การควบคุมคงทนที่รวมเงื่อนไขเชิงเวลาสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว

นางสาวลัดดาวัลย์ แซ่โค้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-222-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19460758

# ROBUST CONTROL WITH TIME-DOMAIN CONSTRAINTS FOR A ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM

Miss Laddawan Khow

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2000
ISBN 974-346-222-8

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมคงทนที่รวมเงื่อนไขเชิงเวลาสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว |
| โดย | นางสาวลัดดาวัลย์ แซ่โค้ว |
| ภาควิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เชาว์วิศิษฐ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

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

ลัดดาวัลย์ แซ่โค้ว: การควบคุมคงทนที่รวมเงื่อนไขเชิงเวลาสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว (ROBUST CONTROL WITH TIME-DOMAIN CONSTRAINTS FOR ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM) อ. ที่ปรึกษา: อ. ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย, 63 หน้า, ISBN 974-346-222-8

งานวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาวิธีการออกแบบระบบควบคุมคงทน วิธีที่ศึกษามี 2 วิธี คือ วิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้และวิธีการสังเคราะห์มิว มีเป้าหมายการควบคุมเพื่อให้สัญญาณออกติดตามสัญญาณอ้างอิงและสามารถขจัดสัญญาณรบกวน อีกทั้งยังประกันเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน การวิเคราะห์เสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนของระบบควบคุมคงทนจำเป็นต้องทำในโดเมนความถี่ ฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะซึ่งเป็นตัวกำหนดสมรรถนะของระบบจึงเป็นฟังก์ชันในเชิงความถี่ด้วย ดังนั้นการเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะ เพื่อให้ระบบมีผลตอบเชิงเวลาที่ดีเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอแนวทางการกำหนดฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะ เพื่อประกันเงื่อนไขทั้งในเชิงความถี่และเชิงเวลาสำหรับปัญหาการติดตามสัญญาณอ้างอิง เงื่อนไขสมรรถนะที่กำหนด ได้แก่ ความกว้างแถบความถี่ของระบบ ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และขนาดสัญญาณตัวขับเร้า

สำหรับระบบที่นำมาควบคุมคือ ระบบแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงมวลที่ปลายแขนและตำแหน่งมวล จากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่า วิธีการควบคุมคงทนสามารถประกันเงื่อนไขทั้งในเชิงเวลาและเชิงความถี่ได้ตามที่กำหนด อีกทั้งผลการทดลองจริงสอดคล้องและมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ นั่นหมายความว่า ตัวควบคุมคงทนสามารถควบคุมระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะตามที่กำหนดได้

| | |
|---|---|
| **ภาควิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า | **ลายมือชื่อนิสิต** ลัดดาวัลย์ แซ่โค้ว |
| **สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า | **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย |
| **ปีการศึกษา** 2543 | **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ..... |

##4170490521: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: ROBUST CONTROL / FLEXIBLE ROBOT ARM / TIME-DOMAIN AND FREQUENCY-DOMAIN SPECIFICATION / $H_\infty$ CONTROL / $\mu$ SYNTHESIS

LADDAWAN KHOW: ROBUST CONTROL WITH TIME-DOMAIN CONSTRAINTS FOR A ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM. THESIS ADVISOR: DAVID BANJERD-PONGCHAI, Ph.D. 63 pp., ISBN 974-346-222-8

This thesis concerns robust control design. Two synthesis techniques, namely, $H_\infty$ control and $\mu$ synthesis are presented. The objectives of the robust control design are to follow the desired reference input, reject disturbance noise, and guarantee stability and performance for systems subject to uncertain working conditions. Since the techniques analyze robust stability and robust performance in frequency domain, the performance weight which specifies system performance is a function in the frequency domain. Thus, it is rather difficult to directly select weighting functions to satisfy time domain specifications. One of the objectives of this thesis is to provide a guideline of selecting weighting functions satisfying for not only frequency-domain specifications but also some time-domain specifications in reference tracking problem. In particular, we specify performance in terms of bandwidth of closed-loop system, steady state error, and maximum control input signal.

The other objective is to apply the robust control design to a one-link flexible robot arm, which has parameter changes due to different working conditions. The simulation results show that this controller satisfies the design specifications. The experimental results clearly yield good time response and agree with the simulation results.

**Department** Electrical Engineering **Student's signature** Laddawan Saethow
**Field of study** Electrical Engineering **Advisor's signature** David Banjerdpongchai
**Academic year** 2000 **Co-advisor's signature** .....

