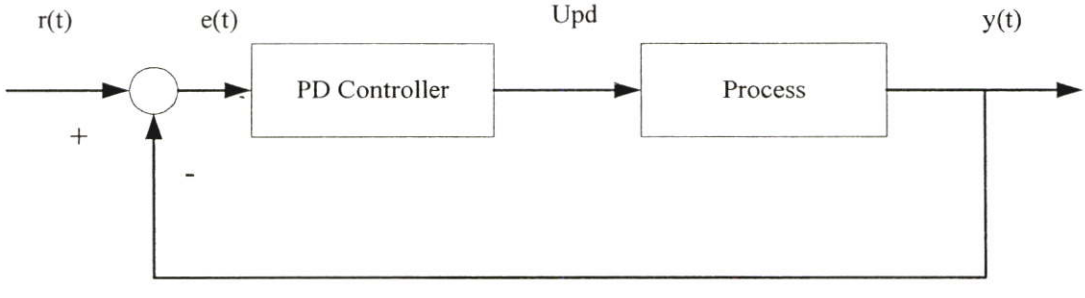
2.1 ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี

2.1.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี

โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมอนาล็อกพีดีแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 2.1 จะเขียนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (frequency domain) โดย

$$U_{pd}(s) = (K_p^c + sK_d^c)E(s) \tag{2.1}$$

โดยที่ K_p^c และ K_d^c เป็นค่าเกน และ $E(s)$ เป็นค่าสัญญาณผิดพลาด



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมอนาล็อกพีดีแบบดั้งเดิม

จากสมการที่ (2.1) ใช้การแปลงแบบไบลิเนียทรานฟอร์ม $s=\frac{2}{T}\left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right]$ เมื่อ T>0 จะได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete virsion) ดังนี้

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

กำหนดให้ $K_p=K_p^c$ และ $K_d=\frac{2}{T}K_d^c$ และทำการหาอินเวอร์สซีทรานฟอร์ม(Z-transform)ได้เป็น

$$u_{pd}(nT)+u_{pd}(nT-T)=K_p[e(nT)+e(nT-T)]+K_d[e(nT)-e(nT-T)] \qquad (2.2)$$

หารสมการที่ (2.2) ด้วย T และแทน nT ด้วย n จะได้เป็น

$$\Delta u_{pd}(n)=K_p e_p(n)+K_d e_v(n) \qquad (2.3)$$

โดยที่

$$\Delta u_{pd}(n)=\frac{u_{pd}(n)+u_{pd}(n-1)}{T} \qquad (2.4)$$

$$e_p(n)=\frac{e(n)-e(n-1)}{T} \qquad (2.5)$$

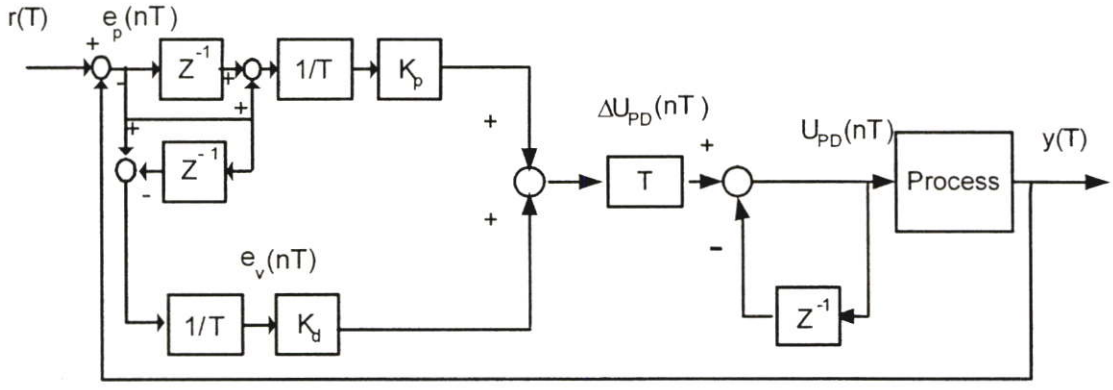
$$e_v(n)=\frac{e(n)+e(n-1)}{T} \qquad (2.6)$$

สมการที่ (2.4) เขียนใหม่ได้เป็น

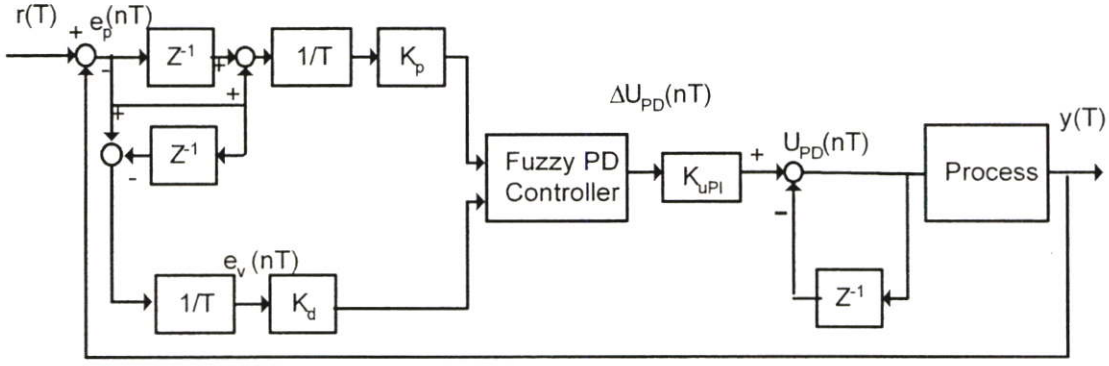
$$u_{pd}(n)=-u_{pd}(n-1)+T\Delta u_{pd}(n) \qquad (2.7)$$

แทน $T\Delta u_{pd}(n)$ ด้วยตัวแปรเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี $K_{upd}\Delta u_{pd}(n)$ ได้เป็น

$$u_{pd}(n)=-u_{pd}(n-1)+K_{upd}\Delta u_{pd}(n) \qquad (2.8)$$



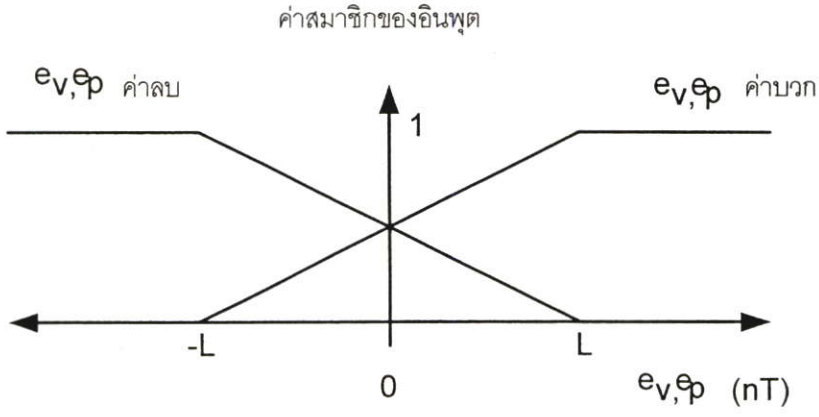
รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมดิจิตอลพีดีแบบดั้งเดิม [4]



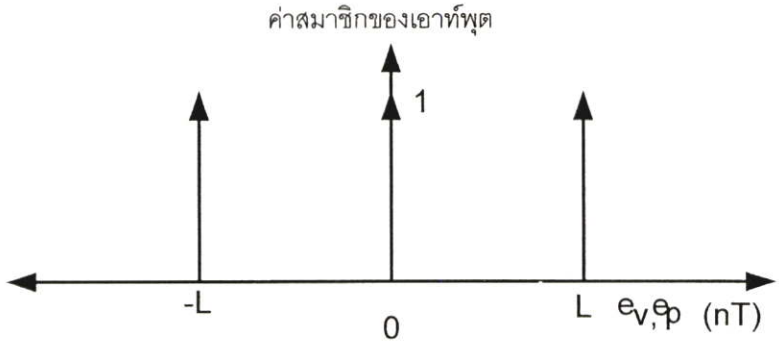
รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีดี [4]

2.1.2. การทำฟัซซิฟิเคชัน

ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีใช้สองอินพุตประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยสัญญาณผิดพลาด ($e_p(nT)$) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด ($e_v(nT)$) จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 เขียนฟังก์ชันสมาชิกทางอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกเอาท์พุตได้ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ



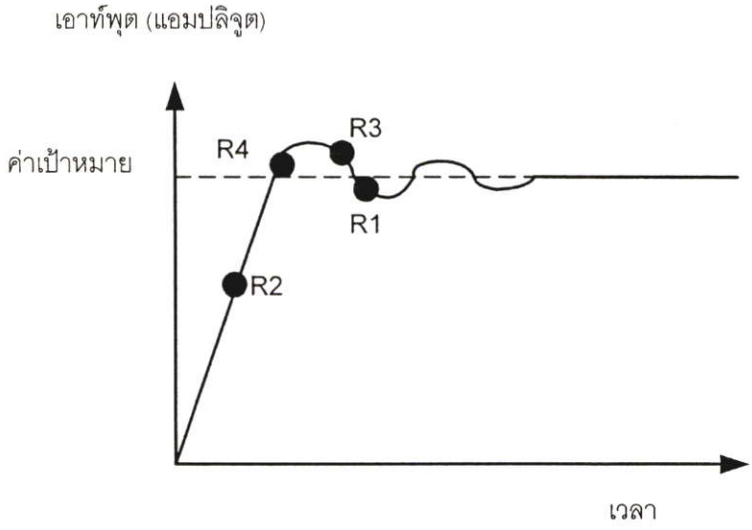
รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีดี [4]



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีดี [4]

2.1.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีดี

การกำหนดกฎของฟัซซีพีดีนั้น จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในรูปที่ 2.4 โดยจะกำหนดกฎเป็นไปตามตารางที่ 2.1 และจะเลือกเอาท์พุตจากฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตในรูปที่ 2.5 และกำหนดกฎจากรูปที่ 2.6 และจะได้กฎของฟัซซีพีดีดังนี้



รูปที่ 2.6 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีดี [4]

ตารางที่ 2.1 กฎของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี

กฎที่	e_p	e_v	เอาท์พุตที่ถูกเลือก
R1	p	p	o.z
R2	p	n	o.p
R3	n	p	o.n
R4	n	n	o.z

จากตารางที่ 2.1 $e_p = r - y$ และ $e_v = 0 - y$ โดย

e_p คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด

e_v คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

r คือ ค่าเป้าหมาย

y คือ เอาท์พุต (Δu_{upd})

"$e_p.p$" คือ ค่าตำแหน่งสัญญาณผิดพลาดที่เป็นบวก และ "$o.p$"หมายถึงเอาท์พุตที่เป็นบวก จากกฎในตารางที่ 2.1 จะใช้ "AND" หมายถึง ตรรกศาสตร์ซาเดแอน (Zadeh's logical "AND") กำหนดโดย $\mu(A \wedge B) = \min\{\mu_A, \mu_B\}$ จะแบ่งเป็นกฎเป็น 4 ข้อดังนี้

R1 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางบวก และ e_v = ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

R2 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางบวก และ e_v = ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น บวก

R3 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางลบ และ e_v = ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ลบ

R4 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางลบ และ e_v = ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

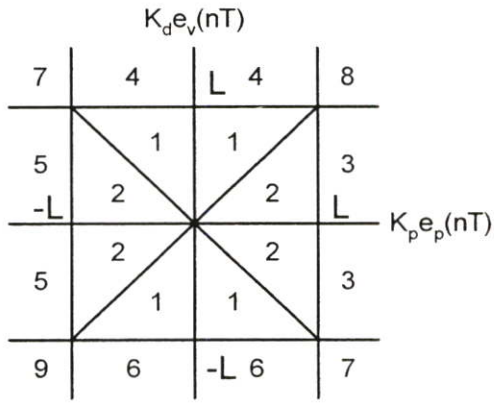
2.1.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีดี

ในขั้นตอนของการทำดีฟัซซิฟิเคชัน จะใช้วิธีศูนย์กลางมวล (center of mass) ดังสมการที่ 2.9

$$\Delta u(n) = \frac{\sum MV_{input}\, xMV_{output}}{\sum MV_{input}} \tag{2.9}$$

โดยที่ MV_{input} คือ สมาชิกทางอินพุต และ MV_{output} คือ สมาชิกทางเอาท์พุต

สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีมี 2 อินพุต คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด และ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด จะแบ่งได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ และมีพื้นที่ที่มีสมการเหมือนกัน 9 พื้นที่จึงสามารถแบ่งได้เป็น 9 พื้นที่ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของฟัซซีพีดี[4]

โดยค่า $o.p = L$, $o.n = -L$, $o.z = 0$ และสูตรสมการเส้นตรงจากรูปที่ 2.7 จะได้

$$e_p.p = \frac{K_p d(n) + L}{2L}, e_p.n = \frac{-K_p d(n) + L}{2L}$$
$$e_v.p = \frac{K_p d(n) + L}{2L}, e_v.n = \frac{-K_p d(n) + L}{2L}$$

และจะได้ 9 สมการสำหรับ 9 พื้นที่ดังนี้

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L\left[K_p e_p(nT) - K_d e_v(nT)\right]}{2\left[2L - K_p\left|e_p(nT)\right|\right]}$$ พื้นที่ 1

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{L\left[K_p e_p(nT) - K_d e_v(nT)\right]}{2\left[2L - K_d\left|e_v(nT)\right|\right]}$$ พื้นที่ 2

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}\left[-K_d e_v(nT) + L\right]$$ พื้นที่ 3

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_p e_p(nT) - L\right]$$ พื้นที่ 4

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}\left[-K_d e_v(nT) - L\right]$$ พื้นที่ 5

$$\Delta u_{pd}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_p e_p(nT) + L\right]$$ พื้นที่ 6

$$\Delta u_{pd}(nT) = 0$$ พื้นที่ 7

$$\Delta u_{pd}(nT) = -L$$ พื้นที่ 8

$$\Delta u_{pd}(nT) = L$$ พื้นที่ 9

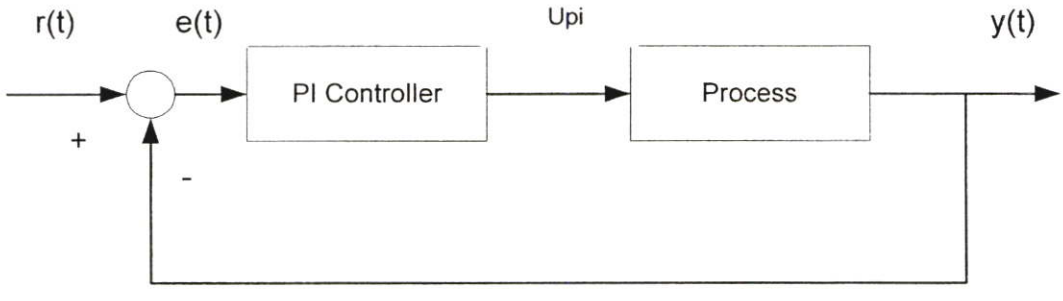
2.2 ตัวควบคุมแบบพีซซีพีไอ

2.2.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีซซีพีไอ

โครงสร้างพื้นฐานของตัวควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 2.8 จะเขียนให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ (frequency domain) โดย

$$U_{pi}(s) = (K_p^c + \frac{K_i^c}{s})E(s) \qquad (2.10)$$

โดยที่ K_p^c และ K_i^c เป็นค่าเกน และ $E(s)$ เป็นค่าสัญญาณผิดพลาด



รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมอนาล็อกพีไอแบบดั้งเดิม

จากสมการที่ (2.10) ใช้การแปลงแบบไบลิเนียทรานฟอร์ม $s=\frac{2}{T}\left[\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right]$ เมื่อ $T>0$ จะได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete virsion) ดังนี้

$$U_{pi}(z)=\left(K_p^c-\frac{K_i^cT}{2}+\frac{K_i^cT}{1-z^{-1}}\right)E(z)$$

กำหนดให้ $K_p=K_p^c-\frac{K_i^c}{2}$ และ $K_d=K_i^cT$ และทำการหาอินเวอร์สซีทรานฟอร์ม (Z-transform)ได้เป็น

$$u_{pi}(nT)-u_{pi}(nT-T)=K_p[e(nT)+e(nT-T)]+K_iTe(nT) \tag{2.11}$$

หารสมการที่(2.2) ด้วย T

$$u_{pi}(nT)=u_{pi}(nT-T)+T\Delta u_{pi}(nT) \tag{2.12}$$

โดยที่

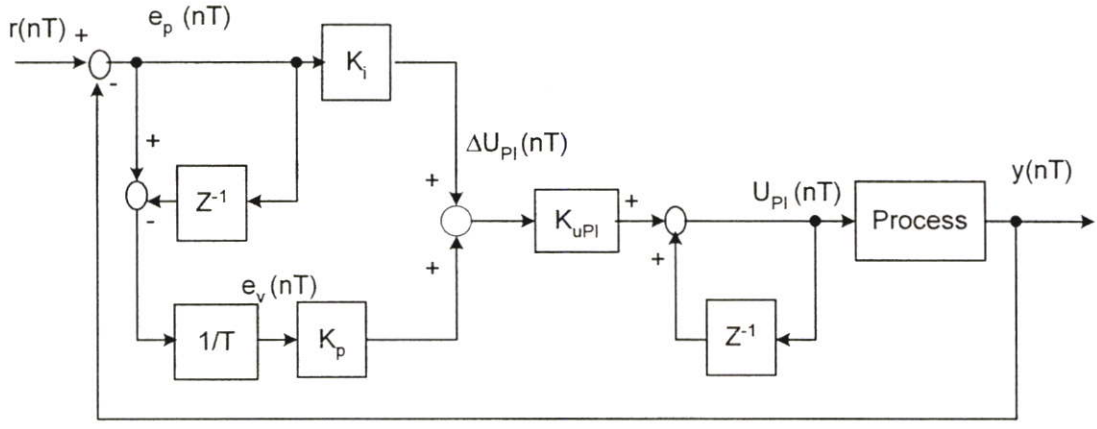
$$\Delta u_{pi}(nT)=K_pe_v(nT)+K_ie_p(nT) \tag{2.13}$$

$$e_v(nT)=\frac{e(n)-e(n-T)}{T} \tag{2.14}$$

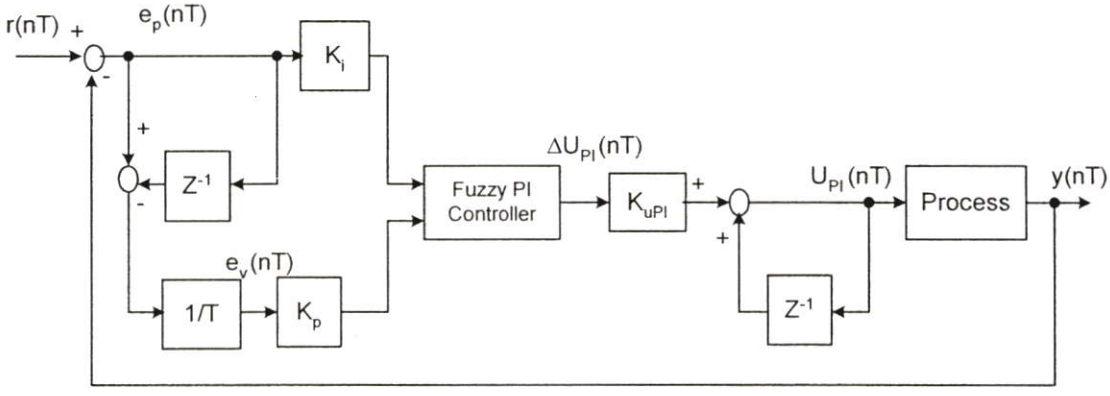
$$e_p(nT)=e(nT) \tag{2.15}$$

แทน $T\Delta u_{pi}(n)$ ด้วยตัวแปรเกนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี $K_{upi}\Delta u_{pi}$ ได้เป็น

$$u_{pi}(n)=u_{pi}(nT-T)+K_{upi}\Delta u_{pi}(nT) \tag{2.16}$$



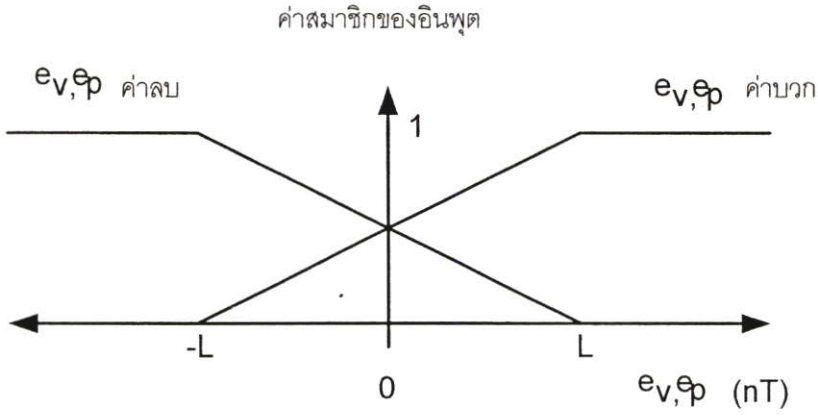
รูปที่ 2.9 ระบบควบคุมดิจิตอลพีไอแบบดั้งเดิม [4]



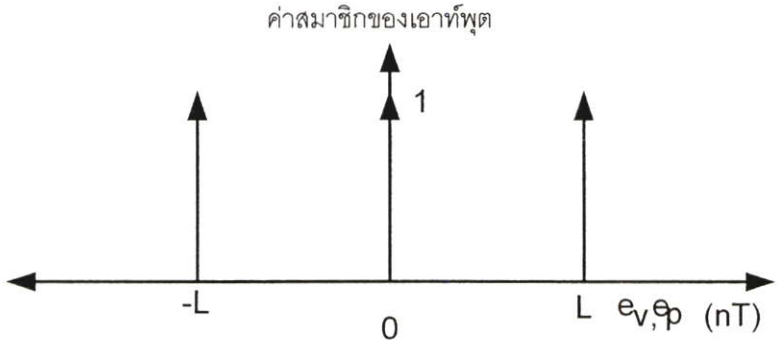
รูปที่ 2.10 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีไอ [4]

2.2.2. การทำฟัซซิฟิเคชัน

ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอใช้สองอินพุตประกอบด้วย ค่าสัญญาณผิดพลาด ($e_p(nT)$) และค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด ($e_v(nT)$) จากสมการที่ (2.15) และ (2.14) ตามลำดับ เขียนฟังก์ชันสมาชิกทางอินพุต และฟังก์ชันสมาชิกเอาท์พุตได้ดังรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ



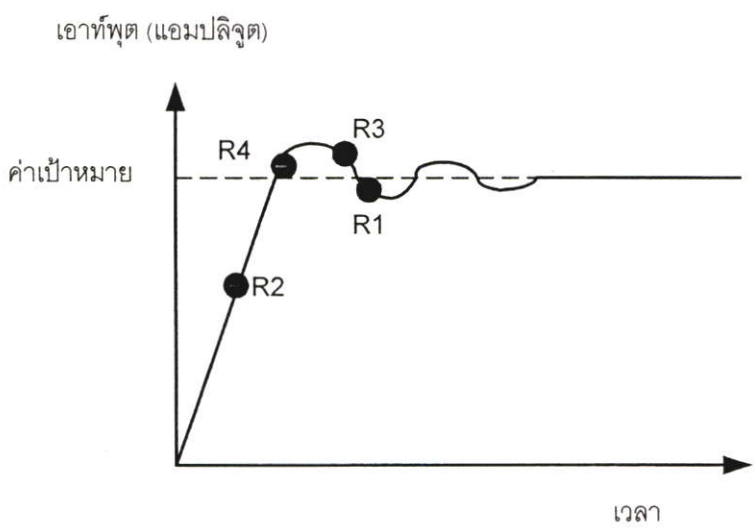
รูปที่ 2.11 ฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีไอ[4]



รูปที่ 2.12 ฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตของตัวควบคุมฟัซซีแบบพีไอ[4]

2.2.3 การกำหนดกฎของฟัซซีพีไอ

การกำหนดกฎของฟัซซีพีไอนั้น จะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันสมาชิกของอินพุตในรูปที่ 2.11 โดยจะกำหนดกฎเป็นไปตามตารางที่ 2.2 และจะเลือกเอาท์พุตจากฟังก์ชันสมาชิกของเอาท์พุตในรูปที่ 2.12 และกำหนดกฎจากรูปที่ 2.13 และจะได้กฎของฟัซซีพีไอดังนี้



รูปที่ 2.13 ผลตอบสนองที่ใช้กำหนดกฎของฟัซซีพีไอ[4]

ตารางที่ 2.2 กฎของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ

กฎที่	e_p	e_v	เอาท์พุตที่ถูกเลือก
R1	p	p	o.p
R2	p	n	o.z
R3	n	p	o.z
R4	n	n	o.n

จากตารางที่ 2.1 $e_p = r - y$ และ $e_v = 0 - y$ โดย

e_p คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด

e_v คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด

r คือ ค่าเป้าหมาย

y คือ เอาท์พุต (Δu_{upi})

"$e_p.p$" คือ ค่าตำแหน่งสัญญาณผิดพลาดที่เป็นบวก และ "$o.p$"หมายถึงเอาท์พุตที่เป็นบวก จากกฎในตารางที่ 2.1 จะใช้ "AND" หมายถึง ตรรกศาสตร์ซาเดแอน (Zadeh's logical "AND") กำหนดโดย $\mu(A \wedge B) = \min\{\mu_A, \mu_B\}$ จะแบ่งเป็นกฎเป็น 4 ข้อดังนี้

R1 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางบวก และ e_v = ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น บวก

R2 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางบวก และ e_v = ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

R3 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางลบ และ e_v = ค่าผิดพลาดทางบวก ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ศูนย์

R4 : ถ้า e_p = ค่าผิดพลาดทางลบ และ e_v = ค่าผิดพลาดทางลบ ดังนี้เอาท์พุตที่ได้เป็น ลบ

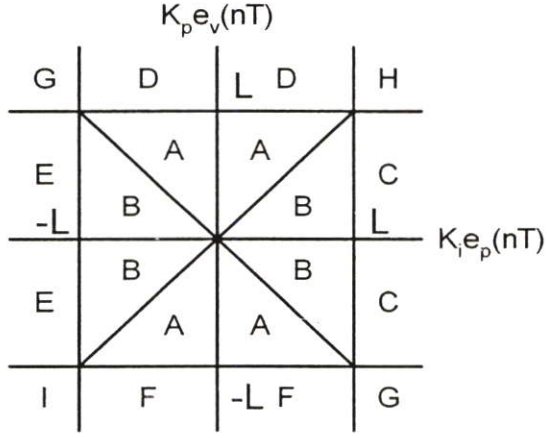
2.2.4 การทำดีฟัซซิฟิเคชันของฟัซซีพีไอ

ในขั้นตอนของการทำดีฟัซซิฟิเคชัน จะใช้วิธีจะศูนย์กลางมวล (center of mass) ดังสมการที่ 2.17

$$\Delta u(n) = \frac{\sum MV_{input}\, xMV_{output}}{\sum MV_{input}} \tag{2.17}$$

โดยที่ MV_{input} คือ สมาชิกทางอินพุต และ MV_{output} คือ สมาชิกทางเอาท์พุต

สำหรับตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอมี 2 อินพุต คือ ค่าสัญญาณผิดพลาด และ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณผิดพลาด จะแบ่งได้ทั้งหมด 20 พื้นที่ และมีพื้นที่ที่มีสมการเหมือนกัน 9 พื้นที่จึงสามารถแบ่งได้เป็น 9 พื้นที่ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงพื้นที่ทั้งหมดของฟัซซีพีไอ[4]

โดยค่า $o.p = L$, $o.n = -L$, $o.z = 0$ และสูตรสมการเส้นตรงจากรูปที่ 2.14 จะได้

$$e_p.p = \frac{K_i e_p(nT) + L}{2L}, e_p.n = \frac{-K_i e_p(n) + L}{2L}$$
$$e_v.p = \frac{K_p e_v(n) + L}{2L}, e_v.n = \frac{-K_p e_v(n) + L}{2L}$$

และจะได้ 9 สมการสำหรับ 9 พื้นที่ดังนี้

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L\left[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)\right]}{2\left[2L - K_i\left|e_p(nT)\right|\right]}$$ พื้นที่ A

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{L\left[K_i e_p(nT) + K_p e_v(nT)\right]}{2\left[2L - K_i\left|e_v(nT)\right|\right]}$$ พื้นที่ B

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_p e_v(nT) + L\right]$$ พื้นที่ C

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_i e_p(nT) + L\right]$$ พื้นที่ D

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_p e_v(nT) - L\right]$$ พื้นที่ E

$$\Delta u_{pi}(nT) = \frac{1}{2}\left[K_i e_p(nT) - L\right]$$ พื้นที่ F

$$\Delta u_{pi}(nT) = 0$$ พื้นที่ G

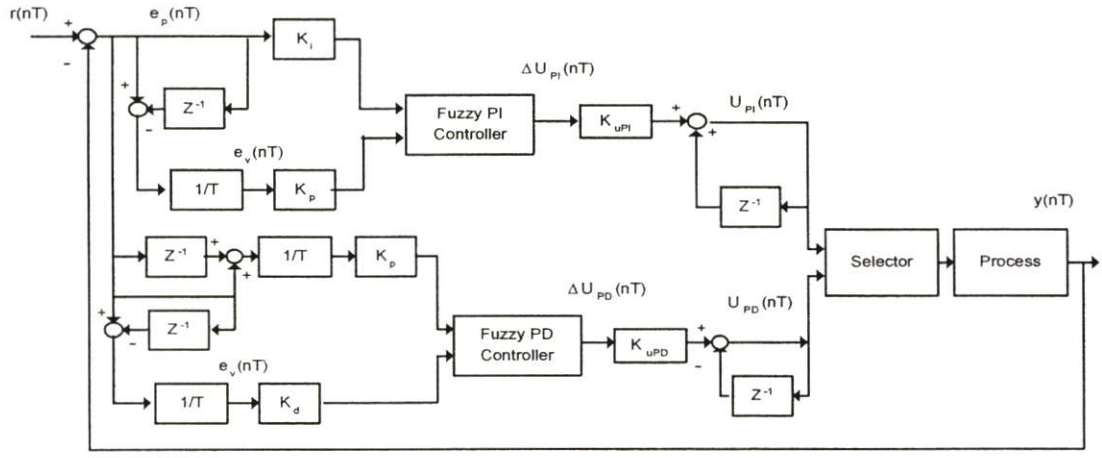
$$\Delta u_{pi}(nT) = L$$ พื้นที่ H

$$\Delta u_{pi}(nT) = -L$$ พื้นที่ I

2.3 ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี

ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอและตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี ซึ่งจะมีตัวเลือก จะทำหน้าที่ในเลือกการทำงาน โดยเริ่มแรกตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี จะทำงานเริ่มต้นกระบวนการเนื่องจะตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีให้การตอบสนองได้เร็วกว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ แล้วจะสลับการทำงานเป็นตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอให้ผลที่สถานะอยู่ตัว (steady state) ดีกว่า เมื่อกระบวนการได้มาถึงจุดที่กำหนดไว้ในย่านสภาวะเสถียร ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอจะหยุดการทำงาน หากเอาท์พุตของกระบวนการออกไปจากย่านสภาวะเสถียร คือต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นของค่าเป้าหมาย โดยตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีจะทำงานอีกครั้งหนึ่ง ด้วยเหตุนี้จะเรียกกระบวนการควบคุมนี้ว่า ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีแสดงในรูปที่ 2.15 [4]

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี[4]

สำหรับการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดี ตัวเลือก(Selector) ที่แสดงในรูปที่ 2.15 เป็นเซตของกฎทางตรรกะสำหรับการทำงานของตัวควบคุม และจะมีการประกันความมีเสถียรภาพได้จาก

1. ทฤษฎีเกนน้อย (small gain theorem) เสถียรภาพของตัวควบคุมฟัซซีพีไอ และฟัซซีพีดี รับประกันโดย[8]และ[9] ตามลำดับ

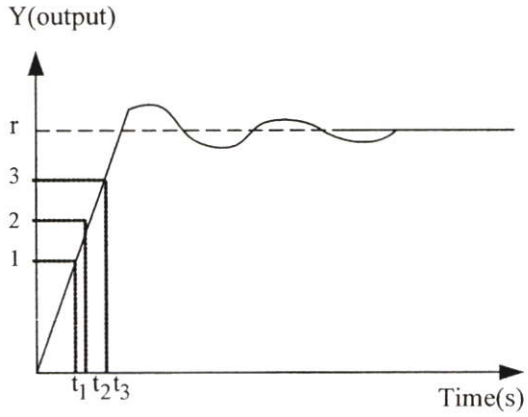
2. ความมีเสถียรภาพของระบบควบคุมทั้งหมดขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของตัวเลือก โดยจะเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบควบคุมการสลับแบบดิจิตอล ได้ดังสมการที่ 2.18

$$x(nT+T) = Gx(nT) + H\sum_{i=1}^{2} u_i(nT)\delta_i(nT) \qquad 2.18$$

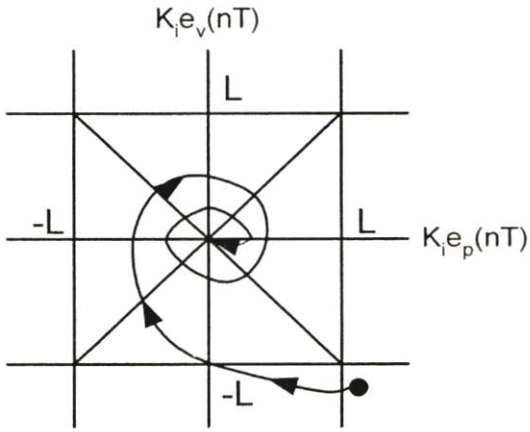
ซึ่ง $x(nT)$ เป็นเวกเตอร์สถานะ (state vector) ที่เวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete) G เป็นเมตริกซ์ระบบ และ H เป็นเมตริกซ์อินพุตสำหรับระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดย u เป็นค่าอินพุตควบคุม ซึ่ง $i=1$ แทนการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดี และ $i=2$ แทนการทำงานของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอ $\delta_i(nT)$ เป็นตัวแปรทางตรรกะซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อระบบทำงาน และเท่ากับ 0 หากหยุดทำงาน จะพบว่าทุกคาบเวลา nT มีเพียงดัชนีเดียวที่ถูกใช้งาน โดยอาจจะใช้สมการที่ 2... มาวิเคราะห์เสถียรภาพแบบ BIBO ใน[10]

การออกแบบโดยใช้กราฟนำมาใช้ในการออกแบบกฎสลับการควบคุม โดยเริ่มจากการพิจารณาวิถีโคจรของเอาท์พุตกับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2. โดยที่ r เป็นจุดค่าเป้าหมาย a, b, และ c แทนเอาท์พุตที่เวลา t_a, t_b และ t_c ตามลำดับ และเมื่อดูที่วิถีโคจรของค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส (error-phase plane) ที่แสดงในรูป 2.16 จากรูปจะเห็นว่าจำนวนของวงกลมรอบจุดศูนย์กลางของ

แผนภาพ ได้สอดคล้องกับระยะเวลาของสภาวะชั่วครู่คลื่นไซน์ (transient sine wave) เมื่อวิถีเอาท์พุตของระบบในรูป 2.16 มาถึงสภาวะเสถียรวิถีค่าความผิดพลาดจะตกอยู่ในจุดศูนย์กลางของระนาบเฟส แสดงในรูป 2.17



รูปที่ 2.16 วิถีเอาท์พุตเทียบกับเวลา [4]



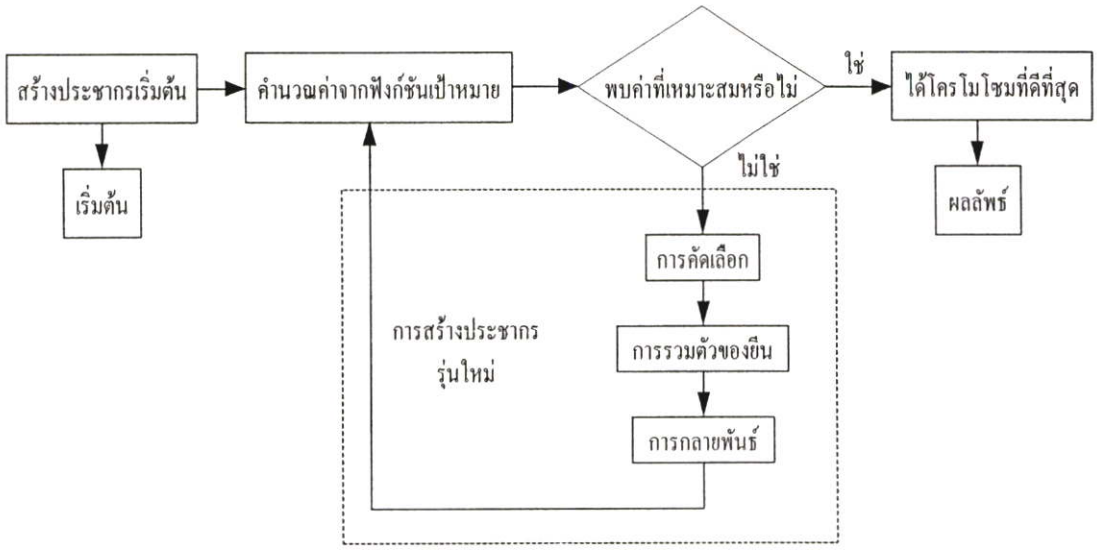
รูปที่ 2.17 วิถีค่าความผิดพลาดบนระนาบเฟส [4]

จากรูปที่ 2.16 จะเห็นว่าสามารถเลือกเวลาการสลับได้ตามต้องการ โดยอาจจะใช้เวลาสลับที่ 90/10 โดยให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีทำงานไปจนถึง 90% ของค่าเป้าหมาย และให้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีไอทำงานใน 10% ที่เหลือ เพราะช่วงเวลาที่ 10% ถึง 90% ของค่าเป้าหมายเป็นช่วงของเวลาไต่ขึ้น (rise time) เนื่องจากตัวควบคุมแบบฟัซซีพีดีให้การตอบสนองที่เร็วจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในส่วนนี้ หลังจาก 90% ต้องการวิถีที่เข้าเป้าหมายดีที่สุด ดังนั้นด้วยคุณสมบัติของตัวควบคุมแบบพีไอจึงทำงานต่อในช่วง 10% ที่เหลือ แต่อาจจะเลื่อนจุดได้ตามความเหมาะสม

บทที่ 3
กระบวนการทางพันธุศาสตร์

กระบวนการทางพันธุศาสตร์ (Genetic Algorithms) ได้เลียนแบบการวิวัฒนาการทางธรรมชาติ [5,6,7] ขั้นตอนการวิวัฒนาการได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความสำคัญนั้นอยู่ที่ ประชากรลูกหลานที่อยู่รอด จะเป็นประชากรที่ดีและเหมาะสมกับปัญหานั้น ๆ ประชากรแต่ละรุ่นจะถูกสร้างโดย กระบวนการคัดเลือกประชากร (population) แต่ละตัวที่มีระดับของความเหมาะสมจากขอบเขตของปัญหา และนำมาผสมกันโดยใช้ตัวดำเนินการทางเจเนติก (Genetic Operation) โดยคำตอบที่ดีที่สุดจะพบจากประชากรตัวสุดท้ายที่เหลือรอดอยู่

กระบวนการทางพันธุ์ศาสตร์จะประกอบด้วย การคัดเลือก (selection) การผสม (recombination) และการกลายพันธ์ (mutation) ดังในรูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของกระบวนการทางพันธุศาสตร์แบบพื้นฐาน ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการสร้างประชากรเริ่มต้นโดยการสุ่ม ขนาดของประชากรขึ้นอยู่กับปัญหาที่แก้ไข ต่อมาจะเป็นการคำนวณประชากรแต่ละตัวด้วยฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective function) หรือฟังก์ชั่นเป้าหมาย จะไม่มีการกำหนดตายตัวขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่จะแก้ไข เมื่อผ่านขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบ ถ้าไม่พบคำตอบที่เหมาะสมจะเริ่มสร้างประชากรรุ่นลูกหลาน โดยจะนำ ประชากรรุ่นพ่อแม่ (parent) มาคัดเลือกซึ่งจะดูจากค่าของฟิสเนส (fitness) ประชากรพ่อแม่ที่ถูกเลือกจะถูกนำมาผสมกัน หลังจากนั้นจะได้ประชากรรุ่นลูกหลาน (offspring) ประชากรรุ่นลูกหลานทั้งหมดจะถูกทำให้กลายพันธุ์ (mutated) ด้วยค่าความน่าจะเป็น ต่อมาจะเป็นการคำนวณค่าของประกรลูกหลานแต่ละตัว แล้วจึงนำประชาการรุ่นลูกหลานที่ดีเข้าไปแทนในประชากรรุ่นพ่อแม่ เพื่อนำเป็นประชากรในเจเนอเรชั่นใหม่ต่อไป และจะวนรอบเช่นนี้ไปจนกว่าจะพบคำตอบที่เหมาะสม



