

การประยุกต์เครือข่ายนิรอนในการควบคุมแบบปรับตัวเอง

นายเรวัชร คัยนันท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-635-267-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 1738090X

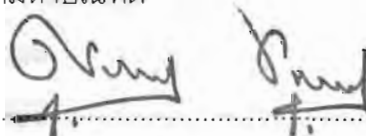
AN APPLICATION OF NEURAL NETWORKS
FOR ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS

Mr. Rawat Kayanan


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 1996
ISBN 974-635-267-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์เครือข่ายนิรeronในการควบคุมแบบปรับตัวเอง
โดย นายเรวัชร คัยนันท์
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฏ์

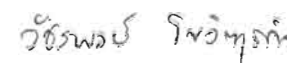
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญมี อย่างธรา)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฏ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วัชรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ)



พิมพ์ต้นฉบับบทความวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

เรวัชร คัยนันท์ : การประยุกต์เครือข่ายนิวรอนในระบบควบคุมแบบปรับตัวเอง

(AN APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฐ์, 98 หน้า. ISBN 974-635-267-9.

งานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์และการควบคุมในระบบควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิง ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมดังกล่าวกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง ผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าเครือข่ายนิวรอนสามารถนำไปใช้งานในทางปฏิบัติได้ และลักษณะผลตอบของระบบควบคุมเมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขพบว่า ระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอนให้ผลตอบที่มีค่าพุ่งเกินและช่วงเวลาเข้าที่น้อยกว่าระบบควบคุมแบบพีไอดีเชิงเลขภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา ระบบควบคุม
ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่อนิสิต เรวัชร คัยนันท์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

C615644 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: NEURAL NETWORK / MODEL REFERENCE / ADAPTIVE CONTROL

RAWAT KAYANAN : AN APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VARAPORN JAOVISIDHA, Ph.D. 98 pp. ISBN 974-635-267-9.

This thesis demonstrates that neural networks can be used effectively for identification and control of dynamical systems in model-reference adaptive control systems. Performance of the identification and control algorithm is evaluated by implementing them on a laboratory-scale heat-exchanger plant. The results reveal that the adaptive control scheme is practically feasible and the time response yields less overshoot and settling time than that of the response with a digital PID controller, under the same operating condition.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต สวรรค์ ศุภรัตน์

สาขาวิชา ระบบควบคุม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา D. (K. M.)

ปีการศึกษา 2539

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาววิศิษฏ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด รวมทั้งคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสาขาระบบควบคุมทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทรากฐานวิชาทางระบบควบคุมซึ่งเป็นหลักสำคัญในงานวิจัยครั้งนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจ ให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อีกทั้ง พี่สาว น้องสาว ญาติ มิตรสหาย ตลอดจน พี่ๆ และน้องๆ สาขาระบบควบคุมทุกท่านซึ่งคอยเป็นแรงใจและเป็นเพื่อนที่ดีให้กับผู้วิจัยเสมอ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ท

บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 โครงสร้างงานวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2. ความรู้เบื้องต้นและทฤษฎีเกี่ยวกับเครือข่ายนิเวรอน.....	6
2.1 ลักษณะกระบวนการรับรู้ของเซลล์ประสาทในสมอง.....	6
2.2 รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนเครือข่ายนิเวรอน.....	7
2.3 ชนิดของการเชื่อมต่อภายในเครือข่ายนิเวรอน.....	11
2.4 กลวิธีการเรียนรู้และการปรับค่า.....	12
2.5 กฎการเรียนรู้ของเครือข่ายนิเวรอน.....	14
2.6 เครือข่ายนิเวรอนชนิด Backpropagation.....	16
2.7 การปรับปรุงอัตราการเรียนรู้โดยวิธี Delta-Bar-Delta.....	27

