

การควบคุมของแขนกลระนาบสองมิติสองก้านโยงภายใต้การรบกวนการเคลื่อนที่จากฐานสองมิติ



นายธีรพงศ์ ฟองจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROL OF TWO-LINK PLANAR MANIPULATOR ARM UNDER 2-D BASE MOTION DISTURBANCE



Mr. Theerapong Fongjun

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมของแขนกลระนาบสองมิติสองก้านโยงภายใต้
การรบกวนการเคลื่อนที่จากฐานสองมิติ

โดย

นายธีรพงศ์ ฟองจันทร์

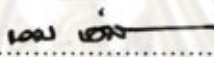
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

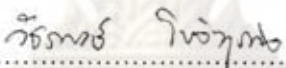
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

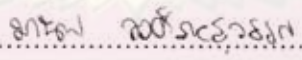
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირูวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรพงษ์ ไชวศิริกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธีรพงศ์ ฟองจันทร์: การควบคุมของแขนกลระนาบสองมิติสองก้านโยงภายใต้การ
 ควบคุมการเคลื่อนที่จากฐานสองมิติ. (CONTROL OF TWO-LINK PLANAR
 MANIPULATOR ARM UNDER 2-D BASE MOTION DISTURBANCE) อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 57 หน้า.

การควบคุมตำแหน่งของแขนกลในกรณีเมื่อฐานไม่อยู่นิ่งนั้นเมื่อแขนกลทำการเคลื่อนที่
 เพื่อเข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการควบคุม โดยที่ฐานของแขนกลไม่อยู่นิ่ง มีผลทำให้ ตำแหน่งของ
 ปลายแขนกลไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการได้ ในวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุม
 ตำแหน่งของปลายแขนกล เมื่อฐานไม่อยู่นิ่งด้วยวิธีการควบคุมปรับตัวแบบเชิงยงานพร้อมกับ
 ชดเชยแรงเสียดทานความหนืดและแรงเสียดทานสถิตโดยการป้อนตำแหน่งที่ต้องการควบคุม
 ให้กับแขนกลในฟังก์ชันที่เขียนจากนั้นทำการคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันเพื่อคำนวณหา
 ความเร็วและความเร่งของแขนกลพร้อมกับชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานด้วยวิธี นิวตัน-ราฟสัน

โดยทำการจำลองระบบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์และทดสอบจริงกับชุดทดลองย่อส่วน
 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแขนกลสามารถคงที่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการควบคุมได้ ในขณะที่
 ฐานของแขนกลไม่อยู่นิ่ง



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต..... ธีรพงศ์ ฟองจันทร์
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... มานพ วงศ์สายสุวรรณ
 ปีการศึกษา..... 2551.....

4970360321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : CONTROL OF STABILIZED / PLATFORM UNDER BASE MOTION

DISTURBANCE / PASSIVITY-BASED ADAPTIVE CONTROL / BASE MOTION

COMPENSATION

THEERAPONG FONGJUN: CONTROL OF TWO-LINK PLANAR MANIPULATOR
ARM UNDER 2-D BASE MOTION DISTURBANCE. ADVISOR: ASST. PROF.
MANOP WONGSAISUWAN, Ph.D., 57 pp.

Under the condition that the base of a robot manipulator has motion disturbance, the control of the end-effector target is difficult. In this thesis, we show a method for robot control under base motion disturbance with Passivity-Based Adaptive Control and for compensation of viscous and coulomb friction. We insert the circular trajectory specified in Cartesian space and then calculate the robot inverse kinematics for the compensation of the robot and its base. The method of compensation is computed by Newton-Raphson iteration.

The simulation and experiment result show that the robot can be controlled to the target under base motion disturbance.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Department :Electrical..Engineering..... Student's Signature : *ธีระพงษ์ ฟองจุน*
Field of Study : Electrical..Engineering..... Advisor's Signature : *มานพ วงศ์ไสสุวรรณ*
Academic Year :2008.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือ ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้เสียสละเวลาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ทั้งยังได้มอบหมายงานที่เป็นประโยชน์ต่างๆ ที่ช่วยทำให้นิสิตได้มีมุมมองและแนวคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วัชรพงษ์ ไชวิฑูรกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.สุธี ผู้เจริญชนะชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้พื้นฐานในวิชาทางระบบควบคุม อันเป็นพื้นฐานในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (TGIST) ที่ สนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้โอกาสศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ สนับสนุนในการศึกษาในระดับปริญญาโท บัณฑิตด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือต่างๆจนผู้วิจัยได้ทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จสมบูรณ์ได้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรต่างๆในการศึกษา ค้นคว้าและวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทนำ	1
1.1 แนวเหตุผล	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา	1
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์	3
แบบจำลองคณิตศาสตร์	4
2.1 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า	4
2.2 จลนศาสตร์แบบผกผัน	7
2.3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ	9
2.4 สรุป	14
ระบบควบคุม	15
3.1 การชดเชยการเคลื่อนที่ของฐาน	15
3.1.1 นิวตัน-ราฟสัน	15
3.2 ตัวควบคุม	18
3.3 สรุป	21
ผลการทดลอง	22
4.1 ชุดทดลอง	22
4.2 ระบบสมองกลฝังตัว	26
4.3 ผลการจำลองระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์	28
4.4 ผลการทดสอบกับชุดทดลองจริง	35

บทที่	หน้า
4.4.1 การเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์.....	35
4.4.2 ทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	36
4.4.3 ทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย.....	44
4.5 สรุป.....	51
บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 บทสรุป.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	54
รายการอ้างอิง.....	55
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	57



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
2.1: แสดงโครงสร้างของชุดทดลองย่อยส่วนจากมุมมองด้านบน	4
2.2: แสดงแผนภาพจลนศาสตร์ผกผันของระบบ	7
2.3: แสดงตำแหน่งของมุมในการคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันของแขนกล	7
4.1: แสดงชุดทดลองที่ออกแบบ	22
4.2: แสดงขีดจำกัดระหว่างแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2.....	23
4.3: แสดงขีดจำกัดระหว่างแขนกลก้านโยงที่ 1 และโครงมอเตอร์ และพื้นที่การทำงาน.....	23
4.4: แสดงความยาวของแขนแต่ละก้านโยงคือ 196 มิลลิเมตร	24
4.5: แสดงชุดทดลองจริง	24
4.6: แสดงชุดทดลองจริงจากมุมมองด้านบน.....	24
4.7: แสดงปลายของแขนกลซึ่งเป็นปากกา	25
4.8: แสดงชุดทดลองที่ตั้งอยู่บนแท่นทดสอบ.....	25
4.9: แสดงแผนภาพโครงสร้างของระบบสมองกลฝังตัว.....	26
4.10: แสดงการติดตั้งใช้งานแผงวงจรสมองกลฝังตัวกับชุดทดลองจริง.....	27
4.11: แสดงส่วนบันทึกและแสดงผลการทดลอง	27
4.12: แสดงแผนผังของระบบ.....	28
4.13: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ในการจำลองระบบ	30
4.14: แสดงการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน เส้นที่บคือตำแหน่ง เป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล.....	30
4.15: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการจำลองระบบ.....	31
4.16: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y ของการจำลองระบบ.....	31
4.17: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะขจัดของการจำลองระบบ	32
4.18: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการจำลองระบบ	33
4.19: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการจำลองระบบ	34
4.20: แสดงมุมขดเชยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2.....	34
4.21: แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์จากมุมมองด้านบน โดย planar คือตัวหุ่นยนต์ และ Platform คือแท่นทดสอบ	35

4.22: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	37
4.23: แสดงผลการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่ของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมายในขณะที่ฐานอยู่นิ่ง	38
4.24: แสดงผลการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่ของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลองเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์.	39
4.25: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	40
4.26: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	40
4.27: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะซัดของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	41
4.28: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่	41
4.29: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่.....	42
4.30: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน X เส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล	42
4.31: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน Y เส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล	43
4.32: แสดงมุมซดเซยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2.....	43
4.33: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ โดยใช้มือเคลื่อนที่แทนทดสอบเพื่อสร้างสัญญาณการรบกวนให้กับฐานของหุ่นยนต์	44
4.34: แสดงผลการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการเขียนวงกลมครบ 1 วงในขณะที่ฐานอยู่นิ่ง	45
4.35: แสดงผลการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลองเมื่อแขนกลทำการเขียนวงกลมครบ 1 วงจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์.....	46

4.36: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย	47
4.37: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y.....	47
4.38: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะขาด.....	48
4.39: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย	48
4.40: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย	49
4.41: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน X เส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล	50
4.42: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน Y เส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล	50
4.43: แสดงมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2.....	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวเหตุผล

หุ่นยนต์เป็นเครื่องจักรประเภทหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในงานหลายๆด้านทั้งทางด้านอุตสาหกรรม, การแพทย์, การกีฬา และอื่นๆอีกมากมาย ซึ่งหน้าที่ของหุ่นยนต์แตกต่างกันไปตามจุดประสงค์ของการใช้งานเช่น หุ่นยนต์สำหรับเชื่อม, หยิบจับสิ่งของ, หุ่นยนต์ในการผ่าตัด, เครื่องยิงลูกเทนนิส ฯลฯ โดยในงานส่วนใหญ่ฐานของหุ่นยนต์ถูกยึดติดอยู่กับที่เช่นหุ่นยนต์สำหรับพ่นสี, เครื่องจักร CNC, เครื่องตัดท่อหม้อน้ำ, เครื่องปั๊มแผ่นโลหะ, เครื่องตัดสติ๊กเกอร์ ฯลฯ และยังมีงานบางประเภทที่ฐานของหุ่นยนต์ไม่อยู่นิ่ง เช่น กล้องหักส่ายตา (periscopes) บนเรือดำน้ำซึ่งต้องทำการชดเชยผลของเรือดำน้ำที่มีการโคลงอยู่ตลอดเวลาทำให้กล้องหักส่ายตาไม่สามารถส่องเป้าหมายได้ดังเดิม, การถ่ายภาพวิดีโอบนเรือเมื่อเรือเกิดการโคลงเนื่องจากคลื่นลมทำให้การถ่ายภาพไม่สามารถจับภาพ ณ จุดเดิมได้, งานเคลื่อนย้ายวัตถุในขณะที่ฐานเคลื่อนที่ ฯลฯ

โดยในส่วนของงานประเภทที่ฐานของหุ่นยนต์ไม่อยู่นิ่งนั้นการควบคุมหุ่นยนต์ต้องทำการลดทอนการรบกวนจากฐานรากที่ส่งผลต่อการควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งมีประเด็นที่ต้องการควบคุมอยู่ 2 ประเด็นคือ การลดค่าความผิดพลาดของการติดตามสัญญาณขาเข้าและเวลาที่ใช้ในการติดตามให้มีค่าน้อยที่สุด

1.2 งานวิจัยที่ผ่านมา

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการนำเสนอการควบคุมระบบที่ฐานไม่อยู่นิ่ง อาทิเช่นในปี 1998 [1] ได้นำเสนอการควบคุมกล้องกลอกตา (gimbal) ด้วยตัวควบคุมเชิงเส้น-กำลังสองเกาส์เซียน (LQG) แบบ ปรับค่าได้ด้วยตัวเอง (self tuning) ถัดมาในปี 2003 [2] นำเสนอการควบคุมกล้องกลอกตา โดยเปรียบเทียบการควบคุมโดยตรง (direct) กับโดยอ้อม (indirect) ด้วยตัวควบคุมพีไอ (PI) ผลของการเปรียบเทียบคือ วิธีทางตรง ให้ผลการควบคุมที่มีประสิทธิภาพดีกว่าเนื่องจากสัญญาณรบกวนของวิธีทางอ้อมนั้นถูกรวมเข้ามากับสัญญาณของฐานฐานซึ่งต้องผ่านการแปลงอีกทีหนึ่งแต่วิธีทางตรงวัดสัญญาณรบกวนได้โดยตรงทำให้สามารถทำการกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า ต่อมาในปี 2004 [3] ทำการควบคุมดาวเทียมด้วยวิธีการควบคุมแบบเหมาะสมที่สุด (optimal control) ในปี 2007 [4] ทำการคำนวณหามุมของกล้องส่องเรือดำน้ำ (periscope) เพื่อ

ชุดเซียมมูมิที่เกิดจากการโคลงของเรือด้วยวิธีนิวตัน และในปี 2007 [5] ทำการควบคุมเรือกระดาน (boatboard) ด้วยวิธีการควบคุมแบบก้าวถอยหลัง (backstepping control)

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อลดทอนการรบกวนจากฐานรากที่ส่งผลต่อหุ่นยนต์
2. หุ่นยนต์สามารถตามรอย (track) เส้นทางของสัญญาณขาเข้าได้เมื่อฐานไม่อยู่นิ่ง
3. เพื่อสร้าง, ออกแบบและควบคุมระบบย่อยส่วน โดยลดจำนวนแกนหรือความซับซ้อนทางกลไก เพื่อลดความยากในการสร้างกลไกแต่ยังคงได้หลักการที่สามารถนำไปสู่เป้าหมายได้

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สามารถลดทอนการรบกวนจากฐานรากได้
2. หุ่นยนต์สามารถตามรอย (track) เส้นทางของสัญญาณขาเข้าได้เมื่อฐานไม่อยู่นิ่ง
3. จำลองการทำงานของระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์
4. สร้าง, ออกแบบและควบคุมระบบย่อยส่วน โดยลดจำนวนแกนหรือความซับซ้อนทางกลไก เพื่อลดความยากในการสร้างกลไกแต่ยังคงได้หลักการที่สามารถนำไปสู่เป้าหมายได้

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาบทความที่เกี่ยวข้อง และหัวข้อสำคัญในการวิจัยต่างๆ
2. ออกแบบระบบควบคุม
3. ออกแบบและสร้างชุดทดลองย่อยส่วน
4. ติดตั้งวงจรควบคุม
5. ทดสอบระบบและเก็บบันทึกข้อมูล
6. สรุปผลการวิจัย และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหุ่นยนต์สำหรับอุตสาหกรรม
2. นำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบอัตโนมัติ

3. วงจรควบคุมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับระบบสมองกลฝังตัว

1.7 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

ในบทถัดไปนำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดทดลอง ในบทที่ 3 กล่าวถึงระบบควบคุมของชุดทดลอง ถัดมานำเสนอผลการทดลองไว้ในบทที่ 4 จากนั้นจึงเป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะในบทที่ 5



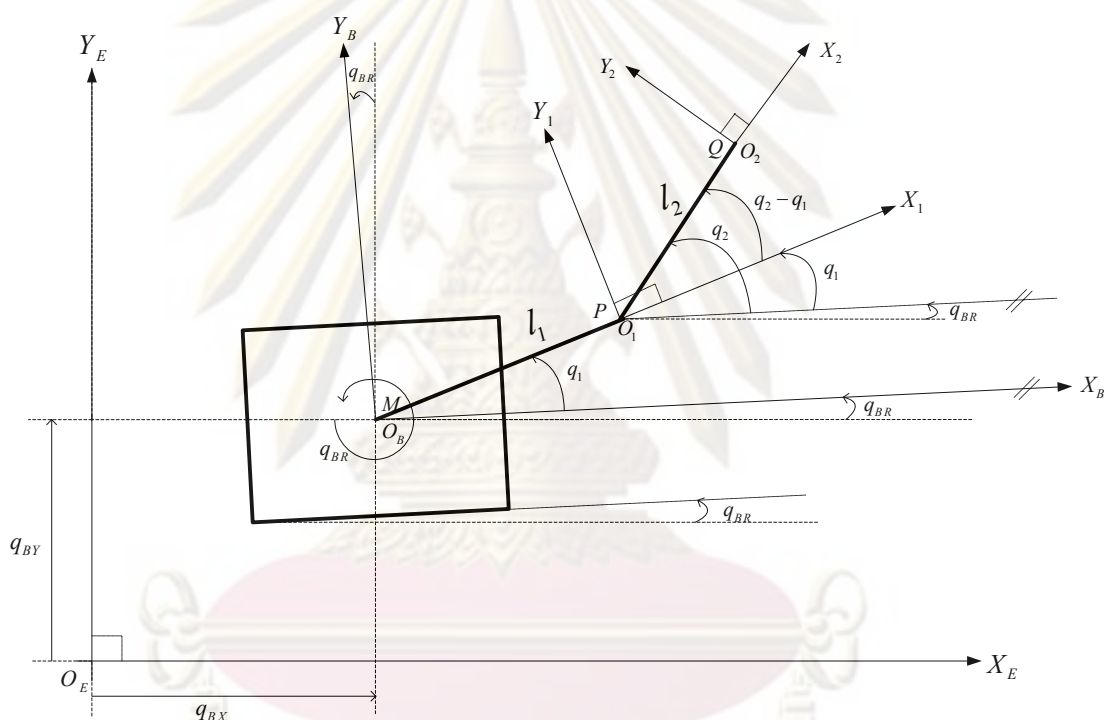
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองคณิตศาสตร์

2.1 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า

จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (forward kinematics) [6] ของระบบใช้สำหรับคำนวณหาตำแหน่งปลายแขนกลและจาโคเบียนเมทริกซ์ของแต่ละก้านโยง



รูปที่ 2.1: แสดงโครงสร้างของชุดทดลองย่อด้านจากมุมมองด้านบน

โดยโครงสร้างของชุดทดลองย่อด้านประกอบด้วยแขนกล 2 ก้านโยงขับเคลื่อนแบบทางไกล (2 links planar elbow manipulator with remote drive) ตั้งอยู่บนฐานที่เคลื่อนที่ในแนวแกน X_E, Y_E ด้วยระยะทาง q_{BX}, q_{BY} และหมุนรอบตัวเองในแนวแกน Z_B ด้วยมุม q_{BR}

โดยการขับเคลื่อนของแขนกลเป็นแบบทางไกลจึงเป็นผลให้มุมของแขนกลก้านโยงที่ 1 คือ q_1 และมุมของก้านโยงที่ 2 คือ q_2 อิสระต่อกัน กำหนดให้แกนอ้างอิงกับโลกคือ X_E, Y_E, Z_E แกนนี้ตั้งอยู่กึ่งที่ ใช้สำหรับอ้างอิงระยะทางการเคลื่อนที่ของแขนกลกับแกนโลก ต่อมาแกน X_B, Y_B, Z_B คือแกนของตัวหุ่นยนต์โดยแกนนี้เคลื่อนที่ไปกับตัวของหุ่นยนต์, แกน X_1, Y_1, Z_1 อยู่ที่ตำแหน่ง

ปลายของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ แกน X_2, Y_2, Z_2 อยู่ที่ตำแหน่งปลายของแขนกลก้านโยงที่ 2 โดย l_1, l_2 คือความยาวของแขนกลก้านที่ 1, 2 มีขนาดความยาวเท่ากันคือ 19.6 เซนติเมตร และ ตำแหน่ง P, Q อยู่ที่ปลายของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2

เนื่องจากระบบของเรานั้นทำการป้อนตำแหน่งที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนโดยอ้างอิงกับแกนโลกดังนั้นจึงทำการคำนวณตำแหน่ง P, Q เทียบกับแกนโลก โดย P_E คือตำแหน่งของปลายแขนกลก้านโยงที่ 1 เทียบกับแกนโลก, Q_E คือตำแหน่งของปลายแขนกลก้านโยงที่ 2 เทียบกับแกนโลก, M_E คือตำแหน่งของฐานเทียบกับแกนโลก โดยการหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ในแนวแกน Z_B ด้วยมุม q_{BR} อธิระกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแนวแกน X_E, Y_E ด้วยระยะทาง q_{BX}, q_{BY}

$$T_E^B = \begin{bmatrix} R_E^B & d_E^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, R_E^B = R_{z_B, q_{BR}}, d_E^B = \begin{bmatrix} q_{BX} \\ q_{BY} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_E \\ 1 \end{bmatrix} = T_E^B \begin{bmatrix} M_B \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_E^B & d_E^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, M_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \because M \text{ อยู่ที่จุดศูนย์กลางของแกน } X_B, Y_B, Z_B$$

$$= \begin{bmatrix} R_{z_B, q_{BR}} & \begin{bmatrix} q_{BX} \\ q_{BY} \\ 0 \end{bmatrix} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, R_E^B = R_{z_B, q_{BR}} = \begin{bmatrix} c_{q_{BR}} & -s_{q_{BR}} & 0 \\ s_{q_{BR}} & c_{q_{BR}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (R_E^B)^T = \begin{bmatrix} c_{q_{BR}} & s_{q_{BR}} & 0 \\ -s_{q_{BR}} & c_{q_{BR}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} q_{BX} \\ q_{BY} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

จุด M อยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแกน X_B, Y_B, Z_B จึงทำให้ไม่มีพจน์ ของมุม q_{BR}

$$\begin{bmatrix} P_E \\ 1 \end{bmatrix} = T_E^1 \begin{bmatrix} P_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= T_E^B T_B^1 \begin{bmatrix} P_1 \\ 1 \end{bmatrix}, T_E^1 = T_E^B T_B^1$$

$$= \begin{bmatrix} R_E^B & d_E^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_B^1 & d_B^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, P_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \because P \text{ อยู่ที่จุดศูนย์กลางของแกน } X_1, Y_1, Z_1$$

$$= \begin{bmatrix} R_{z_B, q_{BR}} & q_{BX} \\ q_{BY} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z_1, q_{BR}} & l_1 c_1 \\ l_1 s_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1 + q_{BR}) + q_{BX} \\ l_1 \sin(q_1 + q_{BR}) + q_{BY} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_E \\ 1 \end{bmatrix} = T_E^2 \begin{bmatrix} Q_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= T_E^B T_B^1 T_1^2 \begin{bmatrix} Q_2 \\ 1 \end{bmatrix}, T_E^2 = T_E^B T_B^1 T_1^2$$

$$= \begin{bmatrix} R_E^B & d_E^B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_B^1 & d_B^1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^2 & d_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, Q_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{z_B, q_{BR}} & q_{BX} \\ q_{BY} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z_1, q_{BR}} & l_1 c_1 \\ l_1 s_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{z_2, q_2 - q_1} & l_2 \cos(q_2 - q_1) \\ l_2 \sin(q_2 - q_1) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1 + q_{BR}) + l_2 \cos(q_2 + q_{BR}) + q_{BX} \\ l_1 \sin(q_1 + q_{BR}) + l_2 \sin(q_2 + q_{BR}) + q_{BY} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_E \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1 + q_{BR}) + l_2 \cos(q_2 + q_{BR}) + q_{BX} \\ l_1 \sin(q_1 + q_{BR}) + l_2 \sin(q_2 + q_{BR}) + q_{BY} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(2.1)

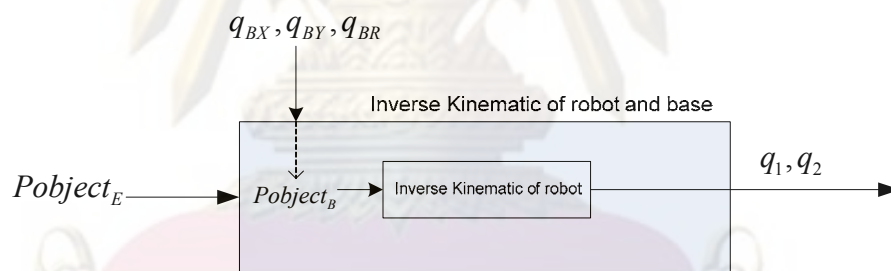
$$T_E^2 = \begin{bmatrix} \cos(q_{BR} + q_2) & -\sin(q_{BR} + q_2) & 0 & q_{BX} + l_1 \cos(q_{BR} + q_1) + l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \\ \sin(q_{BR} + q_2) & \cos(q_{BR} + q_2) & 0 & q_{BY} + l_1 \sin(q_{BR} + q_1) + l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

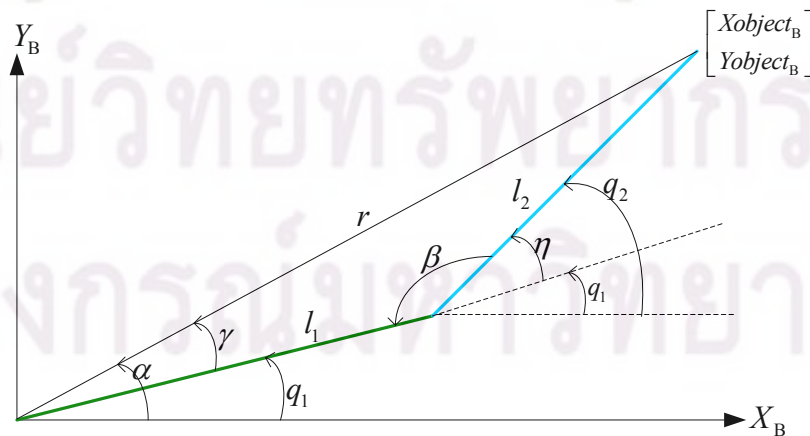
$$c_{q_{BR}} = \cos(q_{BR}), s_{q_{BR}} = \sin(q_{BR}), c_1 = \cos(q_1), s_1 = \sin(q_1), c_2 = \cos(q_2), s_2 = \sin(q_2)$$

โดย T_E^2 คือเมทริกซ์การแปลง (transformation matrix) ของตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับกับแกนโลกและสมการ (2.1) คือสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของระบบ สำหรับคำนวณหาตำแหน่งของปลายแขนกล X_E, Y_E เมื่อทราบค่าตำแหน่งของฐาน q_{BX}, q_{BY}, q_{BR} และมุมของก้านโยง q_1, q_2

2.2 จลนศาสตร์ผกผัน



รูปที่ 2.2: แสดงแผนภาพจลนศาสตร์ผกผันของระบบ



รูปที่ 2.3: แสดงตำแหน่งของมุมในการคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันของแขนกล

ในโลกของการใช้งานจริงนั้นผู้ใช้งาน (user) หุ่นยนต์จะสั่งการในระบบคาร์ทีเซียน (cartesian space) คือป้อนตำแหน่งของวัตถุ P_{object_E} ซึ่งเป็นคนละระบบกับการสั่งงานของหุ่นยนต์ คือระบบข้อต่อ (joint space) ดังนั้นการแปลงค่าจากผู้ใช้งานให้เป็นค่าของแขนกลแต่ละก้านจึงสามารถทำได้ โดยใช้การคำนวณจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics) ดังสมการ (2.5) และ (2.6) เมื่อทราบค่า $X_E, Y_E, q_{BX}, q_{BY}, q_{BR}$ ก็สามารถคำนวณหา q_1, q_2 ได้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_{BX} \\ q_{BY} \\ q_{BR} \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} &= \text{Inverse Kinematic of Robot and Base}(P_{object_E}) \\ &= T_2^E P_{object_E}, T_2^E = (T_E^2)^{-1}, P_{object_E} = \begin{bmatrix} X_{object_E} \\ Y_{object_E} \end{bmatrix} \\ &= (T_E^2)^{-1} P_{object_E} \end{aligned} \quad (2.2)$$

เนื่องจากสมการ (2.2) ต้องหาจากระบบทั้งหมดซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจึงลดความซับซ้อน โดยคำนวณตำแหน่งของวัตถุเทียบกับตัวหุ่นยนต์ P_{object_B} แล้วคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันของแขนกลจากตำแหน่งของวัตถุเทียบกับหุ่นยนต์ดังสมการ (2.3) และสามารถคำนวณหาค่า P_{object_B} ได้จากสมการ (2.4)

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \text{Inverse Kinematic of Robot} (q_{BX}, q_{BY}, q_{BE}, P_{object_B}) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} P_{object_B} &= T_B^E P_{object_E}, T_B^E = (T_E^B)^{-1} = \begin{bmatrix} (R_E^B)^T & | & -(R_E^B)^T d_E^B \\ \hline 0 & | & 1 \end{bmatrix} \\ &= (T_E^B)^{-1} P_{object_E}, P_{object_B} = \begin{bmatrix} X_{object_B} \\ Y_{object_B} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$P_{object_B} = \begin{bmatrix} X_{obj_E} \cos q_{BR} + Y_{obj_E} \sin q_{BR} - q_{BX} \cos q_{BR} - q_{BY} \sin q_{BR} \\ -X_{obj_E} \sin q_{BR} + Y_{obj_E} \cos q_{BR} + q_{BX} \sin q_{BR} - q_{BY} \cos q_{BR} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

การคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันของแขนกลจากตำแหน่งของวัตถุเทียบกับหุ่นยนต์สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{object_B}}{X_{object_B}} \right)$$

$$r^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\beta)$$

$$\therefore \eta = \pi - \beta$$

$$= \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - X_{object_B}^2 - Y_{object_B}^2}{2l_1l_2} \right)$$

$$l_2^2 = r^2 + l_1^2 - 2l_1l_2 \cos(\gamma), \quad r^2 = X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2$$

$$\therefore \gamma = \cos^{-1} \left(\frac{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2}} \right)$$

เพราะฉะนั้นได้ q_1 และ q_2 ดังนี้

$$q_1 = \alpha - \gamma$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{Y_{object_B}}{X_{object_B}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2}} \right) \quad (2.5)$$

$$q_2 = \eta + q_1$$

$$= \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - X_{object_B}^2 - Y_{object_B}^2}{2l_1l_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{Y_{object_B}}{X_{object_B}} \right) \quad (2.6)$$

$$- \cos^{-1} \left(\frac{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2}} \right)$$

2.3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ (dynamic modeling) [7,8] คือสมการที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติต่างๆของตัวหุ่นยนต์ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยวิธีการของออยเลอร์-ลากรองจ์ (Euler-Lagrange method) สำหรับระบบที่ทดลองนี้เป็นแบบ 5 แกนการเคลื่อนที่ ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ของฐานจำนวน 3 แกนคือ q_{BX}, q_{BY}, q_{BR} และแกนการเคลื่อนที่ของแขนกลจำนวน 2 แกนคือ q_1, q_2 โดยเพิ่มแบบจำลองแรงเสียดทานความหนืดและแรงเสียดทานสถิตเข้าไปในระบบด้วย สมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบสามารถแสดงได้ดังสมการ (2.7) และ (2.8)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + \tau_{fv} + \tau_{fc} = u \quad (2.7)$$

โดยสามารถจัดสมการ (2.7) ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ถดถอย (regression matrix) ได้ดังสมการ (2.8)

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})a + Y_{jLv}(\dot{q})v + Y_{jLc}(\dot{q})c = u \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})a = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q}$$

$$Y_{jLv}(\dot{q})v = \tau_{jlv}$$

$$Y_{jLc}(\dot{q})c = \tau_{jlc}$$

กำหนดให้

$$M(q) = \begin{bmatrix} (r_{BX}^2 I_{MX} + d_{BXX}) & d_{BXXY} & d_{BXXR} & d_{BX1} & d_{BX2} \\ d_{BYBX} & (r_{BY}^2 I_{MY} + d_{BYY}) & d_{BYBR} & d_{BY1} & d_{BY2} \\ d_{BRBX} & d_{BRBY} & (r_{BR}^2 I_{MR} + d_{BRBR}) & d_{BR1} & d_{BR2} \\ d_{1BX} & d_{1BY} & d_{1BR} & (r_1^2 I_{M1} + d_{11}) & d_{12} \\ d_{2BX} & d_{2BY} & d_{2BR} & d_{21} & (r_2^2 I_{M2} + d_{22}) \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{BXXR} & c_{BX1} & c_{BX2} \\ 0 & 0 & c_{BYBR} & c_{BY1} & c_{BY2} \\ 0 & 0 & c_{BRBR} & c_{BR1} & c_{BR2} \\ 0 & 0 & c_{1BR} & 0 & c_{12} \\ 0 & 0 & c_{2BR} & c_{21} & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 5}, \quad \tau_{jlv} = v_D \dot{q}, \quad \tau_{jlc} = c_D \operatorname{sgn}(\dot{q})$$

$$v_D = \begin{bmatrix} r_{BX}^2 B_{BX} + F_{vBX} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{BY}^2 B_{BY} + F_{vBY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{BR}^2 B_{BR} + F_{vBR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_1^2 B_1 + F_{v1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2^2 B_2 + F_{v2} \end{bmatrix}$$

$$c_D = \begin{bmatrix} F_{cBX} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_{cBY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{cBR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_{c1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & F_{c2} \end{bmatrix}, \quad \operatorname{sgn}(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(\dot{q}_{BX}) \\ \operatorname{sgn}(\dot{q}_{BY}) \\ \operatorname{sgn}(\dot{q}_{BR}) \\ \operatorname{sgn}(\dot{q}_1) \\ \operatorname{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_{BX} \\ u_{BY} \\ u_{BR} \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}_{5 \times 1}, \quad q = \begin{bmatrix} q_{BX} \\ q_{BY} \\ q_{BR} \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix}_{5 \times 1} \begin{matrix} m \\ m \\ rad \\ rad \\ rad \end{matrix}, \quad \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{BX} \\ \dot{q}_{BY} \\ \dot{q}_{BR} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}_{5 \times 1}, \quad \ddot{q} = \begin{bmatrix} \ddot{q}_{BX} \\ \ddot{q}_{BY} \\ \ddot{q}_{BR} \\ \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \ddot{q}_r) = \begin{bmatrix} y_{BX1} & y_{BX2} & 0 & 0 & y_{BX5} & y_{BX6} & 0 & 0 & y_{BX9} & 0 & y_{BX11} & 0 & 0 \\ y_{BY1} & y_{BY2} & 0 & 0 & y_{BY5} & y_{BY6} & 0 & 0 & y_{BY9} & 0 & y_{BY11} & 0 & 0 \\ y_{BR1} & y_{BR2} & y_{BR3} & 0 & 0 & y_{BR6} & y_{BR7} & 0 & 0 & y_{BR10} & 0 & 0 & y_{BR13} \\ y_{11} & y_{12} & 0 & 0 & 0 & y_{16} & y_{17} & y_{18} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{22} & y_{23} & y_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 13}$$

$$Y_{fLv}(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{q}_{BX} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_{BY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_{BR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{q}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{q}_2 \end{bmatrix}_{5 \times 5}, \quad v = \begin{bmatrix} r_{BX}^2 B_{BX} + F_{vBX} \\ r_{BY}^2 B_{BY} + F_{vBY} \\ r_{BR}^2 B_{BR} + F_{vBR} \\ r_1^2 B_1 + F_{v1} \\ r_2^2 B_2 + F_{v2} \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

$$Y_{fLc}(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(\dot{q}_{BX}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sgn}(\dot{q}_{BY}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{q}_{BR}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{q}_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{sgn}(\dot{q}_2) \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

$$c^T = [F_{cBX} \quad F_{cBY} \quad F_{cBR} \quad F_{c1} \quad F_{c2}]_{1 \times 5}$$

$$d_{BXX} = m_B + m_1 + m_2, \quad d_{BXY} = 0, \quad d_{BYX} = 0$$

$$d_{BXR} = -m_1 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_{c2} \sin(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BX1} = -m_1 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1), \quad d_{BX2} = -m_2 l_{c2} \sin(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BYBY} = m_B + m_1 + m_2$$

$$d_{BYR} = m_1 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_{c2} \cos(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BY1} = m_1 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1), \quad d_{BY2} = m_2 l_{c2} \cos(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BRBX} = -m_1 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_{c2} \sin(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BRBY} = m_1 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_{c2} \cos(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{BRBR} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c1}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1) + I_{BZZ} + I_{1ZZ} + I_{2ZZ}$$

$$d_{BR1} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1) + I_{1ZZ}$$

$$d_{BR2} = m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1) + I_{2ZZ}$$

$$d_{1BX} = -m_1 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_1 \sin(q_{BR} + q_1)$$

$$d_{1BY} = m_1 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) + m_2 l_1 \cos(q_{BR} + q_1)$$

$$d_{1BR} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1) + I_{1ZZ}$$

$$d_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_{1ZZ}, \quad d_{12} = m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1)$$

$$d_{2BX} = -m_2 l_{c2} \sin(q_{BR} + q_2), \quad d_{2BY} = m_2 l_{c2} \cos(q_{BR} + q_2)$$

$$d_{2BR} = m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1) + I_{2ZZ}$$

$$d_{21} = m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2 - q_1), \quad d_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_{2ZZ}$$

$$a = -m_1 l_{c1} \cos(q_{BR} + q_1) - m_2 l_1 \cos(q_{BR} + q_1), \quad h = -m_1 l_{c1} \sin(q_{BR} + q_1) - m_2 l_1 \sin(q_{BR} + q_1)$$

$$b = -m_2 l_{c2} \cos(q_{BR} + q_2), \quad p = -m_2 l_{c2} \sin(q_{BR} + q_2), \quad s = -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_1 - q_2)$$

$$C_{BRBRBX} = a + b, \quad C_{BR1BX} = a, \quad C_{BR2BX} = b, \quad C_{1BRBX} = a, \quad C_{11BX} = a$$

$$C_{2BRBX} = b, \quad C_{22BX} = b, \quad C_{BRBRBY} = h + p, \quad C_{BR1BY} = h, \quad C_{BR2BY} = p$$