รูปที่ 3.1 โครงสร้างกระบวนการทางพันธุศาสตร์

3.1การแทนที่ประชากร (Population Representation)

ก่อนที่จะมีการดำเนินการทางเจเนติก จะต้องมีการเข้ารหัสของพารามิเตอร์ในประชากรเสียก่อน โดยประชากรที่สร้างนั้นจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 ตัว (individual) แต่บางครั้งวิธีการของไมโครเจเนติก จะใช้ประชากรที่น้อยคือประมาณ 10 ตัวและได้ใช้ความสามารถของ การผลิต (reproduction) และการแทนที่ (replacement) เพื่อให้สามารถใช้กับเวลาจริง (real-time)ได้

การแทนที่ประชากรหรือโครโมโซมของเจเนติก อัลกอริทึม จะเป็นการเข้ารหัสของแต่ละตัวแปรหรือยีนส์ ด้วยรหัสแบบไบนารี่ (Binary code) และจะมีการเชื่อมตัวแปรแต่ละตัวเข้าเป็นชุดเดียวกันเรียกว่า โครโมโซม ต่อมาได้มีงานวิจัยได้ทำการทดลองพบว่า การเข้ารหัสแบบเกรย์ (Gray code) ให้ผลของการทำงานได้ดีกว่าการเข้ารหัสแบบไบนารี่

ในขณะที่มีการใช้การเข้ารหัสแบบไบนารี่กันอย่างแพร่หลายนั้น ได้มีอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ คือการเข้ารหัสแบบค่าจริง (Real - value) ซึ่งการแทนด้วยค่าจริงนี้ได้ถูกนำเสนอโดย Wright[13] โดยข้อดีของการเข้ารหัสด้วยค่าจริงคือ ไม่จำเป็นต้องทำการแปลงจากโครโมโซมเป็นฟีโนไทป์ (phenotype) ก่อนการคำนวณค่าจากฟังก์ชั่นเป้าหมาย ต้องการหน่วยความจำน้อยและสามารถนำไปใช้กับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง และยังมีอิสระในการใช้ตัวดำเนินการทางเจเนติก (Genetic Operation) ที่แตกต่างกัน

จากวิธีที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ การเลือกใช้วิธีการในนั้นขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะใช้ เพราะการเลือกวิธีที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเจเนติก อัลกอริทึม

3.2ฟังก์ชันเป้าหมายและฟังก์ชันฟิสเนส (The Objective and Fitness Function)

ฟังก์ชันเป้าหมายนั้นจะถูกกำหนดโดยผู้ใช้หรือตามปัญหาที่จะแก้ ฟังก์ชันเป้าหมายเป็นตัววัดประสิทธิภาพของประชากรแต่ละตัว ในการหาค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุดของปัญหา บางครั้งค่าของฟังก์ชันเป้าหมายอาจมีค่าเป็นลบ ในเจติกฟังก์ชันฟิสเนสเป็นตัววัดสถานะของประชากร จะต้องมีค่าบวกเสมอ ดังนั้นถ้าฟังชันเป้าหมายมีค่าเป็นลบจำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นฟังก์ชันฟิสเนสจากสมการที่ (3.1)

$$F(x) = g(f(x)) \tag{3.1}$$

ซึ่ง $f(x)$ คือ ฟังก์ชันเป้าหมาย g คือ การเปลี่ยนแปลงค่าของฟังก์ชันเป้าหมายเพื่อไม่ให้ค่าเป็นลบ และ $F(x)$ คือ ค่าของฟิสเนสที่ได้ ส่วนมากค่าของฟังก์ชันฟิสเนสจะสอดคล้องกับจำนวนของประชากรลูกหลานที่คาดหวังในการผลิตในเจนเนอร์เรชันถัดไป จากสมการที่ (3.2) $F(x_i)$ คือ ค่าของฟิสเนส $f(x_i)$ คือ ค่าประสิทธิภาพที่คำนวณได้จากประชากรแต่ละตัว

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} f(x_i)} \tag{3.2}$$

ซึ่ง N_{ind} คือ จำนวนของประชากรทั้งหมด และ x_i คือ ค่าของประชากร

ในขณะที่ความเหมาะสมของประชากรแต่ละตัวนั้น จะถูกรับประกันการถูกเลือกด้วยความน่าจะเป็น แต่อาจจะเกิดความผิดพลาดกันเกิดจาก ค่าฟังก์ชันเป้าหมายของประชากรที่มีค่าเป็นลบและอาจจะลู่เข้าก่อนกำหนด เนื่องจากการคลองพื้นที่ของประชากรที่มีค่าฟิสเนสที่สูง ทำให้ประชากรที่มีค่าฟิสเนสต่ำไม่มีโอกาสที่จะถูกเลือก จากปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จะแก้ได้ โดยการปรับค่าฟิสเนส ซึ่งการปรับค่าฟิสเนสมี 2 วิธี คือ การทำสเกลลิ่ง (scaling) และการทำแร้งค์กิ้ง (ranking)

การทำสเกลลิ่งจะเป็นการแปลงค่าฟิสเนสใหม่โดยใช้สมการเส้นตรงดังสมการที่(3.3)

$$F(x) = af(x) + b \tag{3.3}$$

โดยที่ $f(x)$ คือค่าของฟิสเนสเก่า $F(x)$ คือ ค่าของฟิสเนสใหม่ a คือ ค่าของสเกลลิ่ง เฟกเตอร์ ที่มีค่าเป็นบวก และ b เป็นค่าชดเชย (offset) ที่รับรองว่าค่าของฟิสเนสใหม่มีค่าเป็นบวก ส่วนการทำแร้งค์กิ้งนั้น เป็นการเรียงค่าจากฟังก์ชันเป้าหมาย ประชากรที่มีค่าฟิสเนสน้อยที่สุดจะอยู่ในลำดับที่ 1 และจะเรียงลำดับต่อไปจนถึงประชากรที่มีค่าฟิสเนสมากที่สุดจะอยู่ลำดับสุดท้ายจากสมการที่ (3.4)

$$Fitness(pos) = 2 - SP + 2(SP - 1)\frac{Pos - 1}{Nind - 1} \quad (3.4)$$

โดย SP คือค่าความลำเอียง (bias) หรือค่าของซีเล็คทีฟ เพเชอร์ (selective preture) Pos คือลำดับของประชากรตัวที่ i และ Nind คือจำนวนของประชากรทั้งหมด

3.3การคัดเลือก (Selection)

การคัดเลือกเป็นขั้นตอนที่จำลองการคัดเลือกทางธรรมชาติ โดยจะคัดเลือกประชากรพ่อแม่เพื่อเป็นประชากรต้นแบบในแมททิ่งพูล (mating pool) เพื่อใช้ในการสร้างประชากรลูกหลานต่อไป การคัดเลือกของเจเนติก อัลกอริทึมนั้น จะใช้ค่าความเหมาะสมเป็นตัวตัดสินว่า ประชากรมีโอกาสถูกเลือกเป็นประชากรพ่อแม่มากน้อยเพียงใด ประชากรที่มีค่าความเหมาะสมที่ดี จะถูกกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกแต่ละครั้งจะสูงตามไปด้วยจากสมการที่ (3.5)

$$\Pr ob_select = \frac{Fi}{\sum Fitness} \quad (3.5)$$

โดย Fi คือ ค่าของฟิสเนสของประชากรแต่ละตัว และ $\sum Fitness$ คือ ผลรวมของค่าฟิสเนสทั้งหมดที่เขามาคัดเลือกใน แมททิ่ง พูล (mating pool) ซึ่งมีวิธีการคัดเลือกหลายวิธีด้วยกัน ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับ ตัววัดประสิทธิภาพของวิธีการทั้งหมดคือ

Selective pressure คือ ค่าความน่าจะเป็นของประชากรที่ดีที่สุดที่ถูกเลือก โดยเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของประชากรที่ถูกเลือกทั้งหมด

ความลำเอียง (Bias) คือ ค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างระหว่างค่าจริงกับความน่าจะเป็นที่คาดหวังไว้สำหรับการคัดเลือกของสมาชิกแต่ละตัว

การกระจาย (spread) คือ ช่วงของค่าความเป็นไปได้ที่ประชากรตัวหนึ่งจะถูกเลือก

Loss of diversity คือ สัดส่วนของประชากรตัวหนึ่ง ซึ่งไม่ถูกเลือกในระหว่างขั้นตอนของการคัดเลือก

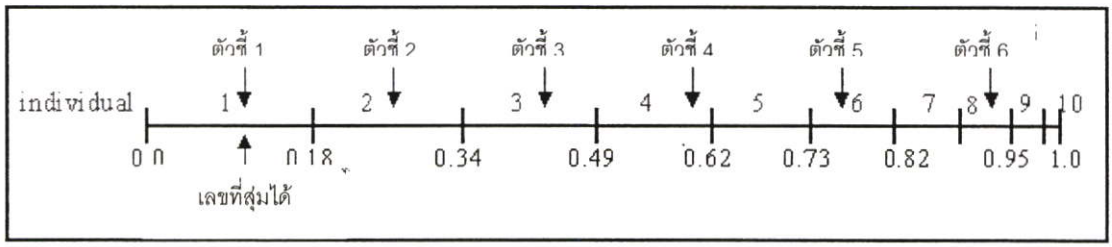
ความหนาแน่นของการคัดเลือก (selection intensity) คือ ค่าเฉลี่ยของค่าฟิสเนสของประชากรหลังจากใช้วิธีการคัดเลือกแบบการกระจายตัวของ Gaussian

ความแปรปรวนของการคัดเลือก (selection variance) คือ ความแปรปรวนของการกระจายตัวของค่าฟิสเนสของประชากร หลังจากใช้วิธีการคัดเลือกแบบการกระจายตัวของ Gaussian

3.3.1การคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่ม (Stochastic Universal Sampling)

วิธีการคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่มทำให้ได้ค่าความลำเอียงเท่ากับ 0 และจะได้ค่าของการกระจายน้อยที่สุด จะเพิ่มตัวชี้ (Pointer) ที่มีจำนวนเท่ากับจำนวนของอินดิวิดวลที่ต้องการเลือก คือ Npointer ซึ่งระยะห่างของตัวชี้จะเท่ากับ 1/ Npointer โดยตำแหน่งแรกของตัวชี้จะกำหนดจากการสุ่มในช่วง[0, 1/ Npointer] ตัวอย่างการเลือก 6 อินดิวิดวล ระยะห่างของตัวชี้จะมีค่าเท่ากับ 1/6 หรือ 0.167 จากรูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของการคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่ม

ตัวอย่าง การสุ่ม 1 ครั้งในช่วง [0, 0.167] ได้ค่าเท่ากับ 0.1



รูปที่ 3.2 วิธีการคัดเลือกแบบยูนิเวอร์ซอลโดยสุ่ม

หลังจากนั้นใน แมททิ่ง ปอปปูเรชัน จะประกอบด้วยอินดิวิดวลที่ 1 2 3 4 6 และ 8

3.4 การรวมตัวของยีน (Recombination)

การรวมตัวของยีนหรือการครอสโอเวอร์ (Cross over) เป็นการนำประชากรที่ได้จากการคัดเลือกที่อยู่ใน แมททิ่งพูล นำมาจับคู่แลกเปลี่ยนยีนของประชากรพ่อแม่ ตามการกำหนดอัตราความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (Probability of Crossover : Pc) เพื่อสร้างประชาการรุ่นใหม่หรือประชากรลูกหลาน โดยการกระทำนี้จะแบ่งแบ่ง 2 ประเภท คือ การรวมตัวของยีนโดยใช้ค่าจริง และการรวมตัวของยีนโดยใช้ค่าไบนารี่

3.4.1การรวมตัวของยีนโดยใช้ค่าจริง

3.4.1.1การรวมตัวของยีนแบบเส้น (Line Recombination)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การรวมตัวของยีนแบบเส้นซึ่งได้มีการทดสอบแล้ว [2,3] การรวมตัวของยีนแบบเส้นจะมีวิธีการที่คล้ายกับการรวมตัวของยีนแบบตัวกลางดังสูตรด้านล่าง

$$\text{ประชากรลูกหลาน} = \text{ประชากรพ่อแม่1} + \alpha\ (\text{ประชากรพ่อแม่2} - \text{ประชากรพ่อแม่1}) \qquad (3.6)$$

ซึ่ง α เป็นสเกลลิ่ง แฟกเตอร์(scaling factor) ที่ถูกเลือกโดยการสุ่มค่าที่อยู่ระหว่าง [-d,1+d] การรวมตัวของยีนแบบตัวกลางจะมีค่า d = 0 สำหรับระยะการขยายออก d>0 ค่าที่ดีที่สุดที่ถูกเลือกจะมีค่า d=0.25 ค่าของตัวแปรประชากรลูกหลานที่ได้ จะมีขอบเขตที่มากกว่าค่าของตัวแปรประชากรพ่อแม่เท่ากับค่าของ α ที่ถูกเลือก ซึ่งการรวมตัวของยีนแบบเส้นจะมีความแตกต่างที่จะใช้ค่า α ค่าเดียวกับค่าตัวแปรของประชากรทั้งหมดดังตัวอย่าง

ประชากรพ่อแม่ 1	12	25	5
ประชากรพ่อแม่ 2	123	4	34

ค่าของของ α ที่สุ่มได้เท่ากับ

ตัวอย่าง 1	0.5
ตัวอย่าง 2	0.1

ค่าของประชากรลูกหลานใหม่ที่คำนวณได้

ประชากรลูกหลาน 1	67.5	14.5	19.5
ประชากรลูกหลาน 2	23.1	22.9	7.9

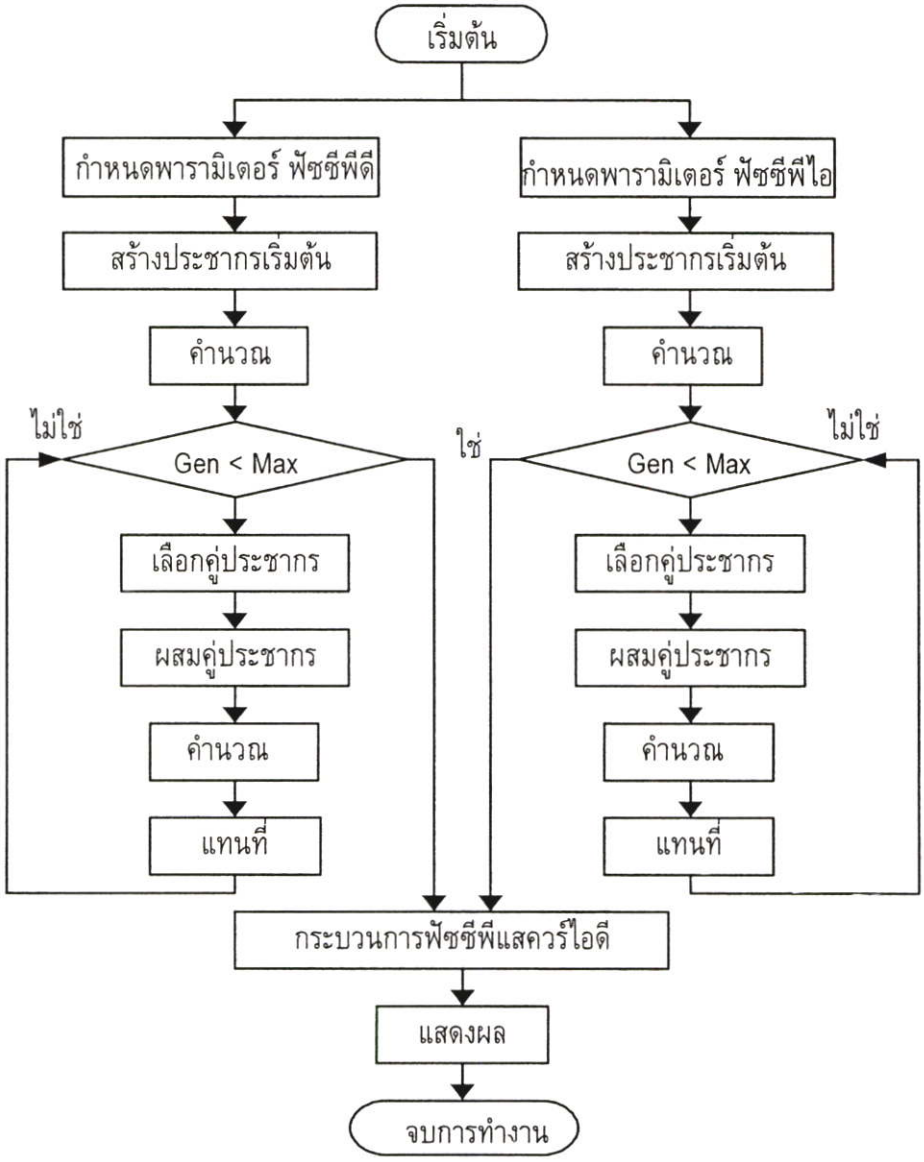
3.5การกลายพันธ์ (Mutation)

การกลายพันธ์เป็นการสร้างความหลากหลายให้กับประชากร หรือเป็นการผ่าเหล่าหลังจากการครอสโอเวอร์ โดยทั่วไปการมิวเตชั่นจะออกแบบไว้สำหรับประชากรที่เข้ารหัสแบบไบนารีเท่านั้น แต่ในปัจจุบันมีการมิวเตชันแบบสุ่มซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กับประชากรที่เข้ารหัสแบบจำนวนจริง

3.6การแทนที่ (Reinsertion)

หลังจากที่สร้างประชากรลูกหลานแล้ว จะมีการแทนที่ประชากรพ่อแม่ปัจจุบันด้วยประชากรลูกหลานทุกตัว เช่น ถ้าหากขนาดประชากรเท่ากับ N วิธีนี้จะสร้างประชากรลูกหลานเท่ากับ N ด้วย วิธีนี้อาจจะทำให้ประชากรที่ดีเสียหายในรุ่นถัดไป ดังนั้นจึงมีการสำเนาประชากรที่ดี

ที่สุด 2-5 ตัว ในรุ่นถัดไป วิธีสำเนาประชากรจะช่วยเพิ่มความเร็วในการหาคำตอบที่ดีที่สุดถ้าหากกำหนดจำนวนสำเนาประชากรได้อย่างเหมาะสม



รูปที่ 3.3 โฟลว์ชาร์ตโปรแกรมทางพันธุศาสตร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีแสควร์ไอดี

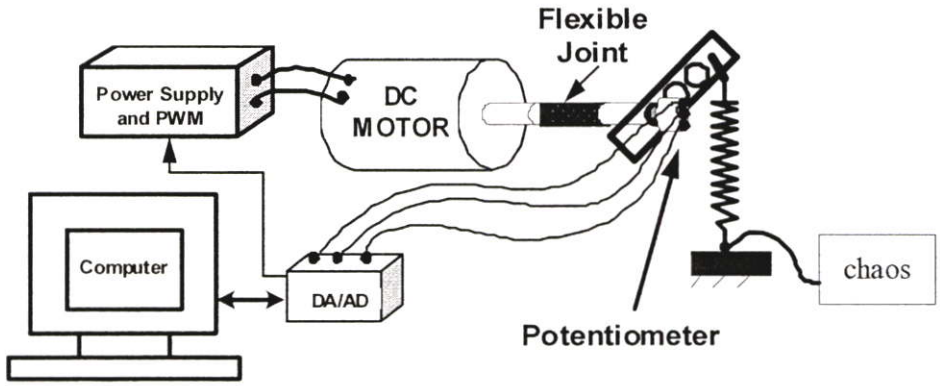
บทที่ 4

ผลการจำลองและการทดลอง

4.1 แบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว

ในการทดลองนี้ได้นำรูปแบบของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวที่มีโหลดเป็นสปริง มาทำการสร้างจริง โดยนำแบบจำลองนี้มาจาก [10] ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ในลักษณะที่เป็นแขนกลดังในรูปที่ 4.1 ซึ่งการทำงานของระบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวนี้เป็นแบบไม่เชิงเส้น

โดยที่ในงานวิจัยนี้ได้เพิ่มในส่วนของสัญญาณรบกวนอลวนในรูปแบบ logistic map ให้ระบบด้วยเพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี



รูปที่ 4.1 แบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะภาระเปลี่ยนตามเวลา

4.1.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว

ในงานวิจัยนี้ได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวมาจาก[10]ซึ่งได้เป็นดังสมการนี้

$$I_1\ddot{\theta}_1(t) + mlg.sin[\,\theta_1(t)] + \tilde{k}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] = 0 \qquad (4.1)$$

$$I_2\ddot{\theta}_2(t) - \tilde{k}[\theta_1(t) - \theta_2(t)] = u(t) \qquad (4.2)$$

โดยที่

I_1 = ค่าความเฉื่อยการหมุนของแขนกล (kgm^2)

I_2 = ค่าความเฉื่อยโรเตอร์ของมอเตอร์ (kgm^2)

$\tilde{k}$ = ค่าความแข็งของข้อต่ออ่อนตัว (Nm/rad)

$\theta_1(t)$ = มุมที่เปลี่ยนไปของแขนกลเทียบกับแกนตั้งฉาก

$\theta_2(t)$ = มุมของแกนมอเตอร์

m = มวลรวมทั้งหมดของแขนกล (kg)

l = ระยะห่างข้อต่อวัดจากจุดศูนย์กลางของแกนหมุน (m)

g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

4.1.2 สมการปริภูมิสถานะ(State-Space)

จากสมการ (4.1) และ (4.2) จะได้สมการปริภูมิสถานะที่อนุพันธ์อันดับหนึ่ง คือ

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{4.3}$$

เมื่อ

$$X = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

และสมการสุดท้ายของระบบที่ได้คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-(k+mlg)}{I_1} & 0 & \frac{k}{I_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k}{I_2} & 0 & \frac{-k}{I_2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{I_2} \end{bmatrix} \cdot u \tag{4.5}$$

ซึ่งสมการ (4.5) นี้สามารถนำไปใช้ในการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ในหัวข้อต่อไป

4.2 การจำลองการควบคุมแขนกลข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์

การทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี ที่ไม่ได้ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์กับ การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดี ที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวซึ่งนำแบบจำลองมาจากรูปที่ 4.1 โดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 ตามลำดับ

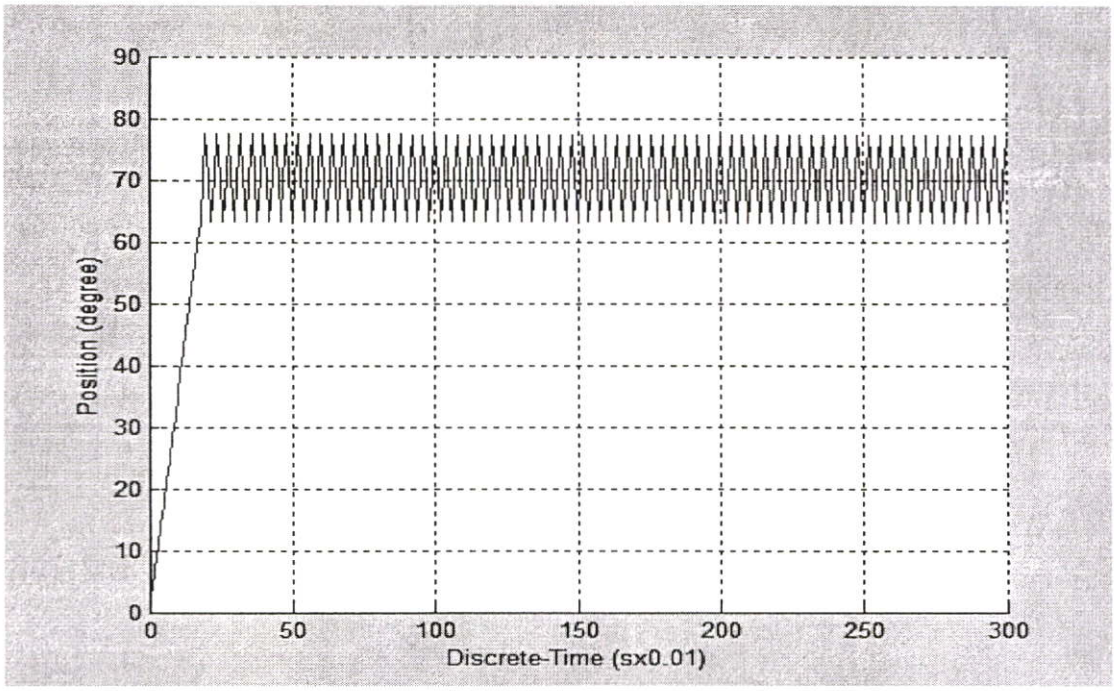
4.2.1 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ และความชำนาญของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

ในการเริ่มแรกของการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่นำไปใช้กับแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวนั้น จะทำการปรับแต่งได้ค่อนข้างยากต้องใช้ทักษะและความชำนาญเป็นอย่างมาก ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ให้ได้ผลตอบสนองที่ดี ซึ่งในหัวข้อนี้ จะทำการทดลองให้เห็นถึงผลในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแต่งโดยผู้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.1

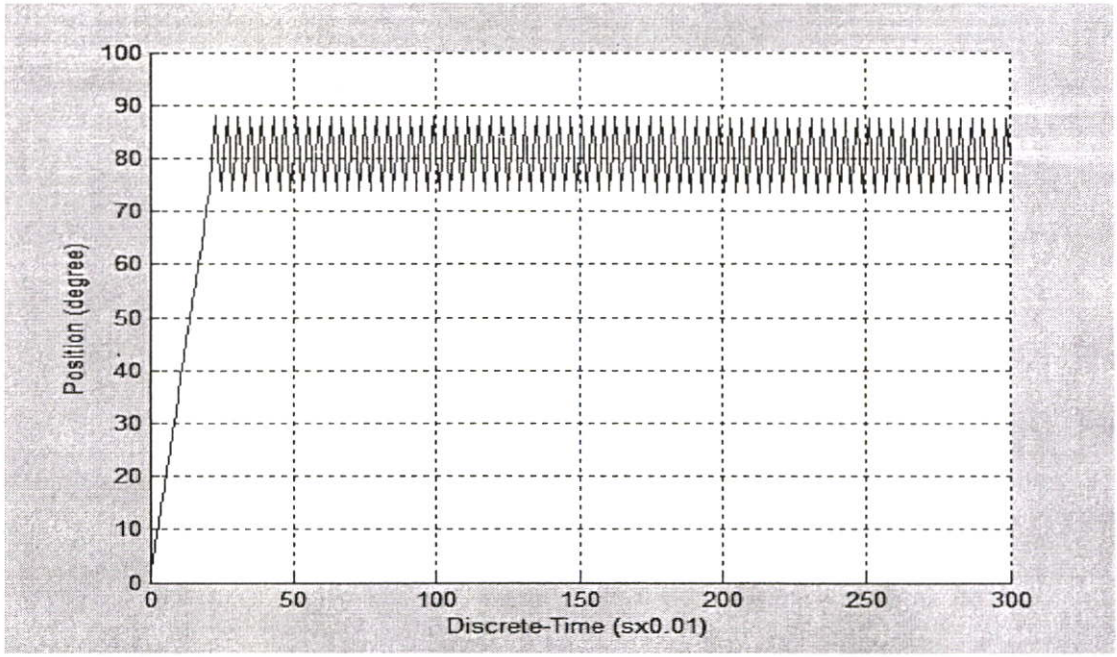
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญ โดยกำหนดค่า $I_1 = 0.000142\ (\text{kgm}^2)$, $I_2 = 0.001(\text{kgm}^2)$, $\widetilde{k} = 0.31(\text{Nm/rad})$, $mlg = 0.051(\text{Nm})$, Setpoint(degree) = 70, 80, 90
เวลาในการสุ่ม (Sampling Time) Ts = 0.01xsec

ค่าเป้าหมาย(degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld	Kpi	Ki	Kupi	Li
70	10	1	1	10	10	1	2	10
80	10	1	1	10	10	1	2	10
90	10	1	1	10	10	1	2	10

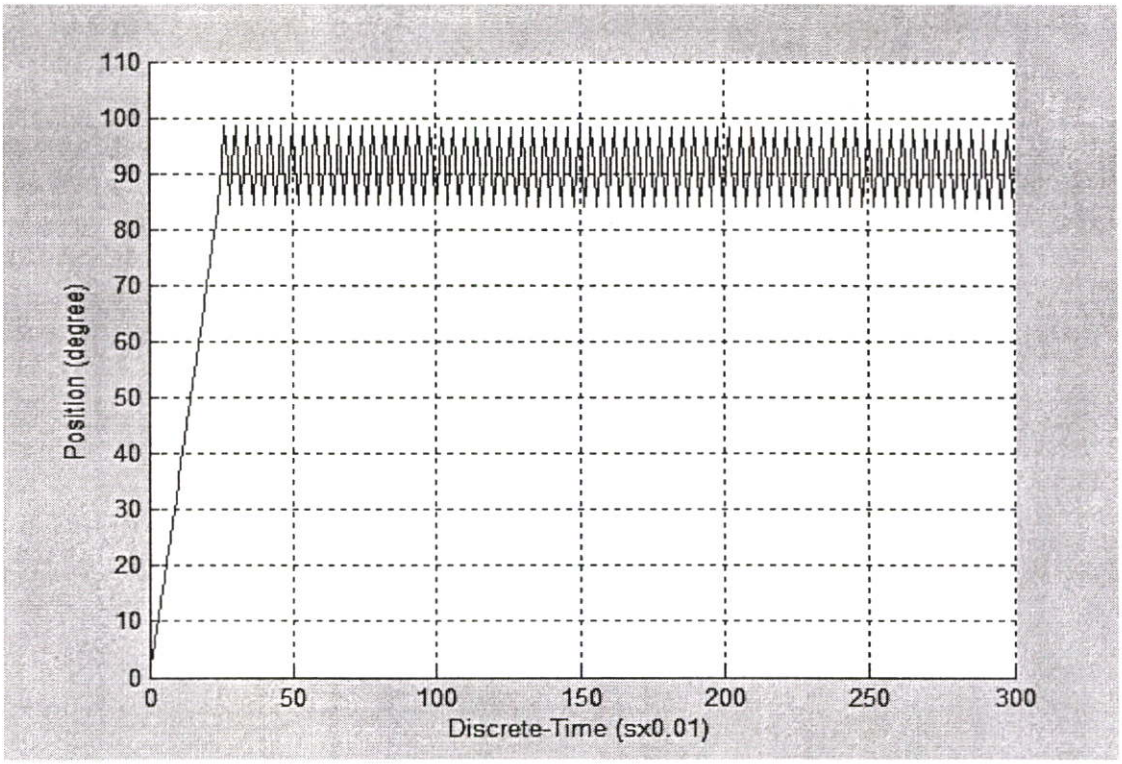
ผลการทดลองในรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 เป็นผลตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้จะวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมายในช่วงเวลาประมาณ 0.2 วินาทีแต่ระบบจะไม่มีความเสถียรภาพซึ่งดูได้จากการแกว่งของสัญญาณที่มีค่าพุ่งเกินที่มากเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายดูผลการทดลองของรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ



รูปที่ 4.3 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

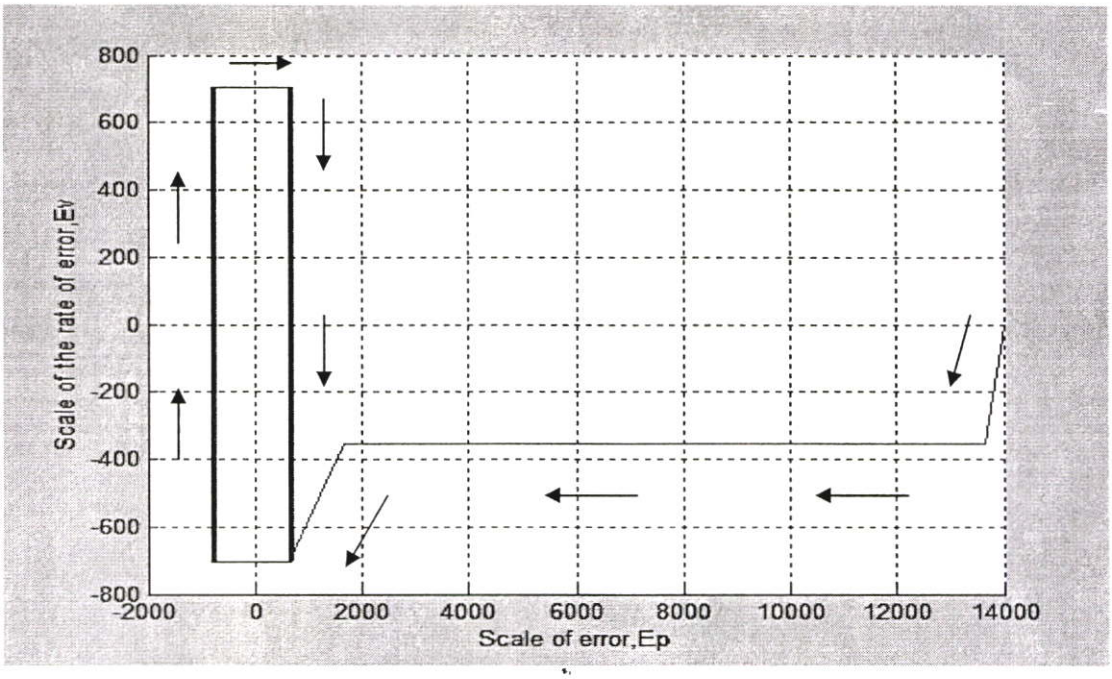


รูปที่ 4.4 ผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

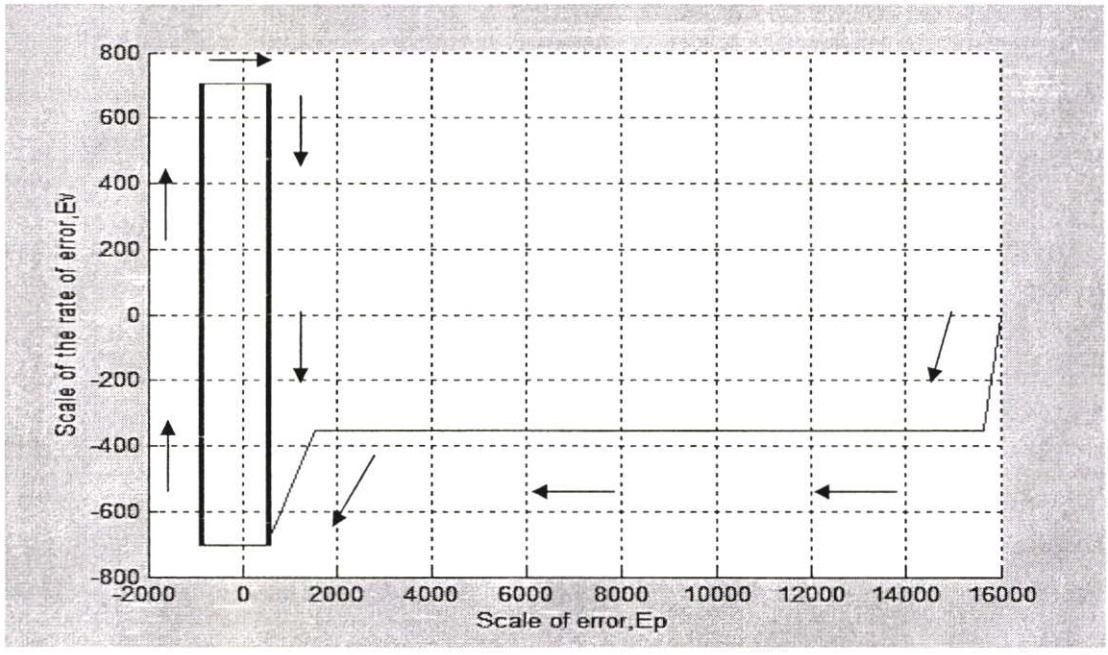
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะและความชำนาญโดยจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

ค่าเป้าหมาย(degree)	Rise time(s)	Setting time(s)	Overshoot %
70	0.2391	0.4315	10.642
80	0.2657	0.4853	10
90	0.3189	0.588	9.56

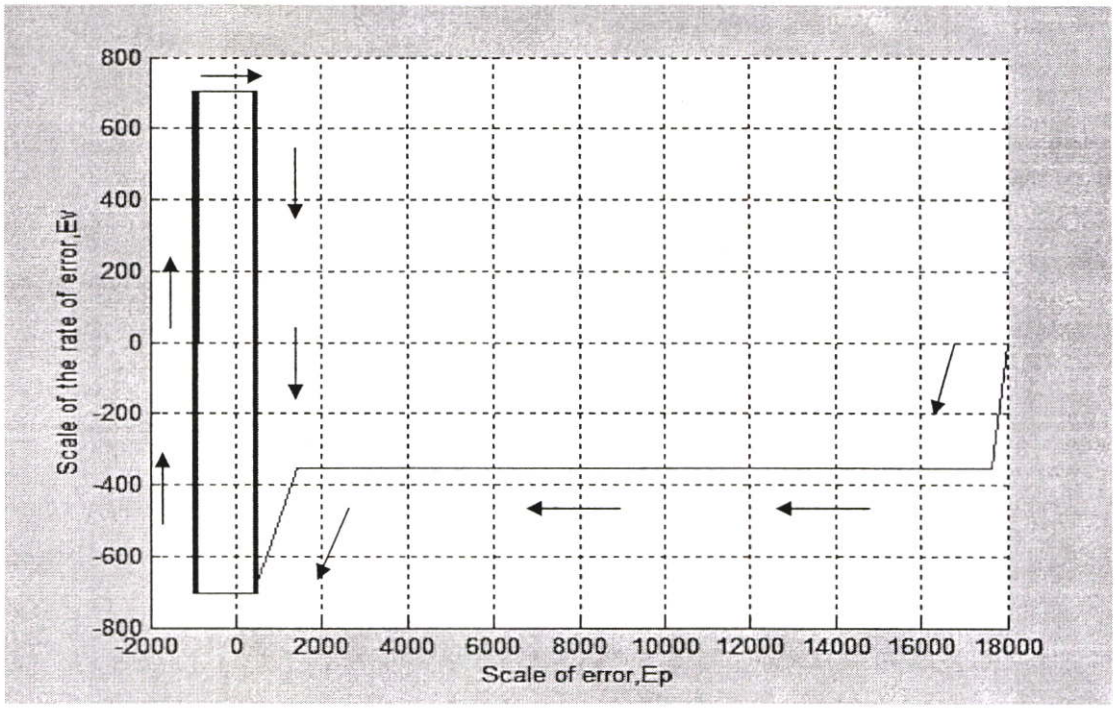
การทดลองในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 เป็นผลของระนาบเฟสความผิดพลาดของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ที่ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้ไม่สามารถที่จะลู่เข้าสู่จุดศูนย์ได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4



รูปที่ 4.5 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.6 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.7 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 จะเห็นได้ว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะหรือความชำนาญนั้นจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่ดีซึ่งดูได้จากกราฟจะเห็นว่ามีการแกว่งของค่าพุ่งเกินที่มาก (overshoot) เมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย (setpoint) และค่าเฟสผิดพลาดนั้นจากรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้นั้นไม่มีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด(origin) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนั้น หากไม่มีทักษะจะหาค่าที่เหมาะสมได้ยากและใช้เวลามาก

4.2.2 การเปรียบเทียบผลตอบสนองของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญกับการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

ในการจำลองผลตอบสนองของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญนั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.3 และการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์นั้นใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญ โดยกำหนดค่า $I_1 = 0.000142\ (\text{kgm}^2)$, $I_2 = 0.001(\text{kgm}^2)$, $\widetilde{k} = 0.31(\text{Nm/rad})$, $mlg = 0.051(\text{Nm})$, Setpoint(degree) = 70, 80, 90
เวลาในการสุ่ม (Sampling Time) Ts = 0.01xsec