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.	การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวเองโดยการใช้เครือข่ายนิวรอน	31
3.1	การควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิง	32
3.2	การควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิงโดยใช้เครือข่ายนิวรอน	33
3.3	การออกแบบเครือข่ายนิวรอนในส่วนของหาเอกลักษณ์หรือ ส่วนการสร้างแบบจำลองระบบ	34
3.4	การออกแบบเครือข่ายนิวรอนเพื่อเป็นตัวควบคุม	40
3.5	การใช้งานเครือข่ายนิวรอนหลังจากได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์ และการควบคุม	43
3.6	การกำหนดแบบจำลองอ้างอิง	46
4.	ผลการควบคุมกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	50
4.1	ลักษณะโดยทั่วไปของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	49
4.2	รายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	50
4.3	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเครือข่ายนิวรอนกับ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	51
4.4	ลักษณะของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการทดสอบ	52
4.5	การทดสอบเครือข่ายนิวรอนกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	54
5.	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	92
5.1	ข้อดีของระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอน	93
5.2	ข้อเสียของระบบควบคุมที่ใช้เครือข่ายนิวรอน	93
5.3	ข้อเสนอแนะ	94
	รายการอ้างอิง	95
	ประวัติผู้เขียน	98

สารบัญตาราง

หน้า

<u>ตารางที่ 3.1</u>	แสดงแบบจำลองสมการที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์ของระบบเชิงเส้น ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบอินพุต-เอาต์พุตเดียว	35
<u>ตารางที่ 4.1</u>	แสดงรายละเอียดเบื้องต้นของกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	50
<u>ตารางที่ 4.2</u>	แสดงผลทดสอบการฝึกเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์	55
<u>ตารางที่ 4.3</u>	แสดงลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์	56
<u>ตารางที่ 4.4</u>	ผลการฝึกเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์	56
<u>ตารางที่ 4.5</u>	แสดงลักษณะผลตอบของฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองอ้างอิง	70
<u>ตารางที่ 4.6</u>	แสดงผลทดสอบการฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม	71
<u>ตารางที่ 4.7</u>	แสดงลักษณะโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม	72
<u>ตารางที่ 4.8</u>	ผลการฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อใช้เป็นตัวควบคุม	72
<u>ตารางที่ 4.9</u>	แสดงขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต จากเครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม	77

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะของเซลล์สมองอย่างง่าย	7
รูปที่ 2.2	แสดงแบบจำลองที่ใช้แทนปมนิวรอน	7
รูปที่ 2.3	แสดงกราฟของฟังก์ชันซิกมอยด์	10
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะของเครือข่ายนิวรอนแบบป้อนไปข้างหน้า	11
รูปที่ 2.5	แสดงลักษณะของเครือข่ายนิวรอนแบบมีการป้อนกลับ	12
รูปที่ 2.6	แสดงลักษณะการเรียนรู้โดยอาศัยการแนะนำ	13
รูปที่ 2.7	แสดงลักษณะการเรียนรู้โดยไม่อาศัยการแนะนำ	14
รูปที่ 2.8	แสดงลักษณะการปรับค่าน้ำหนักโดยกฎการเรียนรู้ของเครือข่ายนิวรอน	14
รูปที่ 2.9	แสดงโครงสร้างของเครือข่ายนิวรอนชนิด Backpropagation	17
รูปที่ 2.10	แสดงลำดับขั้นตอนการประมวลผลของเครือข่ายนิวรอน	26
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงการควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิง	32
รูปที่ 3.2	แผนภาพแสดงการควบคุมแบบปรับตัวเองตามแบบจำลองอ้างอิง โดยการใช้เครือข่ายนิวรอน	33
รูปที่ 3.3	แบบจำลองการหาเอกลักษณ์แบบขนาน	36
รูปที่ 3.4	แบบจำลองการหาเอกลักษณ์แบบอนุกรม-ขนาน	37
รูปที่ 3.5	แสดงการประยุกต์เครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์	39
รูปที่ 3.6	การฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อเป็นตัวควบคุม	40
รูปที่ 3.7	แสดงแผนภาพของระบบควบคุมโดยใช้เครือข่ายนิวรอน	45
รูปที่ 4.1	ชุดทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน	49
รูปที่ 4.2	แสดงตรรกะนี้สมรรถนะขณะฝึกเครือข่ายนิวรอนในการหาเอกลักษณ์	57
รูปที่ 4.3	แสดงผลการทดสอบเครือข่ายนิวรอนหลังจาก ได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.4	แสดงการทดสอบเครือข่ายนิรeronที่ได้รับการฝึกในการหาเอกลักษณ์ กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง	58
รูปที่ 4.5	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	61
รูปที่ 4.6	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	61
รูปที่ 4.7	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	62
รูปที่ 4.8	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	62
รูปที่ 4.9	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มี Load Disturbance	63
รูปที่ 4.10	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มี Load Disturbance	63
รูปที่ 4.11	ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6 มี Load Disturbance	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์
ที่ Throttle Control = 6 มี Load Disturbance64