$$C_{1BRBY} = h, \quad C_{11BY} = h, \quad C_{2BRBY} = p, \quad C_{22BX} = p, \quad C_{BR1BR} = s$$

$$C_{BR2BR} = -s, \quad C_{1BRBR} = s, \quad C_{11BR} = s, \quad C_{2BRBR} = -s, \quad C_{22BR} = -s$$

$$C_{BRBR1} = -s, \quad C_{BR21} = -s, \quad C_{2BR1} = -s, \quad C_{221} = -s$$

$$C_{BRBR2} = s, \quad C_{BR12} = s, \quad C_{1BR2} = s, \quad C_{112} = s, \quad C_{other} = 0$$

$$c_{BXHR} = C_{BRBRBY} \dot{q}_{BR} + C_{1BRBX} \dot{q}_1 + C_{2BRBX} \dot{q}_2, \quad c_{BX1} = C_{BR1BY} \dot{q}_{BR} + C_{11BX} \dot{q}_1, \quad c_{BX2} = C_{BR2BY} \dot{q}_{BR} + C_{22BX} \dot{q}_2$$

$$c_{BYBR} = C_{BRBRBY} \dot{q}_{BR} + C_{1BRBY} \dot{q}_1 + C_{2BRBY} \dot{q}_2, \quad c_{BY1} = C_{BR1BY} \dot{q}_{BR} + C_{11BY} \dot{q}_1, \quad c_{BY2} = C_{BR2BY} \dot{q}_{BR} + C_{22BY} \dot{q}_2$$

$$c_{BRBR} = C_{2BRBR} \dot{q}_2, \quad c_{BR1} = C_{BR1BY} \dot{q}_{BR} + C_{11BR} \dot{q}_1, \quad c_{BR2} = C_{BR2BY} \dot{q}_{BR} + C_{22BY} \dot{q}_2$$

$$c_{1BR} = C_{BRBR1} \dot{q}_{BR} + C_{2BR1} \dot{q}_2, \quad c_{12} = C_{BR21} \dot{q}_{BR} + C_{22BY} \dot{q}_2$$

$$c_{2BR} = C_{BRBR2} \dot{q}_{BR} + C_{1BR2} \dot{q}_1, \quad c_{21} = C_{BR12} \dot{q}_{BR} + C_{112} \dot{q}_1$$

$$\delta_1 = \ddot{q}_{r_{BX}}, \delta_4 = \ddot{q}_{r_{BY}}, \delta_9 = \ddot{q}_{r_{BR}}, \delta_{11} = \ddot{q}_{r_1}, \delta_{12} = \ddot{q}_{r_2}$$

$$\delta_2 = (-\ddot{q}_{r_{BR}} - \ddot{q}_{r_1})\sin(q_{BR} + q_1) + (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_1)(-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_1)\cos(q_{BR} + q_1)$$

$$\delta_3 = (-\ddot{q}_{r_{BR}} - \ddot{q}_{r_2})\sin(q_{BR} + q_2) + (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_2)(-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_2)\cos(q_{BR} + q_2)$$

$$\delta_5 = (\ddot{q}_{r_{BR}} + \ddot{q}_{r_1})\cos(q_{BR} + q_1) + (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_1)(-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_1)\sin(q_{BR} + q_1)$$

$$\delta_6 = (\ddot{q}_{r_{BR}} + \ddot{q}_{r_2})\cos(q_{BR} + q_2) + (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_2)(-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_2)\sin(q_{BR} + q_2)$$

$$\delta_7 = -\ddot{q}_{r_{BX}}\sin(q_{BR} + q_1) + \ddot{q}_{r_{BY}}\cos(q_{BR} + q_1), \delta_8 = -\ddot{q}_{r_{BX}}\sin(q_{BR} + q_2) + \ddot{q}_{r_{BY}}\cos(q_{BR} + q_2)$$

$$\delta_{10} = \{(-\dot{q}_1 + \dot{q}_2)(\dot{q}_{r_{BR}}) + (-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_1)(\dot{q}_{r_1}) + (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_2)(\dot{q}_{r_2})\}\sin(q_1 - q_2) + (2\ddot{q}_{r_{BR}} + \ddot{q}_{r_1} + \ddot{q}_{r_2})\cos(q_2 - q_1)$$

$$\delta_{13} = (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_2)(\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_2)\sin(q_1 - q_2) + (\ddot{q}_{r_{BR}} + \ddot{q}_{r_2})\cos(q_2 - q_1)$$

$$\delta_{14} = (\dot{q}_{r_{BR}} + \dot{q}_1)(-\dot{q}_{r_{BR}} - \dot{q}_1)\sin(q_1 - q_2) + (\ddot{q}_{r_{BR}} + \ddot{q}_{r_1})\cos(q_2 - q_1)$$

$$y_{BY1} = \delta_4 + l_1\delta_2, y_{BY2} = \delta_6, y_{BY5} = \delta_4, y_{BY6} = \delta_5, y_{BY9} = \delta_4, y_{BY11} = \delta_4$$

$$y_{BR1} = l_1\delta_7 + l_1^2\delta_9 + l_1^2\delta_{11}, y_{BR2} = \delta_8 + l_1\delta_{10}, y_{BR3} = \delta_9 + \delta_{12}, y_{BR6} = \delta_7$$

$$y_{BR7} = \delta_9 + \delta_{11}, y_{BR10} = \delta_9, y_{BR13} = \delta_9$$

$$y_{11} = l_1\delta_7 + l_1^2\delta_9 + l_1^2\delta_{11}, y_{12} = l_1\delta_{13}, y_{16} = \delta_7, y_{17} = \delta_9 + \delta_{11}, y_{18} = \delta_{11}$$

$$y_{22} = \delta_8 + l_1\delta_{14}, y_{23} = \delta_9 + \delta_{12}, y_{24} = \delta_{12}$$

เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการประมาณค่าคือ

$$a_1 = m_2, a_2 = m_2 l_{c2}, a_3 = m_2 l_{c2}^2 + I_{2ZZ}, a_4 = r_2^2 I_{M2}, a_5 = m_1, a_6 = m_1 l_{c1}, a_7 = m_1 l_{c1}^2 + I_{1ZZ}$$

$$a_8 = r_1^2 I_{M1}, a_9 = m_B, a_{10} = I_{BZZ}, a_{11} = r_{BX}^2 I_{MBX}, a_{12} = r_{BY}^2 I_{MBY}, a_{13} = r_{BR}^2 I_{MBR}$$

โดยที่

m_B, m_1, m_2 คือมวลของฐาน, แขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น kg)

l_1, l_2 คือความยาวของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น m)

l_{c1}, l_{c2} คือระยะทางจากจุดหมุนถึงจุดศูนย์กลางมวลของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น m)

$I_{BZZ}, I_{1ZZ}, I_{2ZZ}$ คือโมเมนต์ความเฉื่อยของฐาน, แขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น $kg \cdot m^2$)

$I_{MBX}, I_{MBY}, I_{MBR}$ คือโมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของฐานในแนวแกนการเคลื่อนที่ X_E, Y_E และแกนหมุน Z_B (มีหน่วยเป็น $kg \cdot m^2$)

I_{M1}, I_{M2} คือโมเมนต์ความเฉื่อยโรเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น $kg \cdot m^2$)

r_{BX}, r_{BY}, r_{BR} คือ อัตราทดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของฐานในแนวแกนการเคลื่อนที่ X_E, Y_E และแกนหมุน Z_B

r_1, r_2 คือ อัตราทดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

u_{BX}, u_{BY}, u_{BR} คือสัญญาณรบกวนที่ฐาน (มีหน่วยเป็น Nm)

u_1, u_2 คือแรงบิดแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น Nm)

B_{BX}, B_{BY}, B_{BR} คือแรงเสียดทานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของฐานในแนวแกนการเคลื่อนที่ X_E, Y_E และแกนหมุน Z_B (มีหน่วยเป็น Nm-sec/m, Nm-sec/m, Nm-sec/rad ตามลำดับ)

B_1, B_2 คือแรงเสียดทานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงของแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น Nm-sec/rad)

$F_{vBX}, F_{vBY}, F_{vBR}$ คือแรงเสียดทานความหนืดของฐานในแนวแกนการเคลื่อนที่ X_E, Y_E และแกนหมุน Z_B (มีหน่วยเป็น Nm-sec/m, Nm-sec/m, Nm-sec/rad ตามลำดับ)

F_{v1}, F_{v2} คือแรงเสียดทานความหนืดของแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น Nm-sec/rad)

$F_{cBX}, F_{cBY}, F_{cBR}$ คือแรงเสียดทานสถิตของฐานในแนวแกนการเคลื่อนที่ X_E, Y_E และแกนหมุน Z_B (มีหน่วยเป็น Nm)

F_{c1}, F_{c2} คือแรงเสียดทานสถิตของแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 (มีหน่วยเป็น Nm)

τ_{fv} คือแรงเสียดทานความหนืด

τ_{fc} คือแรงเสียดทานสถิต

$M(q)$ คือเมทริกซ์โมเมนต์ความเฉื่อย

2.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้เริ่มจากการคำนวณหาจลนศาสตร์ไปข้างหน้าเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน ตามด้วยการคำนวณหาจลนศาสตร์ผกผันเพื่อคำนวณหามุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ถัดมาเป็นการคำนวณหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบต่อไป

บทที่ 3

ระบบควบคุม

3.1 การชดเชยการเคลื่อนที่ของฐาน

การชดเชยการเคลื่อนที่ของฐานทำให้แขนกลสามารถควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ แม้ว่าฐานของแขนกลไม่อยู่นิ่งก็ตาม

ในการคำนวณหาตำแหน่งมุมของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 เมื่อฐานไม่อยู่นิ่งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการจลนศาสตร์ผกผัน ส่วนการคำนวณหาความเร็วและความเร่งของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 เมื่อฐานไม่อยู่นิ่งนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการความเร็วและความเร่งของปลายแขนกล จากนั้นใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) [9,10] แก้สมการเพื่อหาความเร็วและความเร่งของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

3.1.1 นิวตัน-ราฟสัน

วิธี นิวตัน-ราฟสัน เป็นวิธีการหาค่าที่ทำให้ฟังก์ชันมีค่าเป็นศูนย์ ในกรณีสมการไม่เชิงเส้น 1 สมการ 1 ตัวแปรได้สมการ นิวตัน-ราฟสัน ดังสมการ (3.1)

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)}, \quad (n \geq 0) \quad (3.1)$$

สำหรับระบบสมการไม่เชิงเส้นหลายสมการหลายตัวแปรเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} X^{(k+1)} &= X^{(k)} + \left\{ \frac{-F(X)}{F'(X)} \right\} \\ &= X^{(k)} + \left\{ -[F'(X)^{-1}]F(X) \right\} \\ &= X^{(k)} + H^{(k)} \end{aligned}$$

โดย

X คือรากของสมการที่ต้องการหาค่า

$F(X)$ คือฟังก์ชันที่มีค่าเท่ากับศูนย์

$F'(X)$ คือจาโคเบียน (Jacobian) ของ $F(X)$

$F'(X)^{-1}$ คือจาโคเบียนผกผัน (Inverse Jacobian) ของ $F'(X)$

ขั้นตอนวิธี

1. กำหนดค่าเริ่มต้น $X(0)$
2. คำนวณหา $F(X)$
3. คำนวณหาจาโคเบียนเมทริกซ์ของ $F(X)$ คือ $F'(X)$
4. คำนวณหาจาโคเบียนผกผันของ $F'(X)$ คือ $F'(X)^{-1}$;
5. คำนวณหา H
6. คำนวณหา $X^{(k+1)} = X^{(k)} + H^{(k)}$

การหาค่าการเคลื่อนที่ของฐาน

1. คำนวณหา q_1, q_2 จากสมการจลนศาสตร์ผกผันของตำแหน่งปลายแขนกล โดยทราบข้อมูลการเคลื่อนที่ของฐานคือ $X_E, Y_E, q_{BX}, q_{BY}, q_{BR}$ ได้ดังนี้คือ

$$q_1 = \alpha - \gamma$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{Y_{object_B}}{X_{object_B}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2}} \right)$$

$$q_2 = \eta + q_1$$

$$= \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - X_{object_B}^2 - Y_{object_B}^2}{2l_1 l_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{Y_{object_B}}{X_{object_B}} \right)$$

$$- \cos^{-1} \left(\frac{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2 + l_1^2 - l_2^2}{2l_1 \sqrt{X_{object_B}^2 + Y_{object_B}^2}} \right)$$

2. คำนวณหา \dot{q}_1, \dot{q}_2 จากวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อทราบค่า q_1, q_2 จากข้อ 1 และทราบค่า $\dot{X}_E, \dot{Y}_E, \dot{q}_{BX}, \dot{q}_{BY}, \dot{q}_{BR}, \dot{q}_{BR}$ ได้ดังนี้คือ

จากสมการความเร็วของปลายแขนกล

$$V_E = \begin{bmatrix} \dot{X}_E \\ \dot{Y}_E \\ \dot{Z}_E \end{bmatrix} = J_{V_E} \dot{q} \quad (3.2)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l_1 \sin(q_{BR} + q_1) - l_2 \sin(q_{BR} + q_2) & -l_1 \sin(q_{BR} + q_1) & -l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \\ 0 & 1 & l_1 \cos(q_{BR} + q_1) + l_2 \cos(q_{BR} + q_2) & l_1 \cos(q_{BR} + q_1) & l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 5}$$

$$\times \begin{bmatrix} \dot{q}_{BX} \\ \dot{q}_{BY} \\ \dot{q}_{BR} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

เมื่อจัดรูปสมการ (3.2) ใหม่ให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\dot{q}_{BX} + \{-l_1 \sin(q_{BR} + q_1) - l_2 \sin(q_{BR} + q_2)\} \dot{q}_{BR} - l_1 \sin(q_{BR} + q_1) \dot{q}_1 - l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \dot{q}_2 - \dot{X}_E = 0 \quad (3.3)$$

$$\dot{q}_{BY} + \{l_1 \cos(q_{BR} + q_1) + l_2 \cos(q_{BR} + q_2)\} \dot{q}_{BR} + l_1 \cos(q_{BR} + q_1) \dot{q}_1 + l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \dot{q}_2 - \dot{Y}_E = 0 \quad (3.4)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.3) และ (3.4) ได้เป็น $f_1(\dot{q}_1, \dot{q}_2) = 0, f_2(\dot{q}_1, \dot{q}_2) = 0$

$$X = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, F(X) = \begin{bmatrix} f_1(\dot{q}_1, \dot{q}_2) \\ f_2(\dot{q}_1, \dot{q}_2) \end{bmatrix}$$

$$F'(X) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_{BR} + q_1) & -l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \\ l_1 \cos(q_{BR} + q_1) & l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \end{bmatrix}$$

3. คำนวณหา \ddot{q}_1, \ddot{q}_2 จากวิธีนิวตัน-ราฟสัน เมื่อทราบค่า $q_1, q_2, \dot{q}_1, \dot{q}_2$ จากข้อ 1, 2 และทราบค่า $\dot{X}_E, \dot{Y}_E, \dot{q}_{BX}, \dot{q}_{BY}, \dot{q}_{BR}, q_{BR}$ ได้ดังนี้คือ

จากสมการความเร่งของปลายแขนกล

$$a_{E_{3 \times 1}} = J_{3 \times 5} \ddot{q}_{5 \times 1} + \left(\frac{dJ}{dt} \right)_{3 \times 5} \dot{q}_{5 \times 1}; a_E = \begin{bmatrix} \ddot{X}_E \\ \ddot{Y}_E \\ \ddot{Z}_E \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$= J_{V_E} [\ddot{q}_{BX} \ \ddot{q}_{BY} \ \ddot{q}_{BR} \ \ddot{q}_1 \ \ddot{q}_2]^T + \left(\frac{dJ_{V_E}}{dt} \right) [\dot{q}_{BX} \ \dot{q}_{BY} \ \dot{q}_{BR} \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2]^T$$

เมื่อจัดรูปสมการ (3.5) ใหม่ให้เท่ากับศูนย์จะได้

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{BX} + \ddot{q}_{BR} \{ -l_1 \sin(q_{BR} + q_1) - l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \} - \ddot{q}_1 l_1 \sin(q_{BR} + q_1) \\ + \dot{q}_{BR} \{ -l_1 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_1) \cos(q_{BR} + q_1) - l_2 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_2) \cos(q_{BR} + q_2) \} \\ - \dot{q}_1 l_1 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_1) \cos(q_{BR} + q_1) - \dot{q}_2 l_2 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_2) \cos(q_{BR} + q_2) \\ - \ddot{q}_2 l_2 \sin(q_{BR} + q_2) - \ddot{X}_E = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{BY} + \ddot{q}_{BR} \{ l_1 \cos(q_{BR} + q_1) + l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \} + \ddot{q}_1 l_1 \cos(q_{BR} + q_1) \\ + \dot{q}_{BR} \{ -l_1 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_1) \sin(q_{BR} + q_1) - l_2 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_2) \sin(q_{BR} + q_2) \} \\ - \dot{q}_1 l_1 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_1) \sin(q_{BR} + q_1) - \dot{q}_2 l_2 (\dot{q}_{BR} + \dot{q}_2) \sin(q_{BR} + q_2) \\ + \ddot{q}_2 l_2 \cos(q_{BR} + q_2) - \ddot{Y}_E = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.6) และ (3.7) ได้เป็น $g_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2) = 0$, $g_2(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2) = 0$

$$Z = \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}, G(Z) = \begin{bmatrix} g_1(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2) \\ g_2(\ddot{q}_1, \ddot{q}_2) \end{bmatrix}$$

$$G'(Z) = F'(X) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_{BR} + q_1) & -l_2 \sin(q_{BR} + q_2) \\ l_1 \cos(q_{BR} + q_1) & l_2 \cos(q_{BR} + q_2) \end{bmatrix}$$

เมื่อ $\det(F'(X)) = 0$, $\det(G'(Z)) = 0$ จะไม่สามารถหาค่า $F'(X)$, $G'(Z)$ ได้ นั่นคือ ตำแหน่งที่แขนกลเหยียดตรง $q_1 = q_2$ ดังนั้นในการทำงานจริงจึงหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีดังกล่าวได้โดยจำกัดขอบเขตการทำงานของแขนกลให้แคบลงมา เพื่อป้องกันไม่ให้แขนกลเหยียดตรงได้เต็มที่

3.2 ตัวควบคุม

ในส่วนของสัญญาณควบคุมที่ใช้นั้นได้เลือกใช้วิธีการควบคุมปรับตัวแบบเฉื่อยงาน (passivity-based adaptive control) [7,8,11,12,13,14] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมแขนกลเมื่อฐานไม่อยู่นิ่งและทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพอยู่ได้เมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่แน่นอน (parametric uncertainty)