ค่าเป้าหมาย(degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld	Kpi	Ki	Kupi	Li
70	3	5	1	9	20	1	2	0.1
80	3	5	1	9	20	1	2	0.1
90	3	5	1	9	20	1	2	0.1

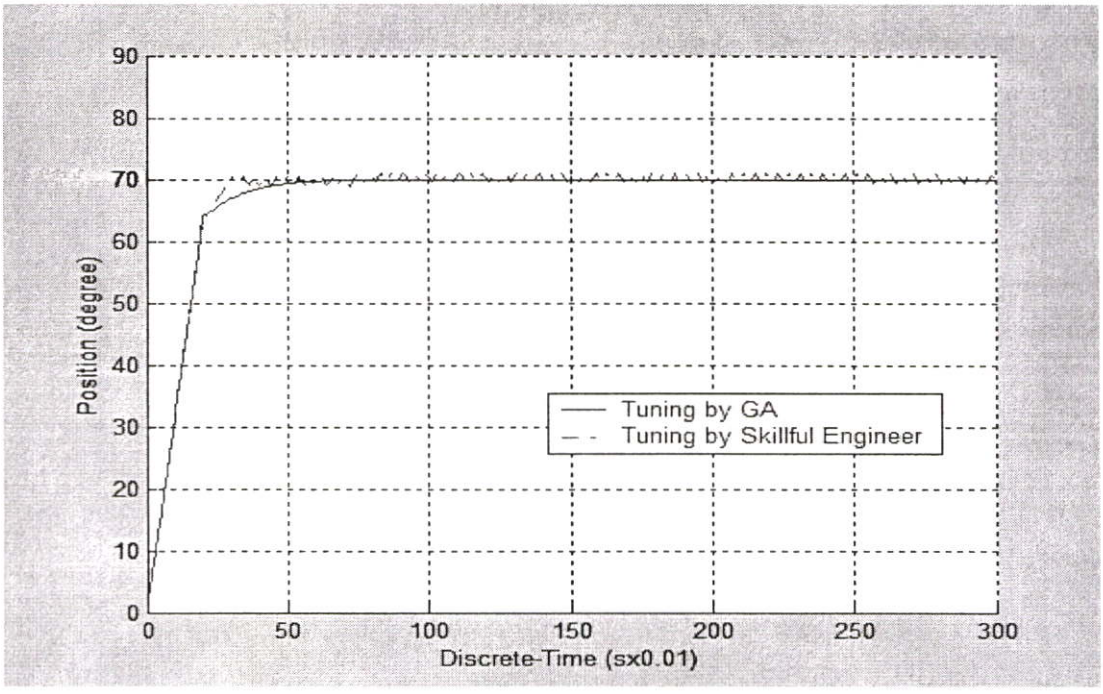
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ โดยกำหนดค่า $I_1 = 0.000142\ (\text{kgm}^2)$, $I_2 = 0.001(\text{kgm}^2)$, $\widetilde{k} = 0.31(\text{Nm/rad})$, $mlg = 0.051(\text{Nm})$, Setpoint(degree) = 70, 80, 90
เวลาในการสุ่ม (Sampling Time) Ts = 0.01xsec

ค่าเป้าหมาย (degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld	Kpi	Ki	Kupi	Li
70	2.9521	3.1263	0.9542	9.5311	0.03	0.0009	0.56	1.3
80	2.9521	3.1263	0.9542	9.5311	0.03	0.0009	0.56	1.3
90	2.9521	3.1263	0.9542	9.5311	0.03	0.0009	0.56	1.3

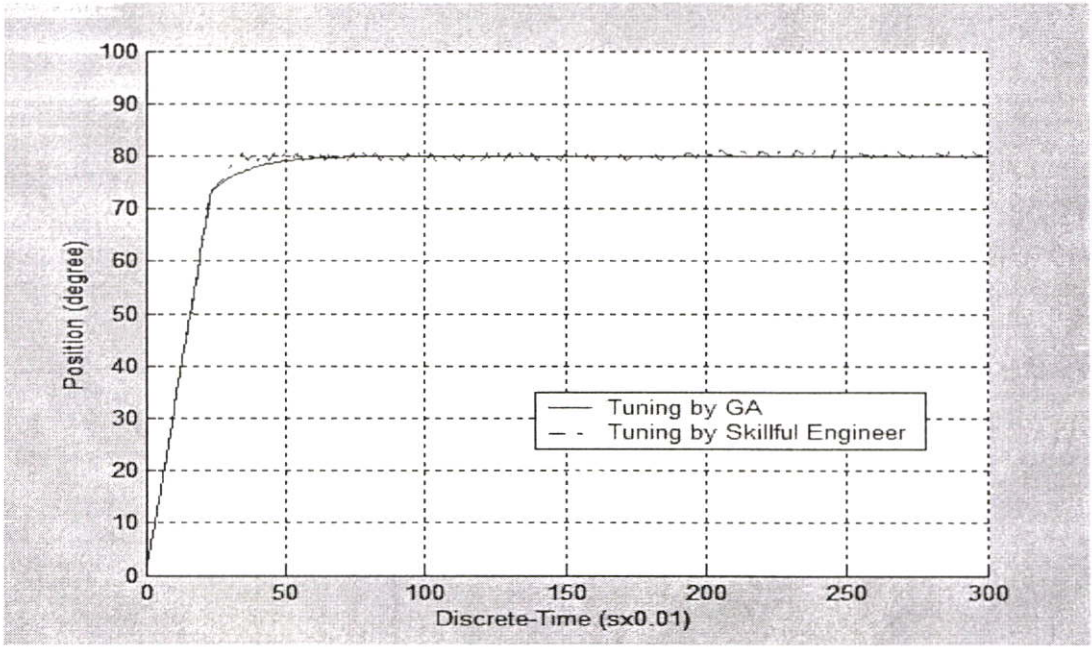
ผลการทดลองในรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 เป็นผลตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้จะวิ่งเข้าหาค่าเป้าหมายได้ในช่วงเวลาประมาณ 0.2 วินาที และระบบมีความเสถียรภาพที่ยอมรับได้ซึ่งดูได้จากการแกว่งของสัญญาณที่มีค่าพุ่งเกินที่น้อยเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายซึ่งดูผลการทดลองได้จากตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

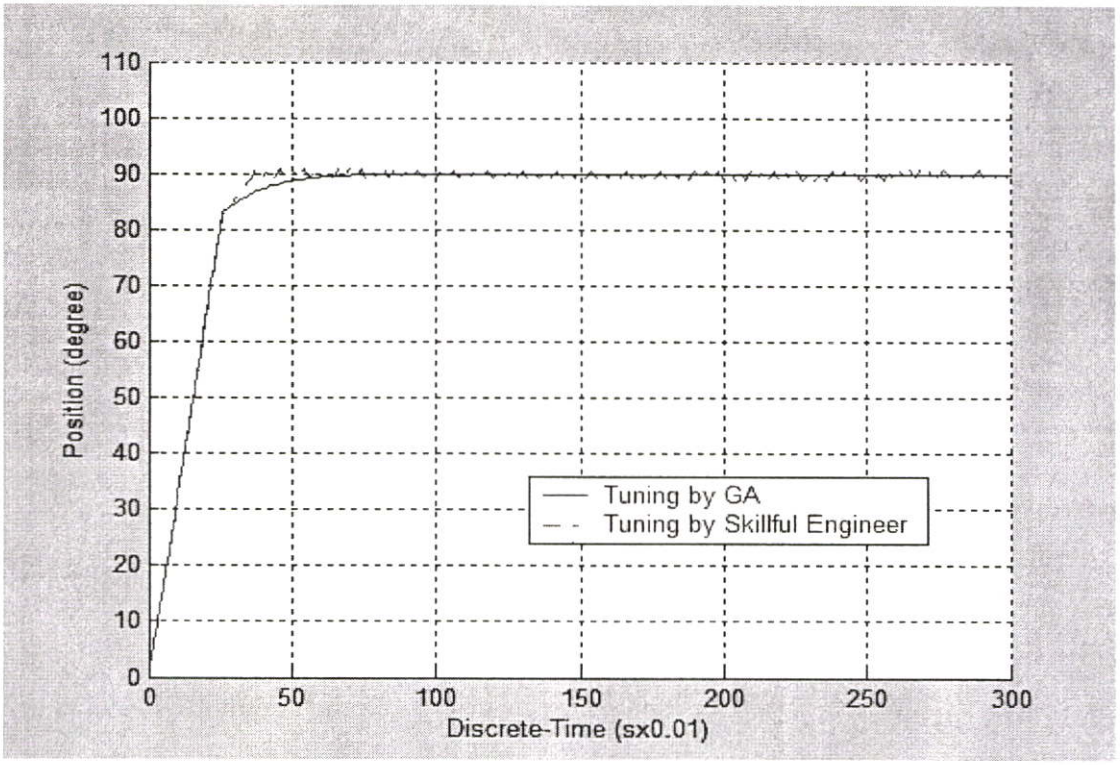
ค่าเป้าหมาย(degree)	Rise time(s)	Setting time(s)	Overshoot %
70	0.2248	0.364	0
80	0.2488	0.4338	0
90	0.299	0.498	0



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์

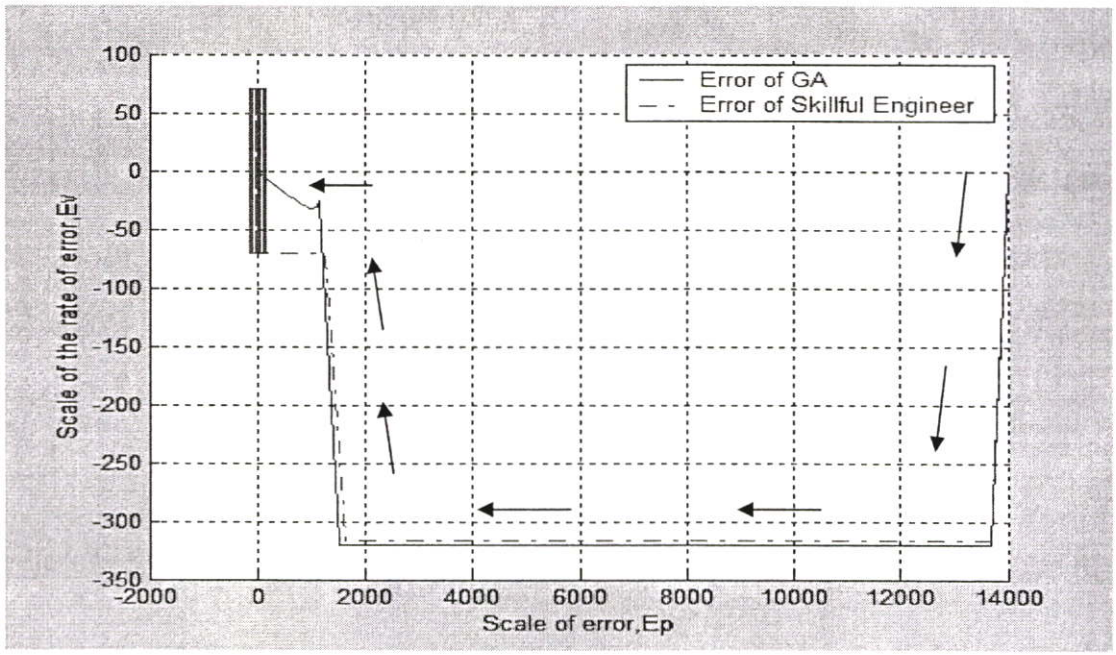


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์

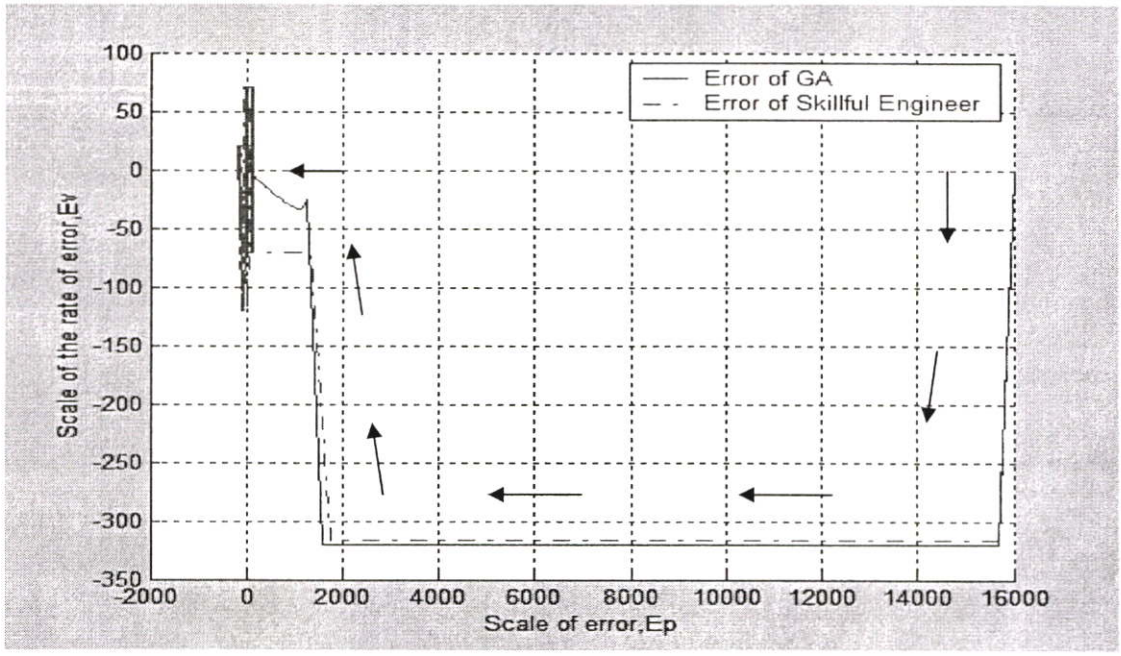


รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบผลจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ระหว่างการปรับแต่งพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์

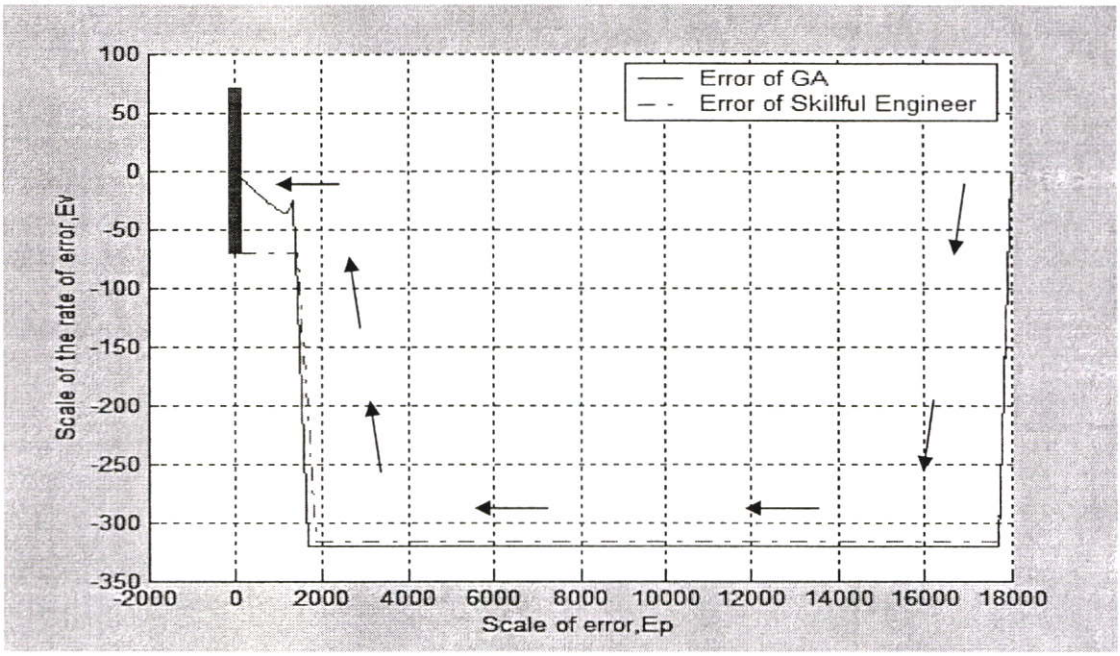
การทดลองในรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 เป็นผลของระนาบเฟสความผิดพลาดของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ที่ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้สามารถที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิดได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10



รูปที่ 4.11 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.12 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.13 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.10

จากการทดลองในรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 นั้นพบว่าการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีโดยผู้ที่มีความชำนาญนั้น สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีใกล้เคียงกับการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์เข้ามาช่วย แต่ยังมีข้อเสียโดยใช้เวลาในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ที่นานกว่าและยังมีค่าพุ่งเกิน (overshoot) ที่มากกว่าอีกด้วย ซึ่งสรุปได้ว่าการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์เข้ามาปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีนั้นให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าและเวลาในการปรับแต่งพารามิเตอร์ที่รวดเร็วกว่า โดยจะนำผลที่ได้ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์นี้ไปทำการทดลองในงานสร้างจริงในต่อไป

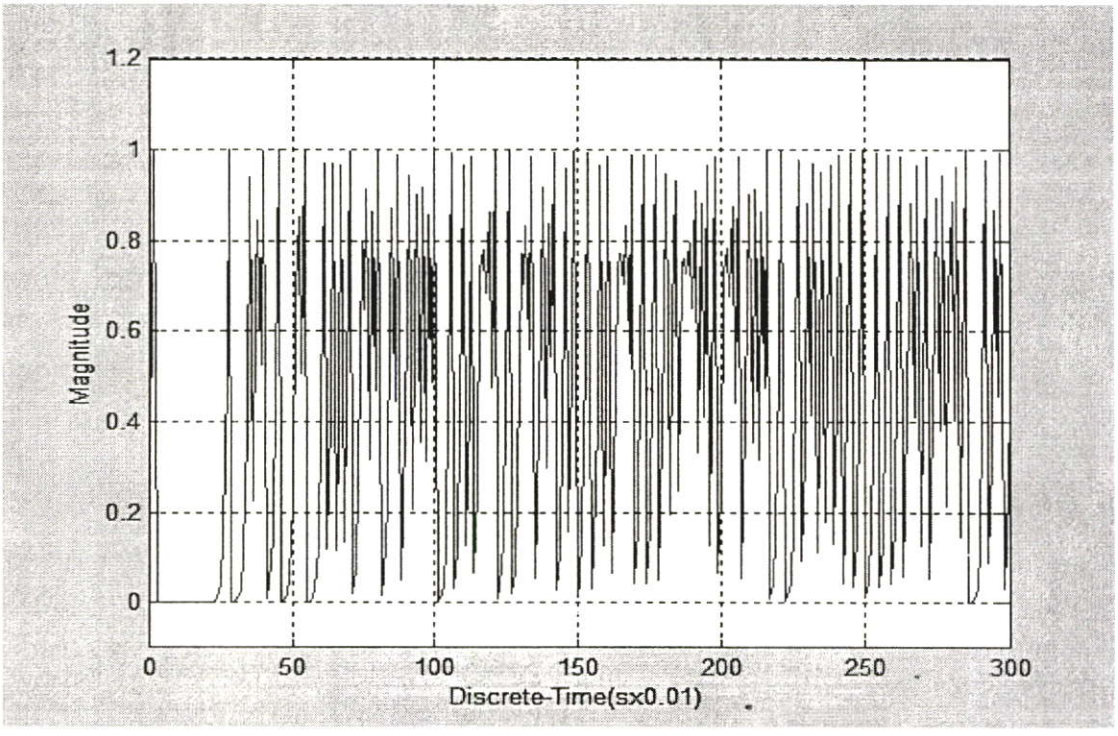
4.2.3 การทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

การทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนให้กับระบบโดยใช้สัญญาณอลวนในรูป logistic map [9] ซึ่งมีสมการดังนี้

$$x_{n+1} = r.x_n(1 - x_n) \tag{4.6}$$

ที่ $x_n = 0.49999999$, $r = 4$

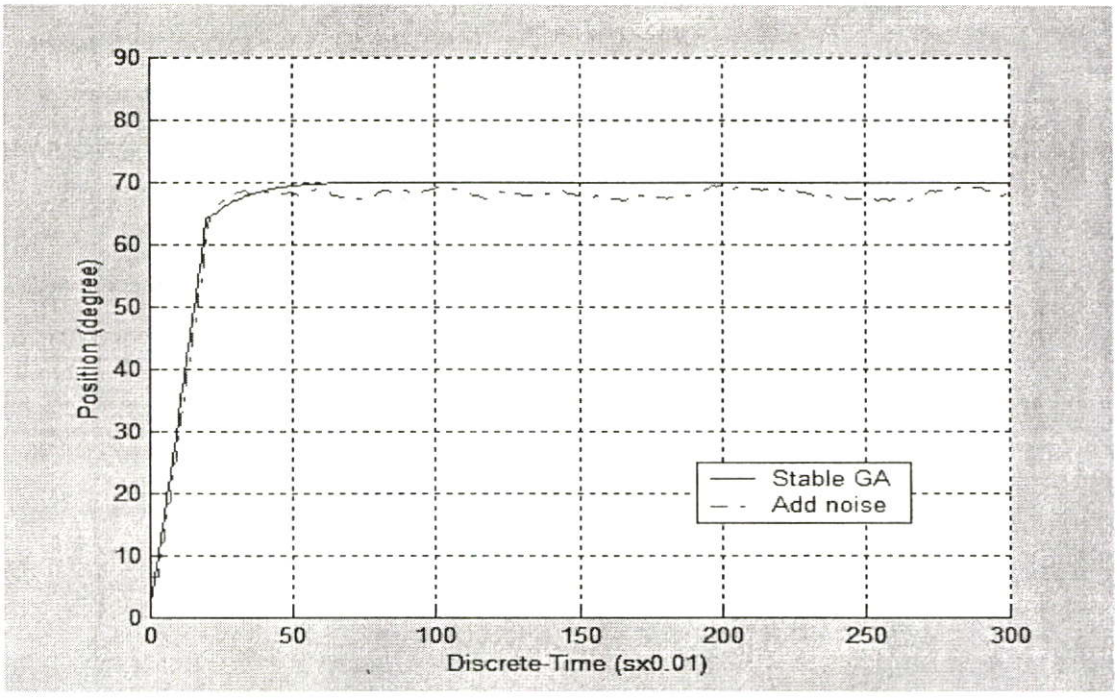
จากการนำสมการที่ (4.6) มาทำการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้ได้ค่าสัญญาณรบกวนอลวนดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าของสัญญาณแต่ละช่วงเวลามีค่าไม่เท่ากันซึ่งเป็นไปตามสมการของสัญญาณรบกวนอลวน [9]



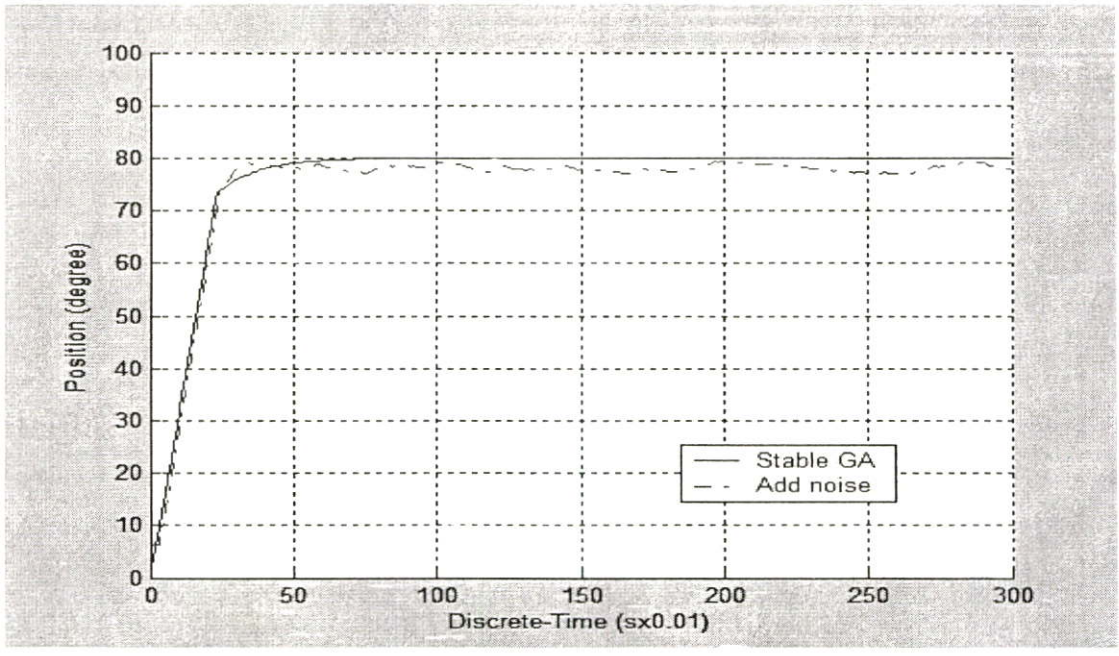
รูปที่ 4.14 สัญญาณอลวนในรูป logistic map

4.2.3.1 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map กำหนดค่าเป้าหมาย ที่ 70, 80, 90 องศา

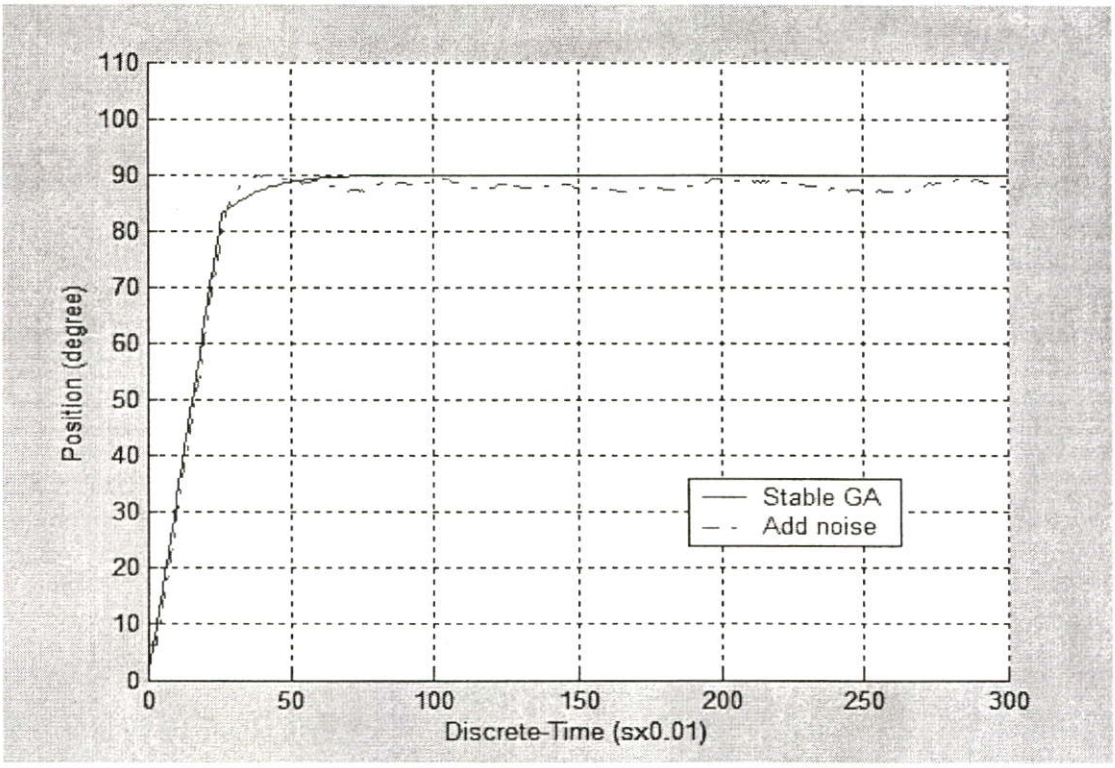
ในการทดลองนี้จะทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map กำหนดค่าเป้าหมาย ที่ 70, 80, 90 องศาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.4 ดังในรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 ซึ่งจะเห็นว่ามีการแกว่งของผลตอบสนองของมอเตอร์ ซึ่งมีความไม่ราบเรียบเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ซึ่งดูผลที่ได้จากตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา

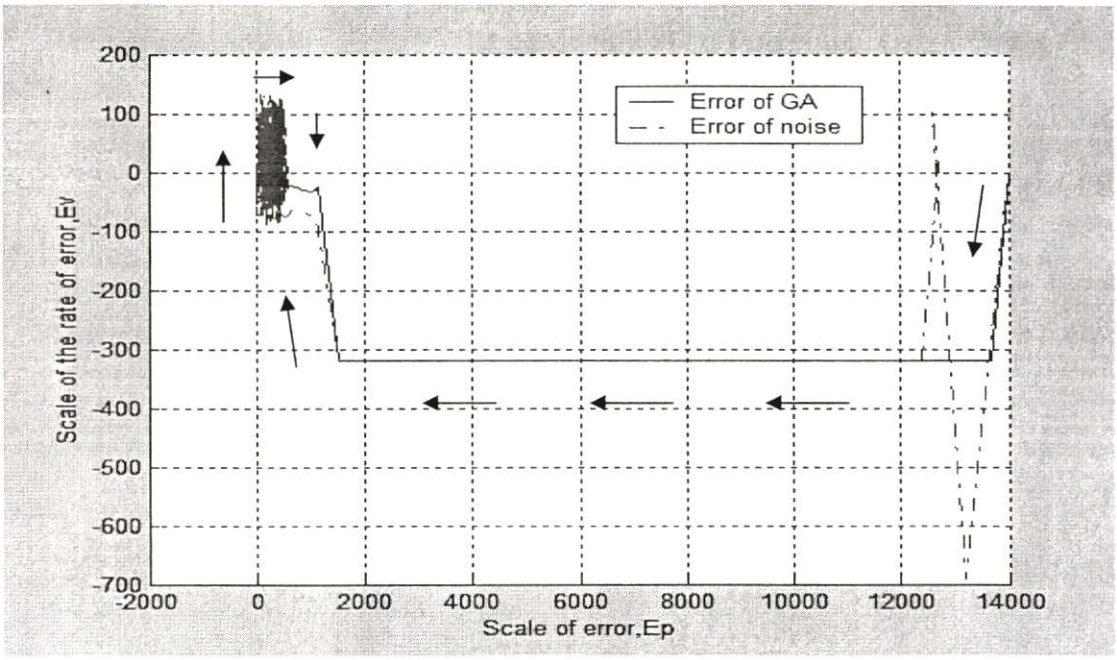


รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา

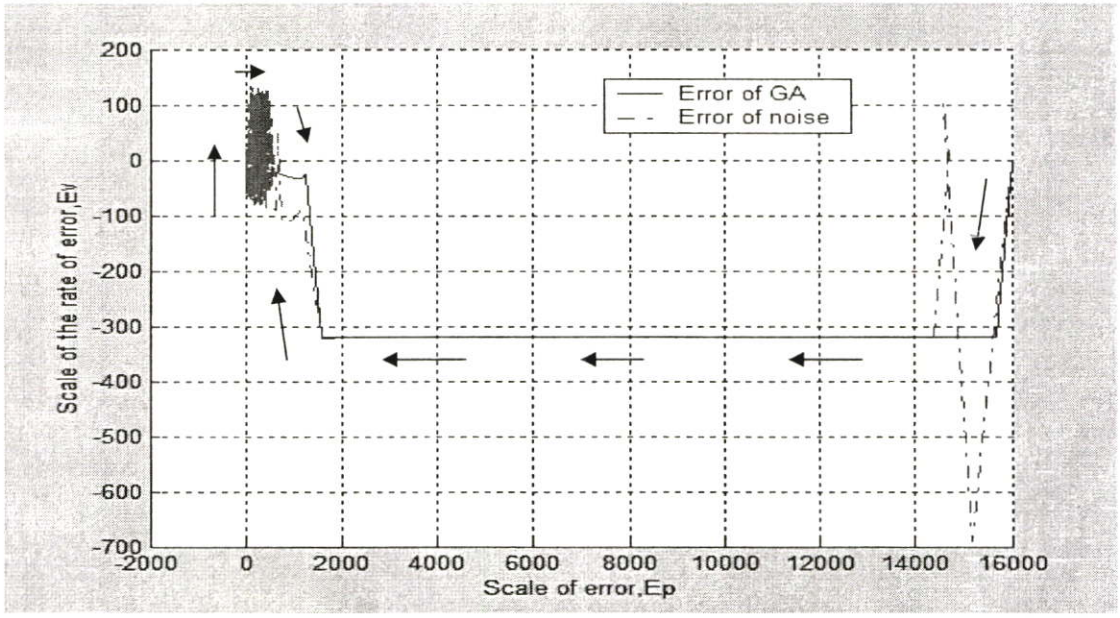
การทดลองในรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20 เป็นผลของระนาบเฟสความผิดพลาดของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ด้วยคอมพิวเตอร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ที่มีสัญญาณรบกวนอลวน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองที่ได้สามารถที่ไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิดได้ ซึ่งมีความสอดคล้องกับรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ซึ่งทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยจำลองโดยคอมพิวเตอร์

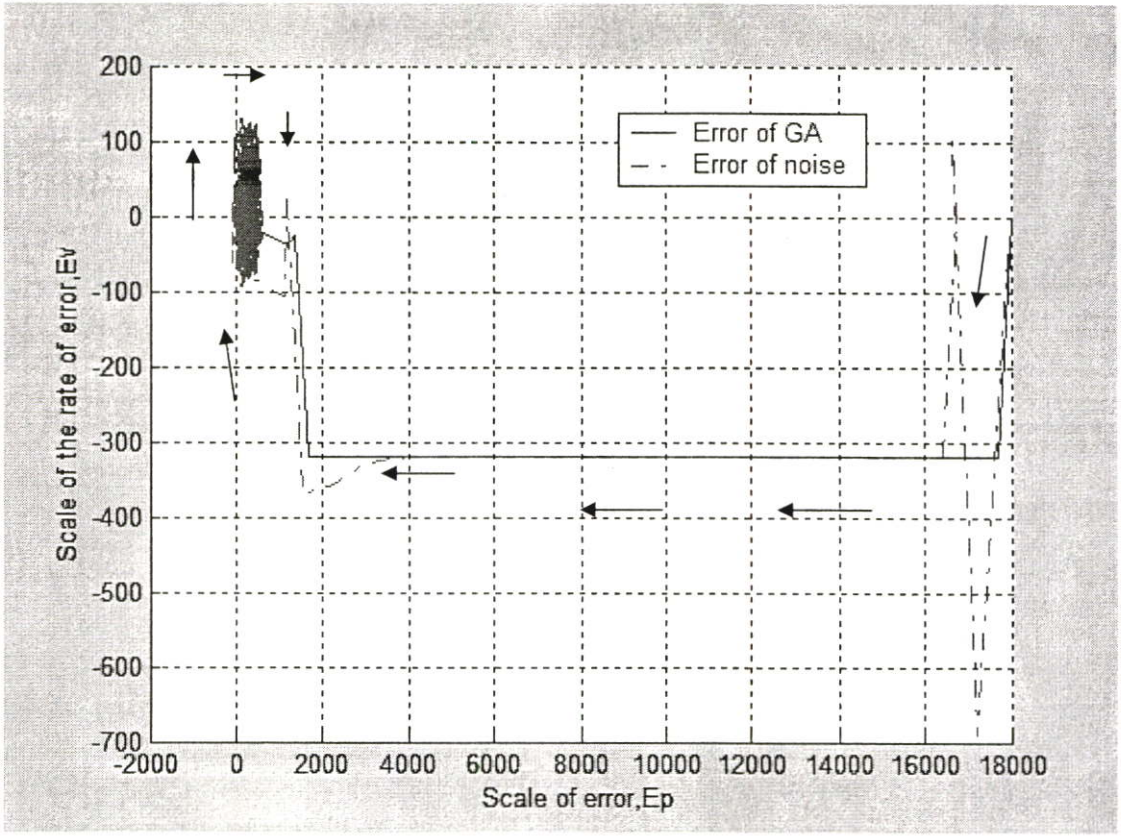
ค่าเป้าหมาย(degree)	Rise time(s)	Setting time(s)	Overshoot %
70	0.2248	0.3281	-1.03
80	0.2498	0.3625	-0.87
90	0.253	0.332	-0.77



รูปที่ 4.18 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.19 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.20 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.17

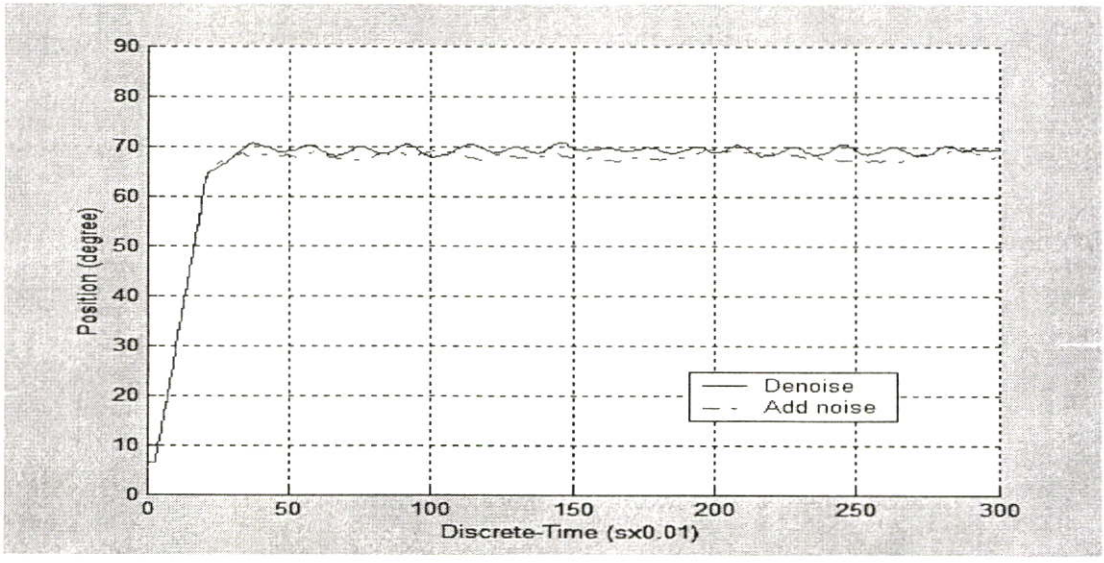
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17 จะพบว่าระบบของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยที่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนนั้นจะเห็นว่าระบบไม่สามารถที่จะเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งดูจากผลการตอบสนองที่ได้จะเห็นว่ามีการแกว่งของสัญญาณเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ที่ 70, 80, 90 องศา และเมื่อดูจากรูปที่ 4.18, 4.19, 4.20 ค่าของระนาบเฟสผิดพลาดยังไม่ลู่เข้าสู่จุดกำนิด ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวจะได้ทำการทดลองขจัดสัญญาณรบกวนในหัวข้อต่อไป

4.2.3.2 การตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map กำหนดค่าเป้าหมาย ที่ 70, 80, 90 องศา