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของอาจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมถึงให้ความช่วยเหลือทั้งด้านการเรียนและเรื่องส่วนตัว ทำให้นิสิตมีกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ เชาว์วิศิษฐ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และอาจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ ที่ท่านได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุมที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ๆทุกคน ที่เป็นกำลังใจและให้โอกาสผู้วิจัยได้เรียนต่อในระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม และเพื่อนสนิทในชั้นเรียนสมัยเรียนที่มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ ช่วยคิดแก้ไขปัญหาต่างๆ ให้ผู้วิจัยได้ทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วง

ท้ายนี้ขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่สนับสนุนด้านการเงินให้ผู้วิจัยตลอดช่วงเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาอยู่

# สารบัญ

หน้า


บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ญ

บทที่

**1. บทนำ ..... 1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ..... 2

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ..... 3

1.3 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์ ..... 4

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน ..... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ..... 4

**2. การควบคุมคงทน ..... 6**

2.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเชิงเส้น ..... 6

2.2 การสร้างแบบจำลองความไม่แน่นอน ..... 7

2.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพคงทน ..... 8

2.4 การวิเคราะห์สมรรถนะคงทน ..... 10

2.5 วิธีการควบคุมเอชอินฟินิตี้ ..... 11

2.6 สรุป ..... 13

**3. การวิเคราะห์และสังเคราะห์มิว ..... 14**

3.1 เมทริกซ์ถ่ายโอนสำหรับการวิเคราะห์และสังเคราะห์ตัวควบคุม ..... 14

3.2 การวิเคราะห์เสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนสำหรับระบบ MIMO ..... 16

3.2.1 ค่ามิว (Structured Singular Value, $\mu$) ..... 17

3.2.2 ทฤษฎีเสถียรภาพคงทน ..... 18

3.2.3 ทฤษฎีสมรรถนะคงทน ..... 18

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า


3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพคงทนและสมรรถนะคงทนสำหรับระบบ SISO ..... 19
3.4 การสังเคราะห์มิว ($\mu$ synthesis) ..... 19
3.4.1 ขั้นตอนของการออกแบบตัวควบคุมด้วยการวนรอบดีเค ..... 20
3.5 สรุป ..... 21

**4. แนวทางการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบเชิงเวลา ..... 22**
4.1 เงื่อนไขสัญญาณออก ..... 22
4.2 การเลือกฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะโดยสังเกตจากระบบอันดับสอง ..... 23
4.3 เงื่อนไขสัญญาณควบคุม ..... 27
4.4 การออกแบบตัวควบคุมที่สอดคล้องกับเงื่อนไขสมรรถนะคงทนทั้งสองเงื่อนไข .. 28
4.5 สรุป ..... 31

**5. ตัวอย่างการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ..... 32**
5.1 แบบจำลองระบบแขนกล ..... 32
5.2 การออกแบบตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้และการสังเคราะห์มิว ..... 34
5.3 การออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขเชิงเวลา ..... 44
5.4 สรุป ..... 48

**6. ผลการทดลองกับระบบจริง ..... 49**
6.1 ชุดทดลองแขนกลแบบอ่อนตัว ..... 49
6.2 ผลการทดลอง ..... 50
6.3 สรุป ..... 51

**7. บทสรุปและข้อเสนอแนะ ..... 56**
7.1 บทสรุป ..... 56
7.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้ ..... 56
7.3 ข้อเสนอแนะอื่นๆ ..... 57
7.4 สิ่งที่ควรทำในการทำงานวิจัยต่อไป ..... 58

**รายการอ้างอิง ..... 59**

**ประวัติผู้เขียน ..... 63**

# สารบัญตาราง

หน้า


ตารางที่ 5.1 ขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้ ..... 36
ตารางที่ 5.2 ขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมมิว ..... 36
ตารางที่ 5.3 ค่าของ $\|G_{zw}\|_\infty$, $\mu_{\tilde{\Delta}}(G_{zw})$ จากการควบคุมเอชอินฟินิตี้และมิวเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า $\gamma$ . 37
ตารางที่ 5.4 ช่วงเวลาขึ้นและช่วงเวลาเข้าที่ (หน่วยวินาที) ของระบบควบคุมจากวิธีการจัดสัณฐานวงรอบ การสังเคราะห์มิวและเอชอินฟินิตี้ ..... 38
ตารางที่ 5.5 ขั้วและศูนย์ของตัวควบคุมมิวที่สอดคล้องสองเงื่อนไข ..... 45
ตารางที่ 5.6 ขั้ว และศูนย์ของตัวควบคุมมิวที่ลดอันดับ ..... 45

# สารบัญภาพ

หน้า


รูปที่ 2.1 ระบบเชิงเส้นที่มีความไม่แน่นอน . . . . . 6
รูปที่ 2.2 การรวมความไม่แน่นอน . . . . . 7
รูปที่ 2.3 ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงการบวก . . . . . 7
รูปที่ 2.4 ระบบที่มีความไม่แน่นอนเชิงการคูณ . . . . . 8
รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมวงปิดที่มีความไม่แน่นอน . . . . . 9
รูปที่ 2.6 กราฟไนควิสต์สำหรับการวิเคราะห์เสถียรภาพคงทน . . . . . 9
รูปที่ 2.7 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมวงปิด เมื่อระบบถูกรบกวน . . . . . 10
รูปที่ 2.8 ระบบควบคุมวงปิด เมื่อแทนการรบกวนด้วยความไม่แน่นอน . . . . . 11