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์
ที่ Throttle Control = 4.....65

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์
ที่ Throttle Control = 4.....65

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์
ที่ Throttle Control = 4.....66

รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์
ที่ Throttle Control = 4.....66

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์
ที่ Throttle Control = 5.....67

รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์
ที่ Throttle Control = 5.....67

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบเครือข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์
เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์
ที่ Throttle Control = 5.....68

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20	ผลการทดสอบเครื่องข่ายนิรeronในการหาเอกลักษณ์ เมื่อป้อนคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5.....	68
รูปที่ 4.21	แสดงดรรชนีสมรรถนะขณะฝึกเครื่องข่ายนิรeronเพื่อเป็นตัวควบคุม.....	73
รูปที่ 4.22	แสดงผลทดสอบระบบควบคุมโดยการใช้เครื่องข่ายนิรeron หลังจากได้รับการฝึกเพื่อเป็นตัวควบคุม.....	73
รูปที่ 4.23	แสดงการทดสอบเครื่องข่ายนิรeronที่ได้รับการฝึกเพื่อเป็นตัวควบคุม กับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาจริง.....	74
รูปที่ 4.24	ผลการทดสอบเครื่องข่ายนิรeronในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	79
รูปที่ 4.25	แสดงสัญญาณควบคุมจากเครื่องข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	79
รูปที่ 4.26	ผลการทดสอบเครื่องข่ายนิรeronในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	80
รูปที่ 4.27	แสดงสัญญาณควบคุมจากเครื่องข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	80
รูปที่ 4.28	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครื่องข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.29	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....81	81
รูปที่ 4.30	ผลการทดสอบเครื่อง่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....82	82
รูปที่ 4.31	แสดงสัญญาณควบคุมจากเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....82	82
รูปที่ 4.32	ผลการทดสอบเครื่อง่ายนิวรอนในการควบคุม เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....83	83
รูปที่ 4.33	แสดงสัญญาณควบคุมจากเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 6.....83	83
รูปที่ 4.34	ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม แบบพีไอดีและเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์84	84
รูปที่ 4.35	ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม แบบพีไอดีและเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์84	84
รูปที่ 4.36	ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม แบบพีไอดีและเครื่อง่ายนิวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์85	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.37 ผลเนื่องจาก Load Disturbance เปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิเวรอน เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นไซน์ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์85

รูปที่ 4.38 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุมเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 486

รูปที่ 4.39 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิเวรอนเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 486

รูปที่ 4.40 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุมเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 487

รูปที่ 4.41 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิเวรอนเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 487

รูปที่ 4.42 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุมเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 588

รูปที่ 4.43 แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิเวรอนเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 588

รูปที่ 4.44 ผลการทดสอบเครือข่ายนิเวรอนในการควบคุมเมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 589

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.45	แสดงสัญญาณควบคุมจากเครือข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ความถี่ 0.05 Hz. ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5.....89	89
รูปที่ 4.46	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4.....90	90
รูปที่ 4.47	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 4.....90	90
รูปที่ 4.48	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-6 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5.....91	91
รูปที่ 4.49	แสดงผลตอบเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีและเครือข่ายนิรeron เมื่อป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ภายในช่วงการทำงาน 4-7 โวลท์ ที่ Throttle Control = 5.....91	91

