

ตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนหุ่นยนต์



นาย ศิริ ศุภพัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2537

ISBN 974-584-424-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 14130034

AN OPTIMAL DIRECT ADAPTIVE CONTROLLER FOR ROBOTIC MANIPULATORS

Mr. Siri Suppapat

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-584-424-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนหุ่นยนต์

โดย นาย ศิริ ศุภพัฒน์

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.บุญมี อย่างธारा



บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการ
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรภักย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนชัย ประดิษฐายน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.บุญมี อย่างธारा)

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



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ศิริ ศุภพัฒน์ : ตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแขนหุ่นยนต์

(AN OPTIMAL DIRECT ADAPTIVE CONTROLLER FOR ROBOTIC MANIPULATORS)

อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. บุญมี อย่างธรา, 184 หน้า. ISBN 974-584-424-1

วิทยานิพนธ์นี้เสนอวิธีออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุด เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ตัวควบคุมส่วนที่หาได้จากกฎข้อที่สองของเลียปโนฟช่วยคำนวณหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ของระบบแขนหุ่นยนต์ และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการสร้างแรงบิดหลัก ซึ่งจะทำความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วมีค่าอยู่ในขอบเขต ในส่วนของตัวควบคุมแบบพีดีมีการใช้วิธีโปรแกรมพลวัตเพื่อคำนวณหาอัตราขยายของตัวควบคุม ซึ่งทำให้พจน์กำลังสองของค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยที่สุด อัตราขยายที่ได้นำไปใช้คำนวณหาค่าแรงบิดเสริม เมื่อนำผลรวมของแรงบิดทั้งสองไปป้อนให้กับข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แต่ละข้อต่อ ค่าความผิดพลาดลดลงเรื่อย ๆ และเข้าสู่ศูนย์ในที่สุด

ผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมสำหรับแขนหุ่นยนต์แบบ 3 ข้อต่อ คือ แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง แขนหุ่นยนต์แบบสกรู และแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ให้ผลการทำงานดี

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา ระบบควบคุม
ปีการศึกษา 2536

ลายมือชื่อนิสิต *ศิริ ศุภพัฒน์*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *[ลายมือ]*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม —

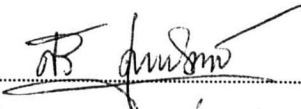
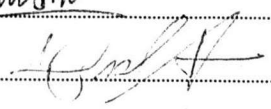
C315600 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: OPTIMAL / DIRECT ADAPTIVE / ROBOT CONTROL

SIRI SUPPAPAT : AN OPTIMAL DIRECT ADAPTIVE CONTROLLER FOR ROBOTIC
MANIPULATORS. THESIS ADVISOR : BOONMEE YANGTHARA, Ph. D.
184 pp. ISBN 974-584-424-1

The thesis presents a method of designing an optimal direct adaptive controller for motion control of robotic manipulators. This controller, based on the Lyapunov's second law, estimates the robotic system parameters and uses them to calculate the main torques which will keep the errors in joint positions and joint velocities within a bound. Next, the gains of a P.D. controller are determined via a dynamic programming approach such that the quadratic terms of the foregoing errors are minimized. Then, the P.D. gains are used to calculate the perturbation torques. Finally, the sum of the main torques and the perturbation torques is used as inputs to the robotic manipulator in order that the errors will be driven to zero after a period of time.

The results of the digital simulation of the 3-joint manipulators, namely the articulated robot, SCARA robot, and spherical robot, reveal that the proposed controller performs well.

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา.....ระบบควบคุม
ปีการศึกษา.....2536

ลายมือชื่อนิสิต..... 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.บุญมี อย่างธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ต่อการวิจัยด้วยดีตลอดมา รวมถึงถึงความช่วยเหลือจาก รศ. ดร.เทียนชัย ประดิษฐายน รศ. ดร.สุวลัย กลั่นความดี และอาจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ ที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำในบางประเด็นที่ผู้วิจัยขาดความเข้าใจ

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งให้ความสนับสนุนด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบคุณรุ่นพี่และรุ่นน้องปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

ศิริ ศุภพัฒน์



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
สารบัญสัญลักษณ์	บ
สารบัญคำย่อ	ผ

