

การควบคุมแขนกลมาสเตอร์-สเลฟด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

นาย สมนาย ฐนธรรมาคณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พุทธศักราช 2535

ISBN 974-581-349-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018510: 119151387

MICROCOMPUTER CONTROL OF THE MASTER-SLAVE CHULA2 MANIPULATOR ARM

Mr. Somchai Thanoodhammakhun

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

Graduate School

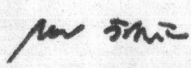
Chulalongkorn University

1992

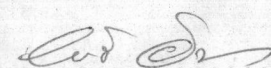
ISBN 974-581-349-4

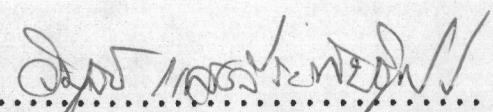
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมแขนกลมาสเตอร์-สเลฟด้วยไมโครคอมพิวเตอร์  
โดย นาย สมชาย ธนธรรมมาคุณ  
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

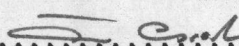
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

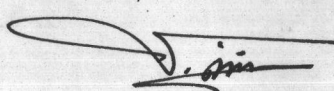
  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วัชรากัย )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
( ศาสตราจารย์ ดร. วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์ )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ )

  
..... กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ )

  
..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณเนษิกิจ )





พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

สมชาย ฐนุธรรมาคณ : การควบคุมแขนกลมาสเตอร์-สเลฟจุฬา2 ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์  
(MICROCOMPUTER CONTROL OF THE MASTER-SLAVE CHULA2 MANIPULATOR ARM)  
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 85 หน้า. ISBN 974-581-349-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิเคราะห์ถึงการใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุมตำแหน่งของระบบแขนกลมาสเตอร์-สเลฟจุฬา2 ในเวลาจริง โดยใช้การป้อนกลับของตัวแปรสเทท มีการพิจารณาถึงผลของพารามิเตอร์ของระบบต่อผลตอบสนองเชิงเวลาและเสถียรภาพของระบบ แขนกลมาสเตอร์-สเลฟจุฬา2 ที่ใช้ทดลองเป็นแขนกลที่เคลื่อนที่ในแนวระดับ มีข้อต่อแบบหมุน 2 ข้อต่อ แขนกลสเลฟหรือแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม มีขนาดใหญ่กว่า แต่ละข้อต่อถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านชุดเกียร์ทด

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แขนกลที่เคลื่อนที่ตาม สามารถเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่นำในเวลาจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มค่าเกน (หรือความถี่ธรรมชาติ) จะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยลง แต่การเพิ่มคาบเวลาในการสุ่ม จะทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งมากขึ้น อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มค่าเกนหรือเพิ่มคาบเวลาในการสุ่มมากเกินไป อาจจะทำให้ระบบเกิดการแกว่งหรือไม่มีเสถียรภาพได้

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา ..... 2534

ลายมือชื่อนิสิต ..... *Am Prasanna*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *Dr. W. W. S.*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม ..... -

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

## C015932 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD : MASTER-SLAVE/MICROCOMPUTER

SOMCHAI THANOODHAMMAKHUN : MICROCOMPUTER CONTROL OF THE MASTER-SLAVE CHULA2 MANIPULATOR ARM. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. DR. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, 85 PP. ISBN 974-581-349-4

This thesis studies and analyses a real-time microcomputer-based position control of the master-slave CHULA2 manipulator arm by using state-variable-feedback. The effect of system parameters to time response and system stability is discussed. The tested master-slave CHULA2 manipulator arm has two revolving joints with plane-motion manipulator arm. The slave arm is bigger than the master's and each joint is indirectly driven by a d.c. servomotor.

The experimental results show that the slave arm can effectively track, in real time, the movement of the master arm. Increase of gain (or natural frequency) will decrease the maximum position error while increase of the sampling time will increase the maximum position error. However, excessive increase of gain or sampling time may cause the system oscillation or eventually unstable.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา ..... 2534