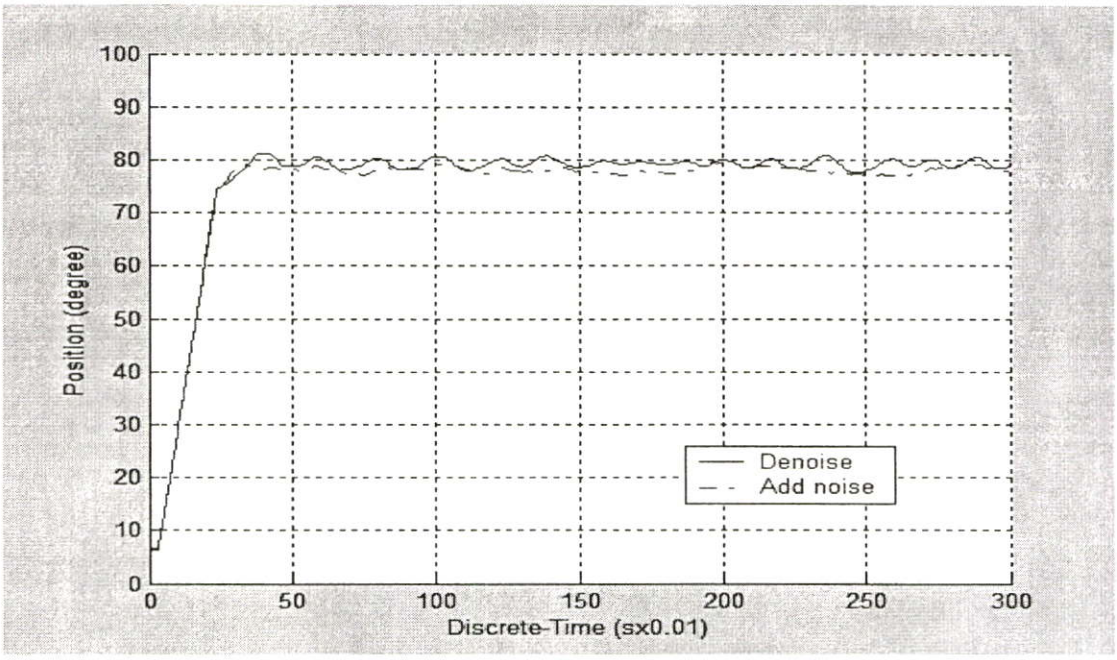
ในการทดลองนี้จะทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map กำหนดค่าเป้าหมาย ที่ 70, 80, 90 องศาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.7 ดังในรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองที่ได้นั้นมีการลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้ได้แต่มีการแกว่งของผลตอบสนองของมอเตอร์อยู่ซึ่งในระบบควบคุมนั้นสามารถยอมรับได้ซึ่งดูผลการทดลองจากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบจำลองแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวที่ขจัดสัญญาณรบกวนอลวนในรูป logistic map แล้ว ที่กำหนดค่า I_1 = 0.000142 (kgm^2), I_2 = 0.001(kgm^2), $\widetilde{k}$ = 0.31(Nm/rad), mlg = 0.051(Nm), Setpoint(degree) = 70, 80, 90 เวลาในการสุ่ม (Sampling Time) Ts = 0.01xsec

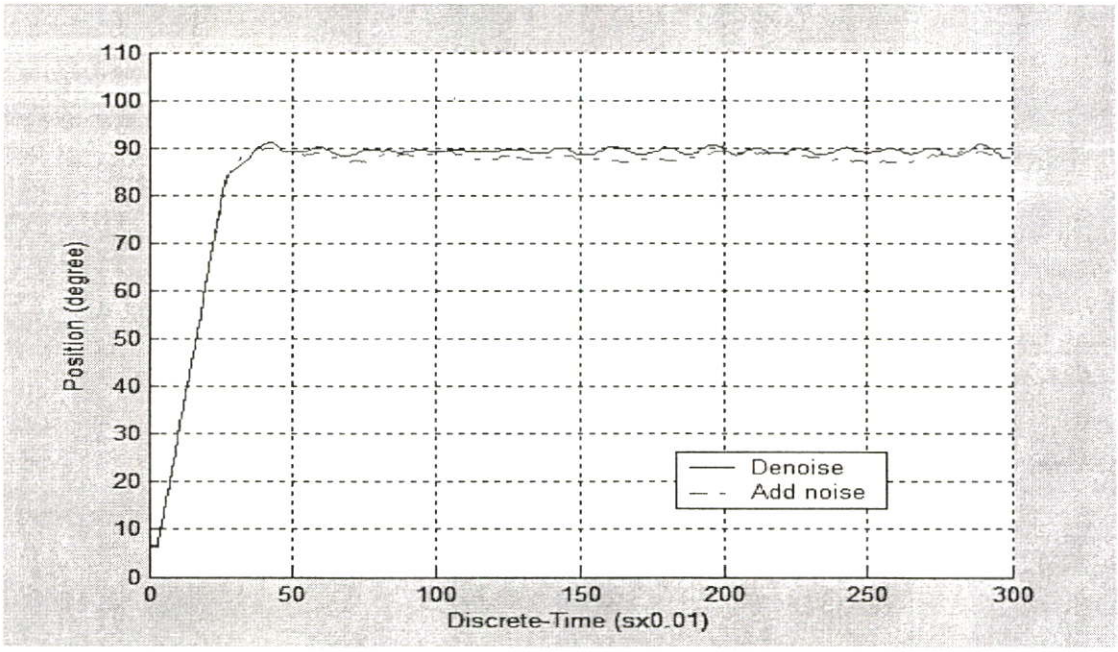
ค่าเป้าหมาย (degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld	Kpi	Ki	Kupi	Li
70	2.9521	3.1263	0.963	9.5311	0.04998	0.01	0.565	0.5
80	2.9521	3.1263	0.963	9.5311	0.04998	0.01	0.565	0.5
90	2.9521	3.1263	0.963	9.5311	0.04998	0.01	0.565	0.5



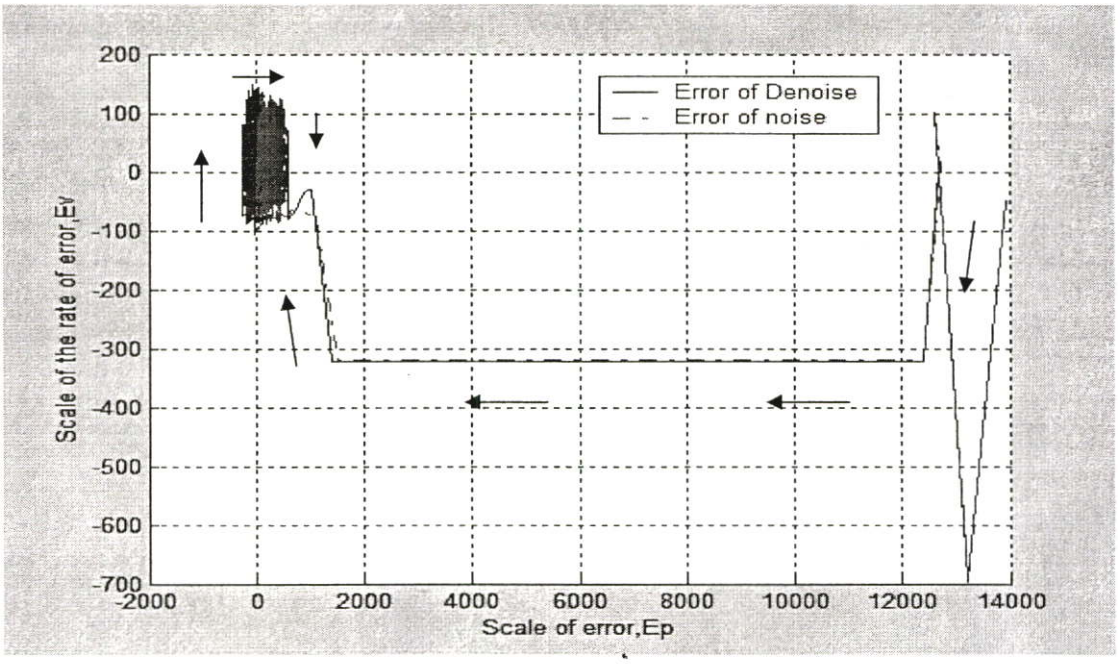
รูปที่ 4.21 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา



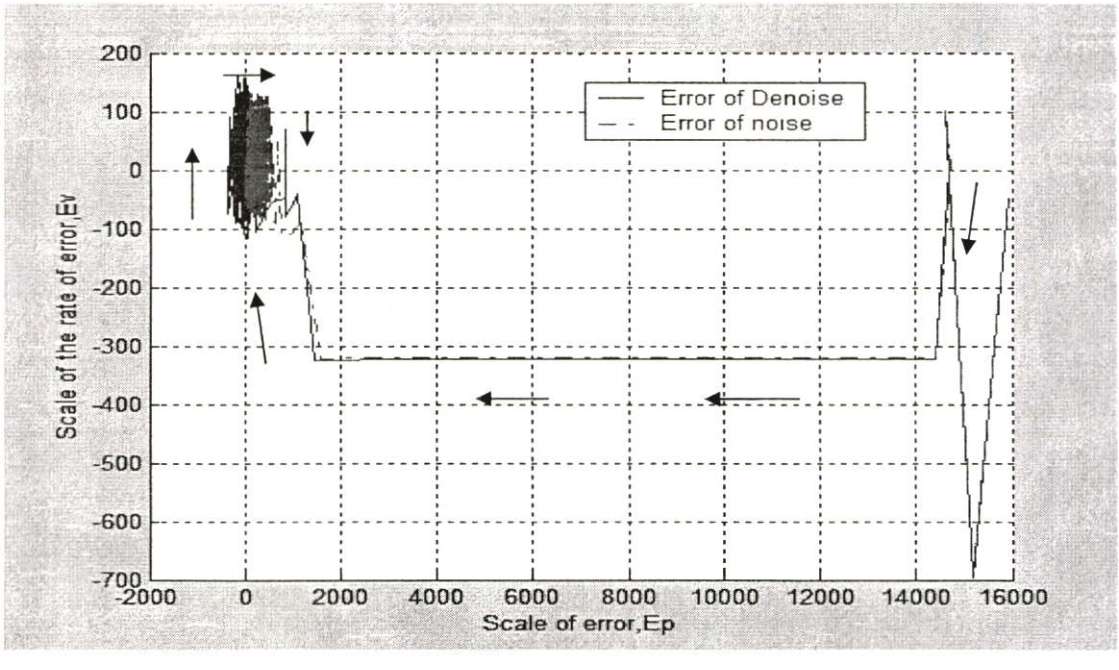
รูปที่ 4.22 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 80 องศา



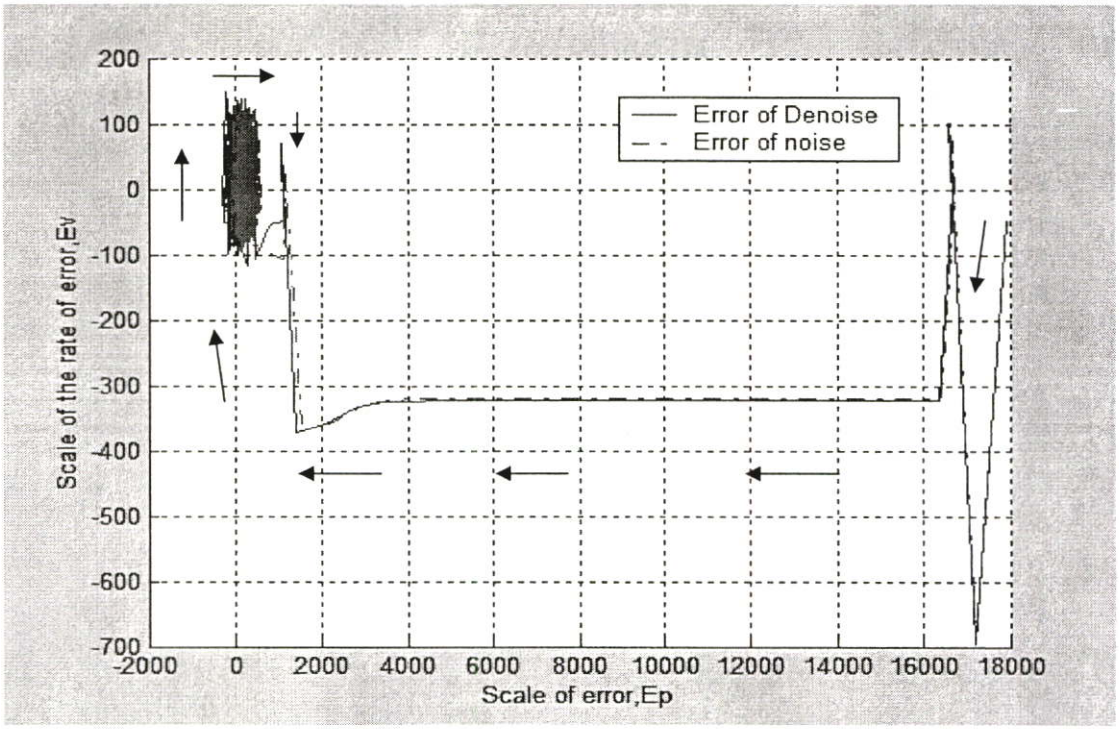
รูปที่ 4.23 ผลการจำลองการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา



รูปที่ 4.24 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.25 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.26 ระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกับผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าประสิทธิภาพของการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map โดยจำลองโดยคอมพิวเตอร์

ค่าเป้าหมาย(degree)	Rise time(s)	Setting time(s)	Overshoot %
70	0.222	0.3249	0.0814
80	0.244	0.3548	0.0706
90	0.257	0.364	0.0814

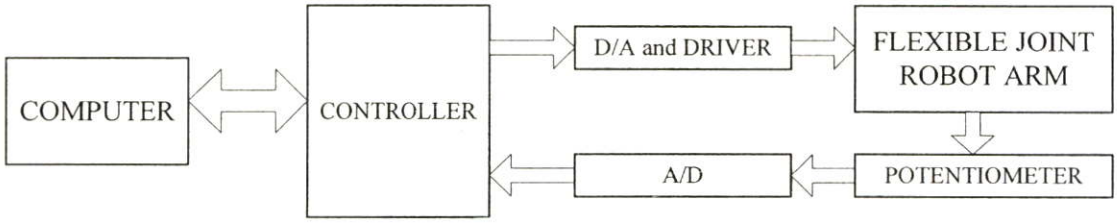
จากผลการทดลองในรูปที่ 4.21, 4.22, 4.23 จะพบว่าระบบของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว โดยการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนนั้นจะเห็นว่าระบบสามารถขจัดสัญญาณรบกวนอลวนได้แต่ผลตอบสนองนั้นยังคงมีค่าพุ่งเกินอยู่เล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนโดยมีระนาบเฟสความผิดพลาดที่สอดคล้องกันดังในรูปที่ 4.24, 4.25, 4.26ซึ่งสรุปได้ว่าการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วย

วิธีการทางพันธุศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวนั้น ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ และจะนำผลที่ได้จากการทดลองด้วยคอมพิวเตอร์นี้ไปทำการสร้างจริงในหัวข้อต่อไป

4.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมระบบปฏิบัติการ 1 เครื่อง
2. โปรแกรมที่ใช้เขียนจำลองการทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ของ MATLAB version 6.5
3. โปรแกรมที่ใช้เขียนบนเครื่องคอมพิวเตอร์ (Compiler) ของ Microsoft รุ่น Microsoft Visual Basic version 6.0
4. โปรแกรมที่ใช้เขียนบนบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์(Compiler) ของ Microchip รุ่น Keil C51
5. บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ของ ATMEL รุ่น 89C51AC2
6. เครื่องโปรแกรมและDebugโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ของ ETT รุ่น CP-JR51AC2
7. สายติดต่อพอร์ตอนุกรม
8. ชุดจำลองการทำงานของระบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว

4.4 การทำงานของระบบ



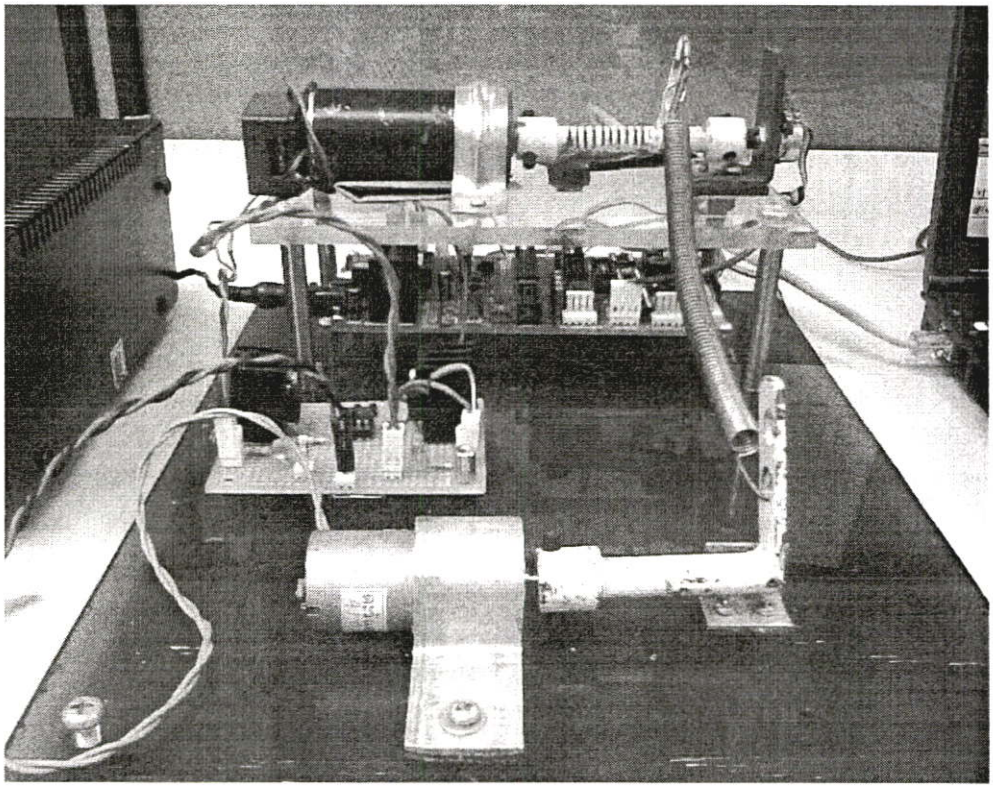
รูปที่ 4.27 บล็อกการทำงานของระบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว

จากรูปที่ 4.27 การทำงานเริ่มจากคอมพิวเตอร์จะส่งค่าอินพุท (องศาที่ต้องการ) ไปยังบอร์ดควบคุม 89C51AC2 ทำการประมวลผล เอาท์พุทที่ได้จะถูกแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาล็อกผ่านชุด Driver เข้าสู่ระบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว จากนั้นตัวความต้านทานปรับค่าได้ (potentiometer) จะวัดองศาและส่งกลับไปที่บอร์ดควบคุม 89C51AC2 โดยผ่านตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล เพื่อทำการประมวลผลให้ได้องศาตามที่คอมพิวเตอร์กำหนดมา และบอร์ด

ควบคุม 89C51AC2 จะส่งค่าที่ได้จากตัวความต้านทานปรับค่าได้ (potentiometer) กลับไปแสดงผลกราฟที่คอมพิวเตอร์

4.5 การทดลองระบบจริง

ในการทดลองได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $I_1 = 0.000142$ (kgm^2), $I_2 = 0.001$(kgm^2), $\widetilde{k} = 0.31$(Nm/rad), $mlg = 0.051$(Nm), Setpoint(degree) = 70, 80, 90

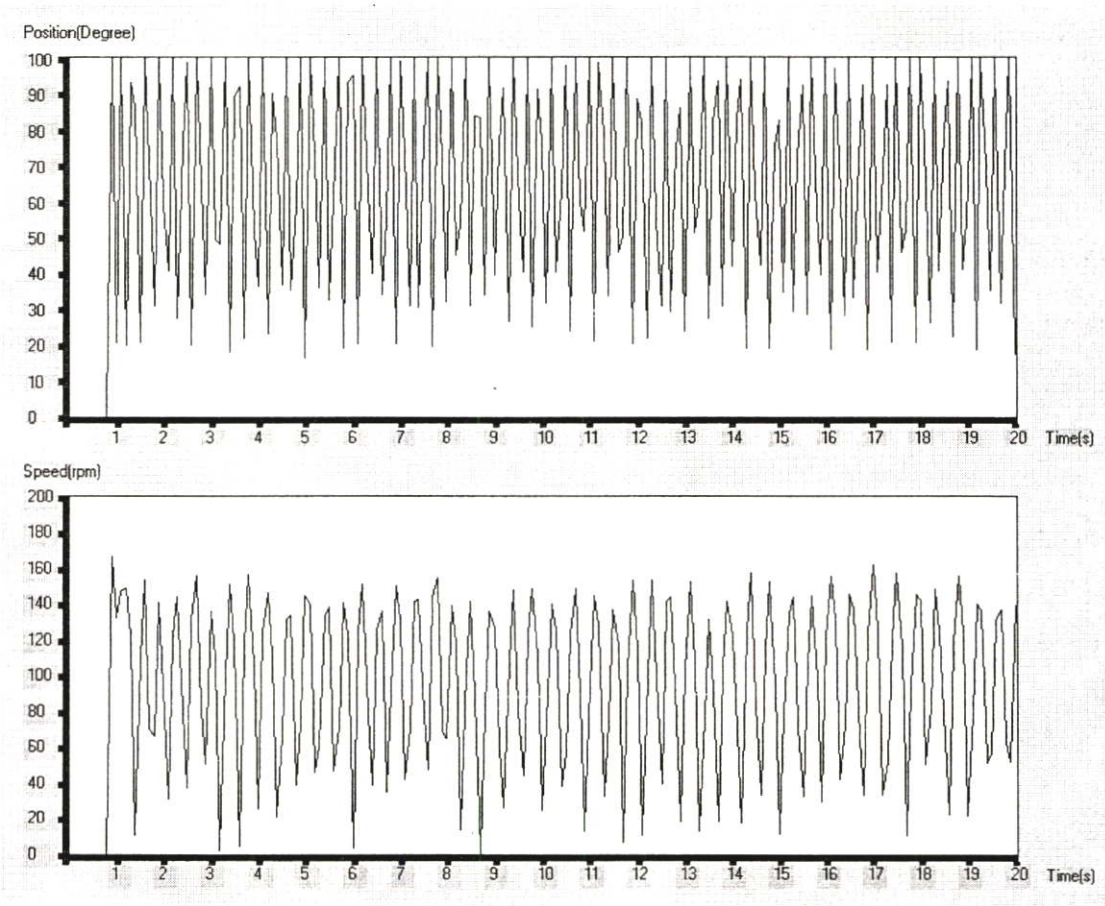


รูปที่ 4.28 แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวที่ใช้ทดลองจริง

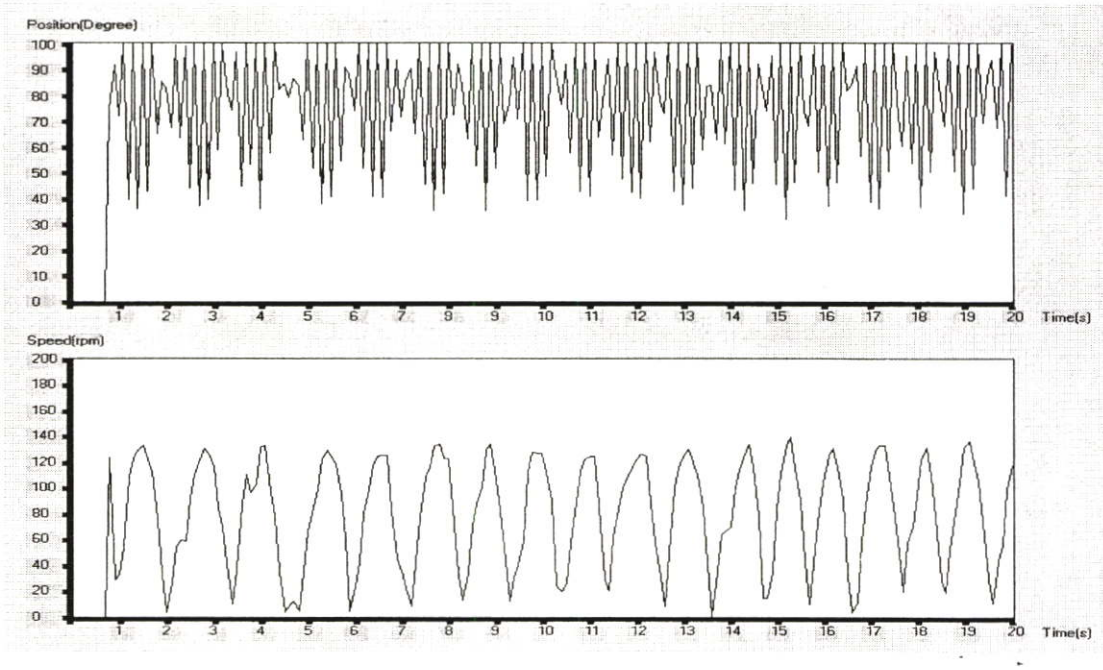
4.5.1 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ และความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดสอบผลตอบสนองที่ได้จาก การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์จากผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะโดยตั้งค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา

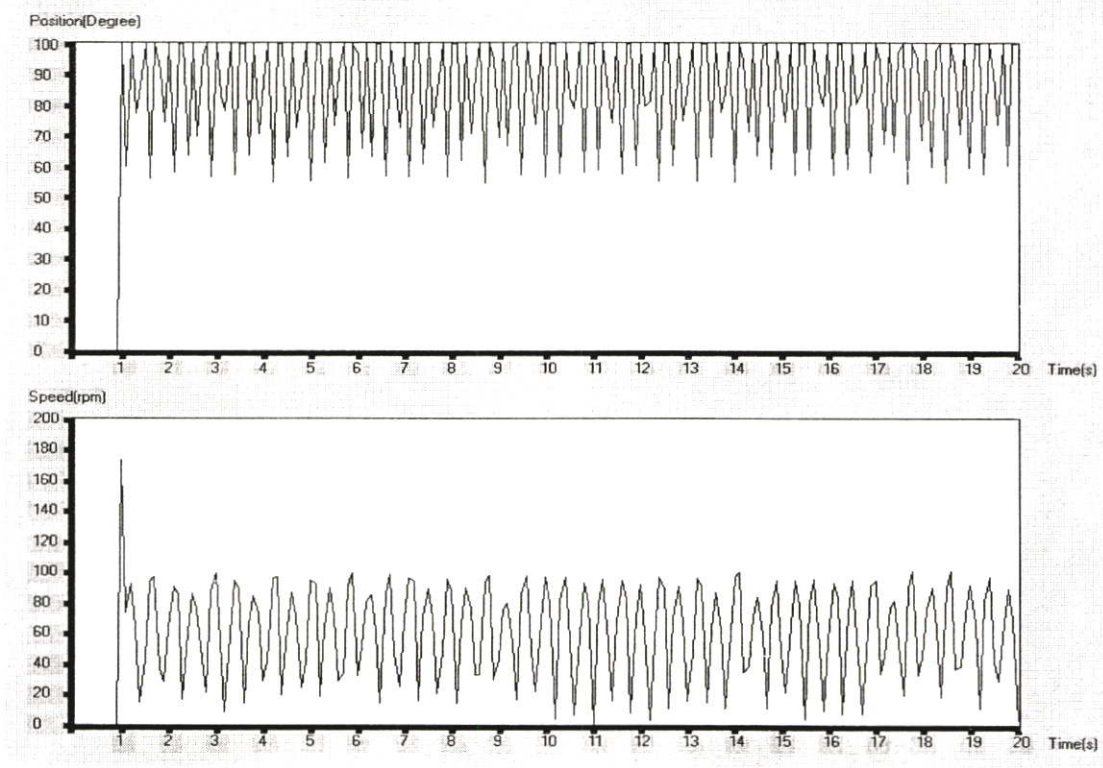
ในรูปที่ 4.29, 4.30, 4.31 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของสัญญาณมากเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายจะเห็นได้ว่าระบบไม่ได้เริ่มการทำงานที่เวลาเท่ากับศูนย์วินาที เนื่องจากการหน่วงค่าที่เกิดขึ้นมาจากการรับส่งค่าจากบอร์ดควบคุมมายังคอมพิวเตอร์ และเมื่อนำมาเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน คือไม่คงที่ในการรักษาระดับขององศาและความเร็วไว้ได้



รูปที่ 4.29 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

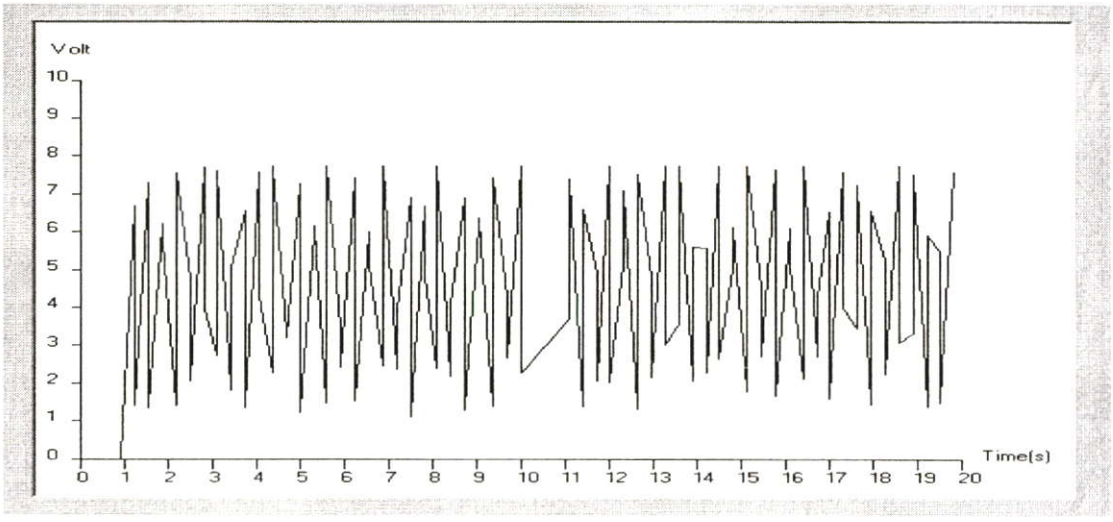


รูปที่ 4.30 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

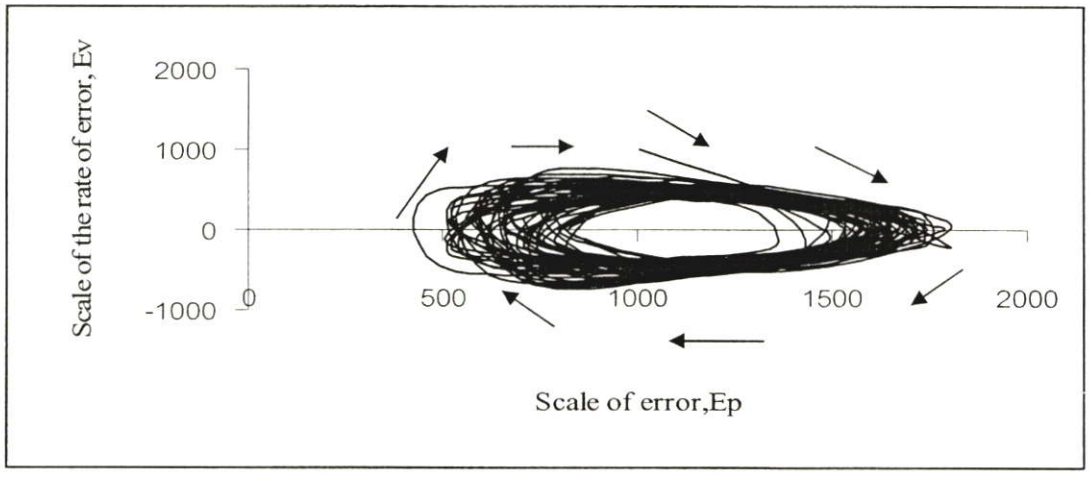


รูปที่ 4.31 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

ในรูปที่ 4.32 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันมาก เนื่องจากแขนกลมีการแกว่งไม่คงที่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.33 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.29 จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

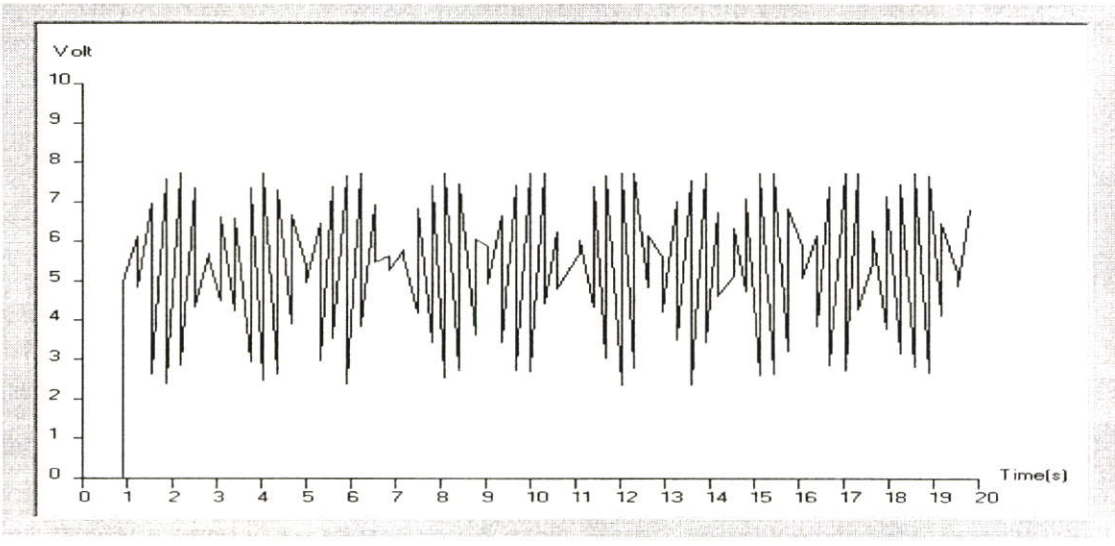


รูปที่ 4.32 ผลสัญญาณควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.29

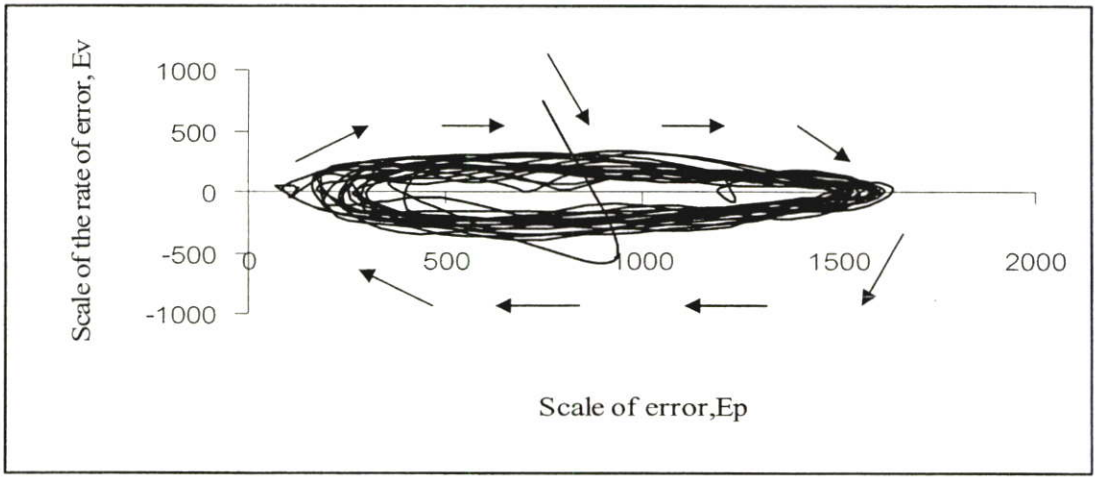


รูปที่ 4.33 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.29

ในรูปที่ 4.34 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันมาก เนื่องจากแขนกลมีการแกว่งไม่คงที่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.35 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

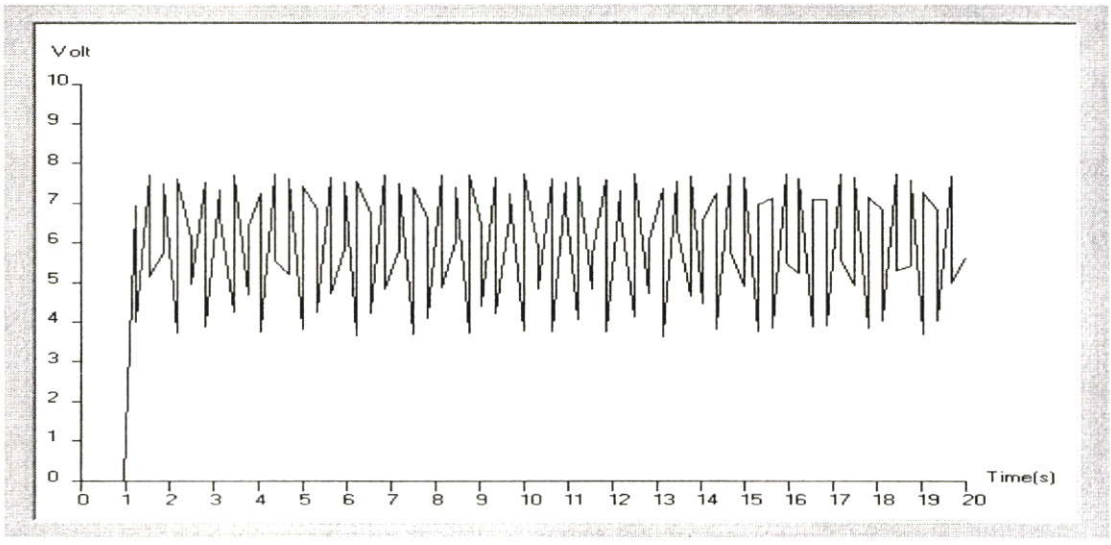


รูปที่ 4.34 ผลสัญญาณควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของ แขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80องศา ของรูปที่ 4.30

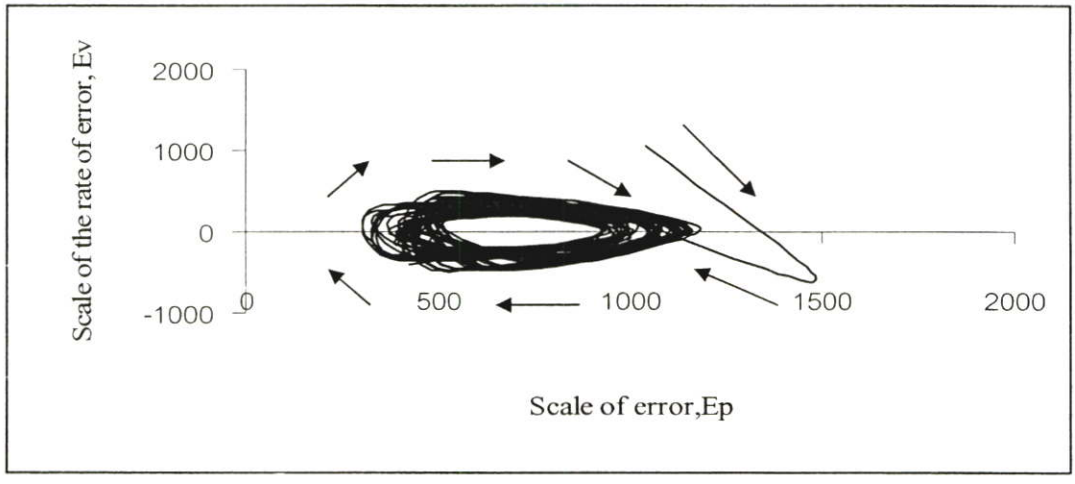


รูปที่ 4.35 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.30

ในรูปที่ 4.36 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันมาก เนื่องจากแขนกลมีการแกว่งไม่คงที่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.37 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าไม่มีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด



รูปที่ 4.36 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.31



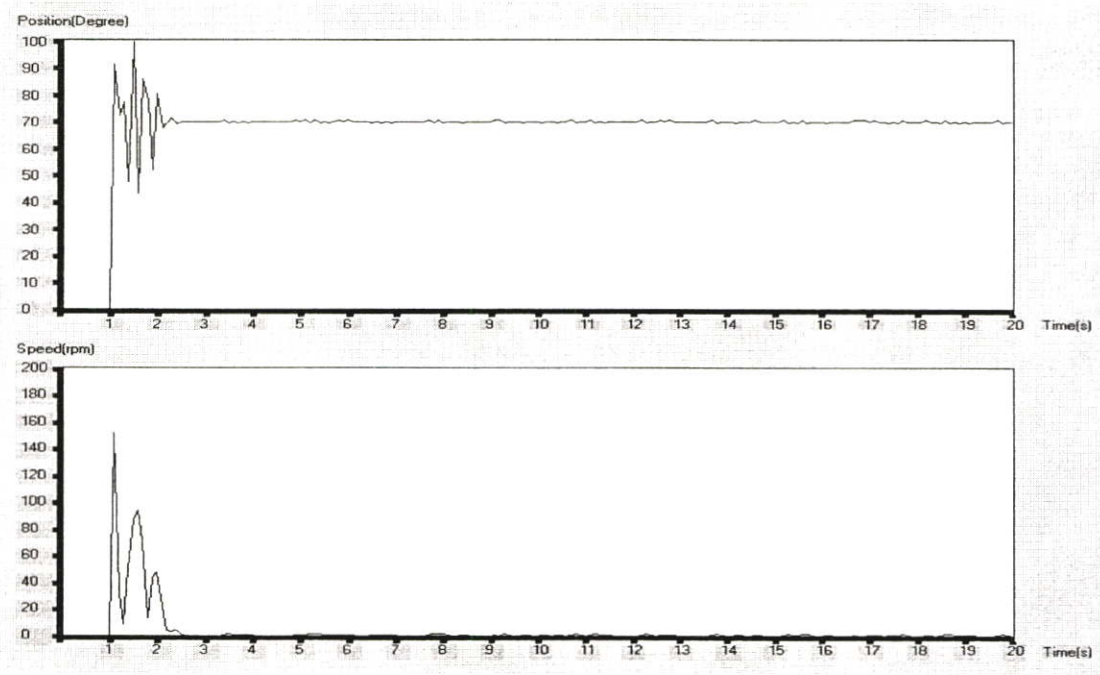
รูปที่ 4.37 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.31