สัญลักษณ์

a	ค่าสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันซิกมอยด์
a_m, b_n	ค่าพารามิเตอร์ของระบบ
b_m	ค่าไบแอสซึ่งเชื่อมต่อปมนิวรอนที่ m ในชั้นที่ $l+1$
B^{l+1}	เวกเตอร์ค่าไบแอสของเครือข่ายนิวรอน ที่กำกับในชั้นที่ $l+1$ ขนาด $m \times 1$
d	สัญญาณที่ใช้ในการสอน (Teaching Signal)
$E(k)$	ฟังก์ชันความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลที่ k
$f(x)$	ฟังก์ชันซิกมอยด์ (Sigmoid Activation Function)
$f_m^{l+1}(\cdot)$	Activation Function ของปมนิวรอนที่ m ในชั้นที่ $l+1$
$f_{NN_c} \{ \}$	เครือข่ายนิวรอนที่ใช้เป็นตัวควบคุม
$f_{NN_m} \{ \}$	เครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์
$F^{l+1}(\cdot)$	เวกเตอร์ค่า Activation Function ของปมนิวรอนในชั้นที่ $l+1$ ขนาด $m \times 1$
$H_{ref}(q^{-1})$	ฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปโดเมนความไม่ต่อเนื่องเชิงเวลาของแบบจำลองอ้างอิง
I, u	สัญญาณอินพุต
I_{max}	ขีดจำกัดบนของพิสัยสัญญาณอินพุต
I_{min}	ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณอินพุต
J	ดรรชนีสมรรถนะของการฝึกเครือข่ายนิวรอน
J_{NN_m}	ดรรชนีสมรรถนะของการฝึกเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์
J_{NN_c}	ดรรชนีสมรรถนะของการฝึกเครือข่ายนิวรอนเพื่อเป็นตัวควบคุม
k	ลำดับเวลา (Time Step)
l	ลำดับชั้นภายในเครือข่ายนิวรอน
m, n, p	จำนวนปมนิวรอน
M_p	เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Percent Over Shoot)
N	จำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกเครือข่าย
o_m^{l+1}	สัญญาณเอาต์พุตจากปมนิวรอนที่ m ในชั้นที่ $l+1$
O	สัญญาณเอาต์พุต

O^{l+1}	เวกเตอร์สัญญาณเอาต์พุตจากปมนิวรอนในชั้นที่ $l+1$ ขนาด $m \times 1$
O_{\max}	ขีดจำกัดบนของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต
O_{\min}	ขีดจำกัดล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุต
P	ชุดข้อมูลที่ใช้ฝึกเครือข่าย (Training Set)
r	สัญญาณที่ใช้ในการเรียนรู้ (Learning Signal)
t_k	ข้อมูลเป้าหมายของปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
t_p	เวลาค่ายอด (Peak Time)
t_r	ช่วงเวลาดำเนิน (Rise Time)
t_s	ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time)
T	เวกเตอร์ของชุดข้อมูลเป้าหมาย (Output Target Vector) ขนาด $m \times 1$
T_s	คาบเวลาชักตัวอย่าง (Sampling Period)
$U(k)$	ข้อมูลอินพุตของพลานท์ (Plant Input Signal)
$U_c(k+1)$	สัญญาณควบคุม (Control Signal)
v_{ij}	ค่าน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างปมนิวรอนที่ i ในชั้นอินพุต กับปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายใน
v_j	ค่าไบแอสของปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายใน
V	เมตริกซ์ของค่าน้ำหนักระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนภายใน ขนาด $n \times p$
V_{Bias}	เวกเตอร์ของค่าไบแอสของชั้นซ่อนภายใน ขนาด $p \times 1$
w_{nm}	ค่าน้ำหนักซึ่งเชื่อมต่อระหว่างปมนิวรอนที่ n ในชั้นที่ l และปมนิวรอนที่ m ในชั้นที่ $l+1$
w_{jk}	ค่าน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายในกับปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
w_k	ค่าไบแอสของปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
$W^{l,l+1}$	เมตริกซ์ค่าน้ำหนักของเครือข่ายนิวรอนซึ่งเชื่อมระหว่างชั้นที่ l และ $l+1$ ขนาด $n \times m$
W	เมตริกซ์ของค่าน้ำหนักระหว่างชั้นซ่อนภายในและชั้นเอาต์พุต ขนาด $p \times m$
W_{bias}	เวกเตอร์ของค่าไบแอสของชั้นเอาต์พุต ขนาด $m \times 1$
x	สัญญาณอินพุตที่เข้าสู่ฟังก์ชันซิกมอยด์
x_i	ข้อมูลอินพุตที่ป้อนเข้าสู่ปมนิวรอนที่ i ในชั้นอินพุต