จากแบบจำลองทางพลศาสตร์ ของระบบ

$$Y(q, \dot{q}, \ddot{q})a + Y_{fv}(\dot{q})v + Y_{fc}(\dot{q})c = \mu$$

ดังนั้นสมการตัวควบคุมปรับตัวแบบเฉื่อยงานของระบบก็คือ

$$\mu_{5 \times 1} = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q}_r)_{5 \times 13} \hat{a}_{13 \times 1} + Y_{fv_{5 \times 5}}(\dot{q}_r) \hat{v}_{5 \times 1} + Y_{fc_{5 \times 5}}(\dot{q}_r) \hat{c}_{5 \times 1} - K_{D_{5 \times 5}} s_{5 \times 1}$$

โดยเลือกฟังก์ชันเลียปูนอฟ (Lyapunov equation) ดังนี้คือ

$$V(t) = \frac{1}{2} [s^T M s + \tilde{a}^T \Gamma_a^{-1} \tilde{a} + \tilde{v}^T \Gamma_v^{-1} \tilde{v} + \tilde{c}^T \Gamma_c^{-1} \tilde{c}]$$

$$\tilde{a} = \hat{a} - a, \quad \tilde{v} = \hat{v} - v, \quad \tilde{c} = \hat{c} - c$$

และได้

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= s^T Y \dot{\tilde{a}} + \dot{\hat{a}}^T \Gamma_a^{-1} \tilde{a} - s^T K_D s \\ &\quad + s^T Y_{fv} \dot{\tilde{v}} + \dot{\hat{v}}^T \Gamma_v^{-1} \tilde{v} - s^T v_D s \\ &\quad + s^T Y_{fc} \dot{\tilde{c}} + \dot{\hat{c}}^T \Gamma_c^{-1} \tilde{c} - s^T [Y_{fc}(\dot{q}) - Y_{fc}(\dot{q}_r)] c \end{aligned}$$

เลือกการปรับค่าพารามิเตอร์ (parameter update) เพื่อให้ $\dot{V}(t)$ มีค่ากึ่งลบแน่นอน (negative semi-definite) ได้ดังนี้คือ

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma_a Y^T s, \quad \dot{\hat{v}} = -\Gamma_v Y_{fv}^T s, \quad \dot{\hat{c}} = -\Gamma_c Y_{fc}^T s$$

ดังนั้น

$$\dot{V}(t) = -s^T (K_D + v_D) s - s^T [Y_{fc}(\dot{q}) - Y_{fc}(\dot{q}_r)] c \leq 0$$

เมื่อ $\hat{a}, \hat{v}, \hat{c}$ คือพารามิเตอร์ที่ต้องประมาณค่าและ $\Gamma_a, \Gamma_v, \Gamma_c, \Lambda, K_D$ คือเมทริกซ์บวกแน่นอน (positive definite matrix) เมื่อเมทริกซ์ $[Y_{fc}(\dot{q}) - Y_{fc}(\dot{q}_r)]$ มีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้มีขนาดเท่ากับ $Y_{fc}(\dot{q} - \dot{q}_r)$ และ v_D เป็นเมทริกซ์บวกแน่นอน เป็นผลให้ $\dot{V}(t)$ มีค่ากึ่งลบแน่นอน

จากสมการการควบคุมของระบบแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมขาออกเข้าสู่ $s = 0$ ซึ่ง \dot{q} และ \dot{q}_r เข้าสู่ศูนย์เช่นกันเมื่อเวลาเข้าสู่ค่าอนันต์ ทำให้รับประกันได้ว่าระบบมีเสถียรภาพและค่าความผิดพลาดในการตามรอย (tracking error) มีค่าลู่เข้า

กำหนดให้

$$Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) a = M(q) \ddot{q}_r + C(q, \dot{q}) \dot{q}_r + g(q)$$

$$Y(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) \hat{a} = \hat{M}(q) \ddot{q}_r + \hat{C}(q, \dot{q}) \dot{q}_r + \hat{g}(q)$$

$$s = \dot{q} + \Lambda \tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_r, \quad \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q}, \quad \tilde{q} = q - q_d$$

$$\dot{\hat{a}}_{13 \times 1} = -\Gamma_{a_{13 \times 13}} Y_{13 \times 5}^T s_{5 \times 1}, \quad \hat{a}_k = \hat{a}_{k-1} + \dot{\hat{a}}_k$$

$$\dot{\hat{v}}_{5 \times 1} = -\Gamma_{v_{5 \times 5}} Y_{fv_{5 \times 5}}^T s_{5 \times 1}, \quad \hat{v}_k = \hat{v}_{k-1} + \dot{\hat{v}}_k$$

$$\dot{\hat{c}}_{5 \times 1} = -\Gamma_{c_{5 \times 5}} Y_{fc_{5 \times 5}}^T s_{5 \times 1}, \quad \hat{c}_k = \hat{c}_{k-1} + \dot{\hat{c}}_k$$

$$\Gamma_v = \begin{bmatrix} \gamma_{v_{BX}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{v_{BY}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{v_{BR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{v_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{v_2} \end{bmatrix}_{5 \times 5}, \Gamma_c = \begin{bmatrix} \gamma_{c_{BX}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{c_{BY}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{c_{BR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{c_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{c_2} \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

$$s = \begin{bmatrix} \dot{q}_{BX} - \dot{q}_{rBX} \\ \dot{q}_{BY} - \dot{q}_{rBY} \\ \dot{q}_{BR} - \dot{q}_{rBR} \\ \dot{q}_1 - \dot{q}_{r1} \\ \dot{q}_2 - \dot{q}_{r2} \end{bmatrix}_{5 \times 1}, \begin{bmatrix} \dot{q}_{rBX} = \dot{q}_{d_{BX}} - \Lambda_{BX}(q_{BX} - q_{d_{BX}}) \\ \dot{q}_{rBY} = \dot{q}_{d_{BY}} - \Lambda_{BY}(q_{BY} - q_{d_{BY}}) \\ \dot{q}_{rBR} = \dot{q}_{d_{BR}} - \Lambda_{BR}(q_{BR} - q_{d_{BR}}) \\ \dot{q}_{r1} = \dot{q}_{d_1} - \Lambda_1(q_1 - q_{d_1}) \\ \dot{q}_{r2} = \dot{q}_{d_2} - \Lambda_2(q_2 - q_{d_2}) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \ddot{q}_{rBX} = \ddot{q}_{d_{BX}} - \Lambda_{BX}(\dot{q}_{BX} - \dot{q}_{d_{BX}}) \\ \ddot{q}_{rBY} = \ddot{q}_{d_{BY}} - \Lambda_{BY}(\dot{q}_{BY} - \dot{q}_{d_{BY}}) \\ \ddot{q}_{rBR} = \ddot{q}_{d_{BR}} - \Lambda_{BR}(\dot{q}_{BR} - \dot{q}_{d_{BR}}) \\ \ddot{q}_{r1} = \ddot{q}_{d_1} - \Lambda_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_{d_1}) \\ \ddot{q}_{r2} = \ddot{q}_{d_2} - \Lambda_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_{d_2}) \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_a = \begin{bmatrix} \gamma_{a_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{a_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{a_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_{10}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \gamma_{a_{13}} \end{bmatrix}_{13 \times 13}$$

$$K_D = \begin{bmatrix} k_{DBX} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{DBY} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{DBR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{D1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{D2} \end{bmatrix}_{5 \times 5}$$

สำหรับตัวแปรอื่นๆ ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 2.3

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 สรุป

ในส่วนของเนื้อหาบทนี้กล่าวถึงการคำนวณหาตำแหน่ง, ความเร็วและความเร่งของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 ซดเซยกับการเคลื่อนที่ของฐานเพื่อให้ปลายแขนกลยังคงควบคุมอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ ด้วยวิธีการแก้สมการของ นิวตัน-ราฟสัน และได้กล่าวถึงตัวควบคุมปรับตัวแบบเฉื่อยงานซึ่งมีคุณสมบัติคงเสถียรภาพอยู่ได้เมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่แน่นอน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

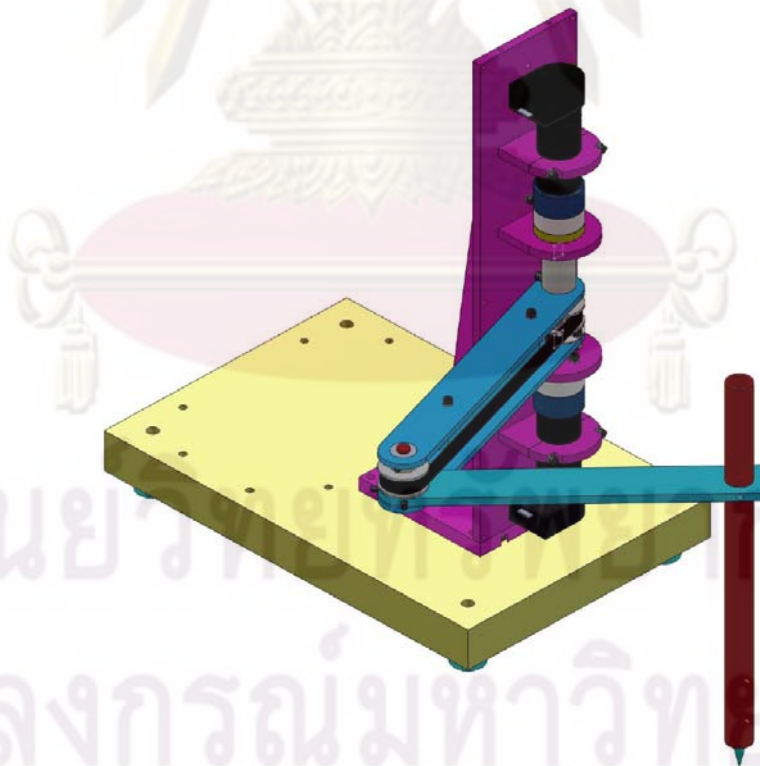
บทที่ 4

ผลการทดลอง

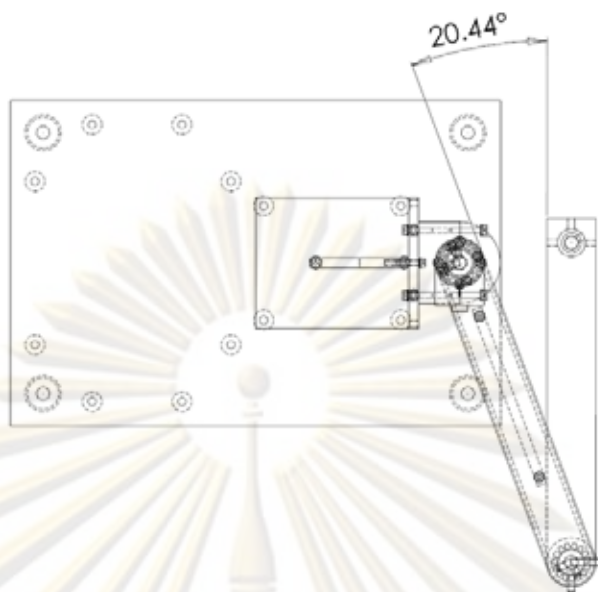
4.1 ชุดทดลอง

ชุดทดลองที่สร้างและออกแบบนี้ได้ทำการย่อส่วนจากระบบจริงเพื่อลดความซับซ้อนในการสร้างและออกแบบแต่ยังคงไว้ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลอง

ชุดทดลองทำการสร้างและออกแบบมีความยาวของแขนแต่ละก้านโยง 196 มิลลิเมตร, น้ำหนักของก้านโยงที่ 1 คือ 0.2 กิโลกรัม, น้ำหนักของก้านโยงที่ 2 คือ 0.3 กิโลกรัม, น้ำหนักโครงมอเตอร์และฐานคือ 27.4 กิโลกรัม, ขีดจำกัดระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 คือ 20.44 องศา, ขีดจำกัดระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และ โครงมอเตอร์ คือ 13.46 องศา, พื้นที่การทำงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 489.12 มิลลิเมตร และมีคุณสมบัติของมอเตอร์ที่ใช้งานดังนี้คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Faulhaber 2657W 012CR แรงดัน 12 โวลท์, อัตราทด 14, ความละเอียดของ Encoder 28000 count/รอบ และมีความเร็วสูงสุด 659.7345 rad/sec

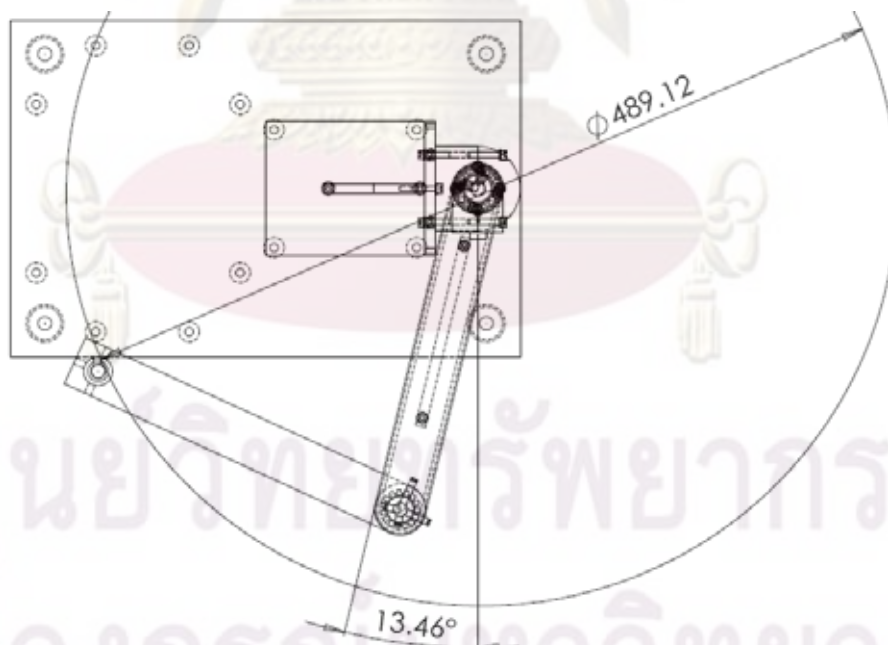


รูปที่ 4.1: แสดงชุดทดลองที่ออกแบบ



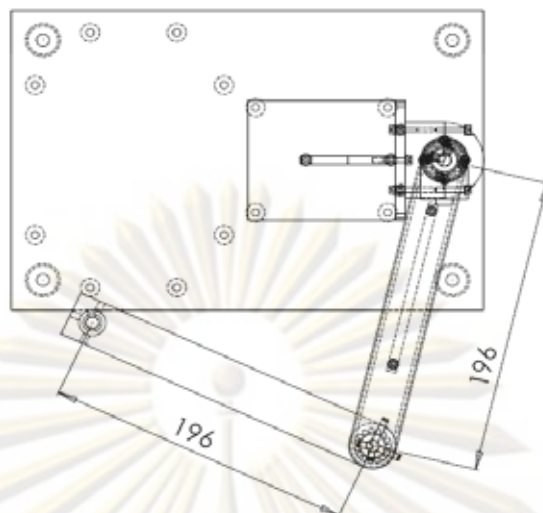
รูปที่ 4.2: แสดงขีดจำกัดระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

จากรูปแสดงให้เห็นถึงมุมการชนระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 ซึ่งมีขีดจำกัดคือ 20.44 องศา



รูปที่ 4.3: แสดงขีดจำกัดระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และโครงมอเตอร์ และพื้นที่การทำงาน

จากรูปแสดงให้เห็นถึงมุมการชนระหว่างแกนกลก้านโยงที่ 1 และโครงมอเตอร์ ซึ่งมีขีดจำกัดอยู่ที่ 13.46 องศาและมีพื้นที่ในการทำงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 489.12 มิลลิเมตร



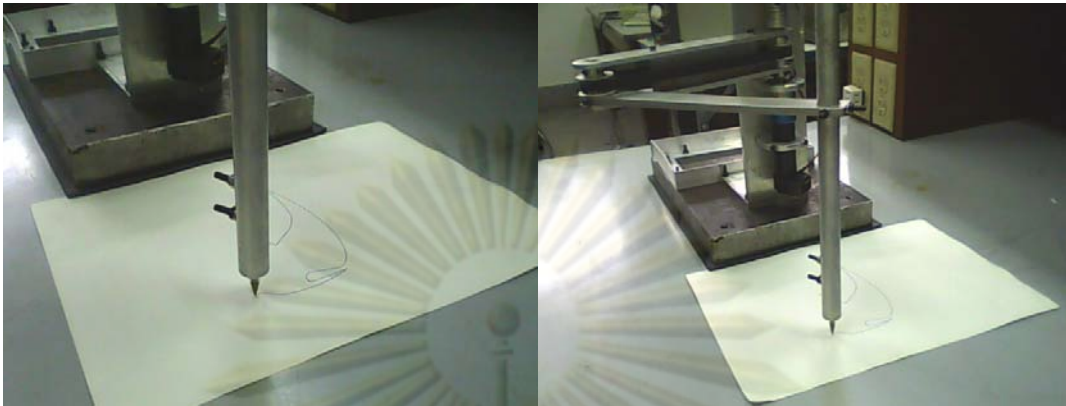
รูปที่ 4.4: แสดงความยาวของแขนแต่ละก้านโยงคือ 196 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5: แสดงชุดทดลองจริง



รูปที่ 4.6: แสดงชุดทดลองจริงจากมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.7: แสดงปลายของแกนกลซึ่งเป็นปากกา



รูปที่ 4.8: แสดงชุดทดลองซึ่งตั้งอยู่บนแท่นทดสอบ

ในการทดลองทำการติดตั้งตัวหุ่นยนต์บนแท่นทดสอบเคลื่อนที่รอบจุดหมุนในแนวแกน Z_E ตรวจสอบวัดสัญญาณการเคลื่อนที่ของแท่นทดสอบด้วย Encoder ความละเอียด 4000 count/รอบ ดังรูปที่ 4.8