จากรูปที่ 4.29 ถึง 4.37 สรุปได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะพบว่า ให้ค่าผลตอบสนองที่ไม่ดีคือมีการแกว่งของสัญญาณพุ่งเกินเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย ค่าสัญญาณที่ควบคุมมอเตอร์ก็ไม่คงที่และระนาบเฟสผิดพลาดยังไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

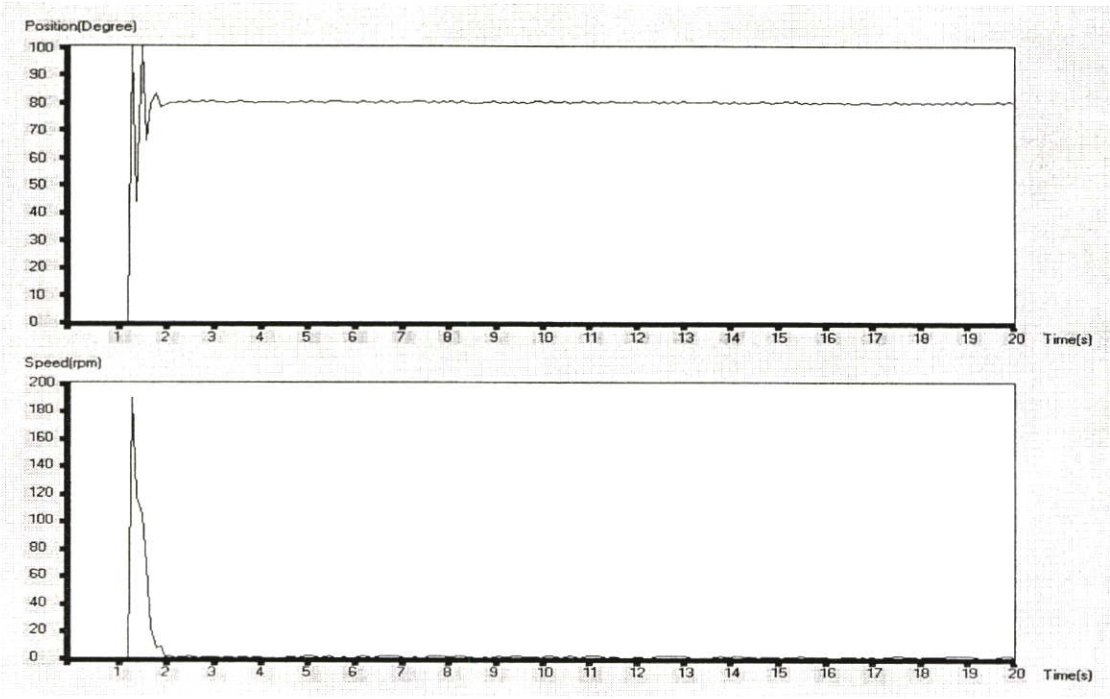
4.5.2 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะและความชำนาญของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดสอบผลตอบสนองที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์จากผู้ใช้ที่มีทักษะโดยตั้งค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา

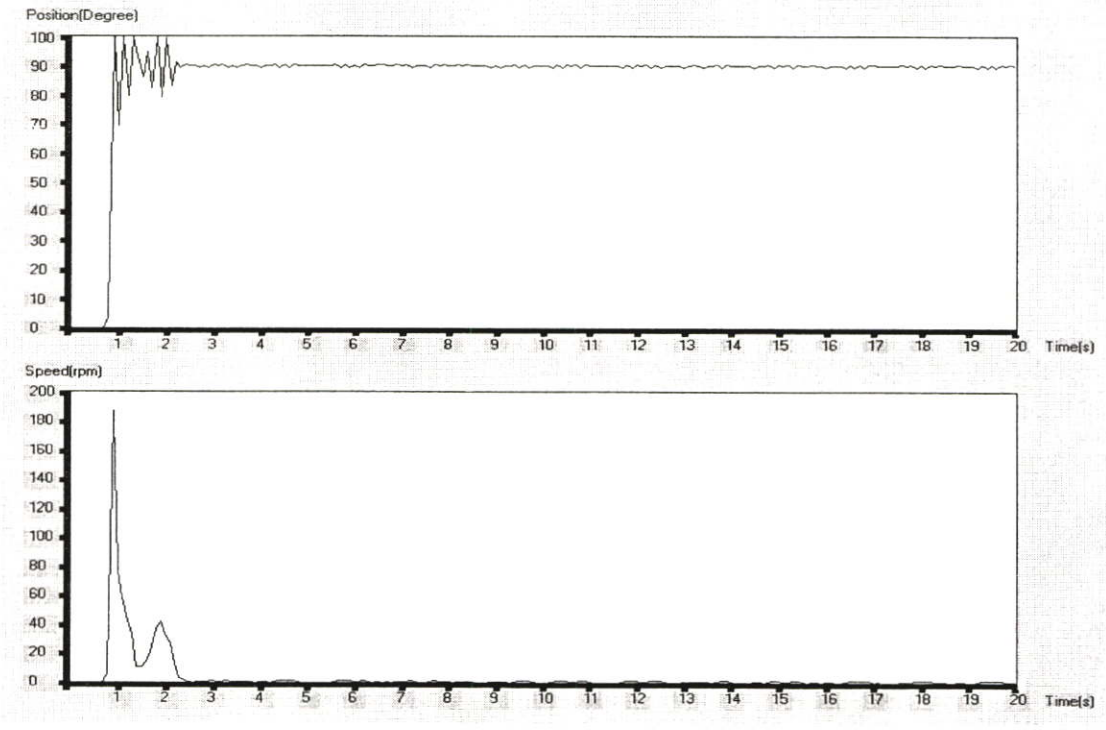
ในรูปที่ 4.38, 4.39, 4.40 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของสัญญาณที่ลดน้อยลงแต่จะมีค่าการพุ่งขึ้นในขณะเริ่มการทำงานของระบบ และเมื่อนำมาเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วจะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันคือความเร็วจะสูงขึ้นในขณะเริ่มการทำงานและเมื่อเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้วความเร็วก็จะคงที่



รูปที่ 4.38 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ

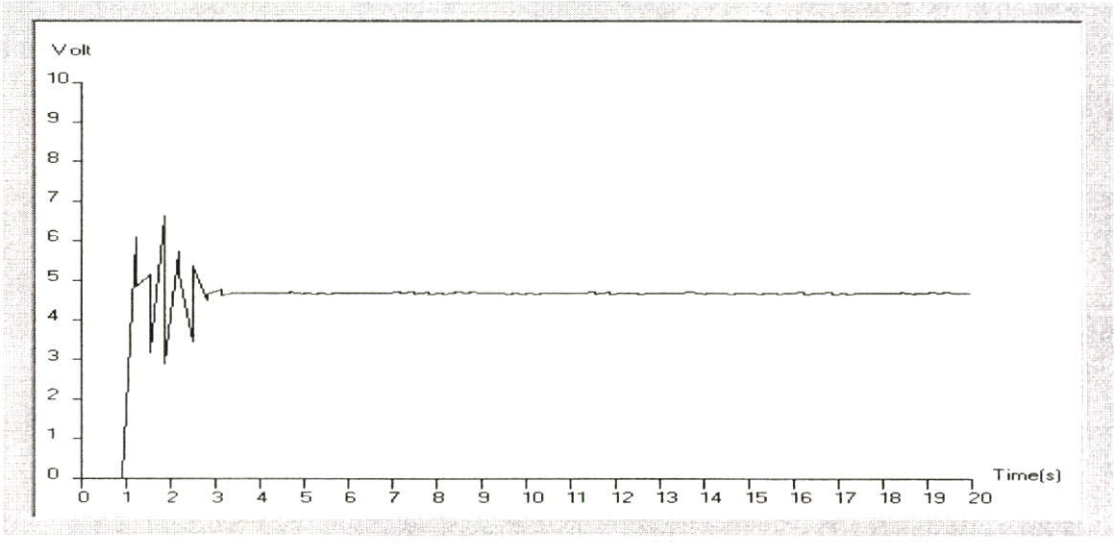


รูปที่ 4.39 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ

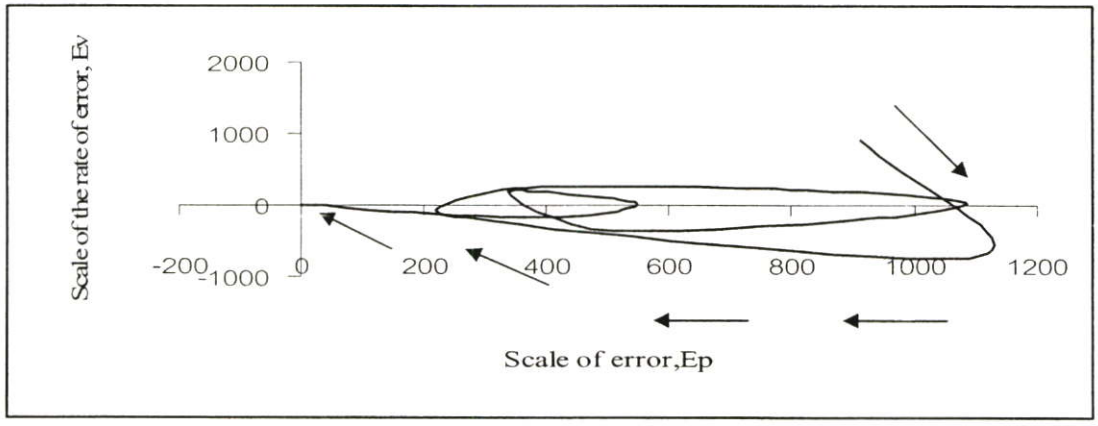


รูปที่ 4.40 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ

ในรูปที่ 4.41 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.38 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันขณะเริ่มทำงานเนื่องจากแขนกลต้องพยายามที่จะลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อแขนกลถึงค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้แรงดันก็จะเริ่มนิ่ง และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน และรูปที่ 4.42 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.38 จะเห็นได้ว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

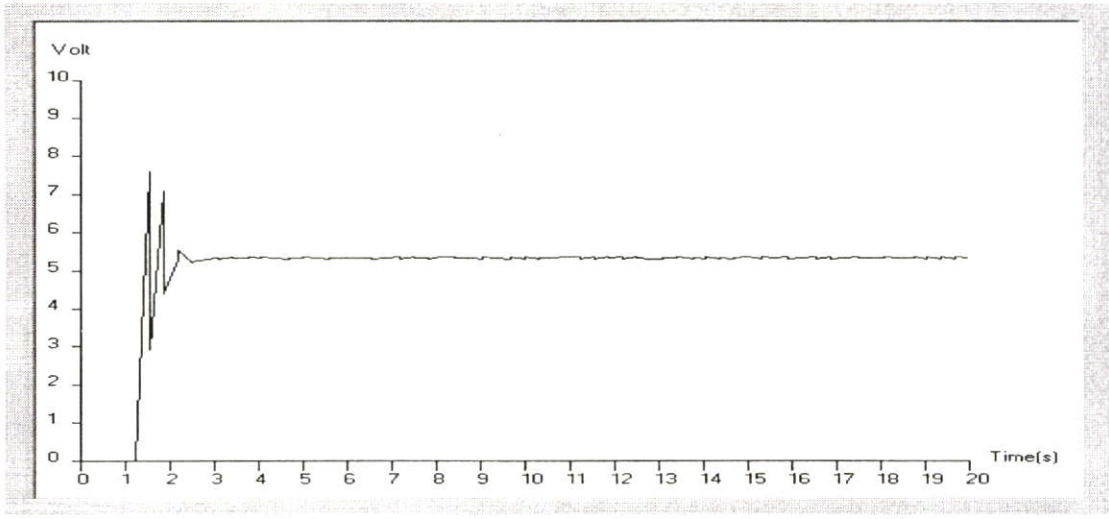


รูปที่ 4.41 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.38

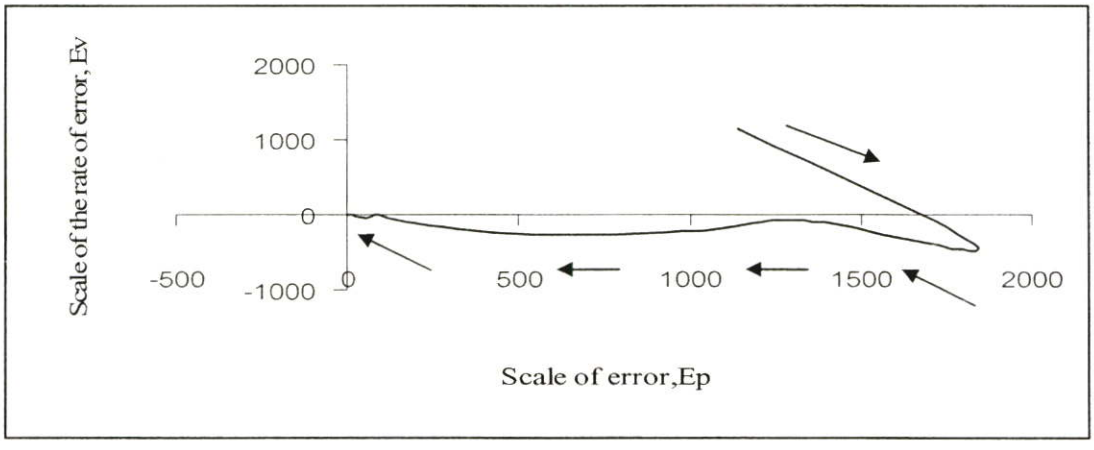


รูปที่ 4.42 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.38

ในรูปที่ 4.43 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.39 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันขณะเริ่มทำงานเนื่องจากแขนกลต้องพยายามที่จะลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อแขนกลถึงค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้แรงดันก็จะเริ่มนิ่ง และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.44 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.39 จะเห็นได้ว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

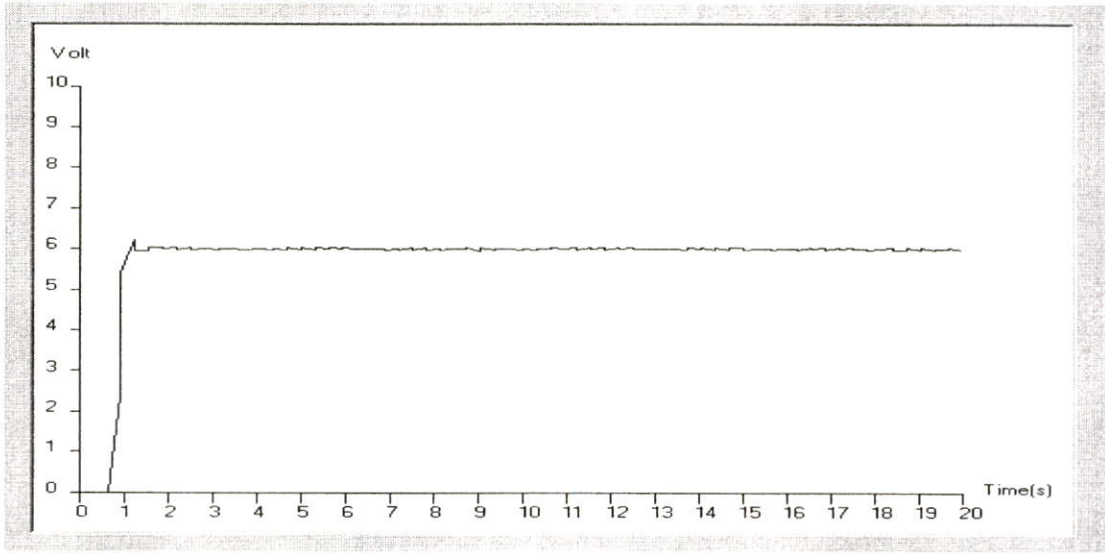


รูปที่ 4.43 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.39

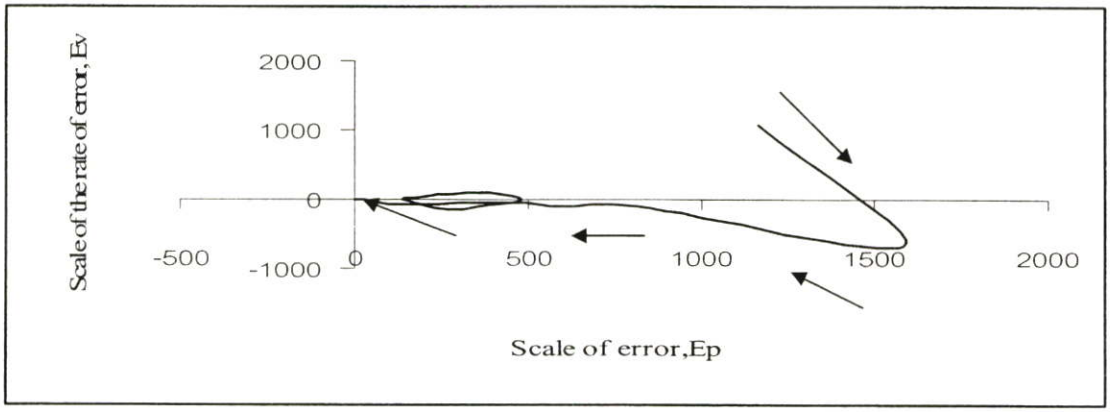


รูปที่ 4.44 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.39

ในรูปที่ 4.45 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.40 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันขณะเริ่มทำงานเนื่องจากแขนกลต้องพยายามที่จะลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายและ เมื่อแขนกลถึงค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้แรงดันก็จะเริ่มนิ่ง และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.46 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.40 จะเห็นได้ว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด



รูปที่ 4.45 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.40



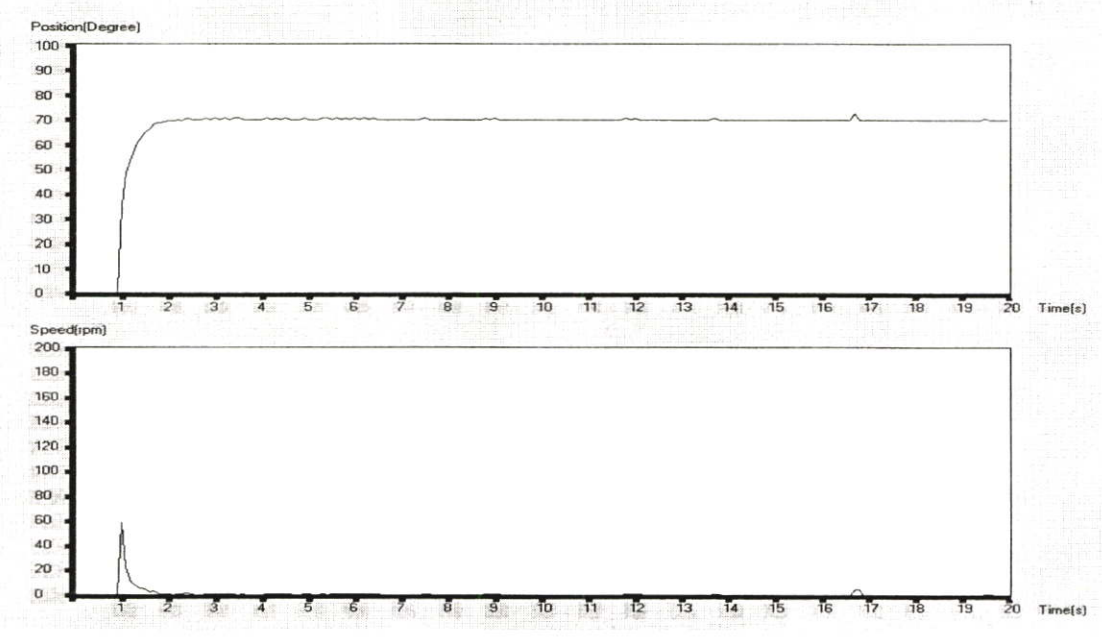
รูปที่ 4.46 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.40

จากรูปที่ 4.38 ถึง 4.46 สรุปได้ว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะพบว่าให้ค่าผลตอบสนองที่พอรับได้แต่จะมีการแกว่งของสัญญาณพุ่งเกินในขณะเริ่มทำงานระบบโดยเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย และระนาบเฟสผิดพลาดที่ได้ยังมีแนวโน้มที่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

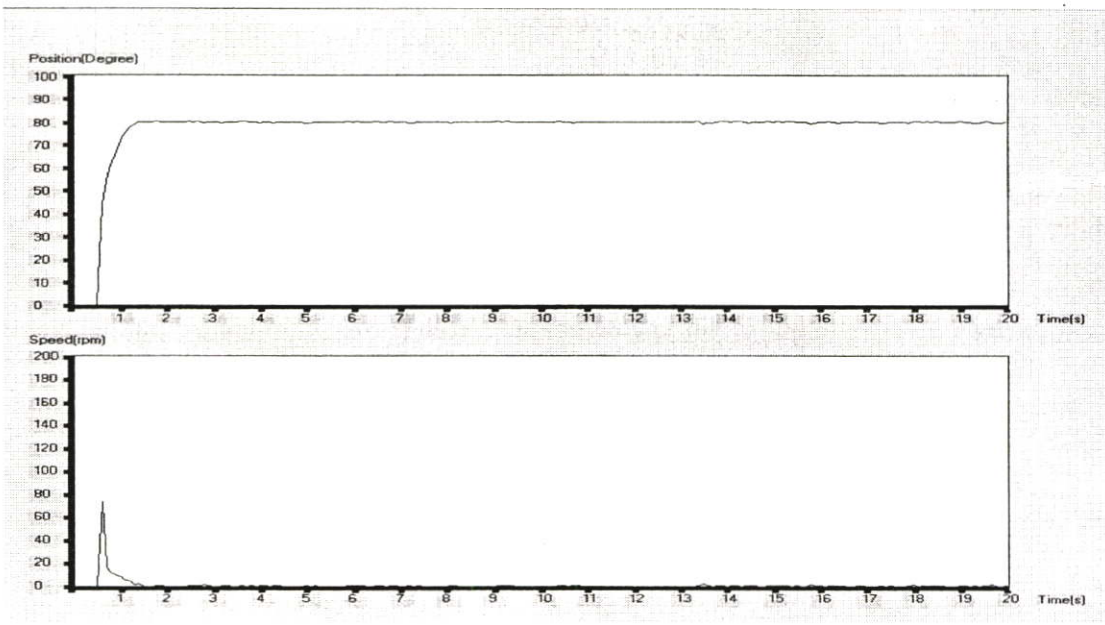
4.5.3 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70 , 80, 90 องศา

การทดลองนี้เป็นการทดสอบผลตอบสนองที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยตั้งค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา

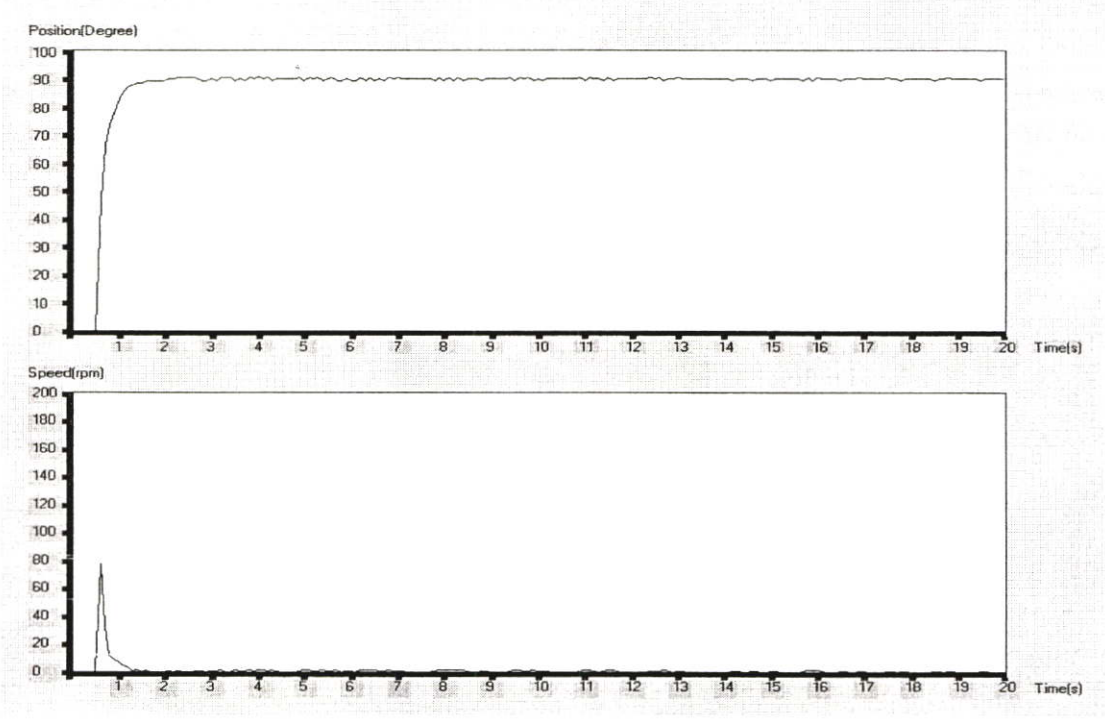
ในรูปที่ 4.47, 4.48, 4.49 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความราบเรียบขึ้นเมื่อเข้าหาเป้าหมายและมีการแกว่งของสัญญาณพุ่งเกินที่น้อยมาก และเมื่อนำผลการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์นำมาเทียบค่าความเร็ว จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันคือความเร็วของมอเตอร์จะค่อยๆเพิ่มระดับไปจนถึงค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้และเมื่อเข้าสู่ค่าเป้าหมายแล้วความเร็วก็จะคงที่



รูปที่ 4.47 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

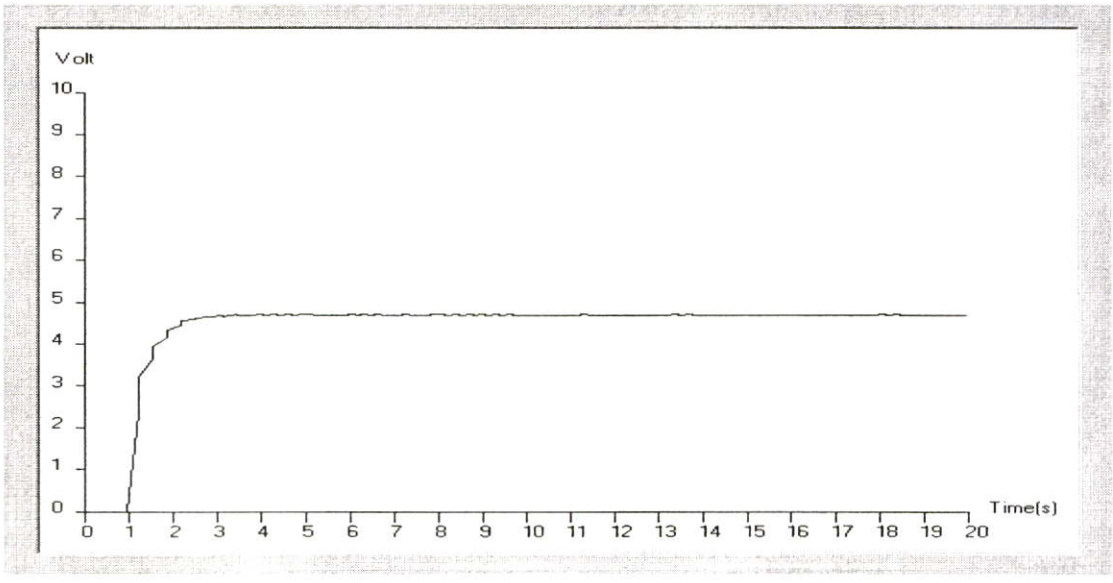


รูปที่ 4.48 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

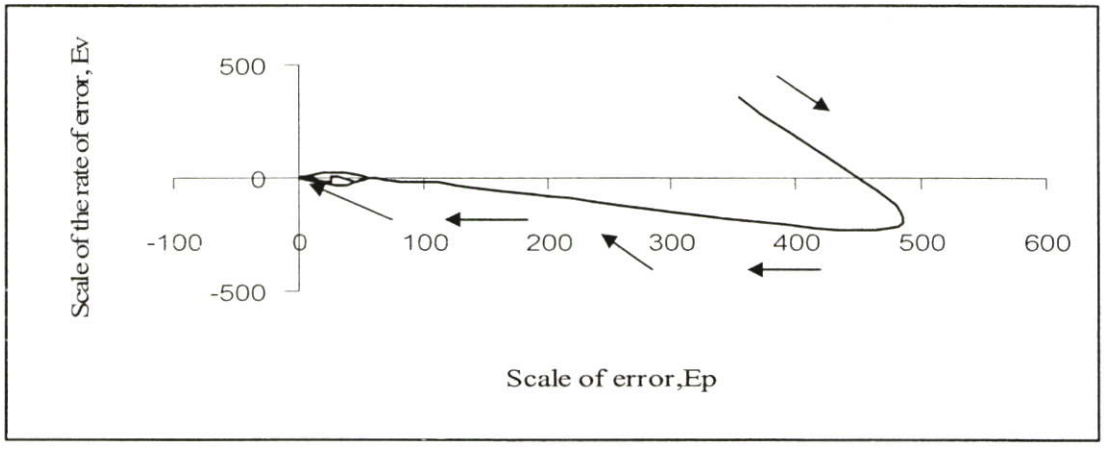


รูปที่ 4.49 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

ในรูปที่ 4.50 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.47 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.47 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.51 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.47 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

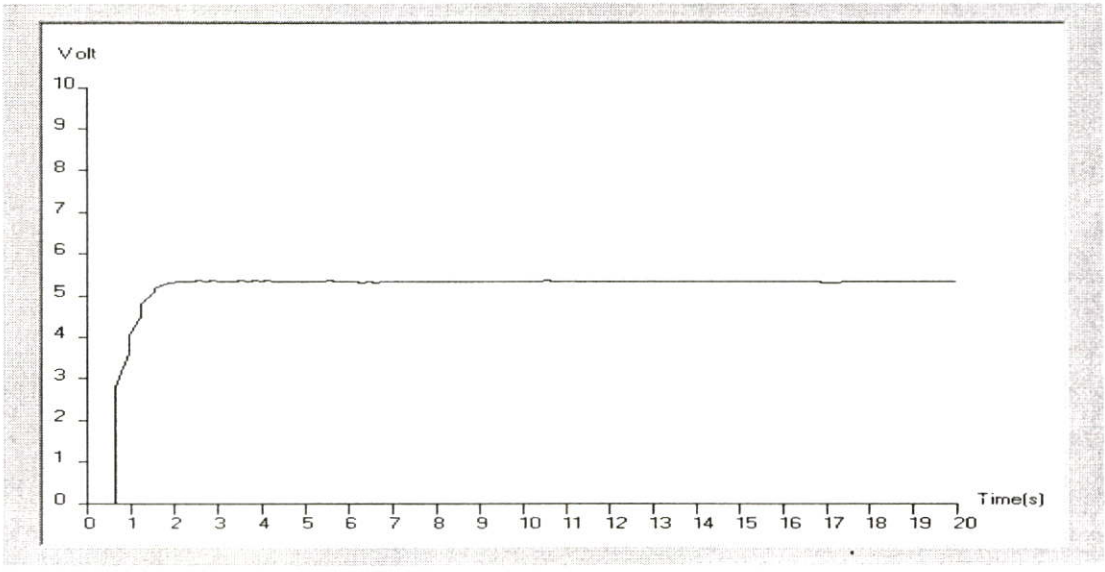


รูปที่ 4.50 ผลสัญญาณการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.47

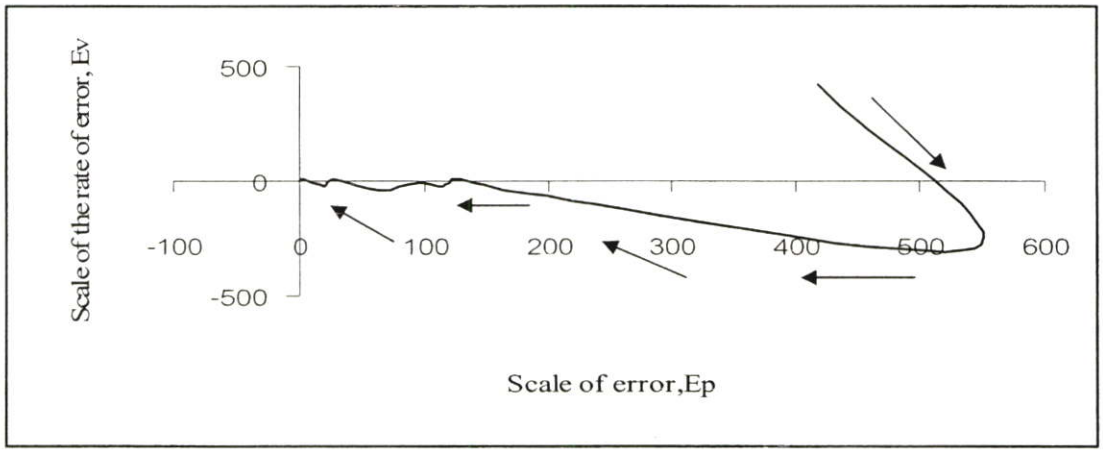


รูปที่ 4.51 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.47

ในรูปที่ 4.52 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.48 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.48 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.53 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.48 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

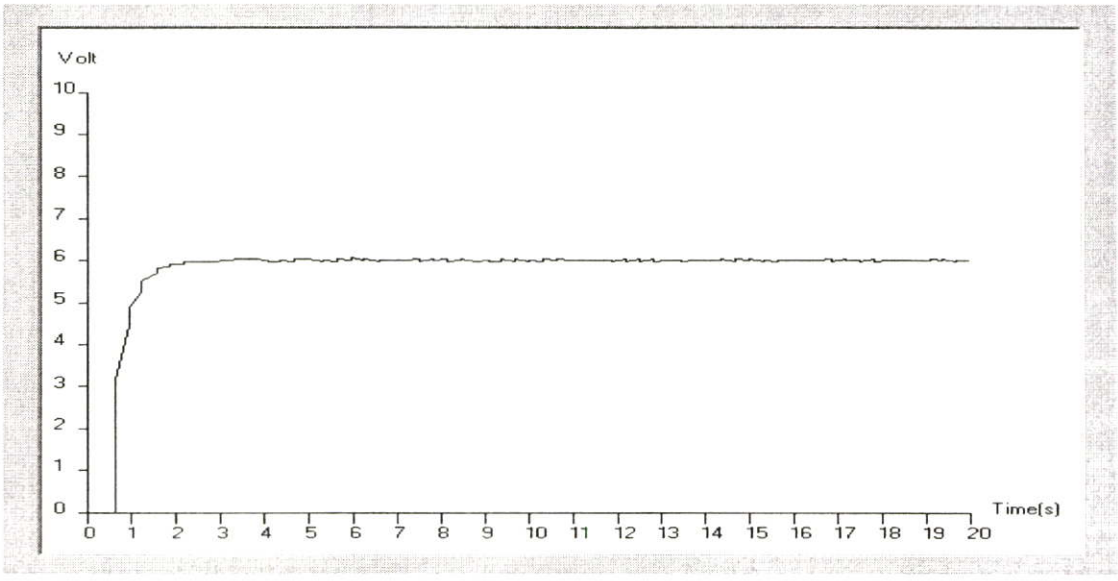


รูปที่ 4.52 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.48

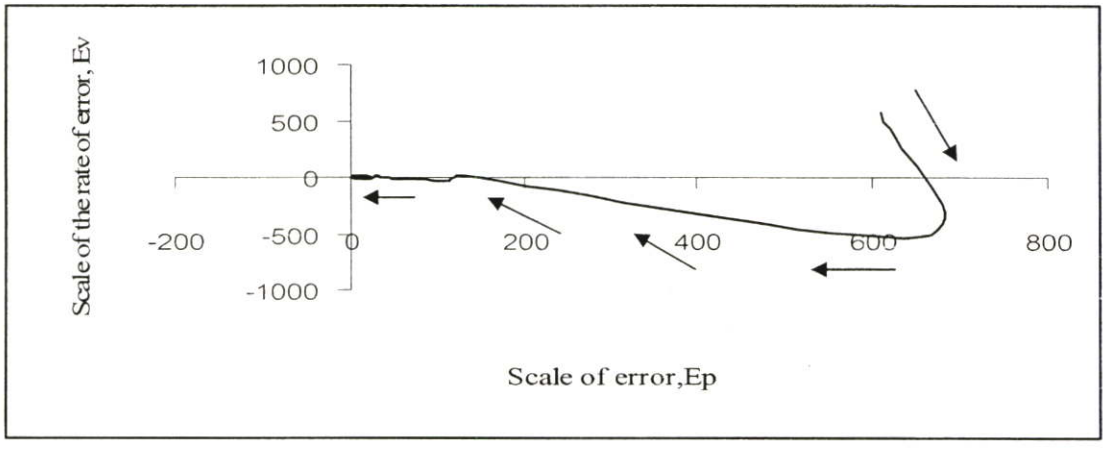


รูปที่ 4.53 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.48

ในรูปที่ 4.54 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.49 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.49 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.55 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.49 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิด



รูปที่ 4.54 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว ค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.49



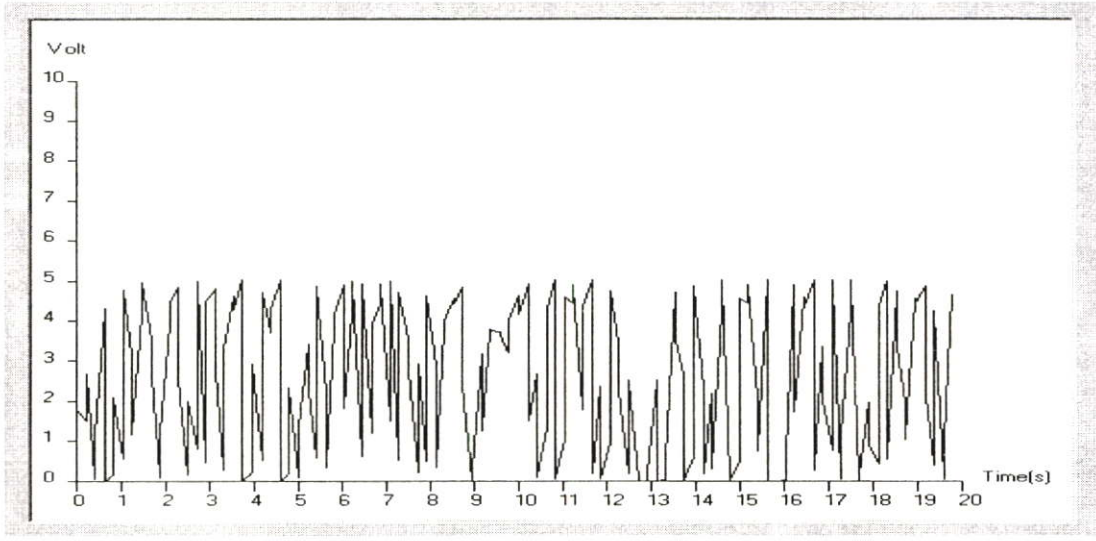
รูปที่ 4.55 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.49

จากรูปที่ 4.47 ถึง 4.55 การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์พบว่า ให้ค่าผลตอบสนองที่ดีมีการแกว่งของสัญญาณพุ่งเกินน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมาย ค่าสัญญาณที่ควบคุมมอเตอร์ก็คงที่เมื่อเข้าสู่เป้าหมายและระนาบเฟสผิดพลาดที่ได้ยังลู่เข้าสู่จุดกำเนิด สรุปว่าการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์เข้ามาช่วยปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดี นั้นได้ผลตอบสนองที่ดีกว่าการปรับแต่งโดยผู้ใช้และใช้เวลาที่รวดเร็วกว่า

