

การควบคุมแบบปรับตัวสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท

นาย จิระศักดิ์ จันทร์รัตน



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-364-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ADAPTIVE CONTROL FOR SINGLE-LINK FLEXIBLE MANIPULATORS USING NEURAL NETWORKS**



**Mr. Jirasak Janrattana**

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

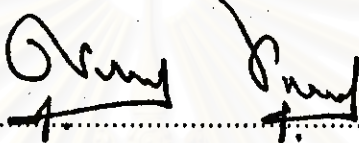
Academic Year 1997

ISBN 974-638-364-7

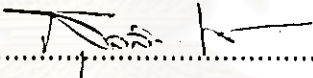
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การควบคุมแบบปรับตัวสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียวโดยใช้ข่ายงาน  
ระบบประสาท  
โดย    นาย จิระศักดิ์ จันทร์รัตน  
ภาควิชา                                        วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา                         อาจารย์ ดร. วชิรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุดิววงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุวิทย์ ก้านความดี)

วชิรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร. วชิรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ)

มานพ วงศ์สายสุวรรณ  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

เดวิด บรรณเจตพงษ์ชัย  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงษ์ชัย)

จิระศักดิ์ จันทร์รัตน : การควบคุมแบบปรับตัวสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียวโดยใช้ข่ายงานระบบประสาท (ADAPTIVE CONTROL FOR SINGLE-LINK FLEXIBLE MANIPULATORS USING NEURAL NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. วัชรพงษ์ โชวิฑูรกิจ , 76 หน้า. ISBN 974-638-364-7.

ข่ายงานระบบประสาทมีคุณสมบัติคือใช้เป็นตัวประมาณไม่เชิงเส้นได้ดี ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการควบคุมแบบปรับตัวกับแขนกลแบบอ่อนตัว ซึ่งได้วิธีการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทโดยอาศัยแบบจำลองส่วนแข็งเกร็ง โครงสร้างของตัวควบคุมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนที่ออกแบบจากแบบจำลองส่วนแข็งเกร็งซึ่งหาได้ง่าย และส่วนที่สองเป็นข่ายงานระบบประสาทใช้ควบคุมส่วนอ่อนตัว การใช้ข่ายงานระบบประสาทในการควบคุมแบบปรับตัวโดยตรงสามารถละเลยสมมติฐานความเป็นเชิงเส้นในพารามิเตอร์ได้ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทราบรายละเอียดของแบบจำลองของระบบซึ่งในกรณีของแขนกลแบบอ่อนตัวหาได้ถูกต้องแม่นยำยาก นอกจากนี้วิธีการนี้ไม่ต้องมีการฝึกหัดข่ายงานล่วงหน้า เนื่องจากมีวิธีการปรับพารามิเตอร์ตั้งแต่เริ่มต้นใช้งานซึ่งได้จากการวิเคราะห์เลียนูปโนฟ ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริงกับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียวแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอสามารถใช้ได้ดี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
ปีการศึกษา ..... 2540 .....

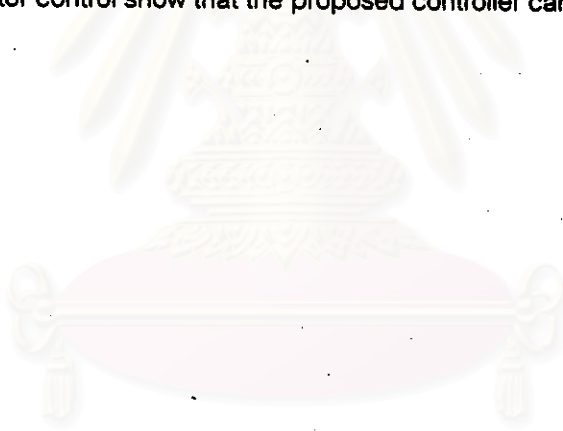
ลายมือชื่อนิสิต ..... จิระศักดิ์ จันทร์รัตน .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... วัชรพงษ์ โชวิฑูรกิจ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... - .....

# # 3970295021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ADAPTIVE CONTROL / NEURAL NETWORKS / SINGLE-LINK FLEXIBLE MANIPULATORS

JIRASAK JANRATTANA : ADAPTIVE CONTROL FOR SINGLE-LINK FLEXIBLE MANIPULATORS  
USING NEURAL NETWORKS. THESIS ADVISOR : WATCHARAPONG KHOVIDHUNGIJ, Ph.D. 76 pp.  
ISBN 974-638-364-7.