รูปที่ 3.1 แผนภาพกรอบแสดงโครงสร้าง $P$ สำหรับเงื่อนไขสมรรถนะคงทน . . . . . 14
รูปที่ 3.2 แผนภาพกรอบแสดงโครงสร้าง $P$ สำหรับเงื่อนไขเสถียรภาพคงทน . . . . . 15
รูปที่ 3.3 แผนภาพกรอบแสดงโครงสร้าง $N\Delta$ . . . . . 15
รูปที่ 3.4 แผนภาพกรอบแสดงโครงสร้าง $M\Delta$ . . . . . 16
รูปที่ 3.5 การปรับมาตราส่วนด้วยเมทริกซ์ปรับมาตราส่วน . . . . . 17

รูปที่ 4.1 เส้นเชิงกำกับของส่วนกลับของฟังก์ชันน้ำหนักสมรรถนะ . . . . . 23
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\zeta$ และขนาดมากที่สุดของฟังก์ชันความไว . . . . . 23
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขึ้นกับความกว้างแถบความถี่และ $\zeta$ . . . . . 25
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาเข้าที่กับความกว้างแถบความถี่และ $\zeta$ . . . . . 25
รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันความไวเมื่อแปรค่า $\zeta$ . . . . . 26
รูปที่ 4.6 ระบบควบคุมวงปิด เมื่อแทนการรบกวนสองตำแหน่งด้วยความไม่แน่นอน . . . . . 28
รูปที่ 4.7 แผนภาพกรอบแสดงโครงสร้าง $N\Delta$ เมื่อระบบมีความไม่แน่นอน 3 บล็อค . . . . . 29

รูปที่ 5.1 แขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว . . . . . 32
รูปที่ 5.2 การแสดงลักษณะการสั่นของแขนกลแบบอ่อนตัว . . . . . 34
รูปที่ 5.3 $|S_{\max}|$ เมื่อควบคุมด้วยวิธีการจัดสัณฐานวงรอบ, การสังเคราะห์มิว และการควบคุมเอชอินฟินิตี้ . . . . . 36
รูปที่ 5.4 มุมที่ปลายแขนในกรณีที่ 1 . . . . . 39
รูปที่ 5.5 ค่าผิดพลาดในกรณีที่ 1 . . . . . 39
รูปที่ 5.6 มุมที่ปลายแขนในกรณีที่ 2 . . . . . 40

# สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7 ค่าผิดพลาดในกรณีที่ 2 . . . . . 40
รูปที่ 5.8 มุมที่ปลายแขนในกรณีที่ 3 . . . . . 41
รูปที่ 5.9 ค่าผิดพลาดในกรณีที่ 3 . . . . . 41
รูปที่ 5.10 มุมที่ปลายแขนในกรณีที่ 4 . . . . . 42
รูปที่ 5.11 ค่าผิดพลาดในกรณีที่ 4 . . . . . 42
รูปที่ 5.12 สัญญาณควบคุมจากระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมเอชอินฟินิตี้ทั้ง 4 กรณี . . . . . 43
รูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุมจากระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมมิวทั้ง 4 กรณี . . . . . 43
รูปที่ 5.14 $(|w_i T_0| + |w_p S_0|)$ และ $(|w_i T_0| + |w_u U_0|)$ . . . . . 46
รูปที่ 5.15 $1/|w_p|$ และ $|S_{\max}|$ . . . . . 46
รูปที่ 5.16 มุมที่ปลายแขนทั้ง 4 กรณี . . . . . 47
รูปที่ 5.17 ค่าผิดพลาดทั้ง 4 กรณี . . . . . 47
รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุมจากการสังเคราะห์มิวสองเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 48

รูปที่ 6.1 ชุดทดลองแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว . . . . . 49
รูปที่ 6.2 มุมที่ปลายแขนจากการควบคุมเอชอินฟินิตี้ทั้ง 4 กรณี . . . . . 52
รูปที่ 6.3 ค่าผิดพลาดจากการควบคุมเอชอินฟินิตี้ทั้ง 4 กรณี . . . . . 52
รูปที่ 6.4 มุมที่ปลายแขนจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องหนึ่งเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 53
รูปที่ 6.5 ค่าผิดพลาดจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องหนึ่งเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 53
รูปที่ 6.6 มุมที่ปลายแขนจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องสองเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 54
รูปที่ 6.7 ค่าผิดพลาดจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องสองเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 54
รูปที่ 6.8 สัญญาณควบคุมจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องหนึ่งเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 55
รูปที่ 6.9 สัญญาณควบคุมจากการสังเคราะห์มิวที่สอดคล้องสองเงื่อนไขทั้ง 4 กรณี . . . . . 55