4.5.4 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแบบแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

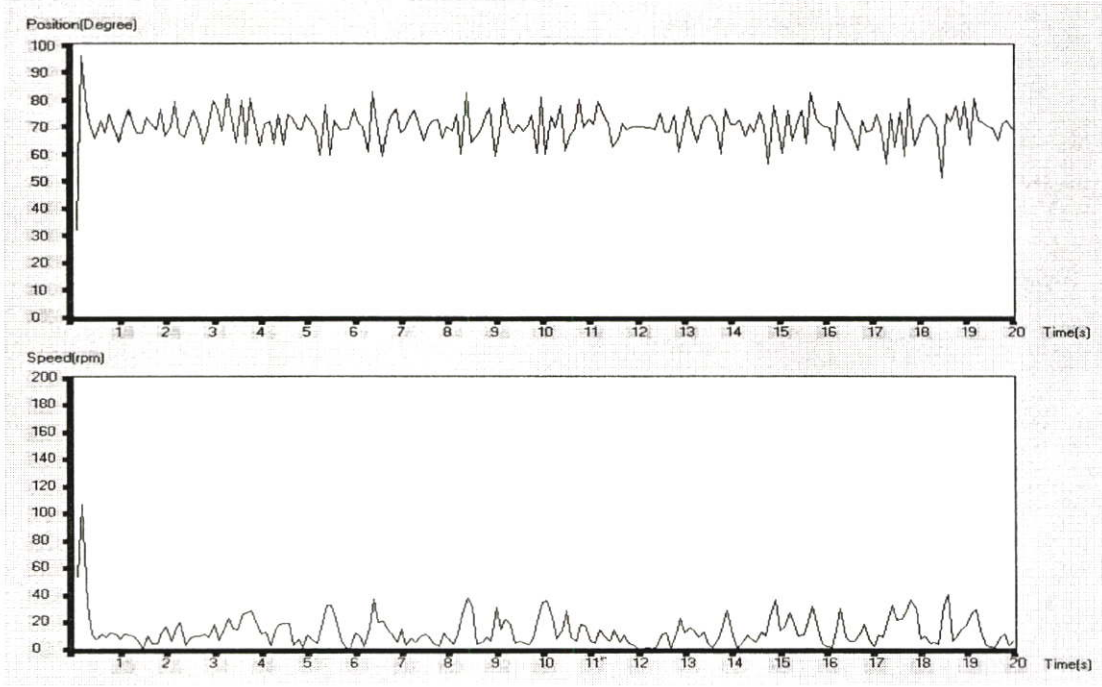
การทดลองนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์โดยเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map

โดยที่ในรูปที่ 4.56 เป็นสัญญาณอลวนจริงที่เพิ่มให้กับระบบซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จากผลที่ได้จะเห็นว่าแรงดันในแต่ละเวลานั้นไม่เท่ากันซึ่งเป็นไปตามสามการที่ (4.6)

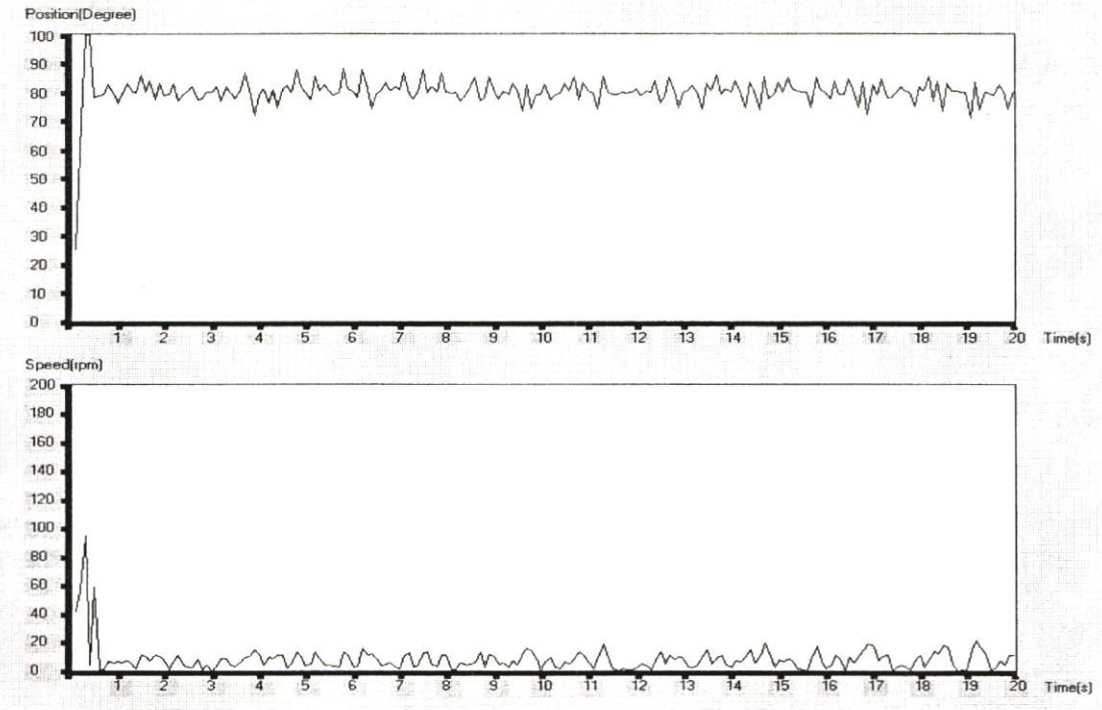


รูปที่ 4.56 สัญญาณรบกวนอลวน logistic map ในระบบจริง

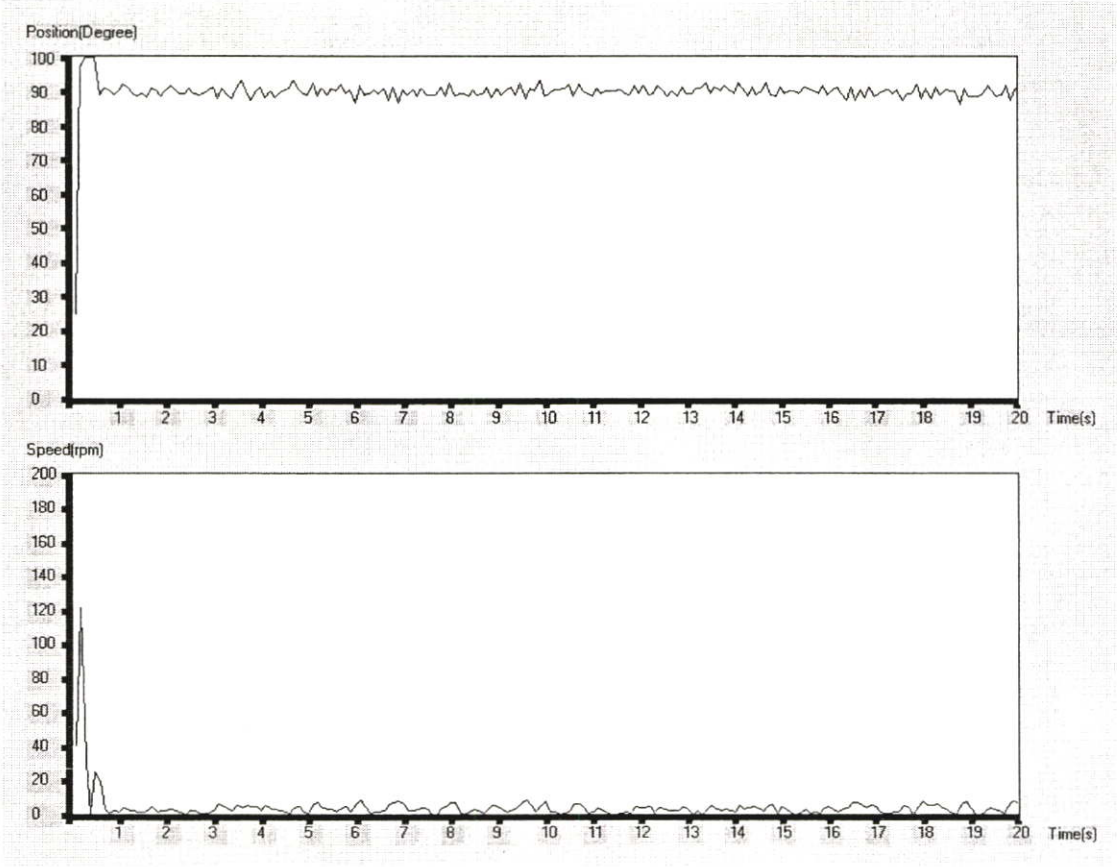
ในรูปที่ 4.57, 4.57, 4.59 จะเห็นได้ว่าผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีค่าเป้าหมาย 70, 80, 90 องศา ที่มีการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนให้กับระบบนั้นพบว่ามีการแกว่งมากเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้โดย และเมื่อมองความเร็วที่ได้จะเห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์อยู่ตลอดเวลาซึ่งสอดคล้องกับค่าของตำแหน่งของแขนกล



รูปที่ 4.57 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา

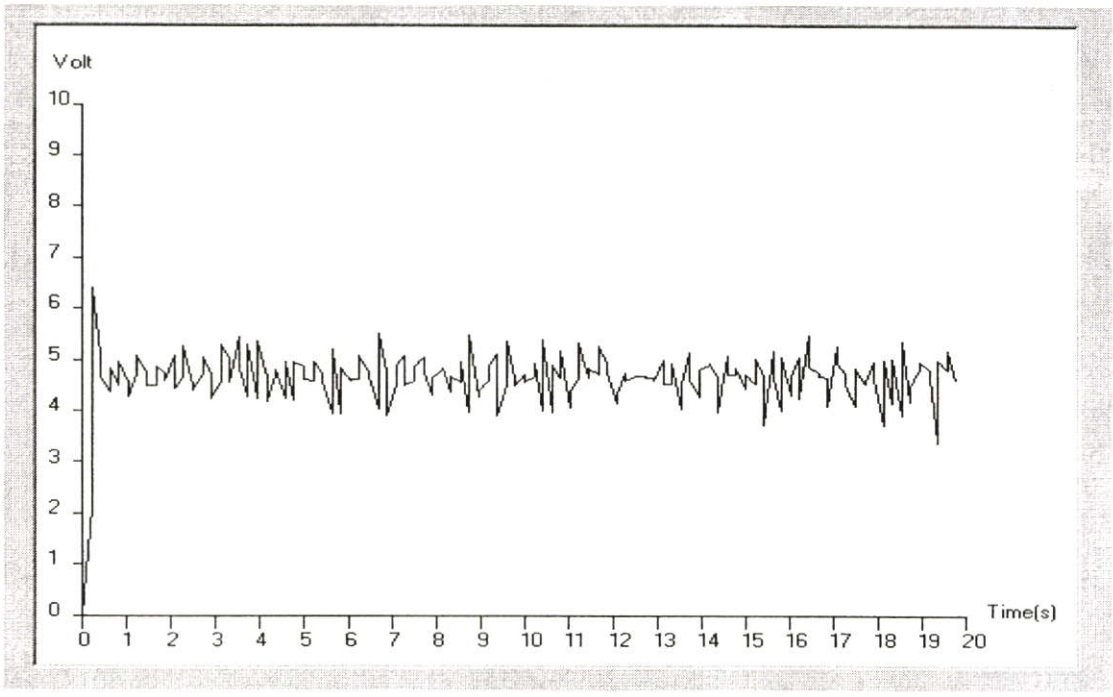


รูปที่ 4.58 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา

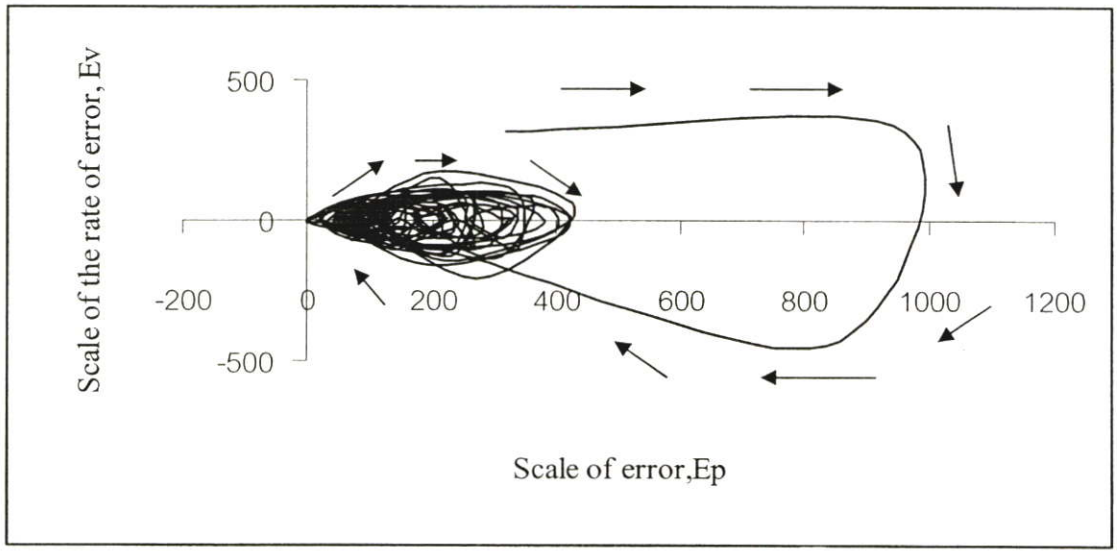


รูปที่ 4.59 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา

ในรูปที่ 4.60 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.57 ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ไม่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.57 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.61 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.57 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

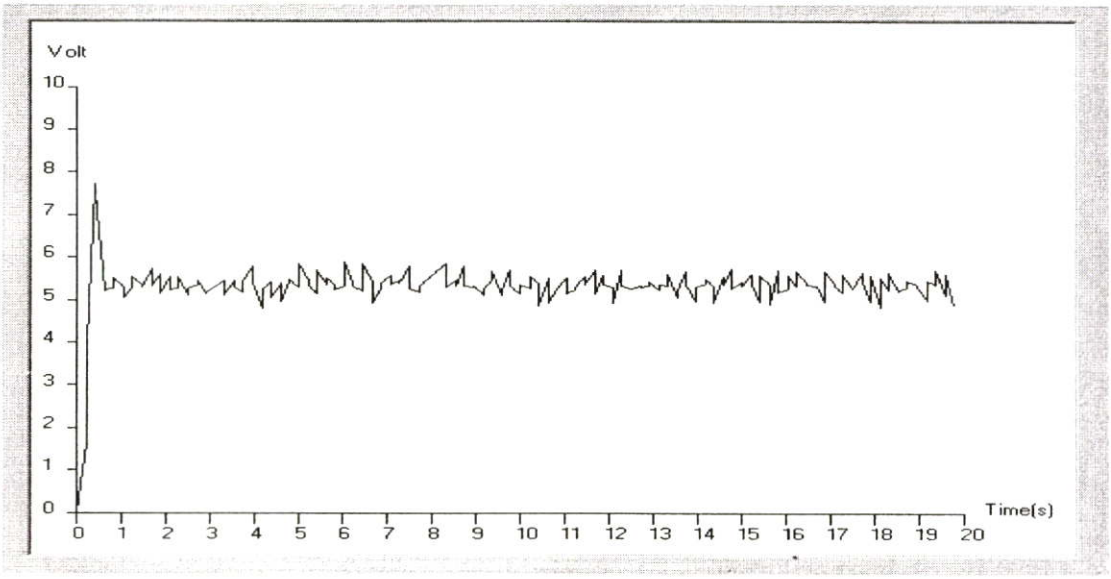


รูปที่ 4.60 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.57

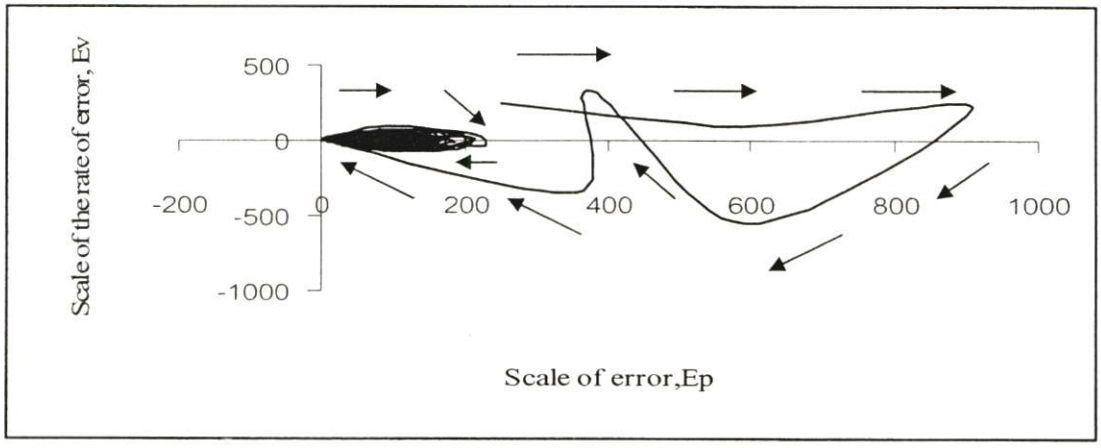


รูปที่ 4.61 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.57

ในรูปที่ 4.62 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.58 ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ไม่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.58 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.63 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.58 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด

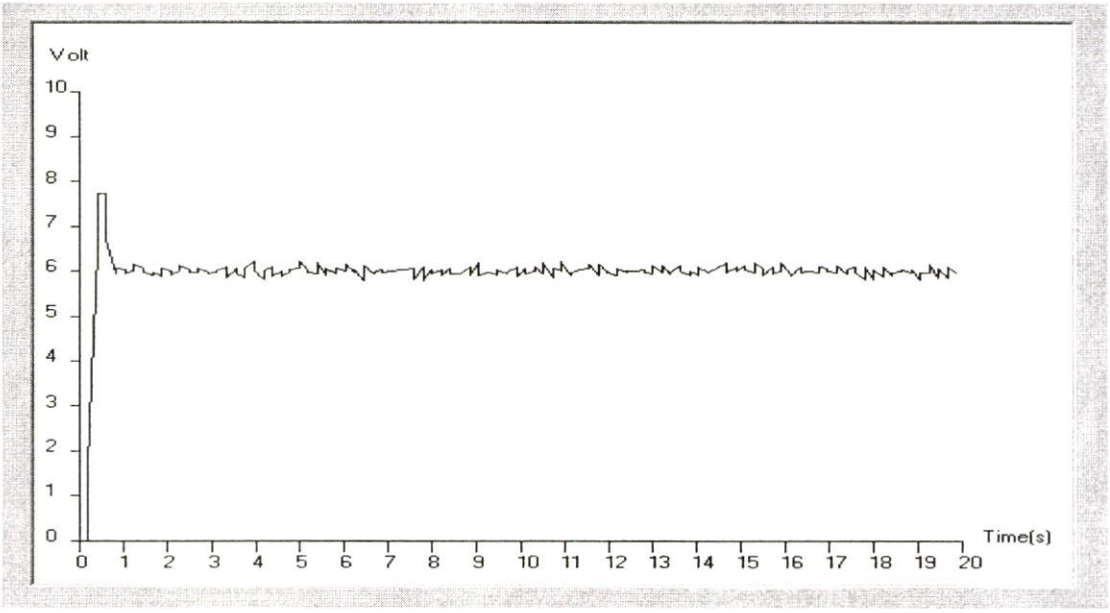


รูปที่ 4.62 ผลสัญญาณการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.58

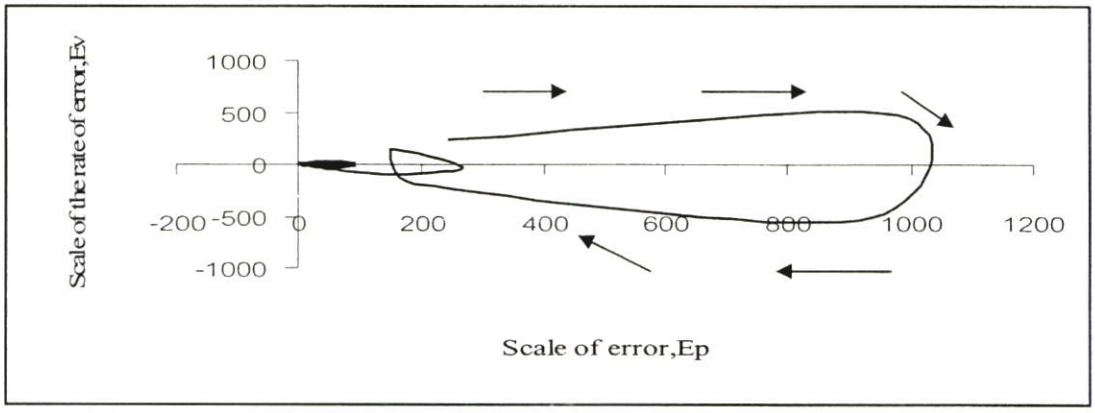


รูปที่ 4.63 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.58

ในรูปที่ 4.64 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.59 ขณะมีสัญญาณรบกวนอลวน ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าแรงดันมีค่าที่ไม่ราบเรียบขณะที่เข้าสู่ค่าเป้าหมาย และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.59 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.65 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.59 จะเห็นว่าทิศทางของค่าผิดพลาดไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด



รูปที่ 4.64 ผลการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.59



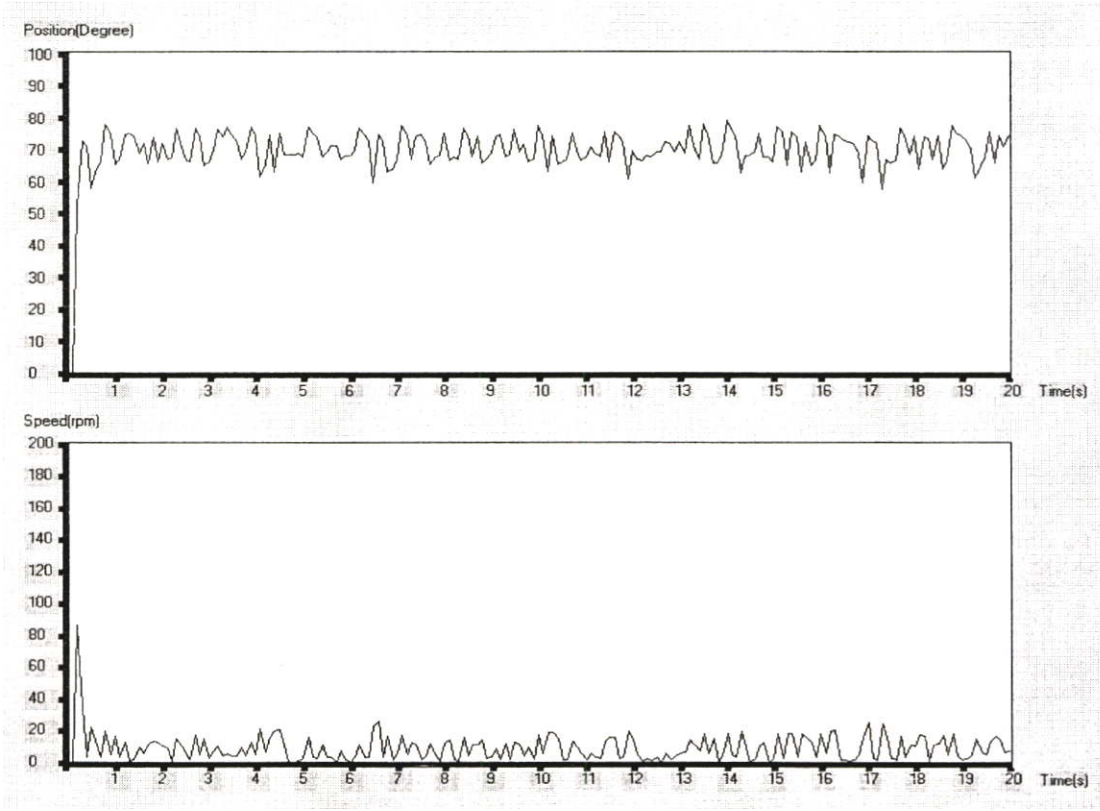
รูปที่ 4.65 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.59

จากรูป 4.57 ถึง 4.65 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map พบว่ามีการแกว่งของแขนกลเมื่อเทียบกับค่าเป้าหมายอีกทั้งค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์นั้นมีค่าไม่คงที่ และเมื่อดูจากระนาบเฟสผิดพลาดของผลตอบสนองพบว่าไม่ลู่เข้าสู่จุดกำเนิด ดังนั้นจะได้นำผลการทดลองนี้ไปทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ในหัวข้อต่อไป

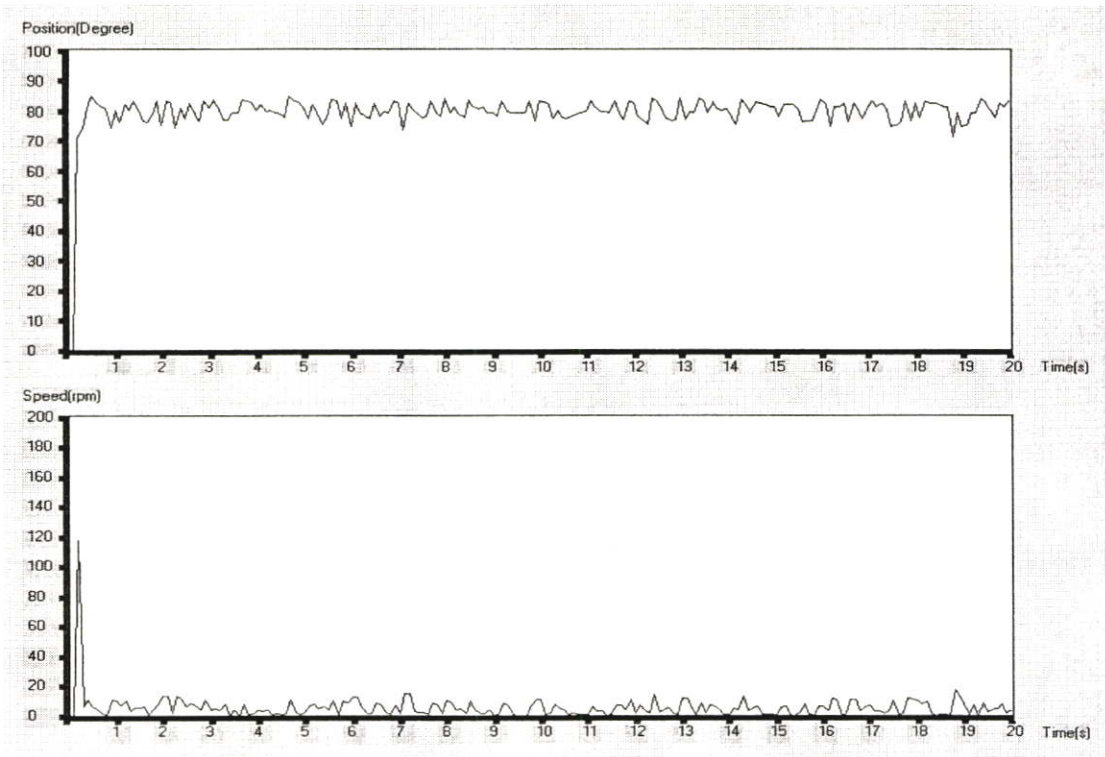
4.5.5 ผลตอบสนองระบบจริงของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic mapโดยกำหนดค่าเป้าหมายไว้ที่ 70, 80, 90 องศา

ในการทดลองนี้จะทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 องศา

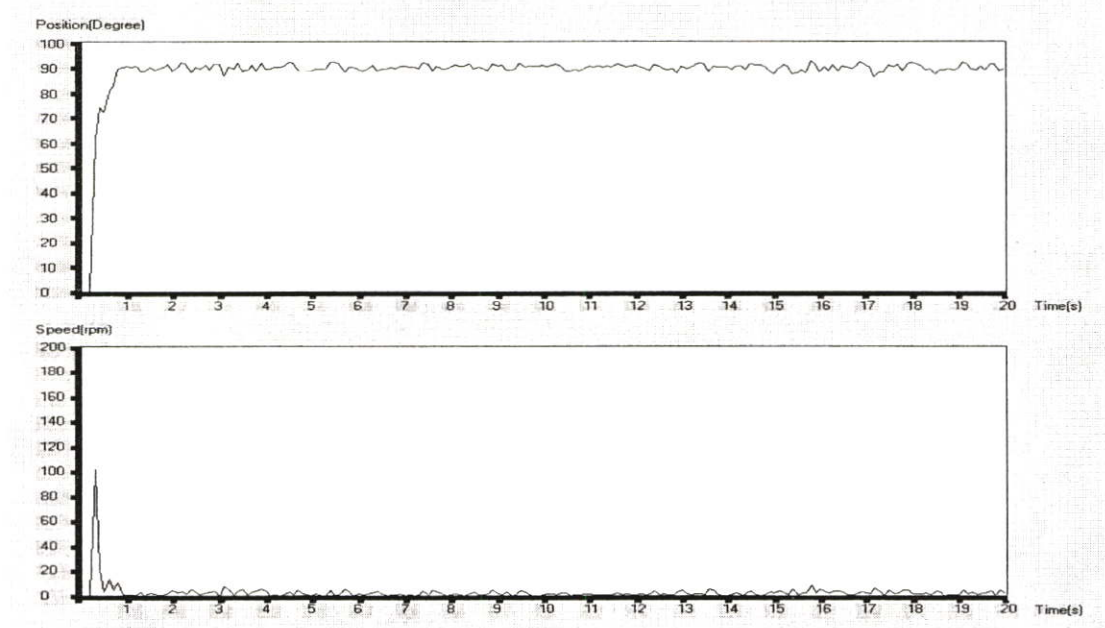
ในรูปที่ 4.66, 4.67, 4.68 เป็นผลตอบสนองที่ได้จากการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70, 80, 90 ซึ่งจะเห็นว่าการแกว่งของผลตอบสนองที่ได้มีค่าพุ่งเกินที่ลดน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.57, 4.58, 4.59



รูปที่ 4.66 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 70 องศา

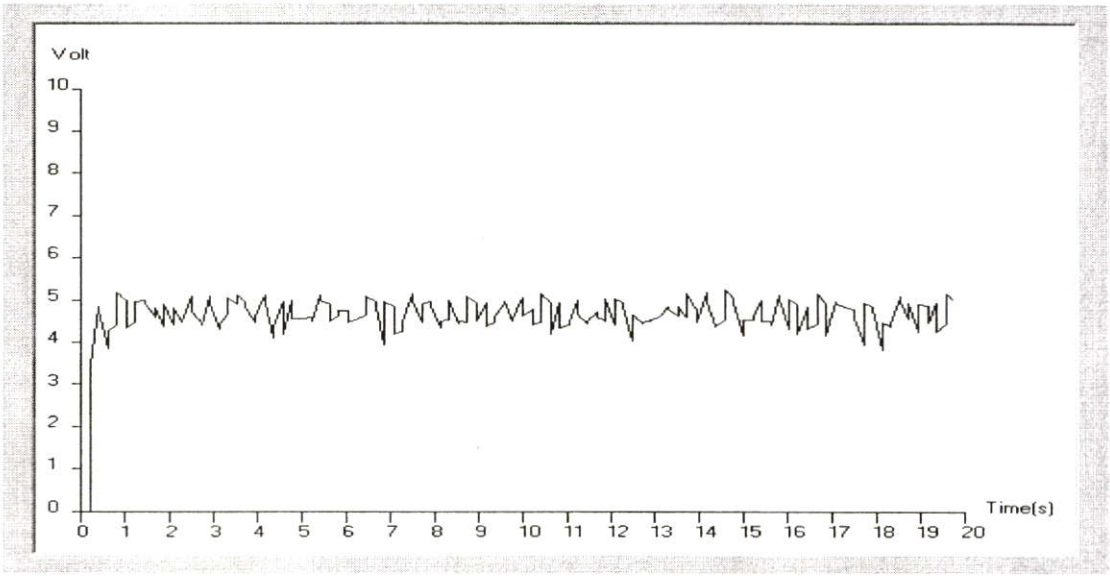


รูปที่ 4.67 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 80 องศา

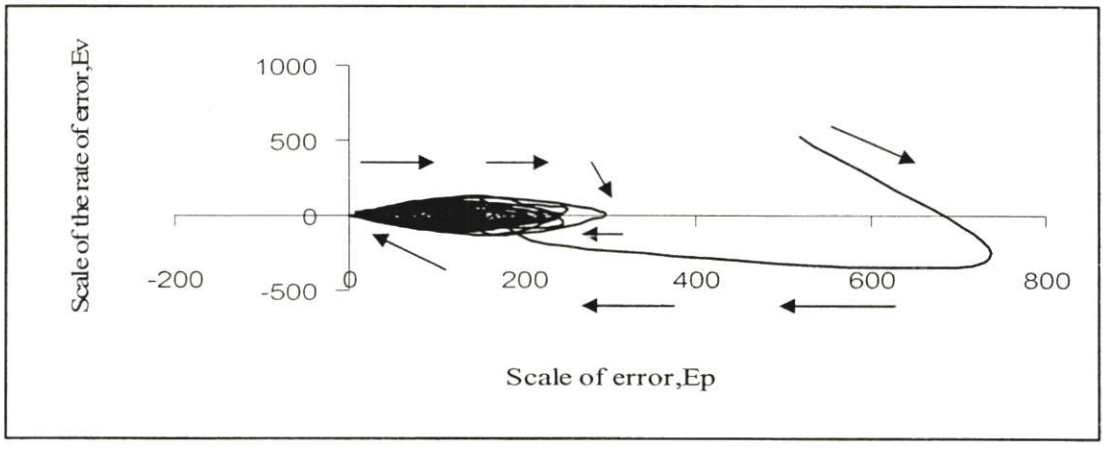


รูปที่ 4.68 ผลทดลองระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90 องศา

ในรูปที่ 4.69 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.66 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ขณะที่ทำการขจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าการแกว่งของแรงดันลดน้อยลงแต่ยังมีการแกว่งของระดับแรงดันอยู่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.66 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.70 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.66 จะเห็นว่าการวนรอบของค่าผิดพลาดลดน้อยลง

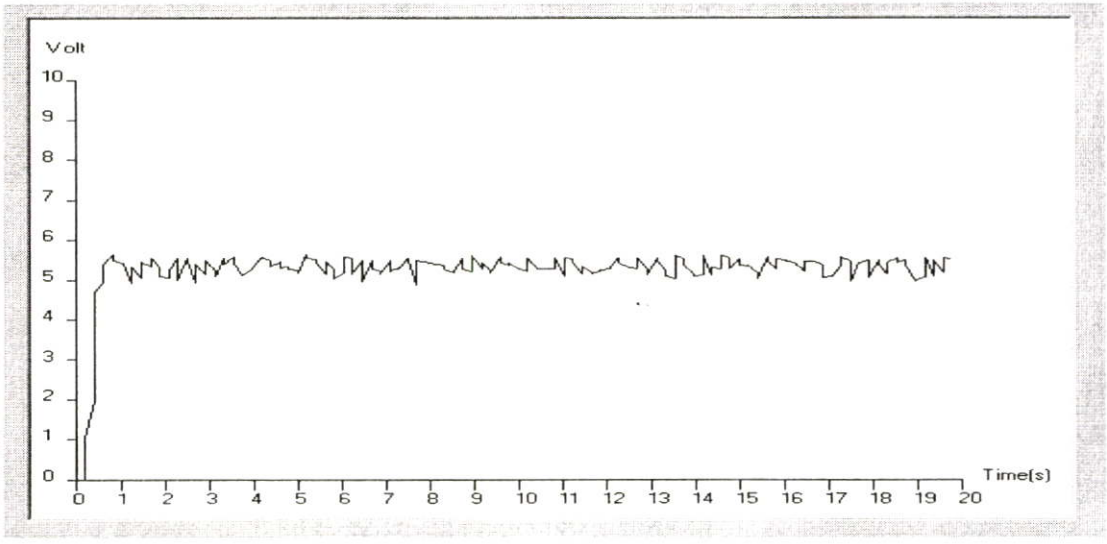


รูปที่ 4.69 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.66

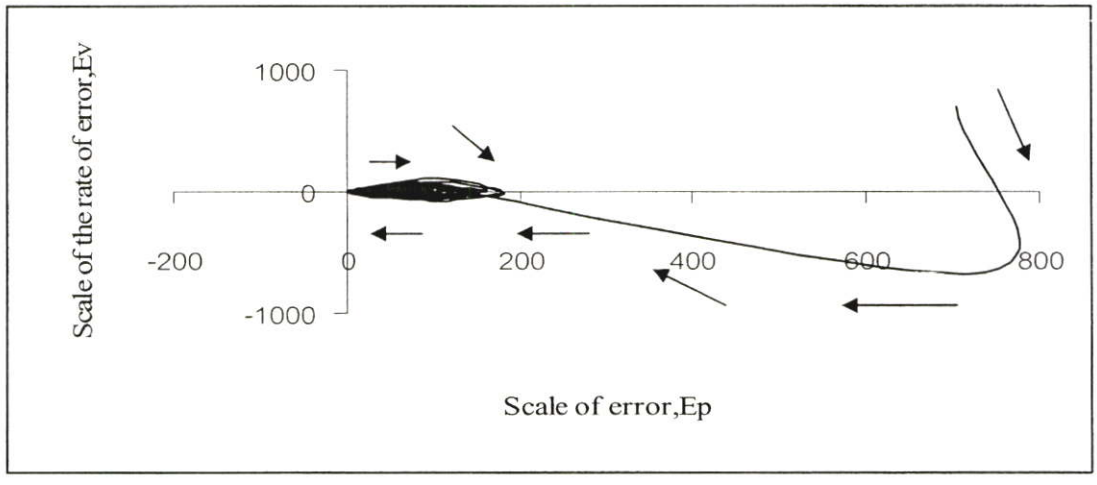


รูปที่ 4.70 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 70 องศา ของรูปที่ 4.66

ในรูปที่ 4.71 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.67 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ขณะที่ทำการขจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าการแกว่งของแรงดันลดน้อยลงแต่ยังมีการแกว่งของระดับแรงดันอยู่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.67 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.72 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.67 จะเห็นว่าการวนรอบของค่าผิดพลาดลดน้อยลง

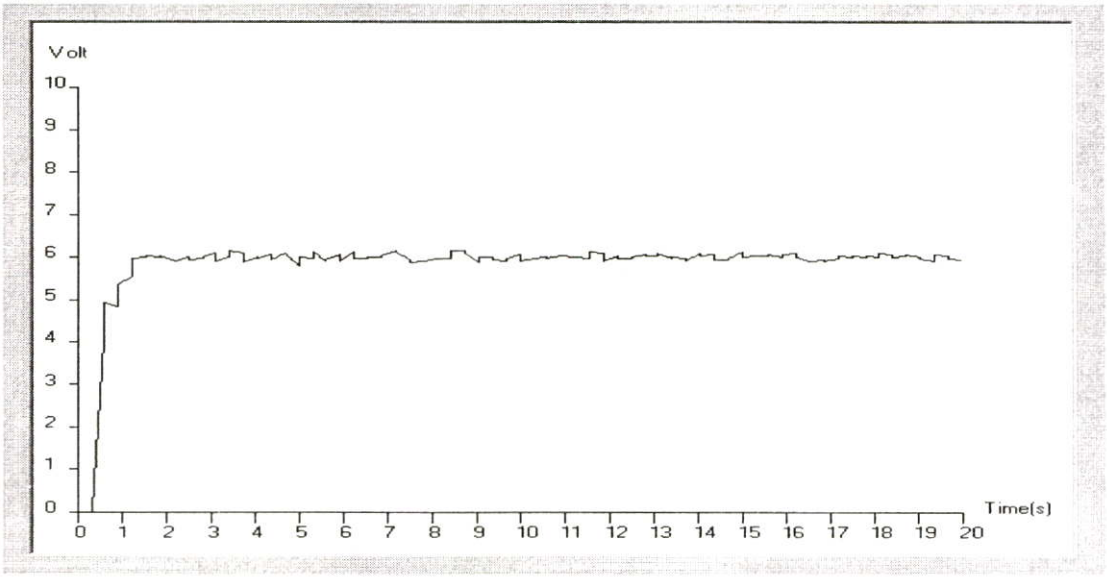


รูปที่ 4.71 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.67

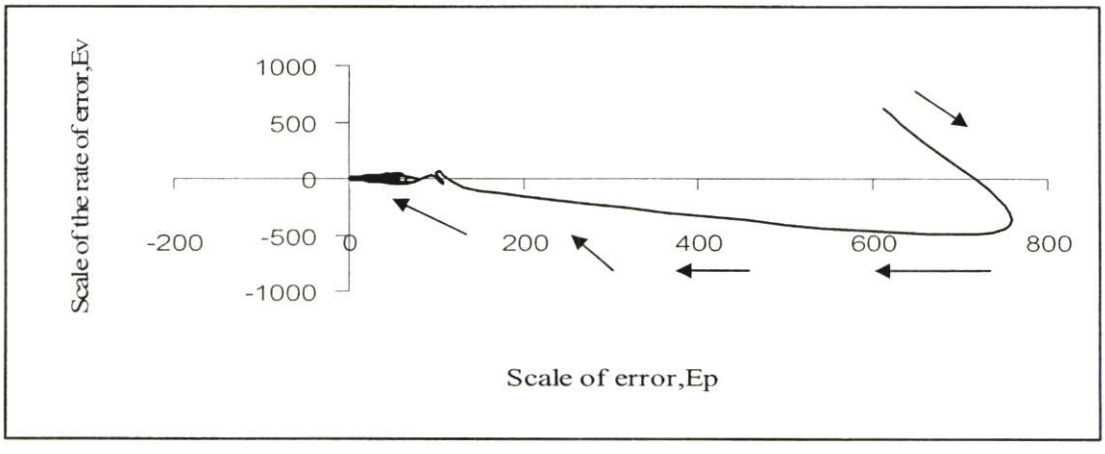


รูปที่ 4.72 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 80 องศา ของรูปที่ 4.67