Neural networks possess a nonlinear approximation property, so they can be employed in direct adaptive control for flexible manipulators. In this thesis, a rigid model-based neural network control is proposed. The structure of controller is composed of two parts. The first part is designed from the rigid model and the second part, which comprises a neural network, is used to control the flexible part of the flexible manipulator. A major advantage of the neural network adaptive controller design over previous ones is that it does not need the linearity-in-the-parameters assumption. Moreover, model details that are hard to obtain exactly, especially in case of flexible manipulator, are not necessary. In addition, since the parameter adaptation law is obtained from the Lyapunov approach, the neural networks learn on-line in real time with no off-line training needed. Both the computer simulation and the experimental result of single-link flexible manipulator control show that the proposed controller can be used satisfactorily.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา..... 254๖.....

ลายมือชื่อนิติ..... จิรศักดิ์ จันทร์รัตนา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... วัชรพงษ์ ใจท้าวทอง.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สุวลัย กลั่นความดี ประธานกรรมการ รวมทั้งกรรมการอีกสองท่านคือ อาจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ และ อาจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย ที่ได้ให้คำชี้แนะเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เนื่องจากผู้วิจัยได้รับทุนการวิจัยจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จึงขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ามา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์รวมทั้งกำลังใจในการทำงาน ทั้งจากบุคคลที่สังกัดและไม่ได้สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 จุดประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ .....	6
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	6
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงาน .....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	7
<b>2 ข่ายงานระบบประสาทและการควบคุมแบบปรับตัว .....</b>	<b>8</b>
2.1 ข่ายงานระบบประสาท .....	9
2.2 การควบคุมแบบปรับตัว .....	13
2.2.1 สมการพลวัตของแขนหุ่นยนต์แบบแข็งเกร็ง .....	14
2.2.2 การควบคุมแบบปรับตัววิธีทั่วไป .....	15
2.2.3 การควบคุมแบบปรับตัวด้วยข่ายงานระบบประสาท .....	16
2.3 สรุป .....	16
<b>3 วิธีการที่นำเสนอ .....</b>	<b>17</b>
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบอ่อนตัว .....	18
3.2 วิธีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น .....	19

## สารบัญ (ต่อ)

### บทที่

3.3	การควบคุมแขนกลแบบอ่อนตัวด้วยข่ายงานระบบประสาท ที่อาศัยแบบจำลองในส่วนเชิงเกร็ง .....	21
3.3.1	หลักการและทฤษฎี .....	21
3.3.3	กฎการควบคุม .....	22
3.3.3	การพิสูจน์เสถียรภาพ .....	25
3.4	สรุป .....	28
4	การควบคุมแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว .....	29
4.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว .....	29
4.2	การออกแบบตัวควบคุม .....	31
4.3	ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ .....	32
4.5.1	การควบคุมแบบไม่เชิงเส้น .....	34
4.5.2	การควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาท โดยอาศัยแบบจำลองในส่วนเชิงเกร็ง .....	39
4.5.3	ผลตอบสนองของระบบเมื่อเปลี่ยนสภาวะการทำงาน .....	34
4.5.4	การตรวจสอบผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ .....	51
4.4	การวิเคราะห์ผลการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ .....	53
4.5	ผลการทดลองกับระบบจริง .....	55
4.5.1	ชุดทดลองแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว .....	55
4.5.2	ผลการทดลองกับระบบจริงกรณีต่างๆ .....	58
4.6	การวิเคราะห์ผลการทดลองกับระบบจริง .....	65
4.7	สรุป .....	66
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....	67
	รายการอ้างอิง .....	69
	ภาคผนวก .....	73
	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว .....	73
	ประวัติผู้วิจัย .....	76



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของแขนกลแบบอ่อนตัว .....	32
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบเวลาในการประมวลผลขั้นตอนต่างๆ .....	57