4.2 ระบบสมองกลฝังตัว

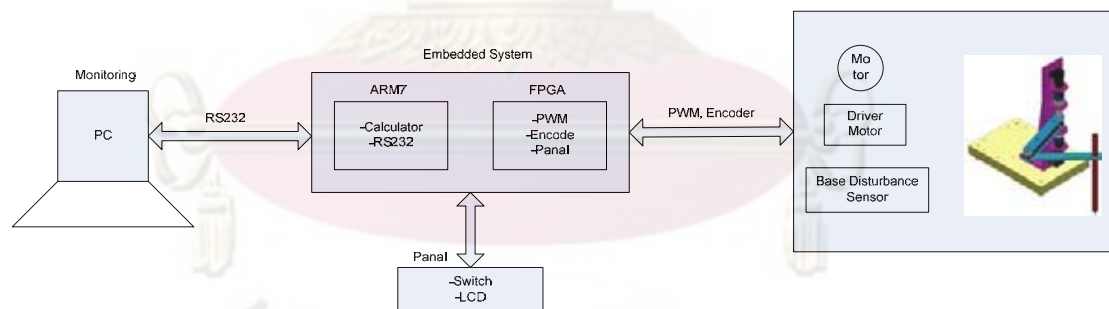
สำหรับระบบสมองกลฝังตัวของการทำงานทดลองชุดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์และส่วนแสดงผลการทำงาน

ในส่วนควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนรับสัญญาณขาเข้า (input) , ส่งสัญญาณขาออก (output) และส่วนต่อมาคือส่วนประมวลผลทำหน้าที่คำนวณและควบคุมการทำงาน

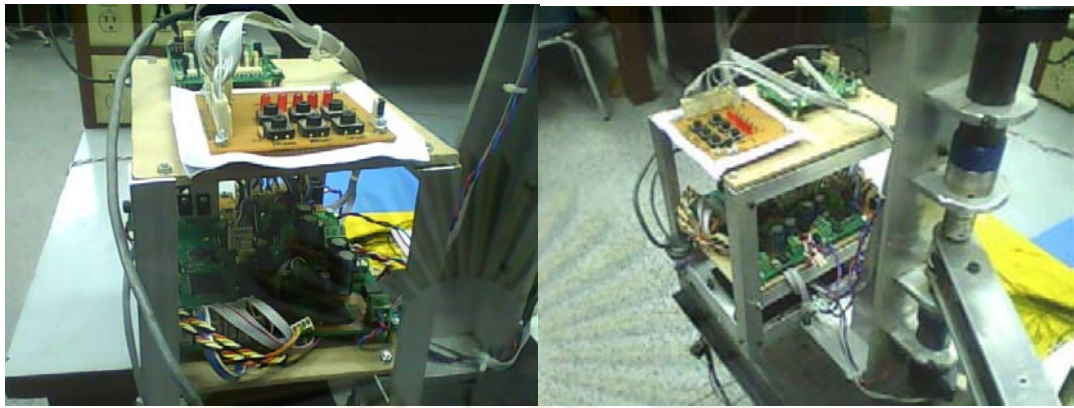
โดยส่วนรับสัญญาณขาเข้าและส่งออกนั้นใช้ชิป FPGA เบอร์ XC3S400 ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับหุ่นยนต์ ประกอบด้วย ส่วนสร้างสัญญาณ PWM เพื่อส่งให้วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์, Encoder นับจำนวนพัลส์ของมอเตอร์, ติดต่อกับผู้ทดลองผ่านปุ่มกด, รับค่าของสัญญาณการรบกวนจากฐานและทำการสื่อสารกับ ชิปปประมวลผล (ARM7) ด้วยขนาดข้อมูล 16 บิต และ แอทเดรส ขนาด 8 บิต

สำหรับส่วนของการประมวลผลใช้ชิป ARM7 เบอร์ LPC2148FBD64 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต ทำหน้าที่หลักในการควบคุมการทำงาน, คำนวณและติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์

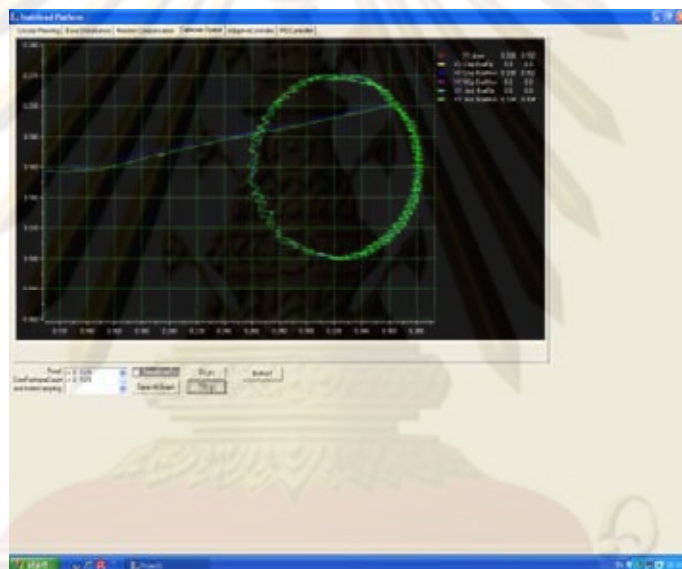
ในส่วนของการแสดงผลนั้นทำการแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์โดยรับส่งข้อมูลกับชิปปประมวลผลผ่านทางสายสัญญาณ RS232



รูปที่ 4.9: แสดงแผนภาพโครงสร้างของระบบสมองกลฝังตัว



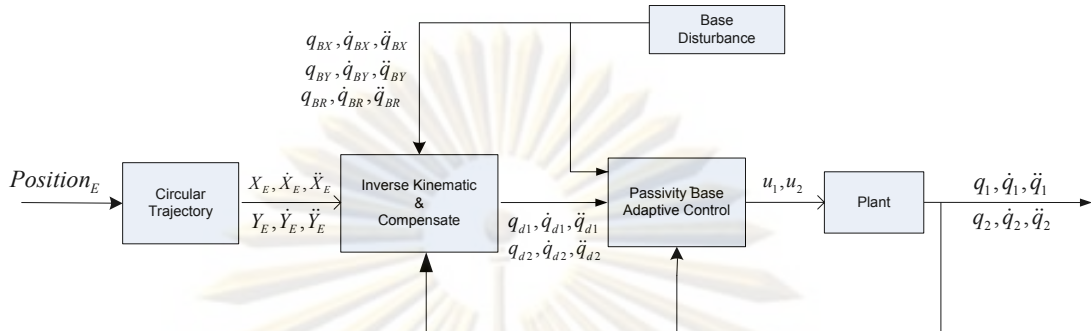
รูปที่ 4.10: แสดงการติดตั้งใช้งานแผงวงจรสมองกลฝังตัวกับชุดทดลองจริง



รูปที่ 4.11: แสดงส่วนบันทึกและแสดงผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการจำลองระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.12: แสดงแผนผังของระบบ

การจำลองการทำงานของระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์ จำลองการทำงานโดยฐานไม่อยู่หนึ่ง แล้วพิจารณาค่าผิดพลาดของตำแหน่งที่ต้องการควบคุมของปลายแขนกลว่าสามารถควบคุมได้ดีหรือไม่

โดยจำลองให้ปลายแขนกลทำการเขียนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 เซนติเมตร ในขณะที่ฐานเคลื่อนที่ และใช้เวลาในการเขียน 6 วินาที/รอบ และใช้เวลาในการซีกตัวอย่าง (sampling time) $6.1875ms$ ในการจำลองการทำงานได้จำกัดสัญญาณควบคุมของแต่ละแกนโยงไว้ที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด $4.0935Nm$ หรือเทียบเท่ากับแรงดัน 12 โวลท์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้งานจริง

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานคือ

$$r_{BX}, r_{BY}, r_{BR}, r_1, r_2 = 14; m_B = 17.4kg, m_1 = 0.3kg, m_2 = 0.2kg$$

$$l_1, l_2 = 0.196m; l_{c1}, l_{c2} = \frac{l_1}{2} = 0.0980m$$

$$I_{MB}, I_{M1}, I_{M2} = 16 \times 10^{-7} kgm^2, I_{1zz} = 0.0182kgm^2$$

$$I_{2zz} = 0.0182kgm^2 \text{ and } I_{Bzz} = 0.1885 kgm^2$$

$$K_{EB}, K_{E1}, K_{E2} = 17.3 \times 10^{-3} \frac{V}{\text{rad per sec}}$$

$$K_{MB}, K_{M1}, K_{M2} = 17.3 \times 10^{-3} \frac{Nm}{A}, R_{aB}, R_{a1}, R_{a2} = 0.71\Omega$$

$$B_B = 0.0024Nm - \text{sec}/m, B_1, B_2 = 0.0024Nm - \text{sec}/\text{rad}$$

$$F_{vB} = 0.2Nm - \text{sec}/m, F_{v1}, F_{v2} = 0.2Nm - \text{sec}/\text{rad}$$

$$F_{cB}, F_{c1}, F_{c2} = 0.4Nm$$

ค่าอัตราขยายต่างๆที่ใช้คือ

$$K_D = \text{diag}(0.006, 0.006)$$

$$\Lambda = \text{diag}(8600, 6000)$$

$$\Gamma_a = \text{diag}(20 \times 10^{-9}, 10 \times 10^{-10}, 60 \times 10^{-12}, 80 \times 10^{-13}, 0, 10 \times 10^{-10}, \\ 60 \times 10^{-12}, 80 \times 10^{-13}, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$\Gamma_v = \text{diag}(102 \times 10^{-10}, 102 \times 10^{-10})$$

$$\Gamma_c = \text{diag}(102 \times 10^{-10}, 102 \times 10^{-10})$$

ค่าพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานคือ

$$a = [0.2000, 0.0196, 0.0201, 3.1360e-004, 0.3000, 0.0294, \\ 0.0211, 3.1360e-004, 17.4000, 0.1885, 3.1360e-004, \\ 3.1360e-004, 3.1360e-004]^T$$

$$v = [0.2, 0.2]^T$$

$$c = [0.4, 0.4]^T$$

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณในการจำลองการทำงานคือ

$$\hat{a} = [5.8757 \times 10^{-4}, -5.5184 \times 10^{-5}, 2.2631 \times 10^{-5}, \\ 1.0905 \times 10^{-6}, 0, -1.9236 \times 10^{-6}, 4.6482 \times 10^{-5}, \\ 4.6748 \times 10^{-6}, x, x, x, x, x]^T$$

$$\hat{v} = [0.0213, 0.0138]^T$$

$$\hat{c} = [3.9645 \times 10^{-4}, 2.9710 \times 10^{-4}]^T$$

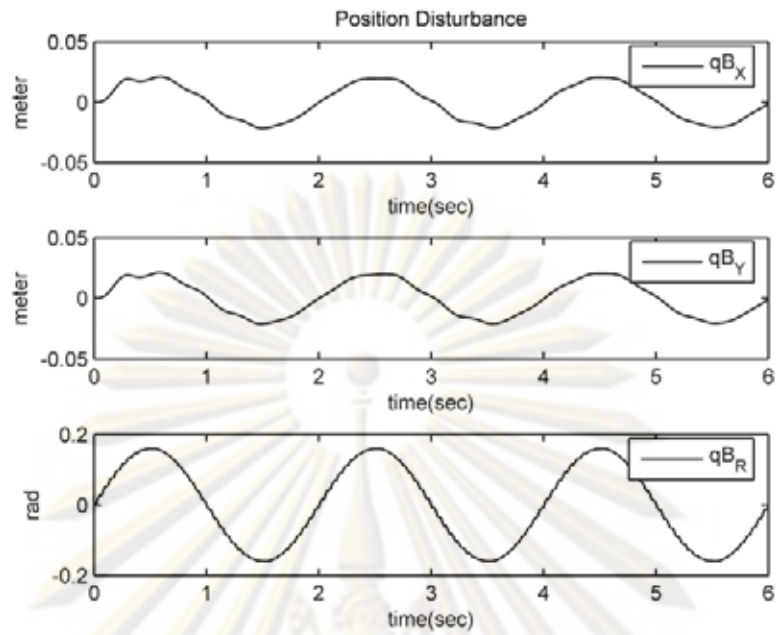
โดยค่า x ในพารามิเตอร์ \hat{a} คือพารามิเตอร์ที่ไม่สนใจ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลในการควบคุมหุ่นยนต์มีเพียง 7 ตัวคือ $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4, \hat{a}_6, \hat{a}_7, \hat{a}_8$

สัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์คือ

$$q_{BX} = 0.02 \sin(\pi t), q_{BY} = 0.02 \sin(\pi t), q_{BR} = 0.16 \sin(\pi t)$$

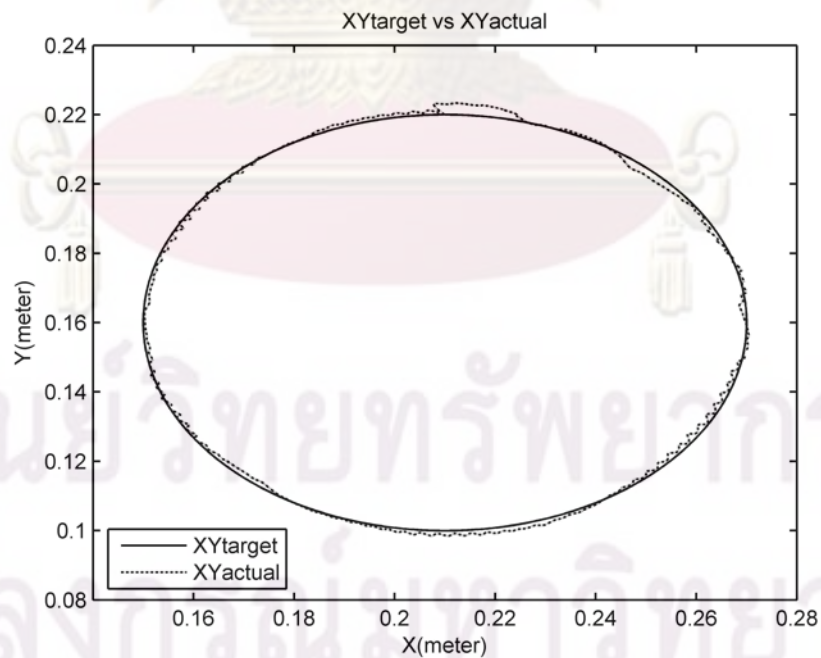
ศูนย์วิทยุโทรพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



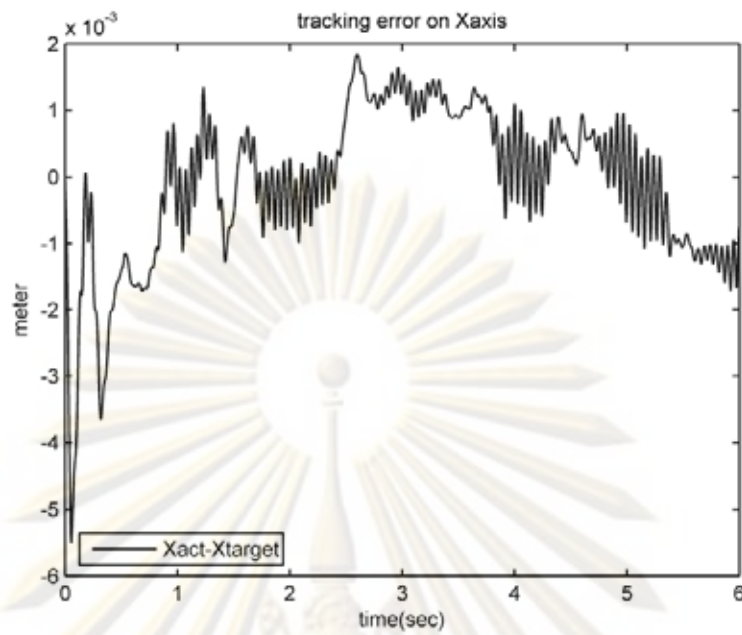
รูปที่ 4.13: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ในการจำลองระบบ

จากรูปแสดงให้เห็นถึงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ในการจำลองระบบด้วยสัญญาณ $q_{BX} = 0.02 \sin(\pi t)$, $q_{BY} = 0.02 \sin(\pi t)$, $q_{BR} = 0.16 \sin(\pi t)$



รูปที่ 4.14: แสดงการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน เส้นทึบคือ

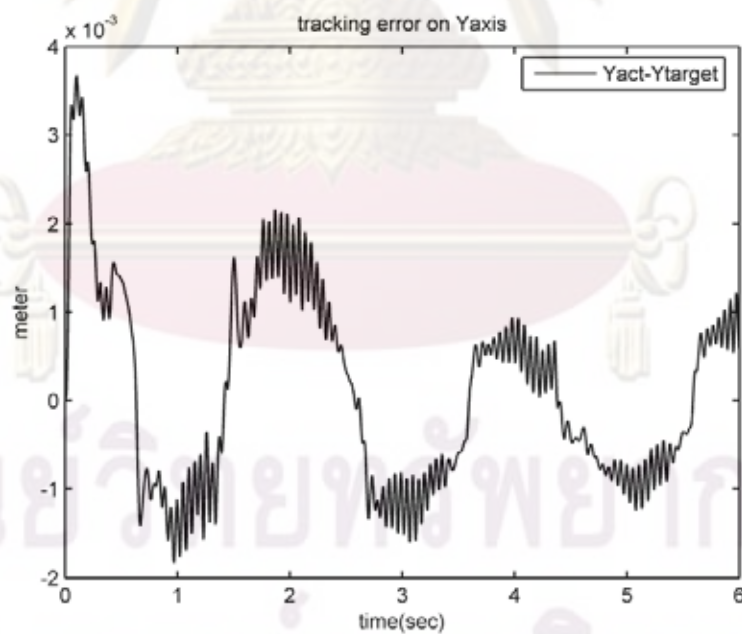
ตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล



รูปที่ 4.15: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการจำลองระบบ

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X คือ

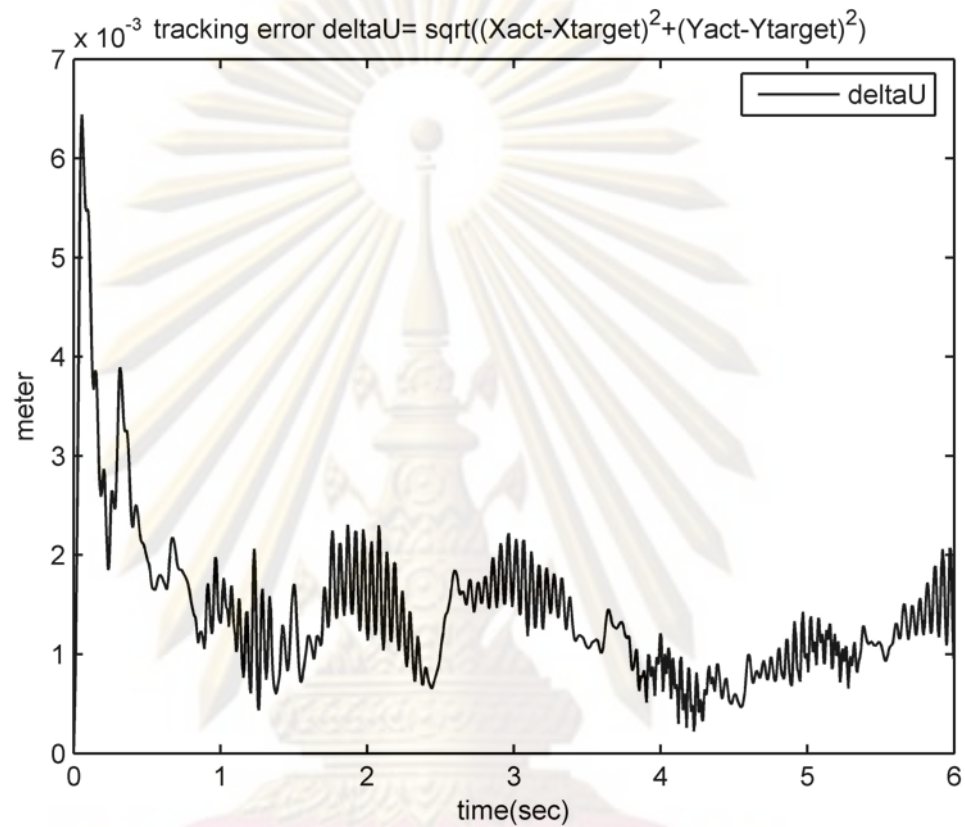
$$1.844 \times 10^{-3} \text{ m}$$



รูปที่ 4.16: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y ของการจำลองระบบ

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y คือ

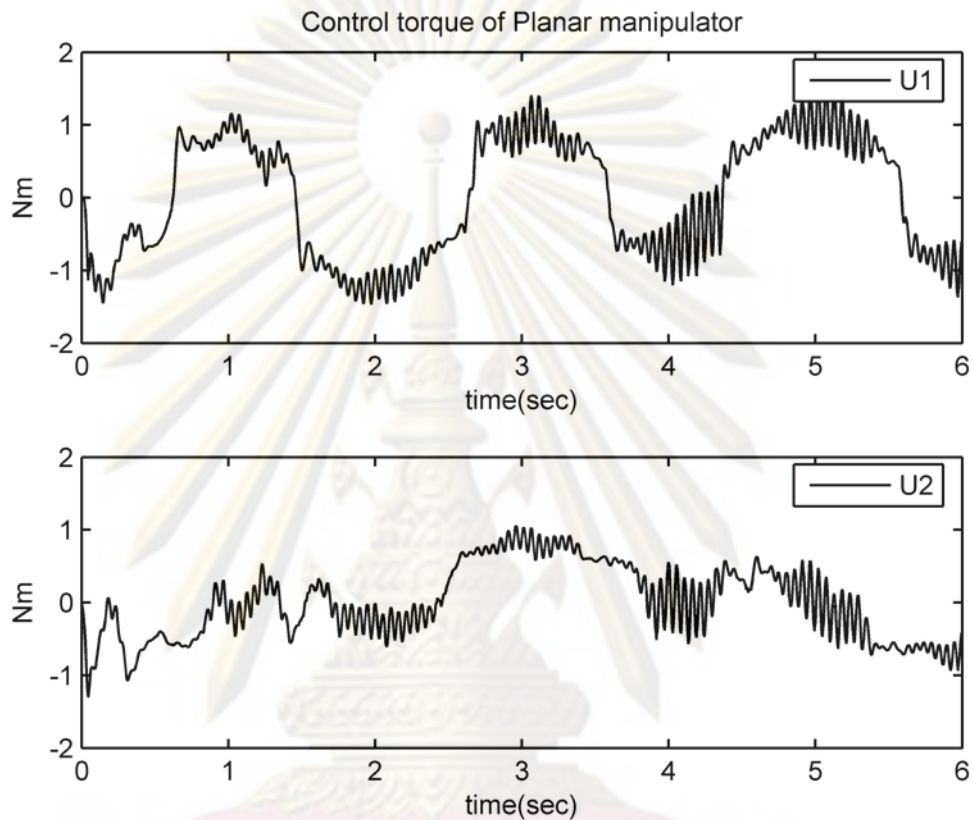
$$3.672 \times 10^{-3} \text{ m}$$



รูปที่ 4.17: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะจัดของการจำลองระบบ

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะจัดคือ $6.44 \times 10^{-3} \text{ m}$

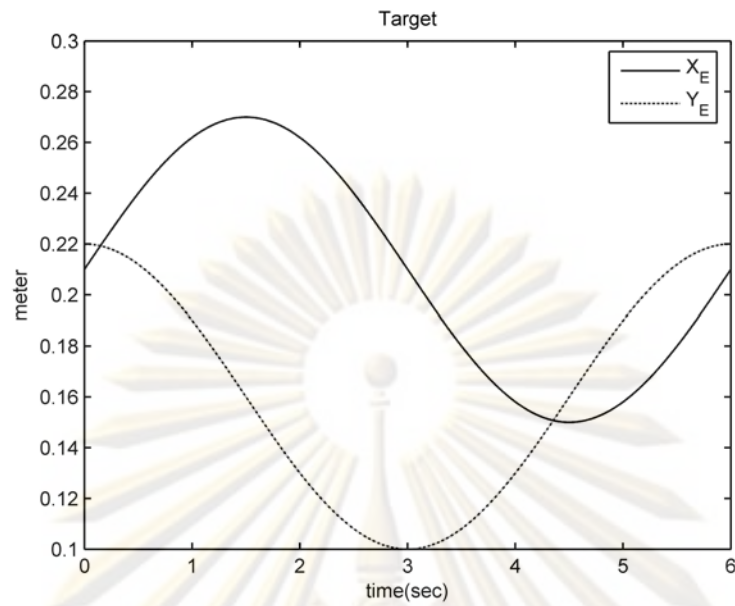
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการจำลองระบบ

จากรูป U1 คือสัญญาณควบคุมของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ U2 คือสัญญาณควบคุมของแขนกลก้านโยงที่ 2 โดยทำการจำกัดค่าสัญญาณควบคุมสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณควบคุมแต่ละก้านโยงไว้ที่ $4.0935Nm$ หรือเทียบเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ชุดทดลอง 12 โวลท์

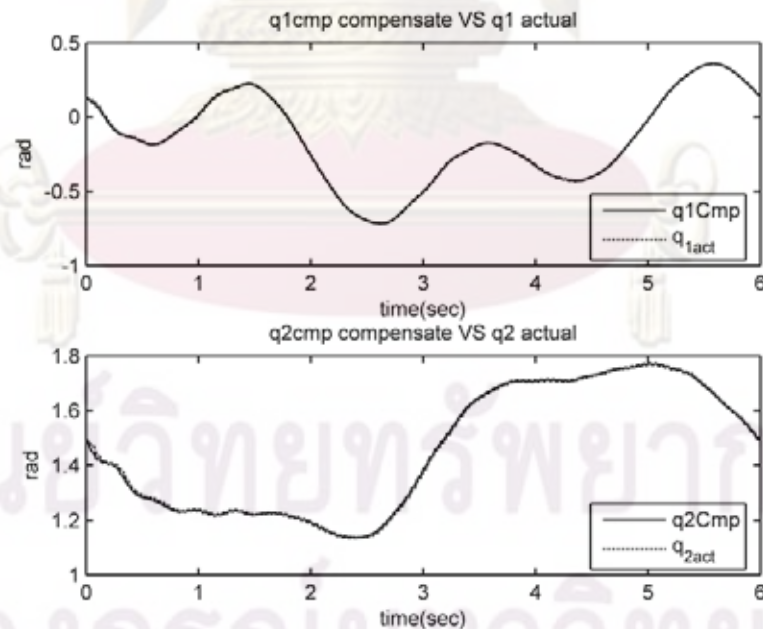
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการจำลองระบบ

จากรูปสัญญาณตำแหน่งเป้าหมายคือ $X_E = 0.21 + 0.06\sin(2\pi t/6)$

$Y_E = 0.16 + 0.06\cos(2\pi t/6)$ และเมื่อเขียนในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้วงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร



รูปที่ 4.20: แสดงมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

จากรูป $q1Cmp$, $q2Cmp$ คือมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานหุ่นยนต์ของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 และ $q1act$, $q2act$ คือมุมของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2

4.4 ผลการทดสอบกับชุดทดลองจริง

ในการทดสอบกับชุดทดลองจริง ทำการทดสอบโดยวางชุดทดลองบนแท่นหมุนเพื่อทำการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ โดยตรวจวัดการเคลื่อนที่ของฐานจากตำแหน่งการหมุนของแท่นทดสอบด้วย Encoder ความละเอียด 4000 count/รอบ และเวลาในการชักตัวอย่างของระบบควบคุมมีค่าเท่ากับ 6.1875 มิลลิวินาที

สำหรับค่าอัตราขยายต่างๆที่ใช้ในการทดสอบจริงคือ

$$K_D = \text{diag}(0.01, 0.01,)$$

$$\Lambda = \text{diag}(1400, 600)$$

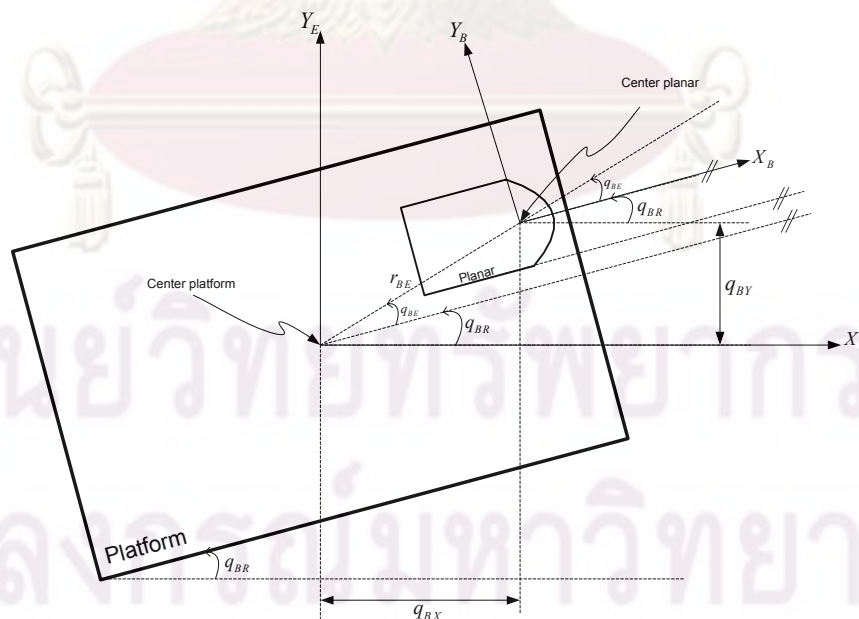
$$\Gamma_a = \text{diag}(80 \times 10^{-10}, 560 \times 10^{-12}, 440 \times 10^{-13}, 360 \times 10^{-14}, 0, 760 \times 10^{-12}, \\ 440 \times 10^{-13}, 360 \times 10^{-14}, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$\Gamma_v = \text{diag}(18 \times 10^{-10}, 18 \times 10^{-10})$$

$$\Gamma_c = \text{diag}(16 \times 10^{-10}, 16 \times 10^{-10})$$

4.4.1 การเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์

การเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์มีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการวางชุดทดลองกับแท่นทดสอบดังรูปที่ 4.20 โดย r_{BE} คือระยะทางจากจุดหมุนของแท่นทดสอบถึงจุดหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนแกนกล และ q_{BE} คือมุมระหว่าง r_{BE} กับ X_B



รูปที่ 4.21: แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์จากมุมมองด้านบน โดย planar คือตัวหุ่นยนต์และ Platform คือแท่นทดสอบ

จากการวัดตำแหน่งจริงทำให้ได้ค่า r_{BE} และ q_{BE} ดังนี้

$$r_{BE} = 0.1112m, q_{BE} = 0.0602 \text{ degree}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ได้ดังนี้

มุม q_{BR} มีค่าเท่ากับมุมการหมุนของแท่นทดสอบ

$$q_{BX} = r_{BE} \cos(q_{BR} + q_{BE})$$

$$q_{BY} = r_{BE} \sin(q_{BR} + q_{BE})$$

4.4.2 การทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

ทดสอบโดยให้ปลายแขนกลคงที่อยู่ที่ตำแหน่ง $X_E = 0.3641m$, $Y_E = 0.2020m$ โดยในตอนเริ่มต้นให้แขนกลเขียนเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการในขณะที่ฐานอยู่นิ่งและหลังจากที่แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ต้องการแล้วจึงทำการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์

โดยมีสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฐานดังรูปที่ 4.22 และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดดังนี้

$$q_{BX_{\max}} = 0.1112m, q_{BX_{\min}} = 0.0838m$$

$$q_{BY_{\max}} = 0.0731m, q_{BY_{\min}} = -0.05785m$$

$$q_{BR_{\max}} = 0.07084 \text{ rad} = 4.0588 \text{ degree}$$

$$q_{BR_{\min}} = -0.05785 \text{ rad} = -3.3146 \text{ degree}$$

และค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากการทดลองเป็นดังนี้

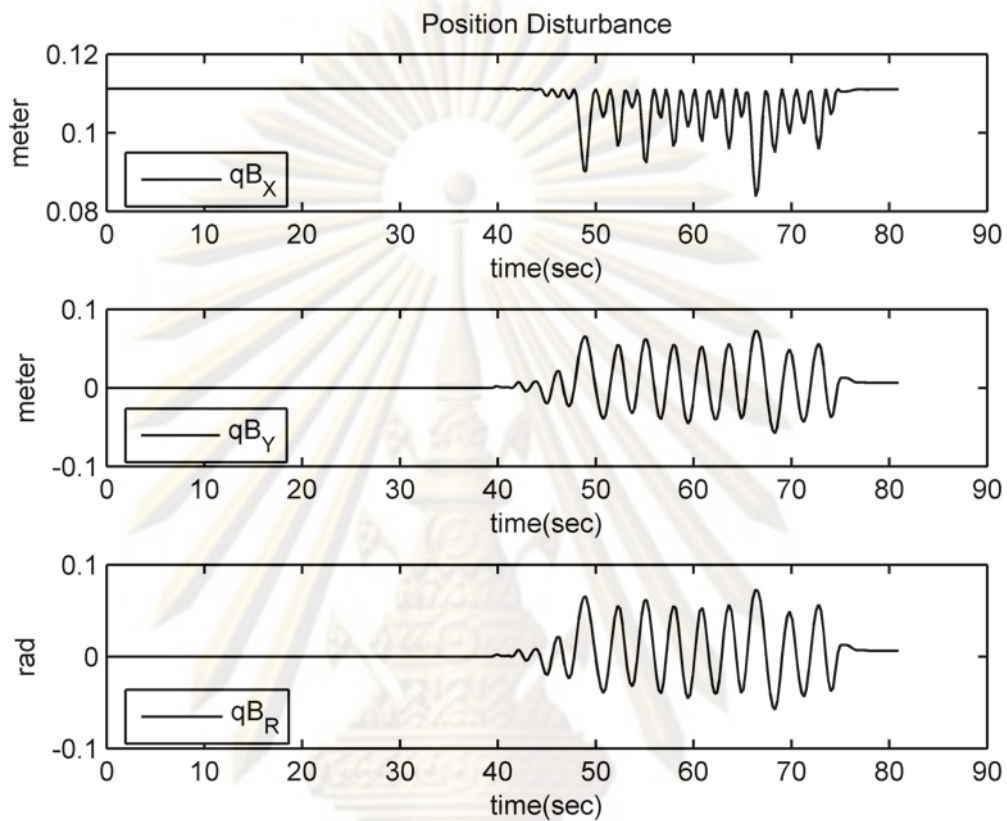
$$\hat{a} = [4.17 \times 10^{-4}, -4.0 \times 10^{-5}, 1.3 \times 10^{-5}, \\ 1.31 \times 10^{-6}, 0, 4.0 \times 10^{-6}, 5.8 \times 10^{-5}, \\ 4.56 \times 10^{-6}, x, x, x, x, x]^T$$

$$\hat{v} = [0.0151, 0.0124]^T$$

$$\hat{c} = [4.6764 \times 10^{-4}, 4.0104 \times 10^{-4}]^T$$

ศูนย์วิศวกรรมโทรพยากร

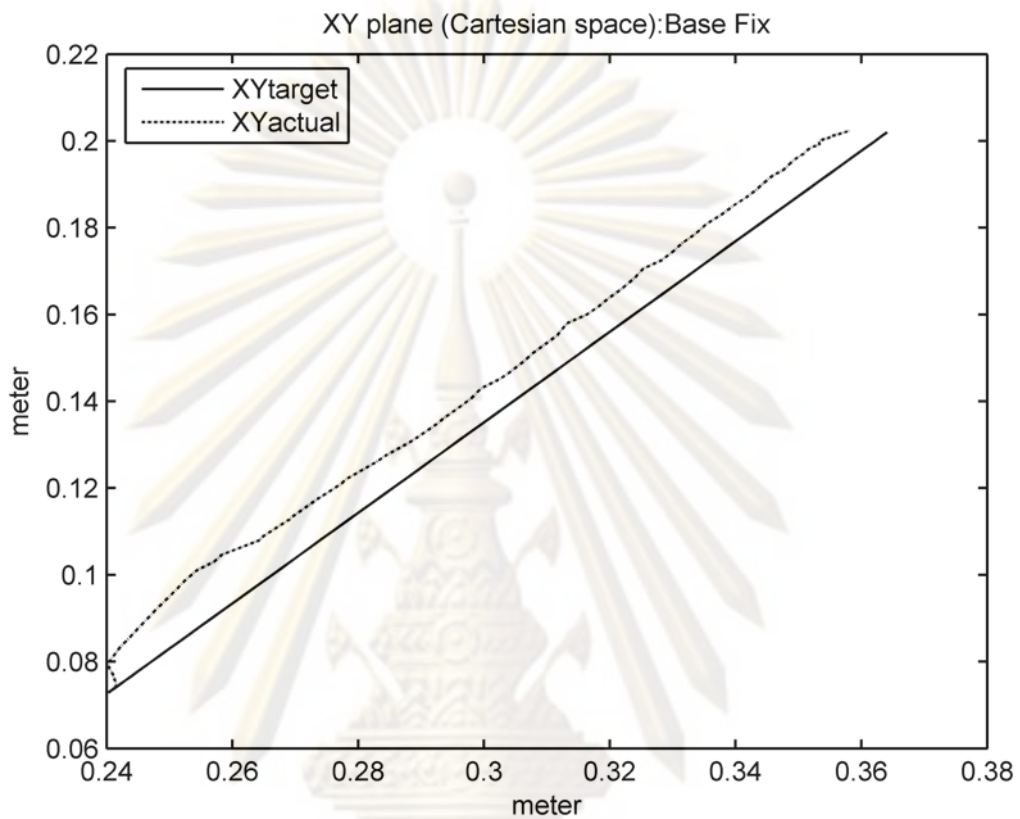
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.22: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