ลายมือชื่อนิสิต ..... *Somchai Thanoodhammakhun*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *Dr. Viboon Sangveraphunsiri*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาเสียสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำตลอดจนข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ฝ่ายวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งได้ให้ทุนโครงการ "ผู้ช่วยวิจัย" สำหรับโครงการ "การควบคุมแบบย้อนกลับของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดสามแกนหมุน" แก่ผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินการวิจัยไปได้ด้วยดี และเนื่องจากทุนของการวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยอีกครั้งมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ มารดา ซึ่งได้สนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	๘
กิตติกรรมประกาศ .....	๑
สารบัญตาราง .....	๗
สารบัญภาพ .....	๗
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	๗
บทที่	
1. บทนำ .....	1
2. ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแซนกลูมาสเตอร์-สเลฟ .....	4
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแซนกล .....	11
4. ระบบควบคุมอัตโนมัติ .....	30
5. การวิเคราะห์ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ .....	37
6. การวิเคราะห์ระบบควบคุมอัตโนมัติแบบไม่ต่อเนื่อง .....	43
7. การทดลอง .....	56
8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	70
เอกสารอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก .....	73
ประวัติผู้เขียน .....	85

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
7.1	ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ใช้ในการทดลอง .....	58
7.2	ผลการทดลองการหาค่าเกิน .....	58
7.3	ผลการทดลองเปลี่ยนคาบเวลาในการสุ่ม .....	63
7.4	ผลการทดลองควบคุมแบบออนไลน์ .....	65



สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรในระดับที่ 1 .....	4
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรในระดับที่ 2 .....	5
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรในระดับที่ 3 .....	6
2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรในระดับที่ 4 .....	6
2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และเครื่องจักรในระดับที่ 5 .....	7
2.6 แสดงระบบแขนกลมาสเตอร์-สเลฟที่ถ่ายทอดข้อมูลด้วยกลไก .....	8
2.7 แสดงระบบแขนกลมาสเตอร์-สเลฟที่ถ่ายทอดข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ .....	9
2.8 การควบคุมแขนกลวิธีที่ 1 .....	10
2.9 การควบคุมแขนกลวิธีที่ 2 .....	10
3.1 แสดงแขนกลที่ใช้ในโครงการวิจัย .....	12
3.2 แสดงสัญลักษณ์ของแขนกลที่เคลื่อนที่ตาม .....	14
3.3 แสดงสัญลักษณ์ของมอเตอร์, เกียร์ทด และ โหลดสำหรับแขนกลหนึ่งแขน .....	19
4.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับระบบแบบผสม .....	30
4.2 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมอัตโนมัติแบบป้อนกลับ .....	36
5.1 แสดงลักษณะของสัญญาณเข้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ .....	38
6.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมอัตโนมัติแบบไม่ต่อเนื่อง .....	44
6.2 แสดงบริเวณของ POLES ของระบบที่มีเสถียรภาพบนระนาบ Z-PLANE .....	53
6.3 แสดงทางเดินของ POLES ในกรณีที่ 1 สำหรับแขนกลข้อต่อที่ 1 .....	54
6.4 แสดงทางเดินของ POLES ในกรณีที่ 2 สำหรับแขนกลข้อต่อที่ 1 .....	54
6.5 แสดงทางเดินของ POLES ในกรณีที่ 1 สำหรับแขนกลข้อต่อที่ 2 .....	55
6.6 แสดงทางเดินของ POLES ในกรณีที่ 2 สำหรับแขนกลข้อต่อที่ 2 .....	55
7.1 แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ของ ข้อมูลอ้างอิง ที่ใช้ทดลอง ควบคุมแบบออฟไลน์ .....	57
7.2 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดของตำแหน่งในการทดลองหาค่าเกน กรณีที่ 4 .....	60

7.3	แสดงความเร็ว และความผิดพลาดของความเร็ว ในการทดลองหาค่าเกณฑ์ที่ 4 .....	61
7.4	แสดงแรงบิดและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองหาค่าเกณฑ์ที่ 4 .....	62
7.5	แสดงตำแหน่งและทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองเปลี่ยนคาบเวลาในการสุม โดยใช้ $T = 20 \text{ msec}$ .....	64
7.6	แสดงตำแหน่ง และ ทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุม แบบออนไลน์ กรณีที่ 1 .....	66
7.7	แสดงตำแหน่ง และ ทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุม แบบออนไลน์ กรณีที่ 2 .....	67
7.8	แสดงตำแหน่ง และ ทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุม แบบออนไลน์ กรณีที่ 3 .....	68
7.9	แสดงตำแหน่ง และ ทางเดินบนระนาบ X-Y ในการทดลองควบคุม แบบออนไลน์ กรณีที่ 4 .....	69
ก.1	แสดงส่วนประกอบของระบบการควบคุมแกนกลศาสตร์-สเลฟ .....	75
ก.2	แสดงรายละเอียดของมอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 1 .....	78
ก.3	แสดงรายละเอียดของมอเตอร์สำหรับข้อต่อที่ 2 .....	79
ข.1	แสดงโครงสร้างทั้งหมดของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม .....	81