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	โครงสร้างของข่ายงานระบบประสาทชนิด 3 ชั้น .....	9
รูปที่ 2.2	ฟังก์ชันกระตุ้นที่ใช้กันโดยทั่วไป .....	11
รูปที่ 3.1	แผนภาพกรอบของแขนกลแบบอ่อนตัว .....	18
รูปที่ 3.2	แผนภาพกรอบแสดงวิธีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น .....	20
รูปที่ 3.3	แผนภาพกรอบแสดงการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทโดยอาศัย แบบจำลองส่วนแข็งเกร็ง .....	24
รูปที่ 4.1	มุมของมอเตอร์ ( $\theta_r$ ) และระยะที่เบี่ยงเบนไป ( $d_r$ ) จากแกนอ้างอิงของ แขนกลแบบอ่อนตัว .....	29
รูปที่ 4.2	แผนภาพกรอบแสดงแขนกลแบบอ่อนตัวที่มีสัญญาณเข้าเป็นแรงดัน ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ .....	30
รูปที่ 4.3	ลักษณะของแขนกลแบบอ่อนตัวโมดที่ 1 ถึง โมดที่ 4 .....	31
รูปที่ 4.4	เส้นทางที่ต้องการที่ใช้ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ .....	33
รูปที่ 4.5	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ที่ปรับแล้ว .....	34
รูปที่ 4.6	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ $\lambda_r$ หรือ $K_{vr}$ มาก..	35
รูปที่ 4.7	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ $\lambda_r$ หรือ $K_{vr}$ น้อย..	36
รูปที่ 4.8	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ $\lambda_f$ หรือ $K_{vf}$ น้อย..	37
รูปที่ 4.9	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ $\lambda_f$ หรือ $K_{vf}$ มาก..	38
รูปที่ 4.10	ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ ที่เหมาะสม .....	39
รูปที่ 4.11	ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีศึกษาผลของ NNm ....	40
รูปที่ 4.12	ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีศึกษาผลของ NNa ....	41
รูปที่ 4.13	ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีพารามิเตอร์เริ่มต้น ไม่เหมาะสม .....	42
รูปที่ 4.14	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นในกรณีลดมวลที่ตำแหน่งปลาย 50 % .....	43
รูปที่ 4.15	ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นกรณีลดมวลที่ตำแหน่งปลาย 50 % .....	44

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีเพิ่มมวลที่ตำแหน่งปลาย 50 % .....	45
รูปที่ 4.17 ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทในกรณีเพิ่มมวลที่ตำแหน่งปลาย 50 % .....	46
รูปที่ 4.18 ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยเปลี่ยนเส้นทางที่ต้องการเป็น $(\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 45^\circ, T = 1)$ .....	47
รูปที่ 4.19 ผลที่ได้จากการควบคุมแบบไม่เชิงเส้นโดยเปลี่ยนเส้นทางที่ต้องการเป็น $(\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 45^\circ, T = 0.5)$ .....	48
รูปที่ 4.20 ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทเมื่อเปลี่ยนเส้นทางที่ต้องการเป็น $(\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 45^\circ, T = 1)$ .....	49
รูปที่ 4.21 ผลที่ได้จากการควบคุมด้วยข่ายงานระบบประสาทเมื่อเปลี่ยนเส้นทางที่ต้องการเป็น $(\theta_0 = 0^\circ, \theta_f = 45^\circ, T = 0.5)$ .....	50
รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้การหาแบบจำลองจาก Ge et al. (1997) .....	51
รูปที่ 4.23 ผลตอบสนองของระบบเมื่อใช้การหาแบบจำลองจาก Tomei and Tomambe (1988). .....	52
รูปที่ 4.24 ชุดทดลองระบบแขนกลข้อต่อเดียวแบบอ่อนตัว .....	55
รูปที่ 4.25 แผนภาพการอบแสดงการสร้าง $\theta_f^{filter}$ และ $d_f^{filter}$ .....	55
รูปที่ 4.26 การเชื่อมต่อระหว่างชุดทดลองกับเครื่องคอมพิวเตอร์ .....	56
รูปที่ 4.27 ผลการทดลองกับระบบจริงในสภาวะปกติ .....	59
รูปที่ 4.28 ผลการทดลองกับระบบจริงในกรณีที่ใช้เส้นทางที่ต้องการ $(\theta_0 = -45^\circ, \theta_f = 45^\circ, T = 0.8)$ .....	60
รูปที่ 4.29 ผลการทดลองกับระบบจริงในกรณีที่ใช้เส้นทางที่ต้องการ $(\theta_0 = -22.5^\circ, \theta_f = 22.5^\circ, T = 0.5)$ .....	61
รูปที่ 4.30 ผลการทดลองกับระบบจริงในกรณีที่เพิ่มมวลที่ตำแหน่งปลาย 30 % .....	62
รูปที่ 4.31 ผลการทดลองกับระบบจริงในกรณีที่สำคัญกับส่วนแข็งแรงมากเกินไป .....	63
รูปที่ 4.32 ผลการทดลองกับระบบจริงในกรณีที่สำคัญกับส่วนอ่อนตัวมากเกินไป .....	64