บทที่

1. บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย	4
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4

2. ระบบแขนหุ่นยนต์

ส่วนประกอบและการทำงานของระบบแขนหุ่นยนต์	6
ส่วนวางแผนขั้นตอนการทำงานของแขนหุ่นยนต์	6
ส่วนวางแผนเส้นทางการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์	6
ส่วนควบคุม	8
แขนหุ่นยนต์	8

3. การออกแบบตัวควบคุม.	
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
ทฤษฎีและแนวความคิด	12
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์	12
ตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติพลัสซีฟ (เดิม)	13
ตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติพลัสซีฟที่เหมาะสมที่สุด	17
4. การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์	
ขั้นตอนการจำลองการทำงาน	25
กรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์	26
กรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์	26
ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	27
การจัดเรียงพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์	27
แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	28
แขนหุ่นยนต์แบบสกราวา	31
แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม	33
การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด	36
ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	37
ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	37
ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	38
ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	39
การออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติพลัสซีฟที่เหมาะสมที่สุด	40
แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	40
แขนหุ่นยนต์แบบสกราวา	42
แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม	44

ผลของการจำลองการทำงานเมื่อตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์	46
ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	46
ผลของการจำลองการทำงานเมื่อตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์	57
ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	57
ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบสกราว	78
ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม	100
 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
ข้อสรุปจากผลการจำลองการทำงาน	122
ข้อสังเกตจากผลการจำลองการทำงาน	124
ข้อเสนอแนะ	124
 รายการอ้างอิง	126
ภาคผนวก ก	
ประเภทของแขนหุ่นยนต์	129
ภาคผนวก ข	
การใช้วิธีโปรแกรมพลวัตในตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติแพสซีฟ	134
ภาคผนวก ค	
เพิ่มคำสั่งที่ใช้ในการจำลองการทำงาน	147
 ประวัติผู้เขียน	184

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1. แสดงประสิทธิภาพการทำงานของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ	2
2. แสดงประเภทต่าง ๆ ของข้อต่อที่ใช้งานบ่อย ๆ ในแขนหุ่นยนต์	130

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1. แขนหุ่นยนต์แบบ Alpha Π robotic arm	5
2. แสดงแผนภาพกรอบระดับสูงของระบบแขนหุ่นยนต์	6
3. แสดงการกำหนดพิกัดลิงค์ให้กับแขนหุ่นยนต์ Alpha Π	7
4. แสดงคณิตศาสตร์ที่ใช้แปลงข้อมูลการเคลื่อนที่	7
5. แสดงการทำงานของตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์	8
6. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติพลัสซีฟ (เดิม)	13
7. แสดงโครงสร้างของตัวควบคุมแบบปรับตัวเองโดยตรงที่ใช้คุณสมบัติพลัสซีฟที่เหมาะสมที่สุด	17
8. แสดงแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องของ Stoten	28
9. แสดงแขนหุ่นยนต์แบบสกราราชของ Schilling	31
10. แสดงแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมของ Stoten	33
11. แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเคลื่อนที่ตาม	47
12. แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเคลื่อนที่ตาม	48
13. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมรู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	49
14. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	50
15. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	51
16. แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณีตัวควบคุมรู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	52
17. แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณีตัวควบคุมรู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	53

ภาพที่	หน้า
18. แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 , a_5 และ a_6 ในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	54
19. แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_7 และ a_8 ในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	55
20. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	56
21. แสดงค่าของดรอปและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	58
22. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	59
23. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	60
24. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	61
25. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	62
26. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 , a_5 และ a_6 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	63

ภาพที่	หน้า
27. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_7 และ a_8 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	64
28. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	65
29. แสดงค่าของดรอปอินสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	66
30. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	67
31. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	68
32. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	69
33. แสดงค่าของดรอปอินสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	70
34. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	71

ภาพที่	หน้า
35. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบ ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจาก ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	72
36. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	73
37. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	74
38. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบ ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจาก ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	75
39. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบ ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจาก ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	76
40. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	77
41. แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบสกราคาเคลื่อนที่ตาม	79
42. แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบสกราคาเคลื่อนที่ตาม	80
43. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราคาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	81