ในรูปที่ 4.73 เป็นผลตอบสนองสัญญาณควบคุมของรูปที่ 4.68 ซึ่งเป็นผลทดลองจากระบบจริงของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ขณะที่ทำการขจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งจากภาพเป็นแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ จะเห็นได้ว่าการแกว่งของแรงดันลดน้อยลงแต่ยังมีการแกว่งของระดับแรงดันอยู่ และเมื่อเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งมอเตอร์กับค่าความเร็วในรูปที่ 4.68 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันและรูปที่ 4.74 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของรูปที่ 4.68 จะเห็นว่าการวนรอบของค่าผิดพลาดลดน้อยลง



รูปที่ 4.73 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.68

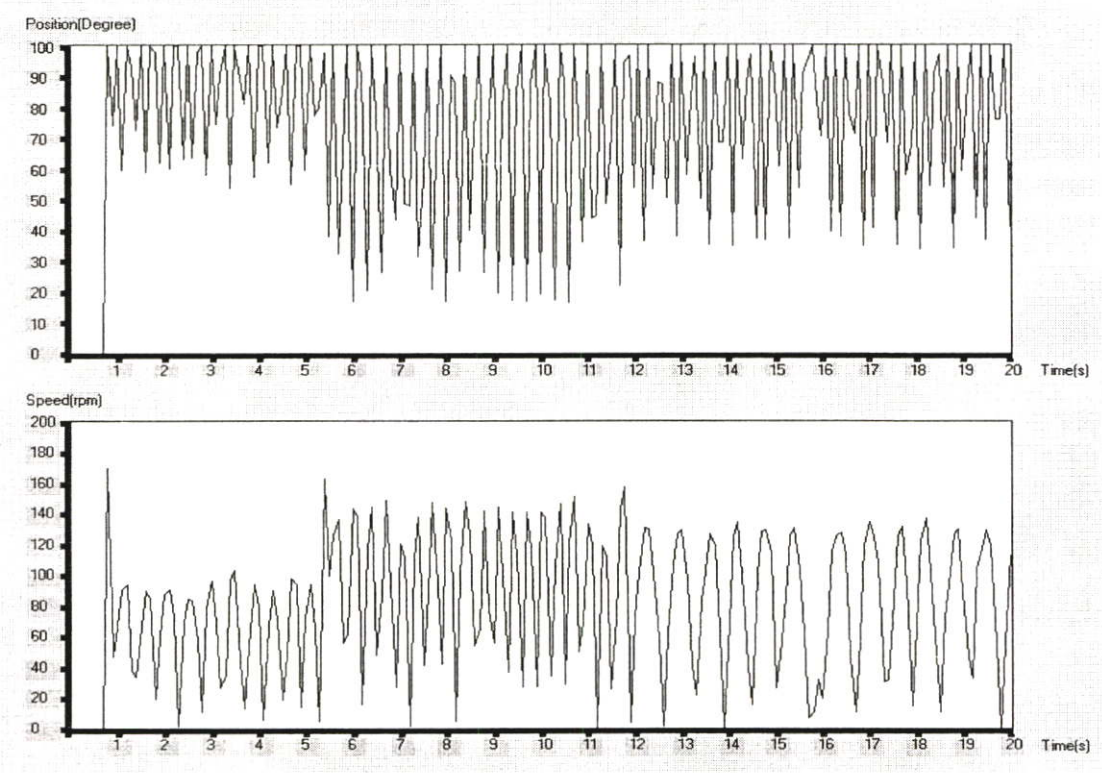


รูปที่ 4.74 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90 องศา ของรูปที่ 4.68

จากการทดลองในรูปที่ 4.667 ถึง 4.74 จะเห็นได้ว่าการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์นั้น สามารถขจัดสัญญาณรบกวนอลวนได้เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.57 ถึง 4.65 จะเห็นว่ารูปที่ 4.66, 4.67, 4.68 มีการแกว่งของผลตอบสนองที่น้อยกว่ารูปที่ 4.57, 4.58, 4.59 และระนาบเฟสผิดพลาดยังมีการวนรอบที่น้อยกว่าการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน

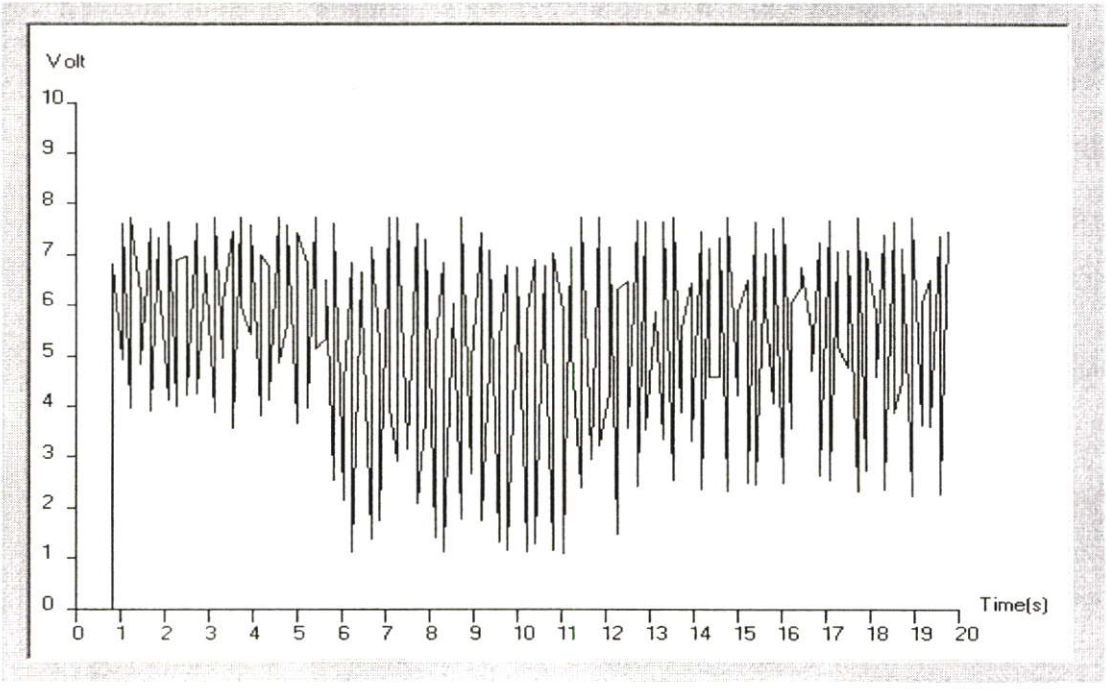
4.5.6 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ และความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว โดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา

การทดลองในรูปที่ 4.75 เป็นการควบคุมตำแหน่งของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ โดยเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายตามเวลาโดยเริ่มจาก 90 องศา และเปลี่ยนแปลงไป 70 องศาที่เวลา 5 วินาทีและเมื่อเวลาที่ 11 วินาทีให้เปลี่ยนค่าเป้าหมายไปที่ 80 องศา

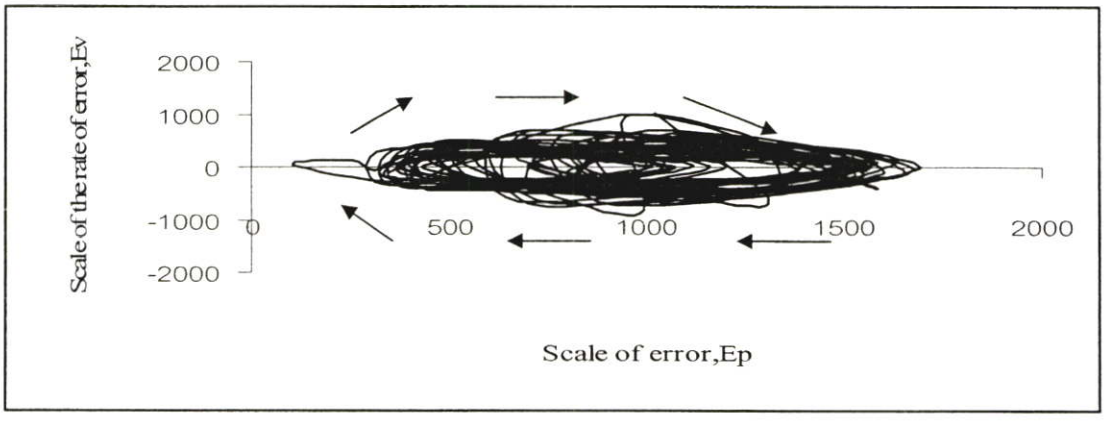


รูปที่ 4.75 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะ

ในรูปที่ 4.76 เป็นผลสัญญาณของระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.75 จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันตามผลตอบสนองสอดคล้องตามในรูปที่ 4.75 และระนาบเฟสความผิดพลาดมีการวนรอบตามค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.77



รูปที่ 4.76 ผลสัญญาณ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.75

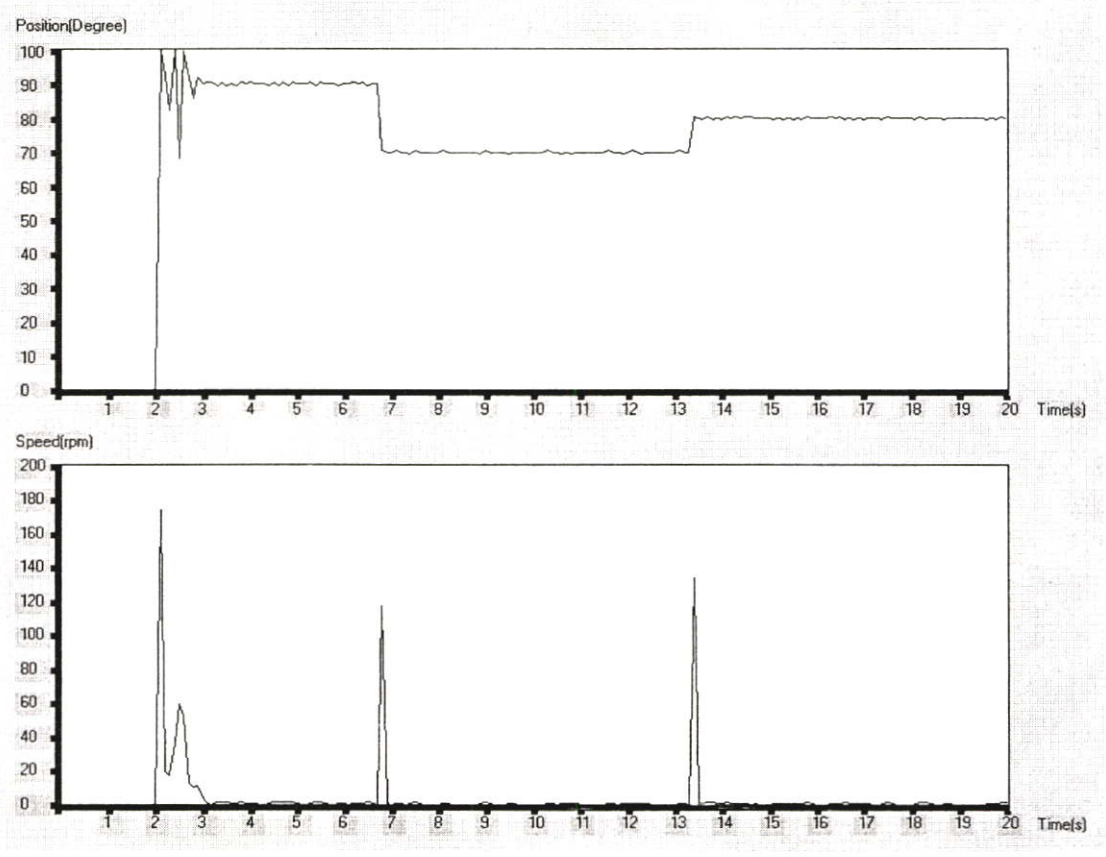


รูปที่ 4.77 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.75

จากรูปที่ 4.75 จะเห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายตามเวลาที่ 90, 70, 80 โดยใช้การปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่ไม่มีทักษะจะเห็นว่าเกิดการแกว่งของผลตอบสนองที่มากและในรูปที่ 4.76 ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ก็มีการแกว่งเช่นกัน ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจะทำการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยผู้ใช้ที่มีทักษะ

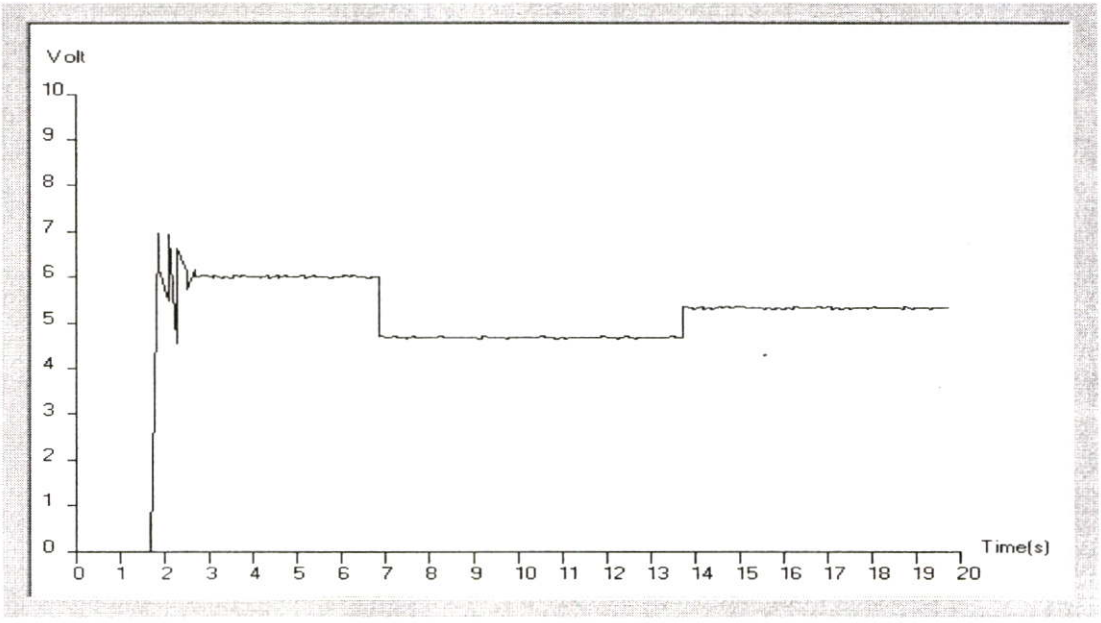
4.5.7 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ และความชำนาญของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา ตามลำดับ

การทดลองในรูปที่ 4.78 การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา

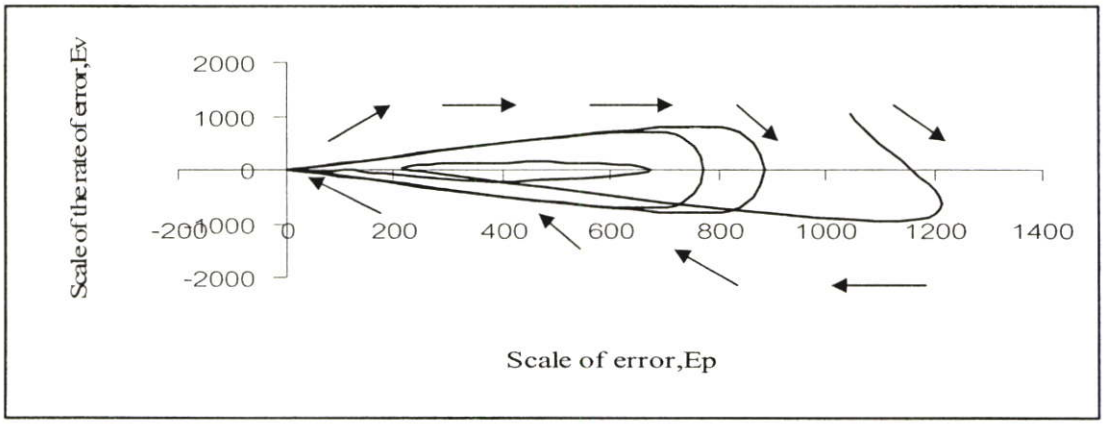


รูปที่ 4.78 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะ

ในรูปที่ 4.79 เป็นผลสัญญาณของระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.78 จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันตามผลตอบสนองสอดคล้องตามในรูปที่ 4.78 และระนาบเฟสความผิดพลาดมีการวนรอบตามค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.80



รูปที่ 4.79 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.78

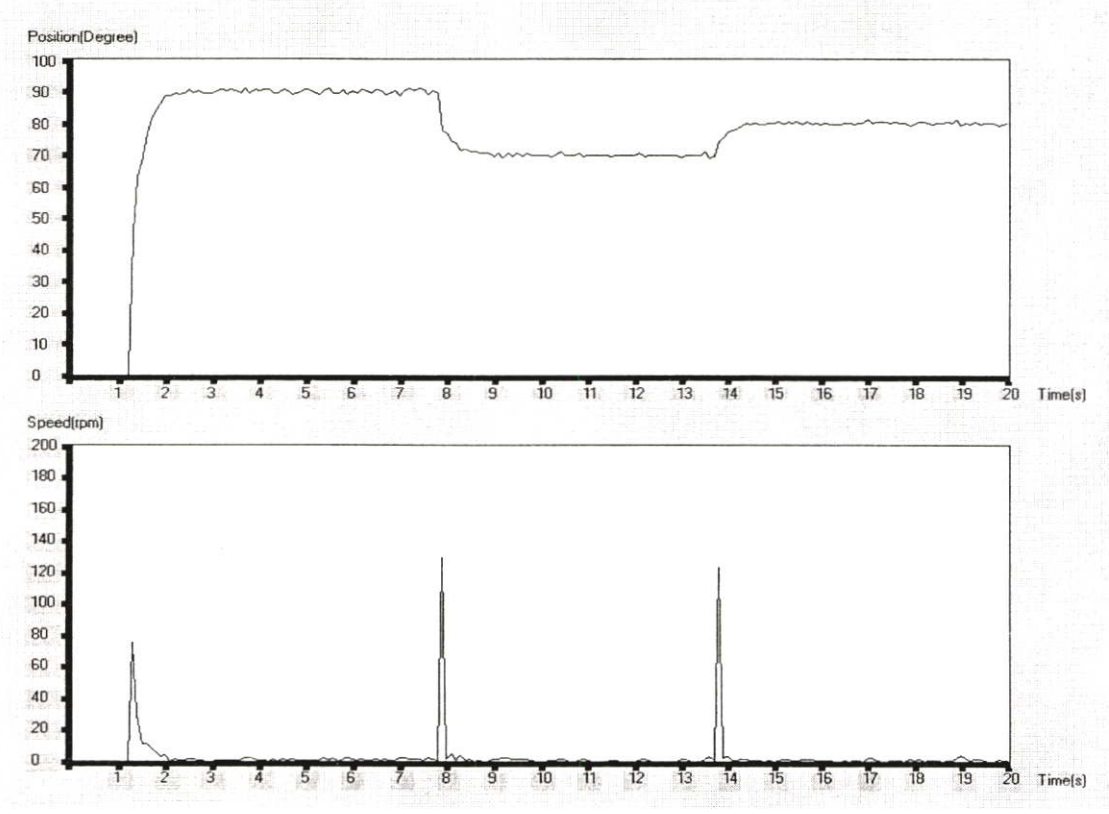


รูปที่ 4.80 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.78

จากรูปที่ 4.78 จะเห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายตามเวลาที่ 90, 70, 80 โดยใช้การปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ที่มีทักษะจะเห็นว่าเกิดการแกว่งของผลตอบสนองที่น้อยลงและ ในรูปที่ 4.79 ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์เกิดมีการแกว่งเล็กน้อยตอนเริ่ม ดังนั้น ในหัวข้อต่อไปจะทำการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

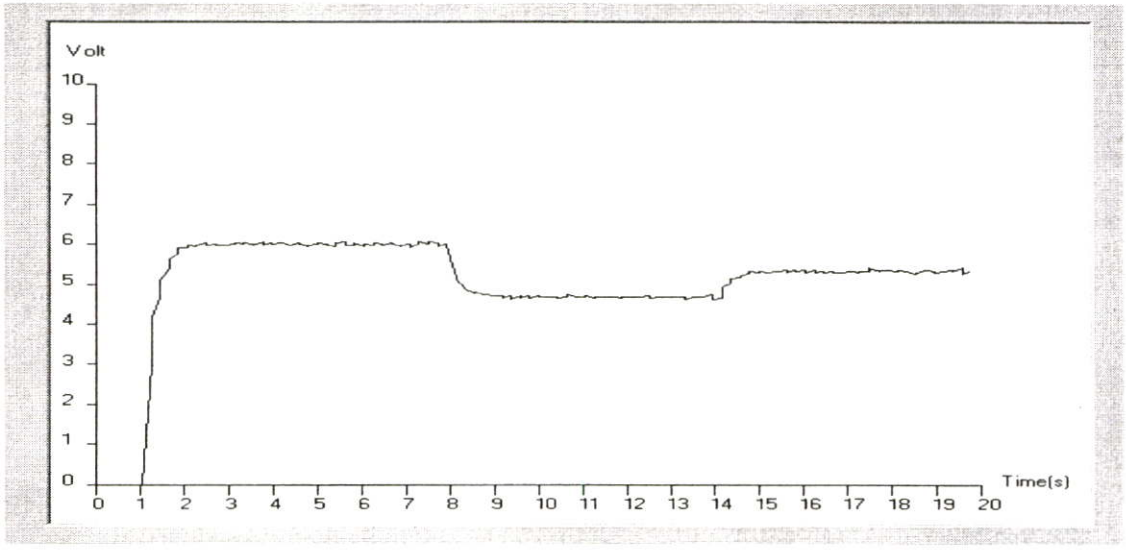
4.5.8 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา

การทดลองในรูปที่ 4.81 การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์มาควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา

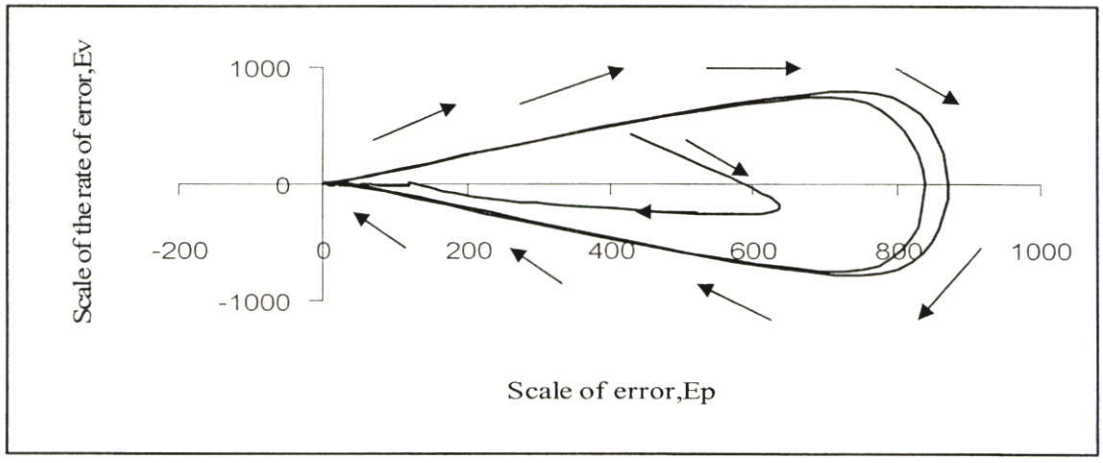


รูปที่ 4.81 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

ในรูปที่ 4.82 เป็นผลสัญญาณของระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.81 จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันตามผลตอบสนองสอดคล้องตามในรูปที่ 4.81 และระนาบเฟสความผิดพลาดมีการวนรอบตามค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.83



รูปที่ 4.82 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.81

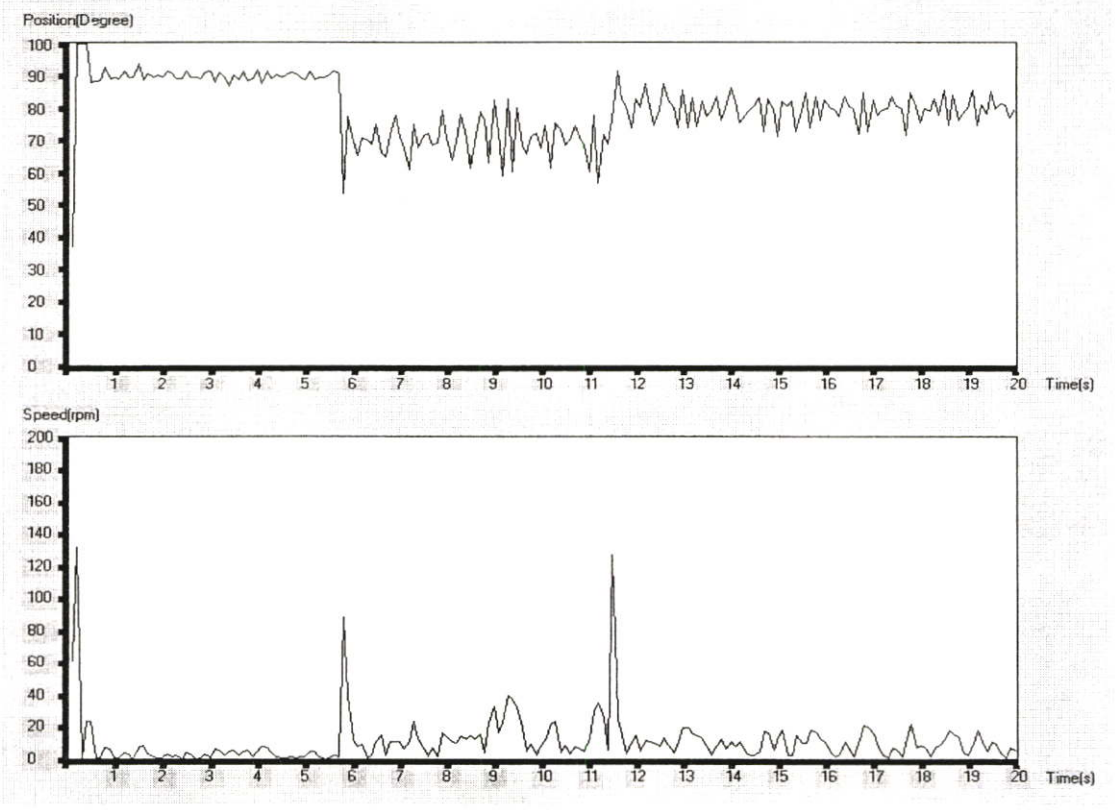


รูปที่ 4.83 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.81

ในรูปที่ 4.81 เป็นผลตอบสนองที่ได้มาจากการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ที่ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลง 90, 70 และ 80 จะเห็นได้ว่าค่าตอบสนองที่ได้มีความราบเรียบเมื่อลู่เข้าค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้และค่าแรงดันในรูปที่ 4.82 ก็มีความราบเรียบเช่นกัน ส่วนค่าระนาบเฟสผิดพลาดในรูปที่ 4.83 มีแนวโน้มลู่เข้าสู่จุดกำเนิด สรุปได้ว่าการใช้วิธีการทางพันธุศาสตร์เข้ามาช่วยปรับตำแหน่งแขนกลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาให้ค่าตอบสนองที่ดีกว่าการปรับโดยผู้ใช้

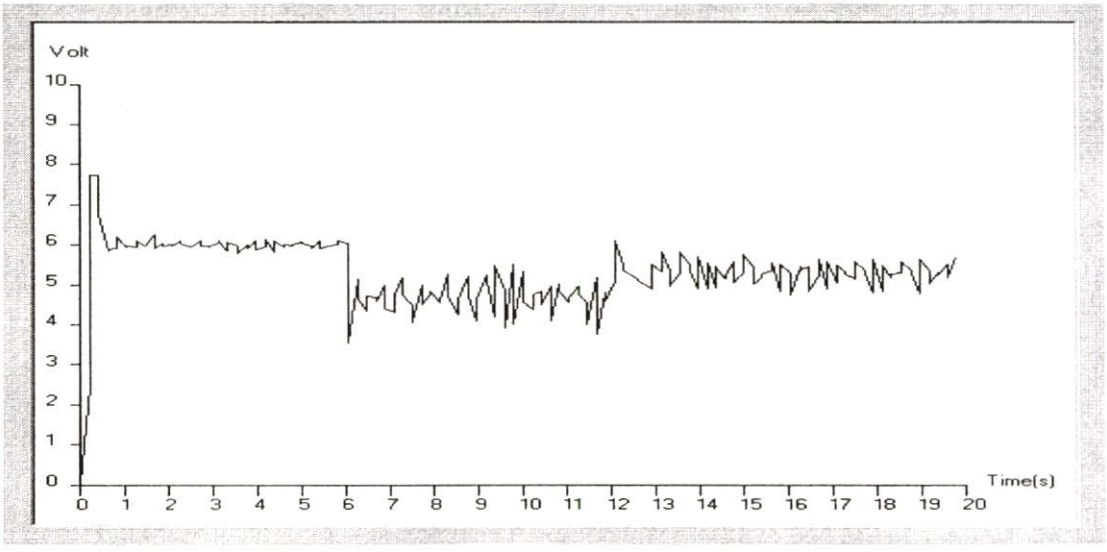
4.5.9 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศา

การทดลองในรูปที่ 4.84 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของการควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน logistic map

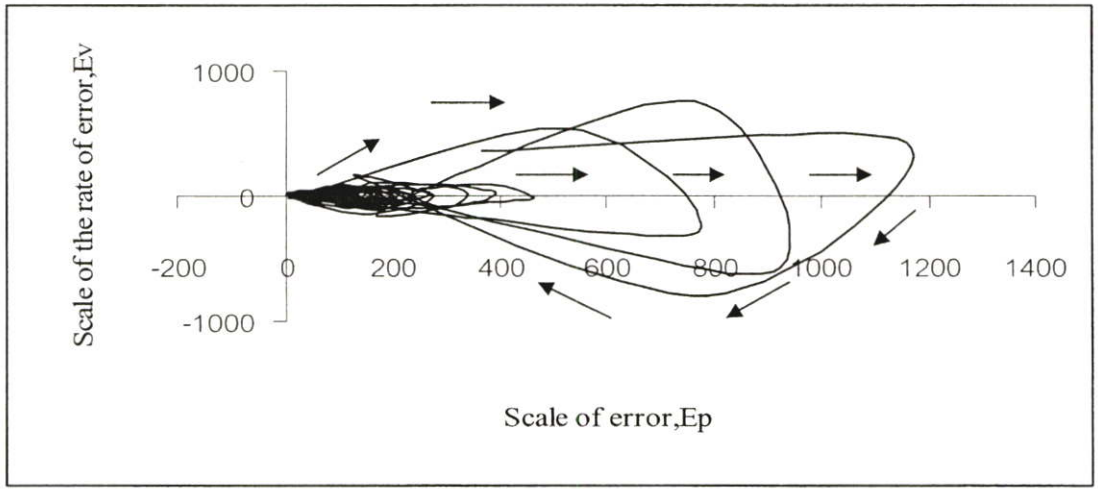


รูปที่ 4.84 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

ในรูปที่ 4.85 เป็นผลสัญญาณของระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศาขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน ของรูปที่ 4.84 จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันตามผลตอบสนองสอดคล้องตามในรูปที่ 4.84 และระนาบเฟสความผิดพลาดมีการวนรอบตามค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.86



รูปที่ 4.85 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics การตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.84

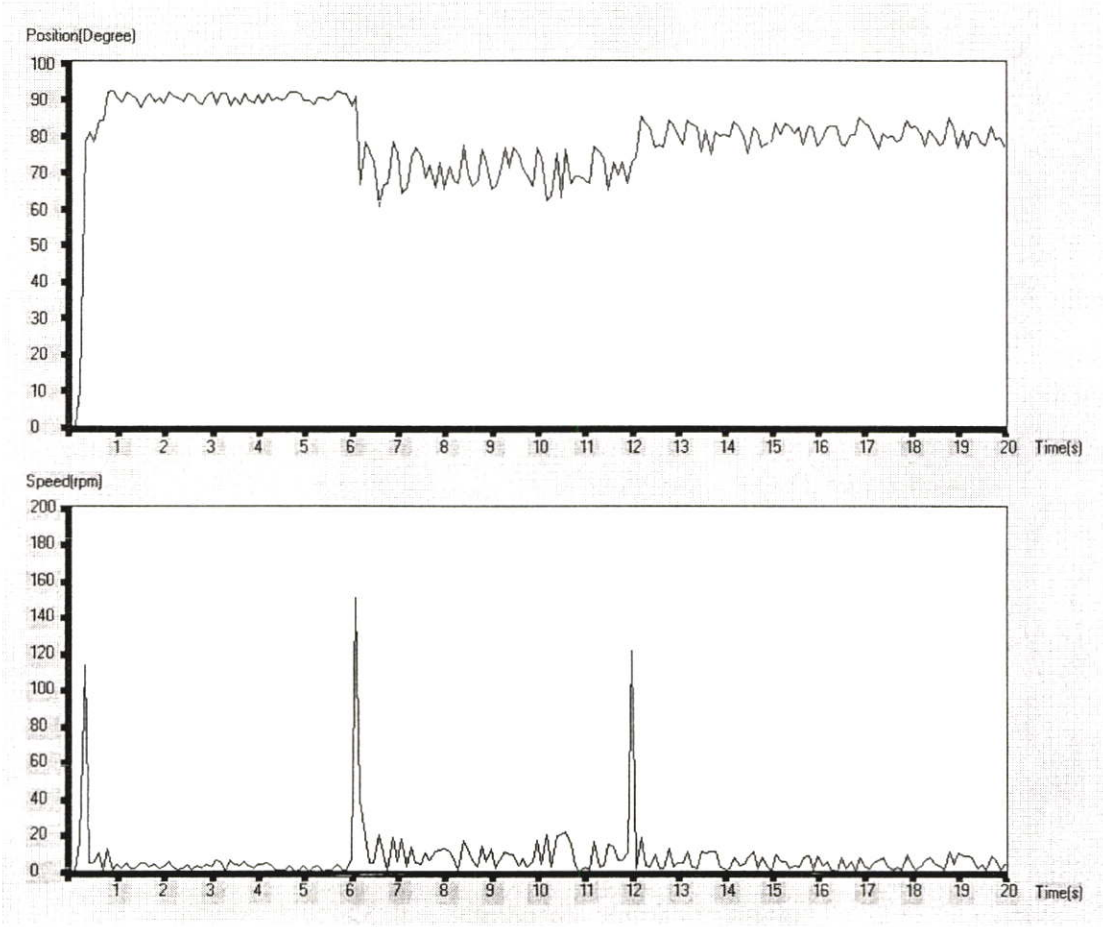


รูปที่ 4.86 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.84

จากรูปที่ 4.84 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนขณะควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวจะเห็นได้ว่าระบบมีการแกว่งของค่าเป้าหมายและค่าแรงดันในรูปที่ 4.85 มีการแกว่งไม่มีความราบเรียบซึ่งสอดคล้องกับระนาบเฟสผิดพลาดในรูปที่ 4.86 ซึ่งจะทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนในหัวข้อต่อไป

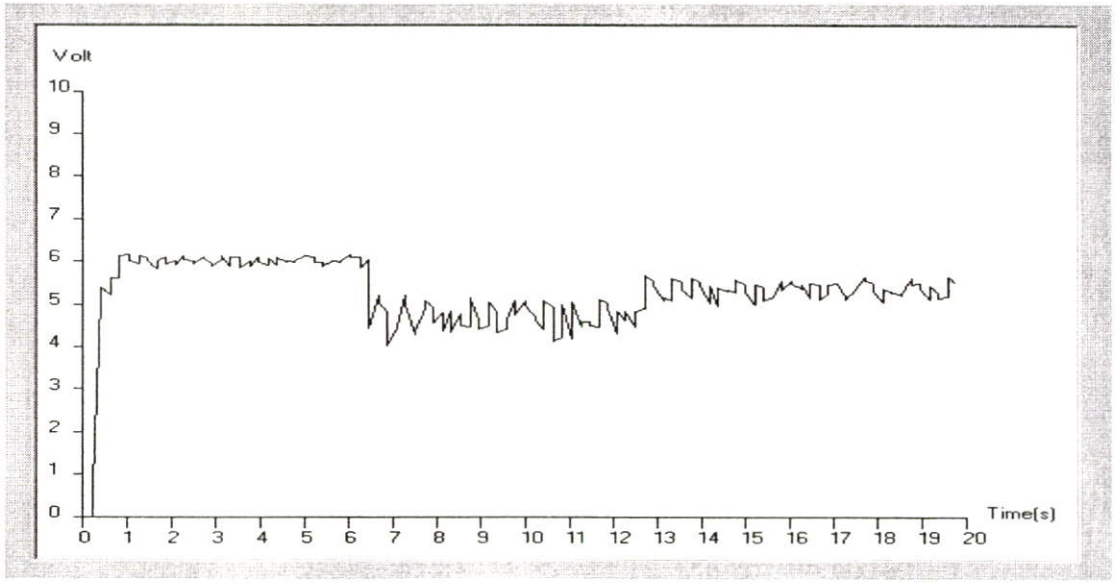
4.5.10 ผลตอบสนองระบบจริงแบบ dynamics ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวโดยกำหนดค่าเป้าหมายให้เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70, 80 องศาตามลำดับ

การทดลองในรูปที่ 4.87 เป็นการทดลองขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

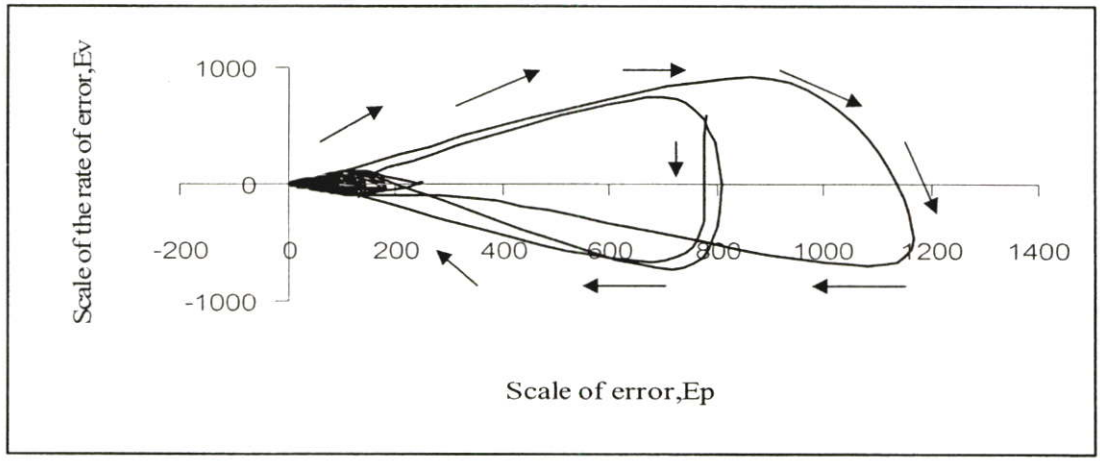


รูปที่ 4.87 ผลทดลองระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์

ในรูปที่ 4.88 เป็นผลสัญญาณของระบบจริงแบบ dynamics การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70 และ 80 องศาขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนของรูปที่ 4.87 จะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของแรงดันตามผลตอบสนองสอดคล้องตามในรูปที่ 4.87 และระนาบเฟสความผิดพลาดมีการวนรอบตามค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงดังในรูปที่ 4.89



รูปที่ 4.88 ผลสัญญาณทางเอาต์พุตของระบบจริงแบบ dynamics กรุตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.87



รูปที่ 4.89 ระนาบเฟสความผิดพลาดของระบบจริงที่สอดคล้องกับการตอบสนองการควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ของแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัวค่าเป้าหมายที่ 90, 70, 80 องศา ของรูปที่ 4.87

จากรูปที่ 4.87 จะเห็นว่าผลของการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีทางพันธุศาสตร์ของค่าเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงจาก 90, 70 และ 80 มีค่าการแกว่งของสัญญาณรบกวนที่เวลา 1 วินาทีมีค่าลดน้อยลงเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.84 และค่าแรงดันที่ได้จากรูปที่ 4.88 ก็มีค่าพุ่งเกินขณะเวลาที่ 1 วินาที่น้อยกว่ารูปที่ 4.85 อีกทั้งระนาบเฟสผิดพลาดของผลตอบสนองมีการวนรอบที่น้อยกว่า

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการสร้างจริงและการประยุกต์ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ มาทำการควบคุมแขนกลแบบข้อต่ออ่อนตัว (Flexible-joint robot arm) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์และเครื่องจักรกลอัตโนมัติ โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งของแขนกลที่ได้ระหว่างการใช้ตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์โดยผู้ใช้ กับการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ มาควบคุมระบบ อีกทั้งยังทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมดังกล่าว โดยมีการเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนให้กับระบบ โดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และนำมาทดลองโดยการสร้างจริง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองด้วยคอมพิวเตอร์และสร้างจริงในบทที่ 4 พบว่าการใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์นั้น ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าการปรับโดยผู้ใช้เองและยังมีความรวดเร็วแม่นยำยิ่งกว่า ซึ่งจากการทดลองจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองจากงานจริงพบว่าผลการทดลองทั้งสองแบบนี้ให้ผลตอบสนองที่สอดคล้องกัน และในส่วนของการเพิ่มสัญญาณรบกวนให้กับระบบนั้นพบว่าในงานจริง ค่าเป้าหมายที่ 70 องศา จะมีค่าความผิดพลาดที่มากกว่า 80 และ 90 องศา เนื่องจากมีตำแหน่งองศาที่น้อยกว่าทำให้การดึงของสัญญาณรบกวนอลวนสามารถรบกวนได้มากกว่า แต่หลังจากทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์นั้นพบว่าสามารถขจัดสัญญาณรบกวนอลวน logistic map ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ในระบบควบคุม

5.2 ข้อแนะนำในการวิจัย

- ถ้าต้องการให้ระบบทำงานได้ดีกว่านี้จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่มีความละเอียดมากกว่านี้ซึ่งจะทำให้ระบบทำงานได้ราบรื่นยิ่งขึ้น
- ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ต้องทำความเข้าใจพฤติกรรม

ของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวว่าส่งผลกับระบบอย่างไรบ้าง ซึ่งมีความจำเป็นต่อการตั้งค่าเริ่มต้นของการปรับแต่งพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์และมีผลทำให้การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์นั้นได้ค่าที่เหมาะสมได้รวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

5.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

การติดต่อระหว่าง hardware จริงกับคอมพิวเตอร์ยังมีความล่าช้าอยู่ในบางขณะที่ทำการทดลองโดยจะพบได้ในขณะที่ทำการเพิ่มสัญญาณรบกวนให้กับระบบ

5.4 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

ในการวิจัยนี้ใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ที่ปรับแต่งด้วยการจำลองจากคอมพิวเตอร์ก่อนแล้วค่อยนำมาใช้กับระบบจริงซึ่งเรียกวิธีการแบบนี้ว่าเป็น Off-line ซึ่งในการปรับปรุงในอนาคตจะพัฒนาให้เป็นแบบ On-line เพื่อให้สามารถใช้งานแบบเวลาจริง(Real-Time) ได้ หรือในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟัซซีพีสแควร์ไอดีนั้นอาจใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) เข้ามาปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ควบคู่ไปด้วยกันได้เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] K.S. Tang, Kim F. Man, G. Chen and S. Kwong, "A GA-Optimized Fuzzy PD+I Controller for Nonlinear Systems". *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.718-723, 2001.