X	เวกเตอร์ของชุดข้อมูลอินพุต (Input Training Vector) ขนาด $n \times 1$
y	สัญญาณเอาต์พุต (Output Signal)
$Y(k)$	ชุดข้อมูลเอาต์พุตจากพลานท์ (Plant Output Signal)
$Y_m(k)$	สัญญาณเอาต์พุตจากเครือข่ายนิวรอนที่ใช้ในการหาเอกลักษณ์
$Y_{ref}(k)$	สัญญาณเอาต์พุตจากแบบจำลองอ้างอิง
y_k	สัญญาณออกจากปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
y_{in_k}	สัญญาณเข้าปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
Y	เวกเตอร์ของสัญญาณออกจากปมนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ขนาด $m \times 1$
Y_{in}	เวกเตอร์ของค่าสัญญาณที่เข้าสู่ชั้นเอาต์พุต ขนาด $m \times 1$
z_j	สัญญาณออกจากปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายใน
z_{in_j}	สัญญาณเข้าปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายใน
Z	เวกเตอร์ของสัญญาณออกจากปมนิวรอนในชั้นซ่อนภายใน ขนาด $p \times 1$
Z_{in}	เวกเตอร์ของค่าสัญญาณที่เข้าสู่ชั้นซ่อนภายใน ขนาด $p \times 1$
α	อัตราการเรียนรู้ (Learning Rate)
δ_h	เวกเตอร์สัญญาณคลาดเคลื่อนของปมนิวรอนในชั้นซ่อนภายใน ขนาด $p \times 1$
δ_o	เวกเตอร์สัญญาณคลาดเคลื่อนของปมนิวรอนในชั้นเอาต์พุต ขนาด $m \times 1$
δ_j	ค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนของปมนิวรอนที่ j ในชั้นซ่อนภายใน
δ_k	ค่าสัญญาณคลาดเคลื่อนของปมนิวรอนที่ k ในชั้นเอาต์พุต
$\alpha_W(k)$	เมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ของค่าน้ำหนัก (Weight) ที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนภายในกับชั้นเอาต์พุตที่เวลา k ขนาด $p \times m$
$\alpha_{W_{Bias}}(k)$	เมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ของค่าไบแอส (Bias) ที่เชื่อมระหว่างชั้นซ่อนภายในกับชั้นเอาต์พุตที่เวลา k ขนาด $m \times 1$
$\alpha_V(k)$	เมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ของค่าน้ำหนัก (Weight) ที่เชื่อมระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนภายในที่เวลา k ขนาด $n \times p$
$\alpha_{V_{Bias}}(k)$	เมตริกซ์อัตราการเรียนรู้ของค่าน้ำหนักไบแอส (Bias) ที่เชื่อมระหว่างชั้นอินพุตกับชั้นซ่อนภายใน ที่เวลา k ขนาด $p \times 1$
γ, β, K	ค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับอัตราการเรียนรู้โดยวิธี Delta-Bar-delta
$G_{ref}(s)$	ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองอ้างอิง (Transfer Function of Model Reference)
ω_0	การหน่วงความถี่ธรรมชาติต่ำกว่าวิกฤต (Underdamp Natural Frequency)

- ๕ อัตราส่วนการหน่วง (Damping Ratio)
- ๗ อัตราส่วนความแตกต่างระหว่างขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณเอาต์พุตต่อความแตกต่างระหว่างขีดจำกัดบนและล่างของพิสัยสัญญาณอินพุต