ภาพที่	หน้า
44. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบ ของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจาก ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	82
45. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบ ของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจาก ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	83
46. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณีตัวควบคุม ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	84
47. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณ จากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	85
48. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	86
49. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	87
50. แสดงค่าของดรอปเอาท์และฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	88
51. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สอง	89

ภาพที่	หน้า
52. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สอง	90
53. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	91
54. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	92
55. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สาม	93
56. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สาม	94
57. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	95
58. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	96
59. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สี่	97

ภาพที่	หน้า
60. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สี่	98
61. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	99
62. แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเคลื่อนที่ตาม	101
63. แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเคลื่อนที่ตาม	102
64. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	103
65. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่หนึ่ง	104
66. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่หนึ่ง	105
67. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	106
68. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	107

ภาพที่	หน้า
69. แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ a_4, a_5 และ a_6 ในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	108
70. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง	109
71. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	110
72. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	111
73. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	112
74. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง	113
75. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	114
76. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพหุนามดีเทอร์มิแนนต์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	115

ภาพที่	หน้า
77. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สาม	116
78. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม	117
79. แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	118
80. แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สี่	119
81. แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของ แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนัก ชุดที่สี่	120
82. แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุม คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่	121
ก.1 แสดงโครงสร้างและบริเวณการทำงานของหุ่นยนต์แบบแกนตั้งฉาก	131
ก.2 แสดงโครงสร้างและบริเวณการทำงานของหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง	131
ก.3 แสดงโครงสร้างและบริเวณการทำงานของหุ่นยนต์แบบทรงกระบอก	132
ก.4 แสดงโครงสร้างและบริเวณการทำงานของหุ่นยนต์แบบทรงกลม	132
ก.5 แสดงโครงสร้างและบริเวณการทำงานของหุ่นยนต์แบบสกรู	133

สารบัญสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
q, \dot{q}, \ddot{q}	หมายถึง เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละข้อต่อ ซึ่งมีมิติ n
$q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$	หมายถึง เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละข้อต่อ ที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตาม ซึ่งมีมิติ n
$\tilde{q}, \dot{\tilde{q}}, \ddot{\tilde{q}}$	หมายถึง เวกเตอร์ที่แสดงค่าความผิดพลาดในการติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยมีค่าดังต่อไปนี้ $\tilde{q} = q - q_d \quad ; \quad \dot{\tilde{q}} = \dot{q} - \dot{q}_d \quad ; \quad \ddot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_d$
\dot{q}_r, \ddot{q}_r	หมายถึง เวกเตอร์ที่สร้างตามแนวคิดของทฤษฎีบทแพสซีฟ เพื่อใช้คำนวณ หาสัญญาณควบคุม โดยมีค่าดังต่อไปนี้ $\dot{q}_r = \dot{q}_d - K_{pp}\tilde{q} \quad ; \quad \ddot{q}_r = \ddot{q}_d - K_{pp}\dot{\tilde{q}}$
e_v, \dot{e}_v	หมายถึง เวกเตอร์ที่ได้จากการรวมแบบเชิงเส้นระหว่างค่าความผิดพลาดต่าง ๆ โดยมีค่าดังต่อไปนี้ $e_v = \dot{\tilde{q}} + K_{pp}\tilde{q} \quad ; \quad \dot{e}_v = \ddot{\tilde{q}} + K_{pp}\dot{\tilde{q}}$
$\tau(t)$	หมายถึง เวกเตอร์ของแรงหรือแรงบิดที่กระทำกับแต่ละข้อต่อ ทำหน้าที่เป็น สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กลับแขนหุ่นยนต์ ซึ่งมีมิติ n
$H(q, A)$	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงผลกระทบอันเนื่องมาจากความเฉื่อยของระบบแขน หุ่นยนต์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
$C(q, \dot{q}, A)$	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงผลกระทบจากแรงคอริโอลิส และแรงเซนติพิทอล ของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
$G(q, A)$	หมายถึง เวกเตอร์ที่แสดงผลกระทบจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีมิติ n
A	หมายถึง เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ระบบ ที่ปกติไม่รู้ค่า เช่น มวลของลิงค์ โมเมนต์ของความเฉื่อย และตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล เป็นต้น และมีมิติ p (p เป็นค่าใด ๆ ที่เหมาะสม)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
F_v	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานฝืด และ เป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
K_f	หมายถึง เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานฝืด ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงพารามิเตอร์ในส่วนของแรงเสียดทานฝืด และมีมิติ n
$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q})$	หมายถึง เมตริกซ์ที่เกิดจากการจัดเรียงพารามิเตอร์ในส่วนของเวกเตอร์ $H(q, A)\ddot{q}$, $C(q, \dot{q}, A)\dot{q}$ และ $G(q, A)$ ซึ่งมีมิติ $n \times p$
$Y_f(\dot{q})$	หมายถึง เมตริกซ์ที่เกิดจากการจัดเรียงพารามิเตอร์ในส่วนของแรงเสียดทานฝืด ซึ่งมีมิติ $n \times n$
\hat{A}	หมายถึง เมตริกซ์ที่เป็นค่าประมาณของเมตริกซ์ A
\tilde{A}	หมายถึง เมตริกซ์ที่เป็นผลต่างระหว่างค่าประมาณและค่าจริงของเมตริกซ์ A โดยมีค่าดังต่อไปนี้ $\tilde{A} = \hat{A} - A$
K	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราขยายของสัญญาณ e_v และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
K_v	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราขยายของค่าความผิดพลาดของความเร็ว และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
K_p	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราขยายของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
K_{pp}	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราส่วนของการรวมแบบเชิงเส้นระหว่างค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็ว เพื่อสร้างสัญญาณ e_v และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
Γ	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราขยายของการปรับตัว (adaptive gain) ของส่วนที่ปรับค่าประมาณของเวกเตอร์ A และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $p \times p$

สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Γ_f	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงอัตราขยายของการปรับตัว (adaptive gain) ของส่วนที่ปรับหาค่าประมาณของเวกเตอร์ K_f และเป็นเมตริกซ์แยงที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
x	หมายถึง เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะในสมการสถานะของระบบควบคุมแบบหุ่นยนต์ ประกอบด้วย \tilde{q} , $\dot{\tilde{q}}$, และ \tilde{A} ซึ่งมีมิติ $(2n+p)$
Q	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าถ่วงน้ำหนักของตัวแปรสถานะ ซึ่งมีสถานะ $(2n+p) \times (2n+p)$
R	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าถ่วงน้ำหนักของขนาดสัญญาณควบคุม u และเป็นเมตริกซ์ที่มากกว่าศูนย์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$
S	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าถ่วงน้ำหนัก สำหรับพจน์ที่ประกอบด้วยตัวแปรสถานะ และสัญญาณควบคุม u ซึ่งมีมิติ $(2n+p) \times n$
Γ_1^{-1}	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าถ่วงน้ำหนักของค่าความผิดพลาด ที่เกิดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ A ที่เวลาอนันต์ ซึ่งมีมิติ $p \times p$
Γ_2^{-1}	หมายถึง เมตริกซ์ที่แสดงค่าถ่วงน้ำหนักของค่าความผิดพลาด ที่เกิดจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ K_f ที่เวลาอนันต์ ซึ่งมีมิติ $n \times n$

สารบัญคำย่อ

คำย่อ		คำเต็ม
DOF	ย่อมาจาก	Degrees of Freedom
SCARA	ย่อมาจาก	Selective Compliance Assembly Robot Arm
P.I.D.	ย่อมาจาก	Proportional plus Integral plus Derivative
P.D.	ย่อมาจาก	Proportional plus Derivative
S_i	ย่อมาจาก	$\sin(q_i)$
C_i	ย่อมาจาก	$\cos(q_i)$
S_{i+j}	ย่อมาจาก	$\sin(q_i + q_j)$
C_{i+j}	ย่อมาจาก	$\cos(q_i + q_j)$
$S_{2(i)+j}$	ย่อมาจาก	$\sin(2q_i + q_j)$
$C_{2(i)+j}$	ย่อมาจาก	$\cos(2q_i + q_j)$