[2] T. Onboonare , S. Charumartphan and P . Sooraksa, "A Geno-Fuzzy P^2ID Controller For Mobile Robots". *Processdings of the Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics*, Bangkok, Thailand,pp. 189-192, May.8-9, 2003.

[3] H.A. Malki, H Li and G. Chen, "New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional- Derivative Control Systems". *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Nov., pp. 245-254, 1994.

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

[5] G. Chen and Hao Ying, "Stability analysis of nonlinear fuzzy PI control systems". *Third International Conference on Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems*, pp.128 – 133, Dec, 1-3,1993.

[6] K.F. Man , K.S. Tang and S. Kwong, Genetic Algorithms Concepts and Designs, Springer-verlay, London, U.K.

[7] D.E. Goldberg, Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning, Addison Wesley Publishing Company, New York.

[8] A. H. Wright, Genetic Algorithm for Real Parameter Optimization in Foundation of Genetic Algorithm, J. E. Rawlins (Ed.), Morgan Kaufmann.

[9] R.C. Hilborn, Chaos and Nonlinear Dynamics An Introduction for Scientists and Engineers , 2nd ED, New York : Oxford University Press, Inc, 2000.

[10] H.A. Malki, D. Misir, D. Feigenspan, and G. Chen, "Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads". *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, pp.371-378, May, 1997.

[11] M.C. Readman, Flexible Joint Robots, Florida : CRC Press, Inc, 2000.

[12] R.D. Klafter, T.A. Chmielewski, and M. Negin, Robotic Engineering An Integrated Approach , New Jersey : Prentice-Hall, Inc, 1989.

[13] R. J. Vaccaro, Digital Control A State-Space Approach. International Editions. Singapore : McGraw-Hill, Inc, 1995.

[14] W.R. Kolk, R.A. Lerman, Nonlinear System Dynamics. New York : Van Nostrand Reinhold, Inc, 1992.

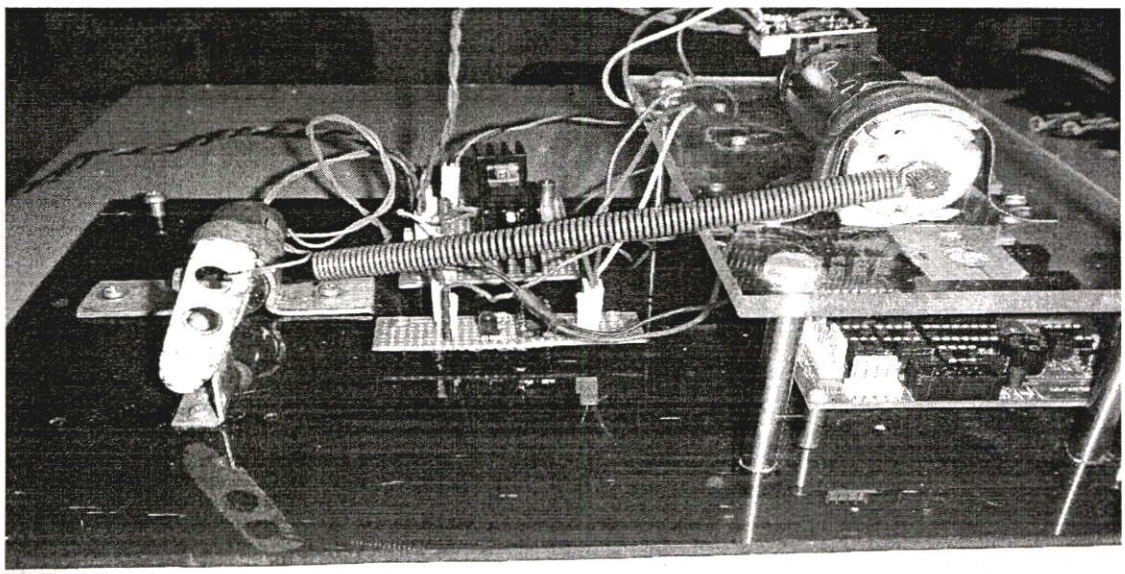
[15] F.L. Lewis, C.T. Abdallah, and D.M. Dawson. Control of Robot Manipulators. New York : Macmillan Publishing Company, Inc. 1993.

[16] B. Friedland. Control System Design. Singapore : McGraw-Hill, Inc, 1987.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
การควบคุมความเร็วมอเตอร์

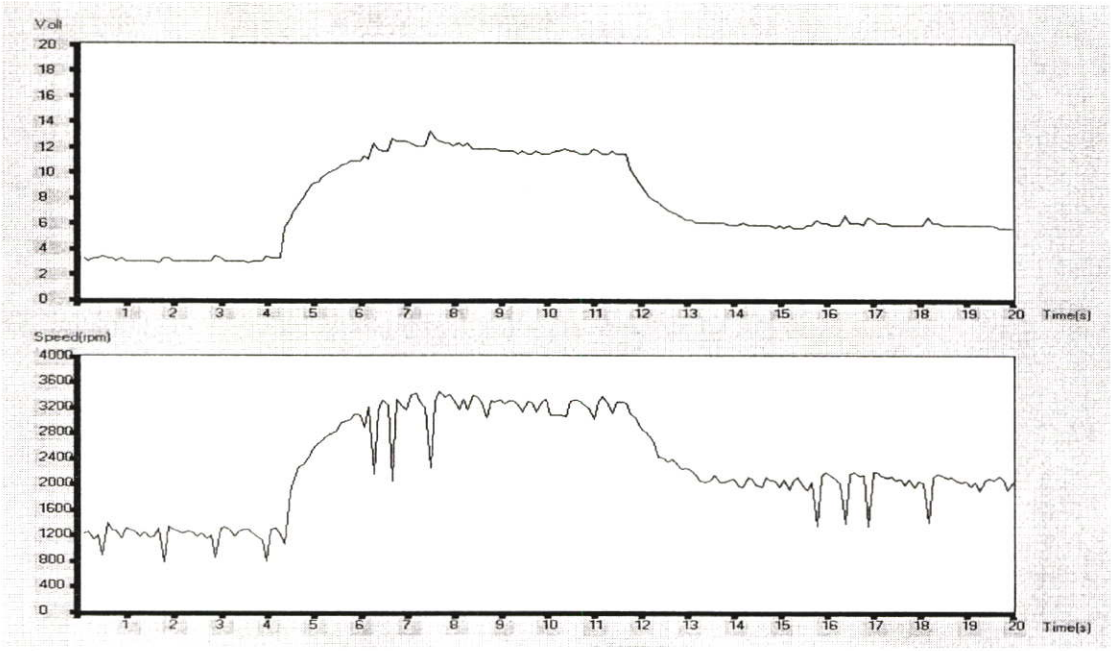
การทดลองนี้เป็นการนำตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ ให้เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์มาทำการทดลองปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยทำการเปรียบเทียบ ผลการทดลองที่ได้ระหว่างการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ขณะที่มีสัญญาณรบกวนอลวน logistic map กับผลการทดลองจากการที่ขจัดสัญญาณรบกวนอลวนแล้ว โดยรูปที่ ผ.ก.1 เป็นรูปจากงานจริง



รูปที่ ผ.ก.1 รูปงานจริงในการควบคุมความเร็วมอเตอร์

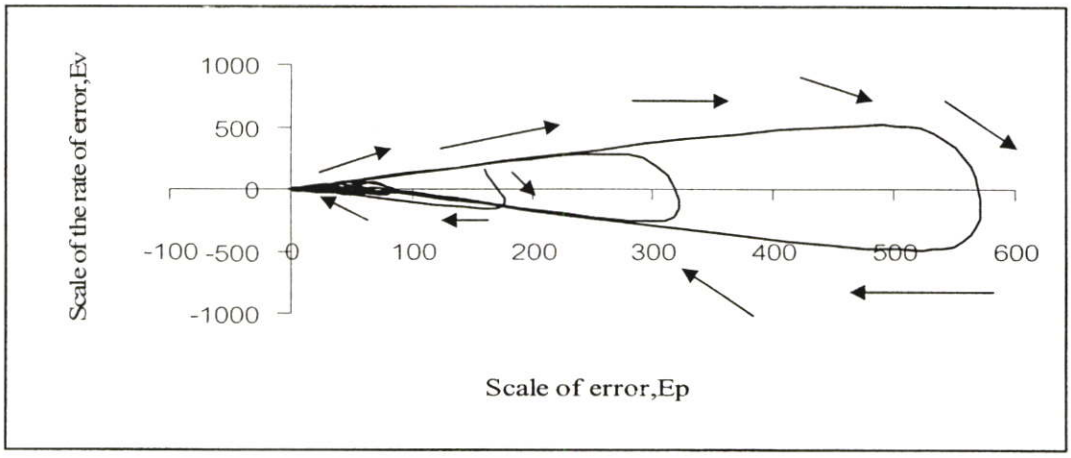
ผ.ก.1 การทดลองตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1200, 3200 และ 2000 รอบต่อนาที

ในรูปที่ ผ.ก.2 เป็นผลการทดลองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที ที่ประกอบไปด้วยผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์กับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์



รูปที่ ผ.ก.2 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที

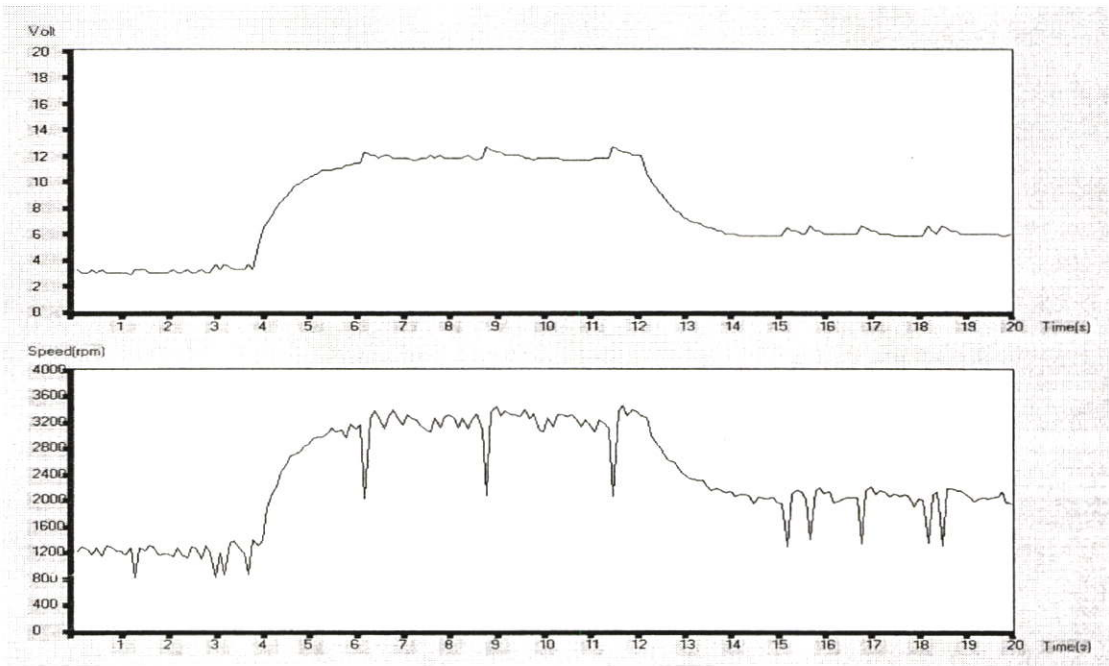
ในรูปที่ ผ.ก.3 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที



รูปที่ ผ.ก.3 ระนาบเฟสผิดพลาดผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที

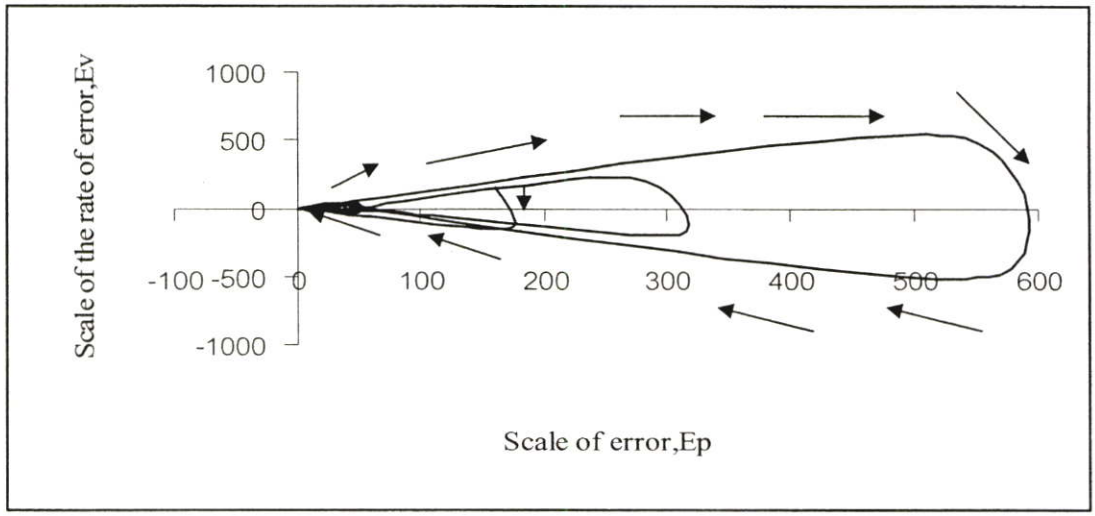
ผ.ก.2 การทดลองตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวนค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1200, 3200 และ 2000 รอบต่อนาที

ในรูปที่ ผ.ก.4 เป็นผลการทดลองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที ที่ประกอบไปด้วยผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์กับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์



รูปที่ ผ.ก.4 ผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที

ในรูปที่ ผ.ก.5 เป็นผลระนาบเฟสความผิดพลาดของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที



รูปที่ ผ.ก.5 ระนาบเฟสผิดพลาดผลตอบสนองของตัวควบคุมแบบฟัซซีพีสแควร์ไอดีที่ปรับค่าด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะขจัดสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที

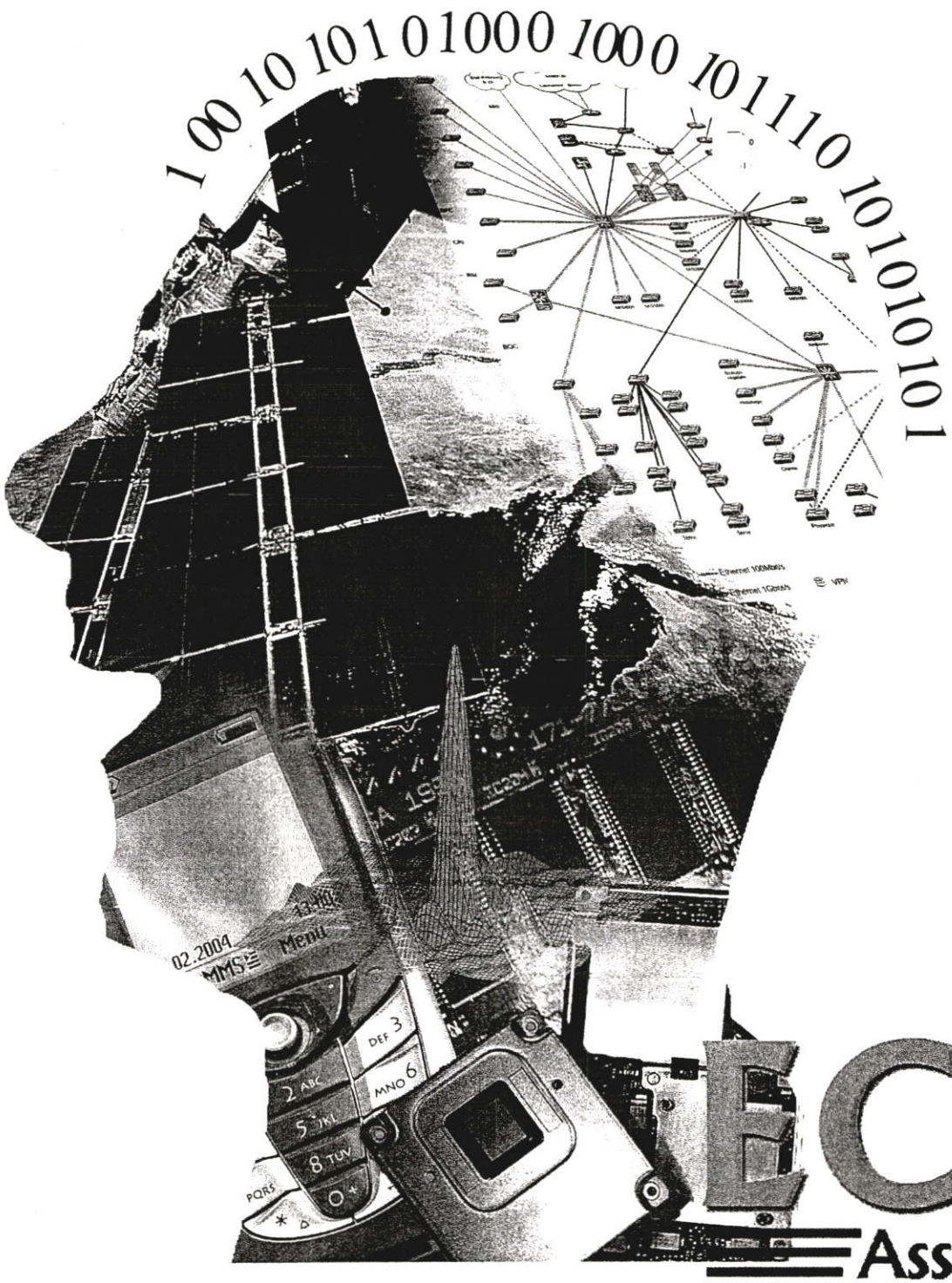
จากผลการทดลองในรูปที่ ผ.ก.2 ซึ่งเป็นผลการทดลองตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์ขณะเพิ่มสัญญาณรบกวนอลวน ค่าเป้าหมายเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ 1,200, 3,200 และ 2,000 รอบต่อนาที ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการแกว่งของสัญญาณมากอยู่ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 4 วินาทีแรกที่เริ่มสตาร์ทระบบเมื่อเทียบกับในรูปที่ ผ.ก.4 ซึ่งได้ทำการขจัดสัญญาณรบกวนอลวนแล้วและค่าระนาบเฟสผิดพลาดในรูปที่ ผ.ก.3 และ ผ.ก.5 ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมากคือไม่สามารถที่จะลู่เข้าสู่จุดกำเนิดได้ แต่การใช้ตัวควบคุมแบบฟัซซีพีแสควร์ไอดีที่ปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการทางพันธุศาสตร์มาปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ สามารถให้ผลที่ดีกว่าการปรับแต่งโดยผู้ใช้และขจัดสัญญาณรบกวนได้

ภาคผนวก ข
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] T. Tangcharoensuk, B. Purahong and P. Sooraksa, "Geno-fuzzy P^2ID Control System for Flexible-joint Robot Arm" 2005 ECTI International Conference, pp.461-464,2005.

ECTI-CON 2005

The 2005 ECTI International Conference



ECTI Association

Proceedings of the 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference

May 12-13, 2005

Asia Pattaya Beach Hotel, Pattaya, Cholburi, THAILAND

IEEE CAS Society

IEEE-LEOS Thailand Chapter

IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY THAILAND CHAPTER

IEEE MTT/AP/ED THAILAND CHAPTER

ECTI-21 NECTEC

POWER ENGINEERING SOCIETY PES IEEE

Geno-fuzzy P²ID Control System for Flexible-joint Robot Arm

Teranun Tangcharoensuk

Teranun Tangcharoensuk, Boonchana Purahong, Pitikhate Sooraksa,
Department of Information Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung .Rd., Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520.
E-mail: ball_club2@yahoo.com, yuna001@gmail.com, kspitikh@kmitl.ac.th

ABSTRACT

This paper presents a Geno-fuzzy P²ID control system for the flexible-joint robot arm. This controller is designed based on the parameter adjustment using fuzzy logic and genetic algorithms. According to the simulations, the better performance has been achieved acquired that the robot moved smoothly and met its required objectives.

Keywords: Genetic Algorithm (GA), Fuzzy P²ID Controller, Flexible-joint Robot Arm

1. INTRODUCTION

Smooth movements of the flexible-joint robot arm are depend on the controller that can indicate every specific moment. Because those movements are non-linear, if we use the controller which is suited the non-linear system, it will increase the system's efficiency [1]. Therefore, this paper presents the fuzzy P²ID that can adjust for appropriate parameters using genetic algorithm(GA) to control the arm's movements.

In general, the parameters adjustment usually is usually modified by the users, but this method takes too much time to obtain appropriate results. Since this type of controller has many parameters for tuning, using GA would be worthwhile in order to search for fruitful results. Detail development of the controller can be found in [2]. This paper aims to apply the method to control a flexible-joint robot arm for smooth and accurate movements. Next sections provides a brief detail behind the ideas.

2. FUZZY P²ID CONTROLLER

Fuzzy P²ID controller is the coordination between the fuzzy PI and fuzzy PD controllers, which both controllers will process parallel to each other. Those controllers will be proscribed by a switch that chooses which controller will be in charged. As soon as the system starts, the fuzzy PD controller gives the faster rise time comparing with fuzzy PI controller [3]. Then the process will reach the designed exchange point, the system will swap the control to the fuzzy PI controller because it provides the better output at steady state [4]. When the process reaches the indicated point as the stabilized condition, the fuzzy PI controller will be terminated, and if the output of the process is not in the steady state which means lower than 90 percents of the projected resulted, the fuzzy PD controller will stand by to take control. For this reason, this process is called fuzzy P²ID control system.

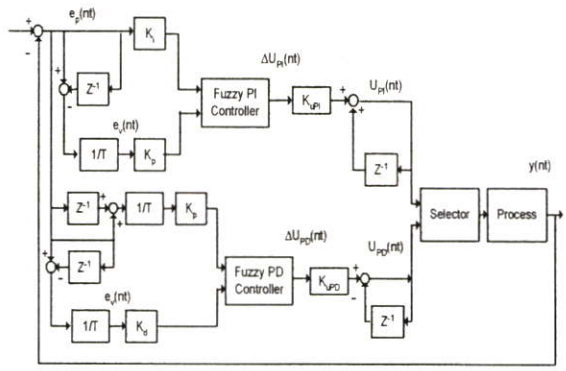


Fig.1: Fuzzy P²ID Control System

3. GENETIC ALGORITHMS

Genetic Algorithms [5-7] were duplicated from the natural evolutions. This method is efficiently applied to the problem solving; the importance of the method relies on how many potential members will survive as the suitable potentials to solve problems. Each generation will be created by population selection, and each member has the limited potential for fitting the problems' boundaries. Also, this method is combined with the genetic operation, which the best result will come for the last survived member.

Genetic operation is consisted of selection, recombination, mutation, and reinsertion. The first procedure initiates with the population creation randomly, the size of population depends on the problems. Next procedure is determining each member by using the objective function, or targeting function, which will not be restricted, it depends on types of problems to be solved. Then, there will be the inspection, if it doesn't find the answer; it will start creating the next generation members by obtaining the parent members which were selected from the fitness values. The selected parent members will be mixed together, and then all offspring will be mutated by using probability and then finding the value of each offspring and then bringing 3-6 best of them to replace the parent members as the next generation. This will be cycling like this till it finds the appropriate values.

The chromosome's length has eight variables which consisted of the fuzzy PD controller that has objected parameters: they are Kpd, Kd, Ld, Kupd, fuzzy PI controller, Kpi, Ki, Li, Kupi, which will give I = {Kpd, Kd, Ld, Kupd, Kpi, Ki, Li, Kupi} by substituting the values and the restriction of the parameters with the real numbers and the initial value of the parameter for starting the program. The initial parameter value is the initial population at 30, and the maximum generated value is at 30.

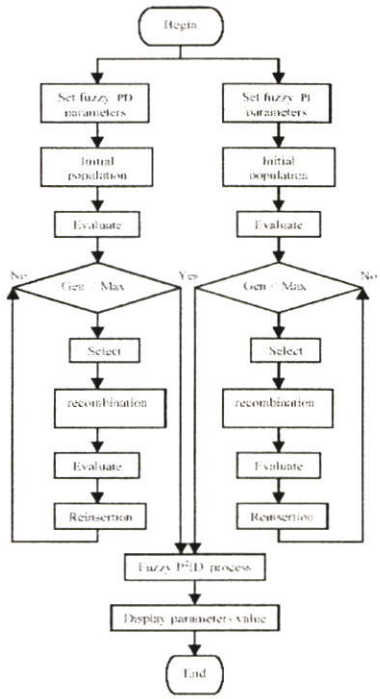


Fig.2: Flow chart of the GA Program for Fuzzy P²ID Controller

4. FLEXIBLE-JOINT ROBOT ARM

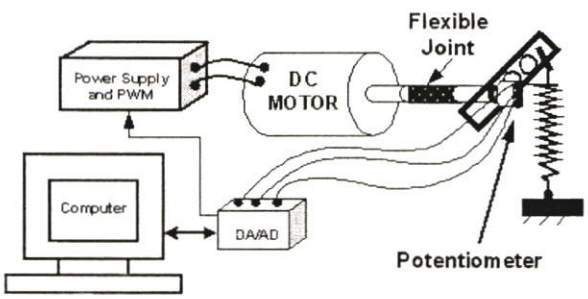


Fig.3: Flexible-joint Robot Arm Model

The mathematical model [8] from "***Fig. 3:***"is shown as these following equations

$$I_1\ddot{\theta}_{1(t)} + M(t)\ell g\sin[\theta_{1(t)}] + \tilde{k}[\theta_{1(t)} - \theta_{2(t)}] = 0 \qquad (1)$$

$$I_2\ddot{\theta}_{2(t)} - \tilde{k}[\theta_{1(t)} - \theta_{2(t)}] = u(t)$$

In which I_1 is the arm's rotational inertia, I_2 is the rotor inertia of the motor, $\theta_1(t)$ is the changing angle of the arm is angle of the motor's comparing with vertical axis, $\theta_2(t)$ is the changing angle of the rotor of motor axis, $u(t)$ is motor's torque, $\tilde{k}$ is spring constant which used as the joint of the arm, $M(t)$ is the total mass of the arm varies by time which is the spring joining the arm, ℓ is the distance from the center of the rotational axis, g is gravity of the earth.

5. SIMULATION AND RESULTS

The simulation is the application of the fuzzy P²ID idealistic which adjusted the parameter values suited with the genetic algorithm in order to control the movements of the flexible-joint robot arm from equation (1)

There are two parts in this simulation; the first part uses the fuzzy P²ID controller which has not been adjusted the parameter values with the genetic algorithm as shown in table 1, the second part uses the fuzzy P²ID controller which has been adjusted the parameter values with the genetic algorithm as shown in table 3. Then, comparing the results from both parts and determining the efficiency which indicated in table 2 and 4.

Table 1: *Parameter Values Acquired from the Fuzzy P²ID Controller which has not been Adjusted the Parameter Values with the Genetic Algorithm. Given I_1=0.030(kgm²), I_2= 0.001(kgm²), $\tilde{k}$ = 31(Nm/rad), Mg ℓ = 0.8(Nm), Set point (degree) = 100, 180, Sampling Time (Ts) = 0.01xsec*

Setpoint (degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld
100	2	3	15	50
180	2	3	17	70
Setpoint (degree)	Kpi	Ki	Kupi	Li
100	1	5	1	40
180	5	8	2	50

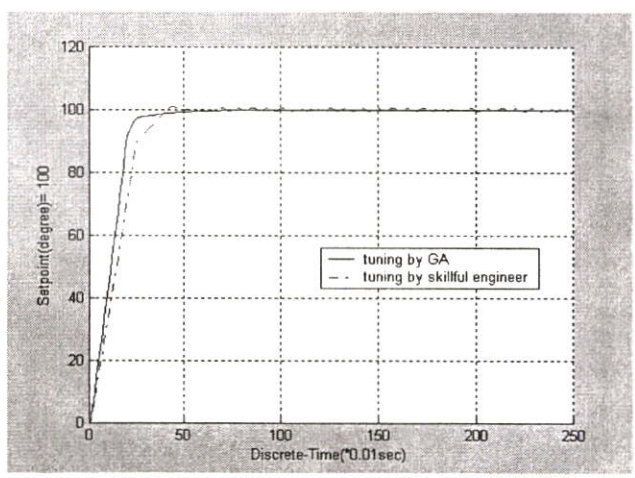


Fig.4: *The Comparison of Controlled Position Reaction Acquired from Fuzzy P²ID Controller which has not been Adjusted the Parameter Values with the Genetic Algorithm. The Targeted Values = 100*

Table 2: *Performance of the Fuzzy P²ID Controller which has been Manually Adjusted Parameters by a Skillful Engineer.*

Setpoint (degree)	Rise time (s)	Setting time (s)	Overshoot (%)
100	0.2134	0.3833	1
180	0.2422	0.3553	1.16

Table 3: *Parameter Values Acquired from the Fuzzy P²ID Controller which has been Adjusted the Parameter Values with the Genetic Algorithm.*
Given, $I_1 = 0.030(kgm^2)$, $I_2 = 0.001(kgm^2)$, $\tilde{k}$ = 31(Nm/rad), $Mg\ell$ = 0.8(Nm), Set point (degree) = 100, 180, Sampling Time(Ts) = 0.01xsec

Setpoint (degree)	Kpd	Kd	Kupd	Ld
100	2.7762	3.1111	19.2384	50
180	10.7762	5.1111	19.34	70
Setpoint (degree)	Kpi	Ki	Kupi	Li
100	0.9703	0.0211	2.3158	40
180	0.9703	0.0211	2.5	50

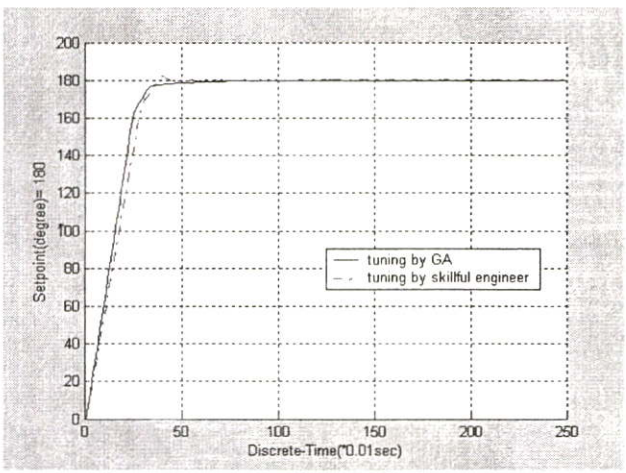


Fig.5: *The Comparison of Controlled Position Reaction Acquired from Fuzzy P²ID Controller which has not been Adjusted the Parameter Values with the Genetic algorithm. The Targeted Values = 180*

Table 4: *Performance of the Fuzzy P²ID Controller which has been Adjusted the Parameters using the Genetic Algorithm.*

Setpoint (degree)	Rise time (s)	Setting time (s)	Overshoot (%)
100	0.1663	0.3234	0
180	0.2127	0.3346	0

6. CONCLUSION

Table 2 and 4 show that the application of the fuzzy P²ID controller which has adjusted the parameter values with the genetic algorithm brought up the satisfied results. The rise time and setting time are small, and the overshoot value is significantly small. It means that this idea has high efficiency in controlling the arm movements which creates the accurate and smooth arm's movements. Furthermore, the results shows that this idea brought up low errors.

Performance comparison between the manually adjusted parameters and the genetic algorithm concludes that the genetic algorithm method provides more precision results and less rise time than the counterpart.

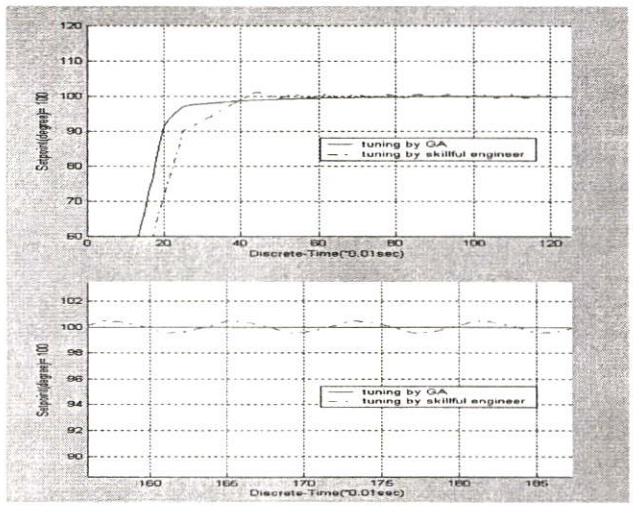


Fig.6: *Zoom in from "**Fig. 4:**"*

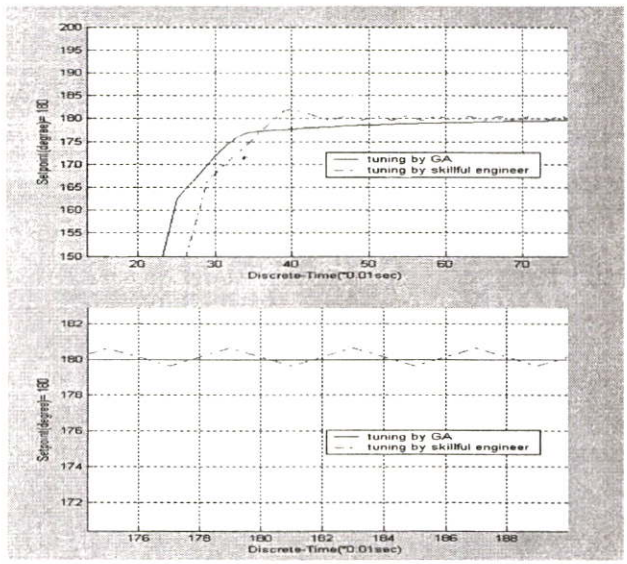


Fig.7: *Zoom in from "**Fig. 5:**"*

7. REFERENCES

[1] K.S. Tang, Kim F. Man, Guanrong Chen and Sam Kwong, A GA-Optimized Fuzzy PD+I Controller for Nonlinear Systems. *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.718-723,2001.

[2] T. Onboonare , S, Charumartphan and P . Sooraksa, A Geno-Fuzzy P²ID Controller For Mobile Robots. *Processdings of the Third Asian Conference on Industrial Automation and Robotics*, Bangkok, Thailand,pp. 189-192, May. 8-9, 2003.

[3] Heidar A. Malki, Huaidong Li.,Guanrong Chen, New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional-Derivative Control Systems. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, Nov.,pp. 245-254, 1994.

[4] Guanrong Chen, Hao Ying, 1993. Stability analysis of nonlinear fuzzy PI control systems. *Third International Conference on Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems*, pp.128 – 133, Dec. 1-3,1993.

[5] K.F. man , K.S. Tang and S. Kwong. 1989. Genetic Algorithms Concepts and Designs, Springer-verlay, London, U.K.

[6] David E Goldberg. 1989. Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning, Addison Wesley Publishing Company, New York.

[7] A. H. Wright. 1991. Genetic Algorithm for Real Parameter Optimization In Foundation of Genetic Algorithm, J. E. Rawlins (Ed.), Morgan Kaufmann.

[8] Heidar A. Malki, Dave Misir, Denny Feigenspan, and Guanrong Chen, 1997. Fuzzy PID Control of a Flexible-Joint Robot Arm with Uncertainties from Time-Varying Loads. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, pp.371-378, May. 1997.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธีรนันท์ ตั้งเจริญสุข
วัน เดือน ปีเกิด	31 พฤษภาคม 2523
ที่อยู่	2/33 หมู่ 3 ต.นครชัยศรี อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม
ประวัติการศึกษา	2541 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคนครปฐม
	2543 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ
	2545 อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงาน	
ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกร ฝ่าย Core network แผนก Implementation & Improvement บริษัท Total Access Communication PLC. (DTAC)