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- a - สมาชิกในเมตริกซ์ของ A
- b - สมาชิกในเมตริกซ์ของ B
- c - ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์
- e - ค่าความผิดพลาด หรือ EXPONENTIAL
- f - ฟังก์ชัน
- k - สมาชิกในเมตริกซ์ของ K หรือ ครั้งที่ในการสุ่มเวลา
- m - มวล
- n - อัตราการระหว่างเกียร์ที่เพลลาของมอเตอร์กับเกียร์ที่เพลลาของแกนกล
- q - ตำแหน่งในพิกัดทั่วไป
- r - รัศมีพิกซ์ของเกียร์
- t - เวลา
- u - สมาชิกในเมตริกซ์ของ U
- v - ความเร็วเชิงเส้น
- x - ตำแหน่งเชิงเส้นในแนวแกน X หรือ สมาชิกในเมตริกซ์ของ X หรือ ตำแหน่ง  
เชิงมุม
- y - ตำแหน่งเชิงเส้นในแนวแกน Y
- A - เมตริกซ์ของระบบ (SYSTEM MATRIX) เมื่อพิจารณาระบบแบบต่อเนื่อง
- B - เมตริกซ์ของสัญญาณเข้า (INPUT MATRIX) เมื่อพิจารณาระบบแบบต่อเนื่อง  
หรือ สัมประสิทธิ์ความหน่วง
- CPU - CENTRAL PROCESSOR UNIT
- CG - จุดศูนย์กลางมวล
- D - สัมประสิทธิ์ความหน่วงเทียบเท่า หรือ สัญญาณดิจิทัล
- DMA - DIRECT MEMORY ACCESS
- D/A - DIGITAL TO ANALOG
- I - โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลเทียบเท่า หรือ เมตริกซ์ของโมเมนต์ความเฉื่อยของ  
มวล หรือ กระแสไฟฟ้า
- I/O - INPUT AND OUTPUT
- J - โมเมนต์ความเฉื่อยของมวล



- K - เมตริกซ์ของค่าเกน  
 KE - พลังงานจลน์รวมของระบบ  
 L - ค่าของลากรานจ์ โดยที่  $L = KE - PE$  หรือ ความยาว  
 N - จำนวนพื่นเกียร์  
 P - เมตริกซ์ของระบบ (SYSTEM MATRIX) เมื่อพิจารณาระบบแบบไม่ต่อเนื่อง  
 PE - พลังงานศักย์รวมของระบบ  
 Q - เมตริกซ์ของสัญญาณเข้า (INPUT MATRIX) เมื่อพิจารณาระบบแบบไม่ต่อเนื่อง หรือ แรงในพิกัดทั่วไป  
 SDP - SERVO DATA PROCESSOR  
 T - คาบเวลาในการลู่ หรือ แรงบิด  
 U - เมตริกซ์ของเวกเตอร์สัญญาณเข้า (INPUT VECTOR)  
 V - เมตริกซ์ของสเตตเวกเตอร์และเวกเตอร์สัญญาณเข้า หรือ แรงดันทางไฟฟ้า  
 X - เมตริกซ์ของสเตตเวกเตอร์ของระบบ (STATE VECTOR)  
 Y - เมตริกซ์ของเวกเตอร์สัญญาณเข้า (INPUT VECTOR)  
 ZOH - ZERO-ORDER HOLD  
 $\zeta$  - ตำแหน่งเชิงมุม  
 $\zeta$  - อัตราส่วนของความหน่วง (DAMPING RATIO)  
 $\omega$  - ความถี่ธรรมชาติ (NATURAL FREQUENCY)  
 $s( )$  - ความแตกต่างน้อยๆของตัวแปรในวงเล็บจากจุดทำงานปกติ (NOMINAL STATE)  
 $( \dot{ } )$  - อนุพันธ์อันดับที่ 1 เทียบกับเวลาของตัวแปรในวงเล็บ  
 $( \ddot{ } )$  - อนุพันธ์อันดับที่ 2 เทียบกับเวลาของตัวแปรในวงเล็บ

## ตัวอักษรห้อยท้าย (Subscript)

- c - ที่จุดศูนย์กลางมวล  
 d - ที่ต้องการ  
 i - ของแถวที่ i หรือ ของข้อต่อที่ i หรือ กรณที่ i  
 ij - ของแถวที่ i คอลัมน์ที่ j หรือ ของข้อต่อที่ i เทียบกับข้อต่อที่ j  
 M - ของมอเตอร์  
 o - ที่จุดทำงานปกติ (NOMINAL STATE)  
 ss - ที่สภาวะสมตลย (STEADY STATE)