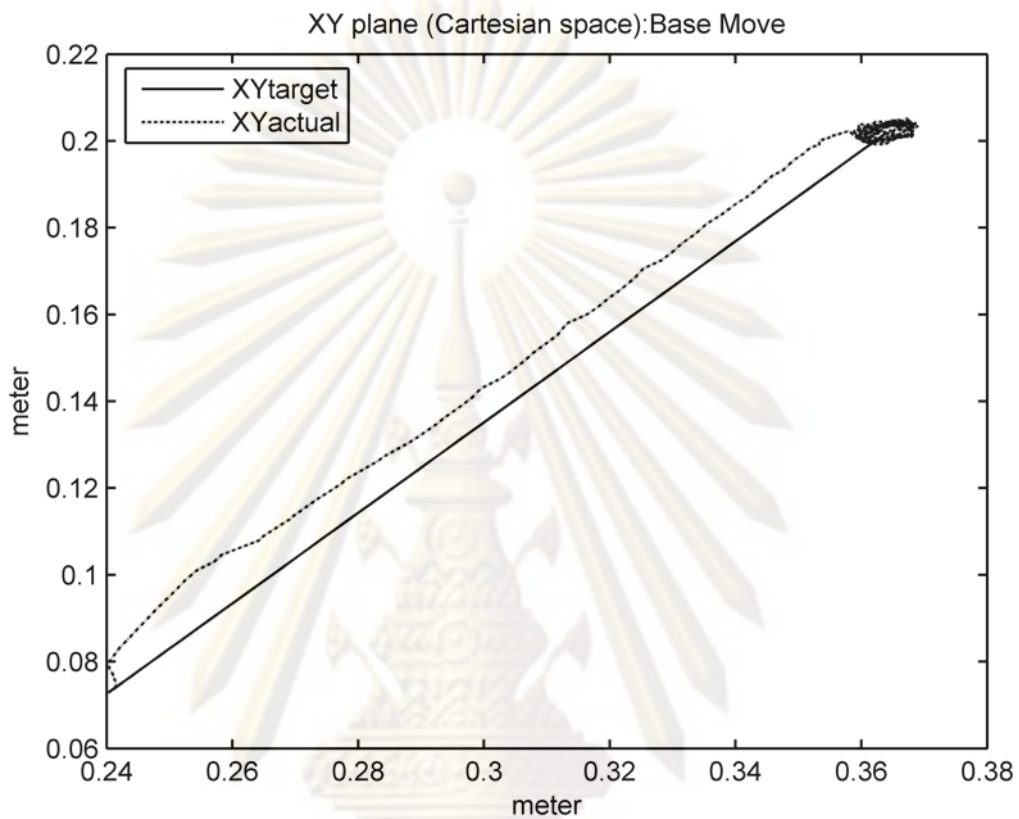
จากรูปสัญญาณที่เกิดขึ้นเกิดจากการรบกวนฐานโดยใช้มือเคลื่อนที่แทนทดสอบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23: แสดงผลการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่ของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมายในขณะที่ฐานอยู่นิ่ง

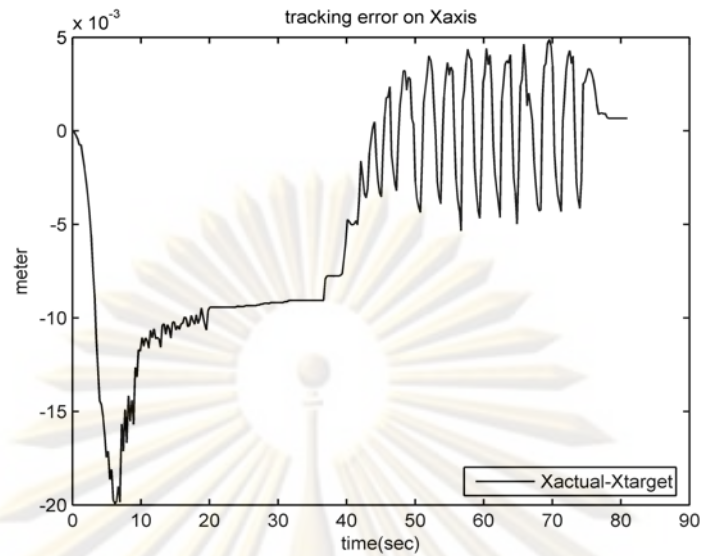
จากรูปเส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล โดยเริ่มต้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากตำแหน่ง $X=0.2403\text{m}$, $Y=0.07286\text{m}$ ไปสู่ตำแหน่ง $X=0.3641\text{m}$, $Y=0.202\text{m}$ และคงที่ ณ ตำแหน่งนี้ไว้



รูปที่ 4.24: แสดงผลการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่ของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน ตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลองเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์

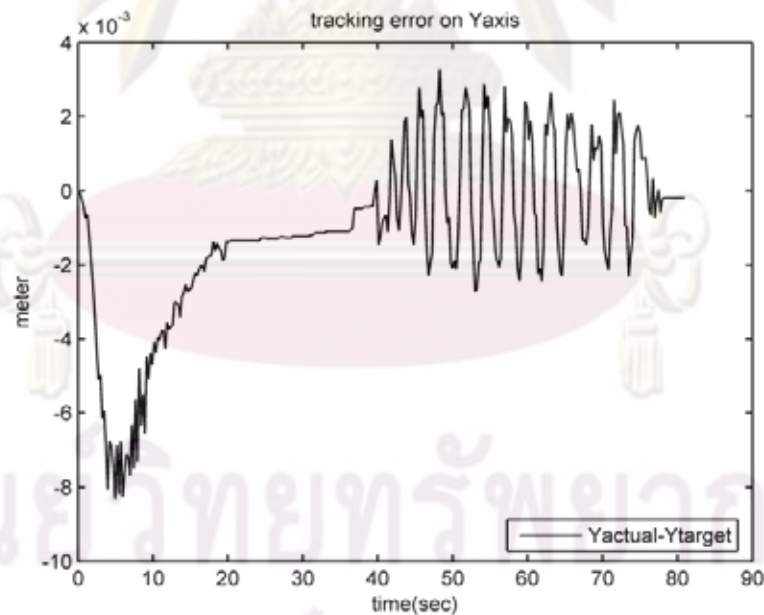
จากรูปเส้นที่บคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกลโดยเริ่มต้นเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งปลายของเส้นตรงคือ $X=0.3641\text{m}$, $Y=0.202\text{m}$ จะเห็นว่าเมื่อทำการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ ตำแหน่งปลายของแขนกลจะทำการเคลื่อนที่รอบเป้าหมายคงที่ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่แสดงนั้นเกิดจากการปรับตำแหน่งฐานกับแทนทดสอบและการปรับค่าอัตราขยาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



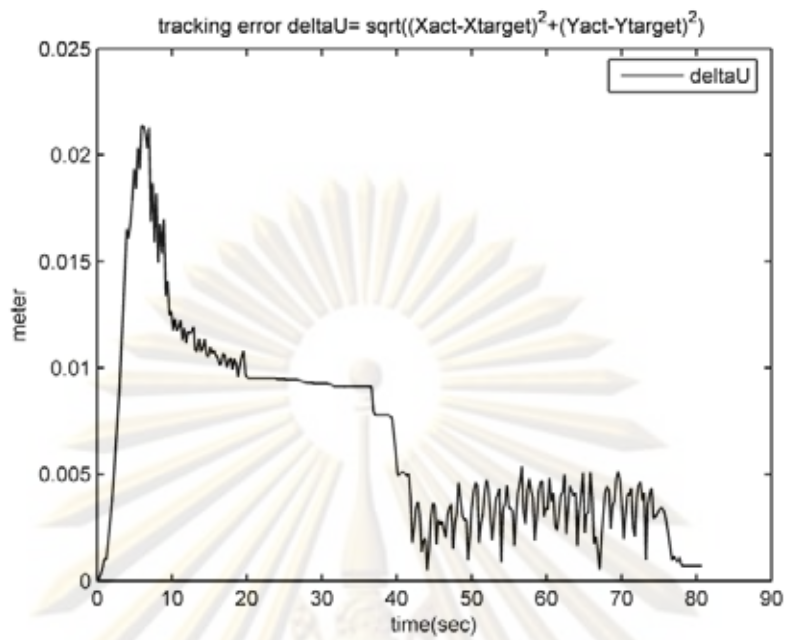
รูปที่ 4.25: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $19.7 \times 10^{-3} \text{ m}$ และในช่วงที่แขนกลเคลื่อนที่ถึงเป้าหมายแล้วจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $4.8 \times 10^{-3} \text{ m}$



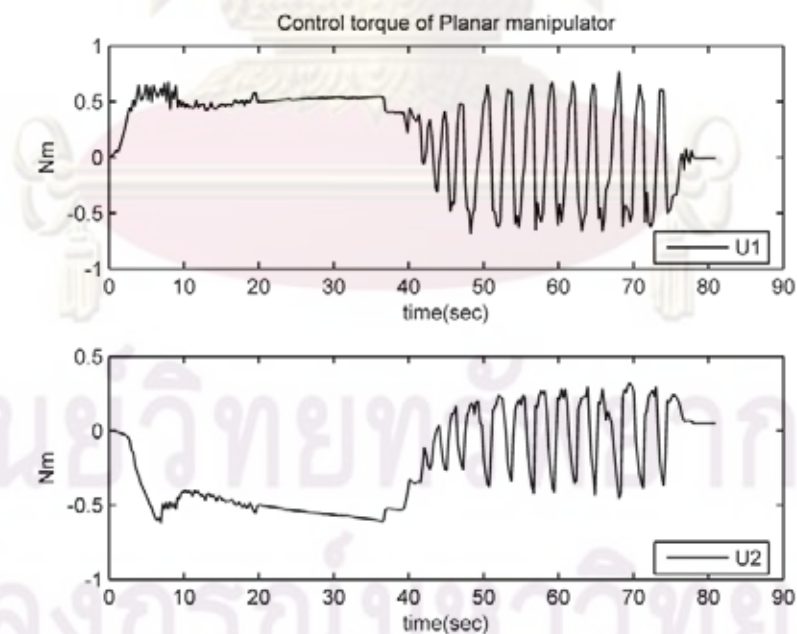
รูปที่ 4.26: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $8.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ และในช่วงที่แขนกลเคลื่อนที่ถึงเป้าหมายแล้วจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $3.2 \times 10^{-3} \text{ m}$

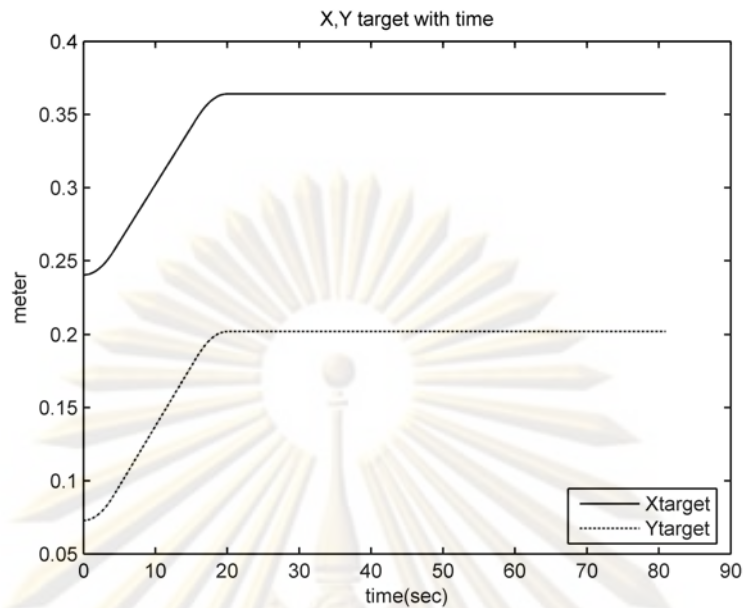


รูปที่ 4.27: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะขจัดของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $21.0 \times 10^{-3} m$ และในช่วงที่แขนกลเคลื่อนที่ถึงเป้าหมายแล้วจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $5.3 \times 10^{-3} m$

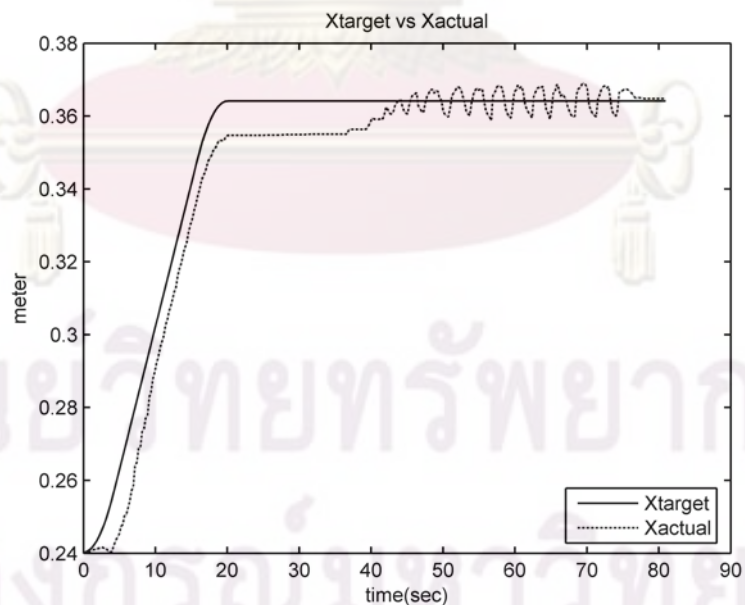


รูปที่ 4.28: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

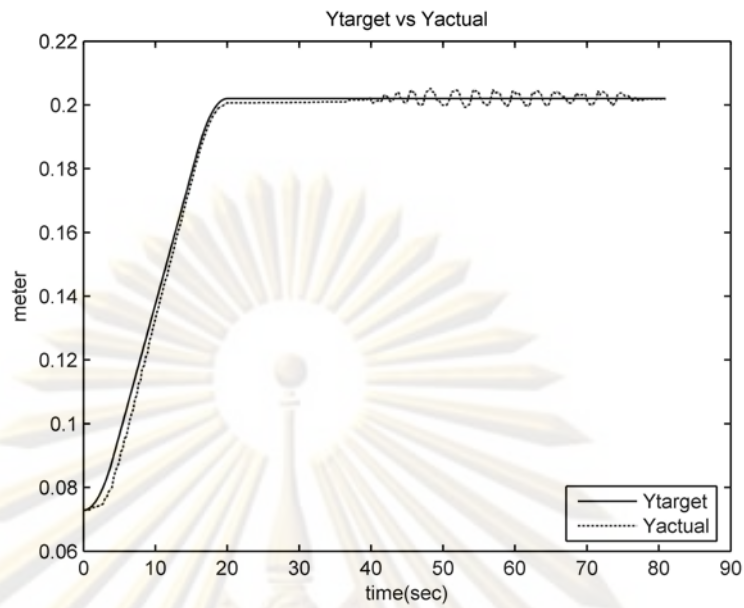


รูปที่ 4.29: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่

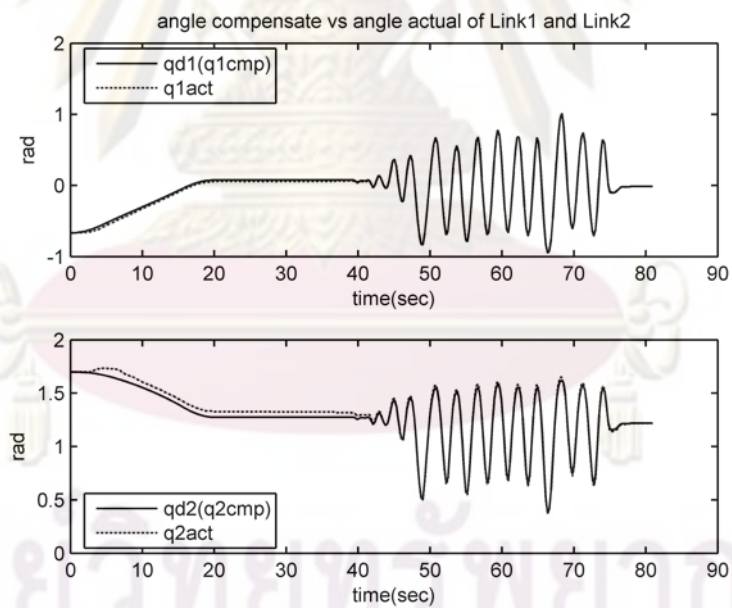
จากรูปเมื่อเขียนในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้เส้นตรงจากตำแหน่ง $X=0.2403\text{m}$, $Y=0.07286\text{m}$ ไปสู่ตำแหน่ง $X=0.3641\text{m}$, $Y=0.202\text{m}$ โดยช่วงเวลา 20 วินาทีแรกแขนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นเป็นเส้นตรงเพื่อเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายคงที่



รูปที่ 4.30: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวนอน X เส้นที่บ คือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล



รูปที่ 4.31: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน Y เส้นทึบคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล



รูปที่ 4.32: แสดงมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

จากรูป $q1Cmp$, $q2Cmp$ คือตำแหน่งมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานหุ่นยนต์ของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 และ $q1act$, $q2act$ คือตำแหน่งของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2

4.4.3 การทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย

ทดสอบโดยให้ปลายแขนกลเขียนวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12 เซนติเมตร ใช้เวลาในการเขียน 6 วินาที/รอบ โดยตอนเริ่มต้นให้แขนกลเขียนเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดตั้งต้นของวงกลมแล้วจึงเขียนวงกลม 1 วงในขณะที่ฐานอยู่นิ่ง หลังจากนั้นจึงทำการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์

โดยมีสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฐานดังรูปที่ 4.33 และมีค่าสูงสุดและต่ำสุดดังนี้

$$q_{B_{X_{\max}}} = 0.1112m, q_{B_{X_{\min}}} = 0.09m$$

$$q_{B_{Y_{\max}}} = 0.06531m, q_{B_{Y_{\min}}} = -0.03091m$$

$$q_{B_{R_{\max}}} = 0.06531rad = 3.7420 \text{ degree}$$

$$q_{B_{R_{\min}}} = -0.03091rad = -1.7710 \text{ degree}$$

และค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากการทดลองเป็นดังนี้

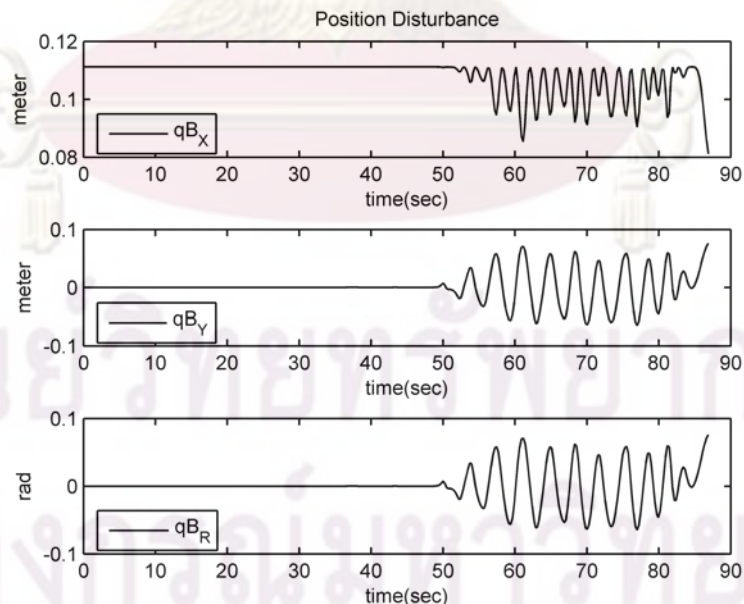
$$\hat{a} = [5.76 \times 10^{-4}, -3.3 \times 10^{-5}, 3.6 \times 10^{-5},$$

$$3.06 \times 10^{-6}, 0, 1.0 \times 10^{-6}, 8.2 \times 10^{-5},$$

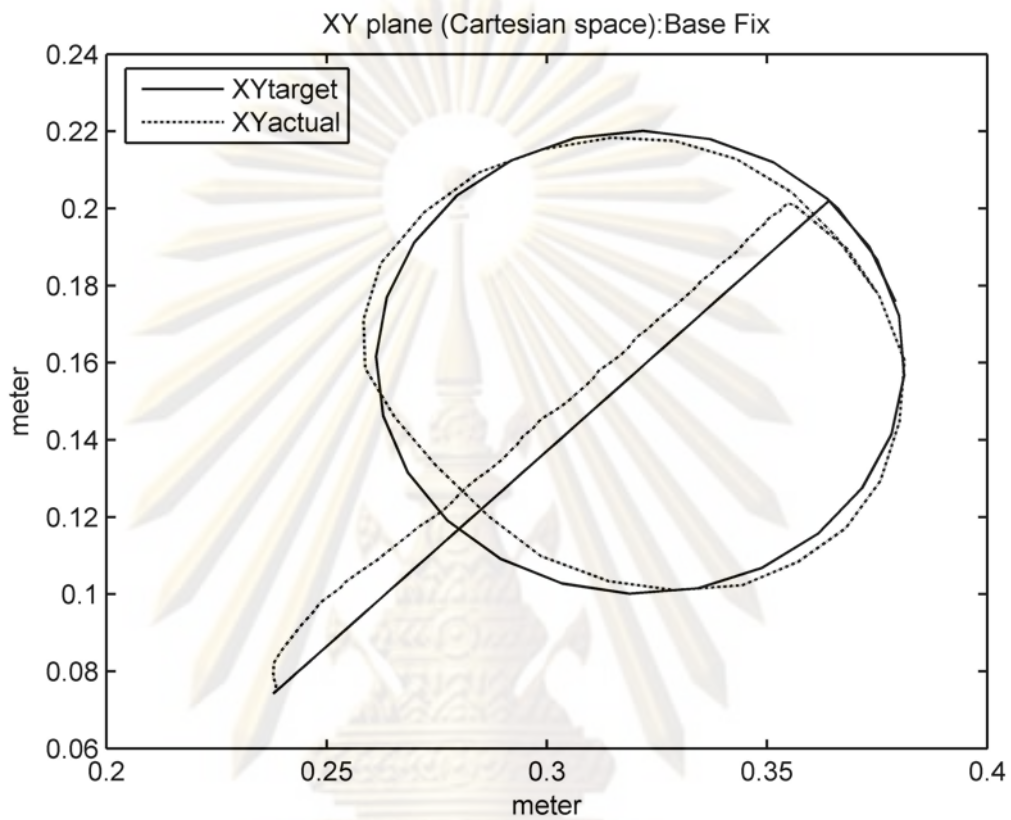
$$6.6 \times 10^{-6}, x, x, x, x, x]^T$$

$$\hat{v} = [0.0161, 0.0161]^T$$

$$\hat{c} = [4.9992 \times 10^{-4}, 4.9726 \times 10^{-4}]^T$$



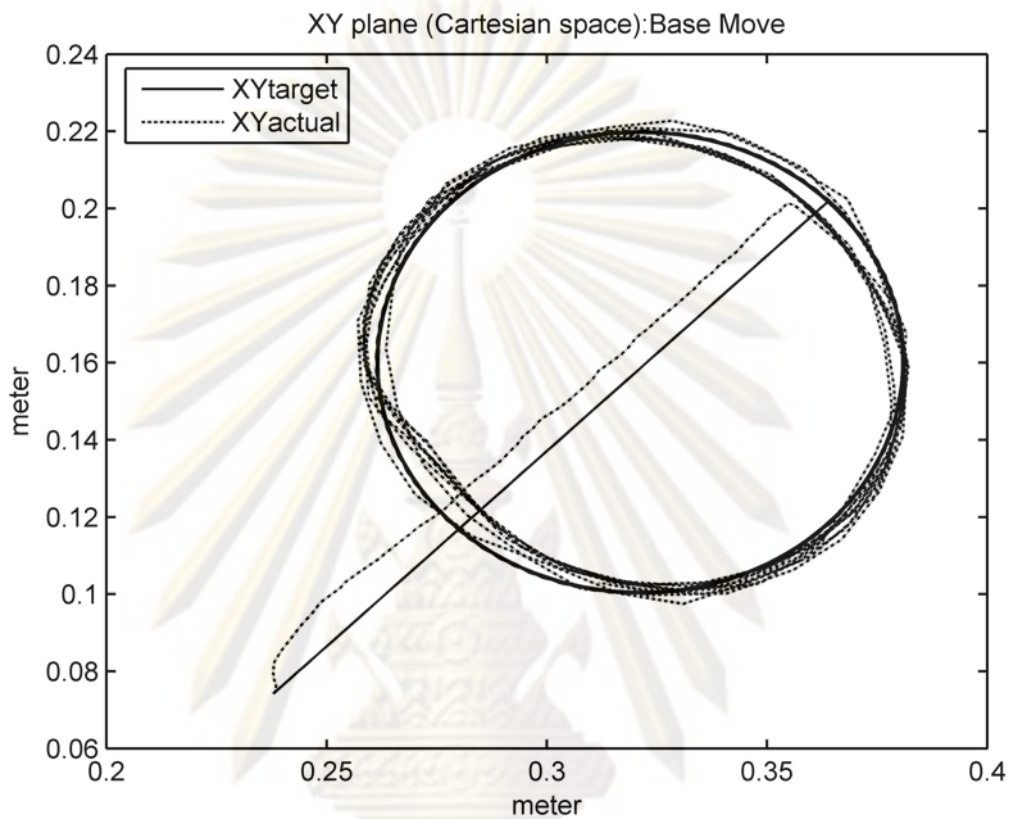
รูปที่ 4.33: แสดงสัญญาณการรบกวนที่ป้อนให้กับฐานของหุ่นยนต์ โดยใช้มือเคลื่อนที่แทนทดสอบเพื่อสร้างสัญญาณการรบกวนให้กับฐานของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.34: แสดงผลการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงการเขียนวงกลมครบ 1 วงในขณะที่ฐานอยู่นิ่ง

จากรูปเส้นทึบคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกลโดยเริ่มต้นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากตำแหน่ง $X=0.2379\text{m}$, $Y=0.07421\text{m}$ ไปสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของวงกลมคือ $X=0.3641\text{m}$, $Y=0.202\text{m}$ แล้วเขียนวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

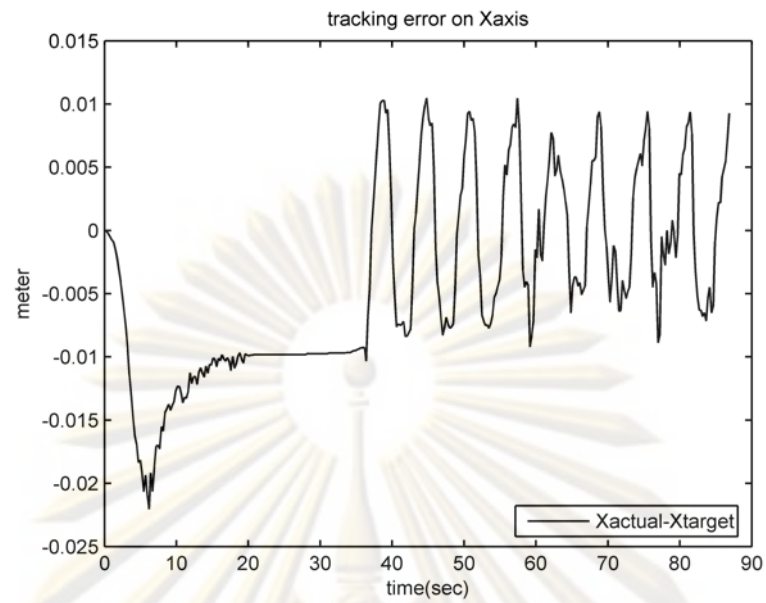
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.35: แสดงผลการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียนตั้งแต่เริ่มต้นจนจบการทดลองเมื่อแขนกลทำการเขียนวงกลมครบ 1 วงจึงเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์

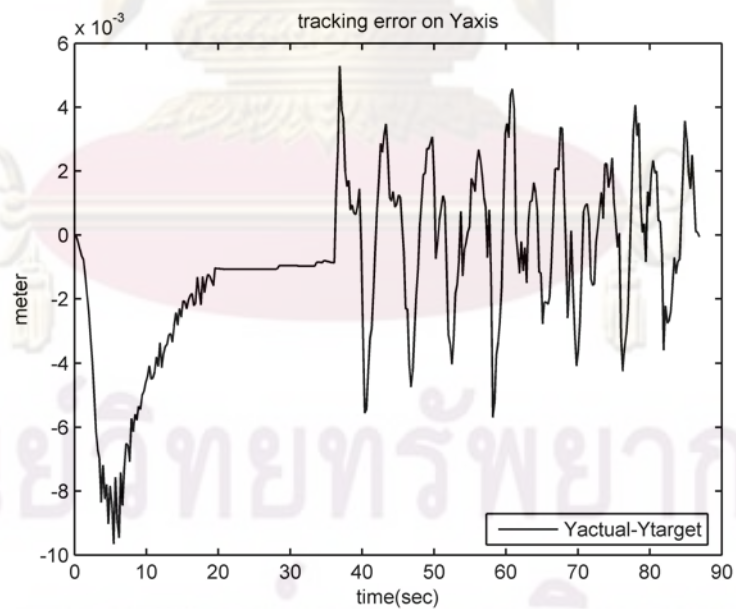
จากรูปเส้นทึบคือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกลโดยเริ่มต้นเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์เมื่อแขนกลเขียนวงกลมครบ 1 วงจะเห็นว่าเมื่อทำการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ ปลายของแขนกลจะเคลื่อนที่รอบตำแหน่งเป้าหมาย(วงกลม) ซึ่งค่าความผิดพลาดที่แสดงนั้นเกิดจากการปรับตำแหน่งฐานกับแท่นทดสอบและการปรับค่าอัตราขยาย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



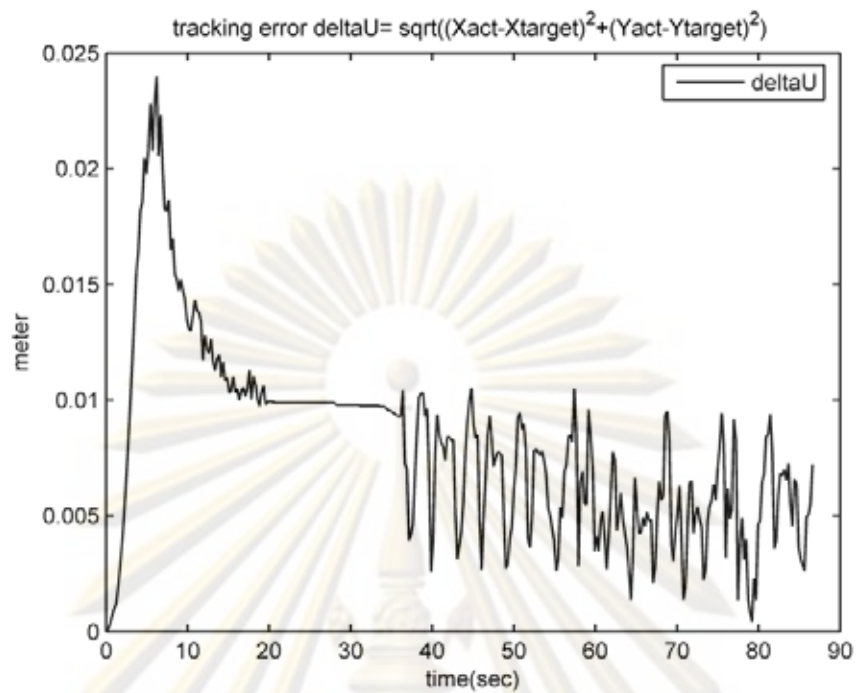
รูปที่ 4.36: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน X ของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $22.04 \times 10^{-3} m$ และในช่วงที่เคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $10.46 \times 10^{-3} m$



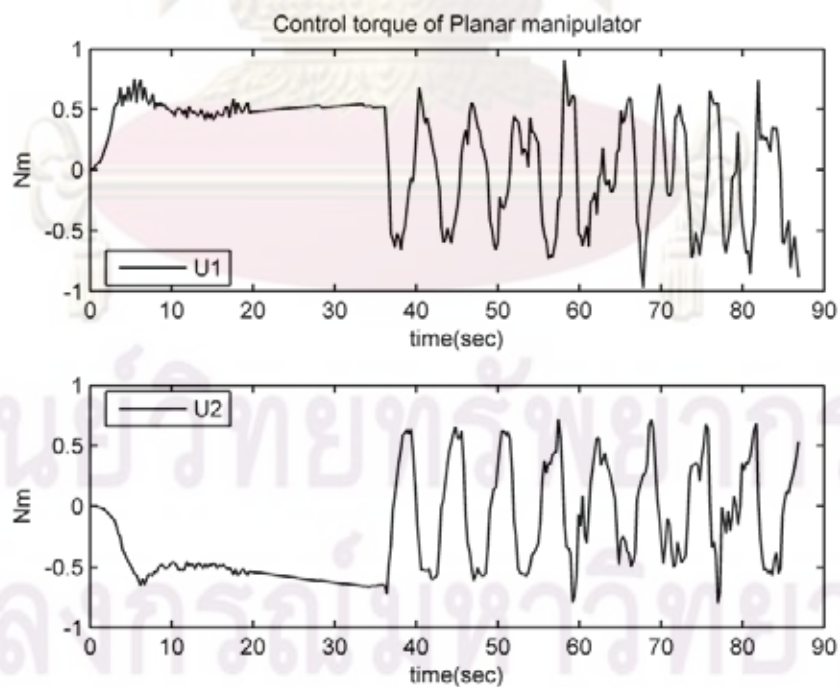
รูปที่ 4.37: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในแนวแกน Y

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $9.649 \times 10^{-3} m$ และในช่วงที่เคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $5.29 \times 10^{-3} m$

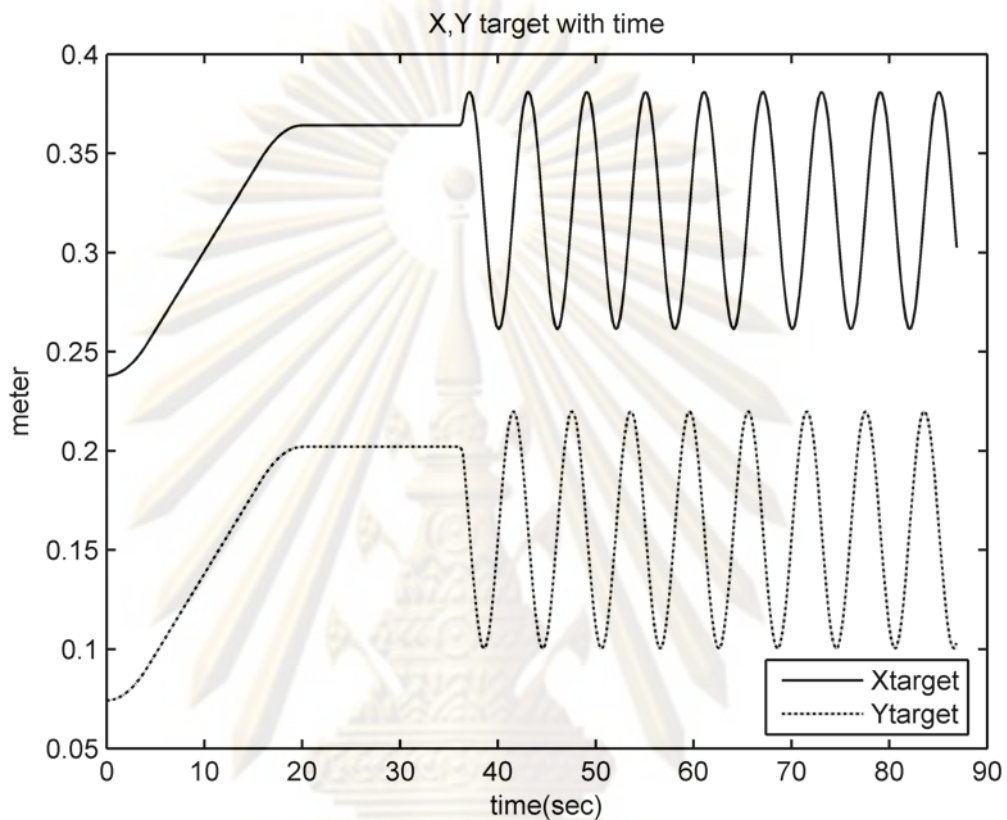


รูปที่ 4.38: แสดงค่าความผิดพลาดของค่าจริงกับเป้าหมายในระยะขจัด

จากรูปค่าความผิดพลาดสูงสุดตลอดการทดลองคือ $23.98 \times 10^{-3} \text{ m}$ และในช่วงที่เคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์คือ $10.49 \times 10^{-3} \text{ m}$

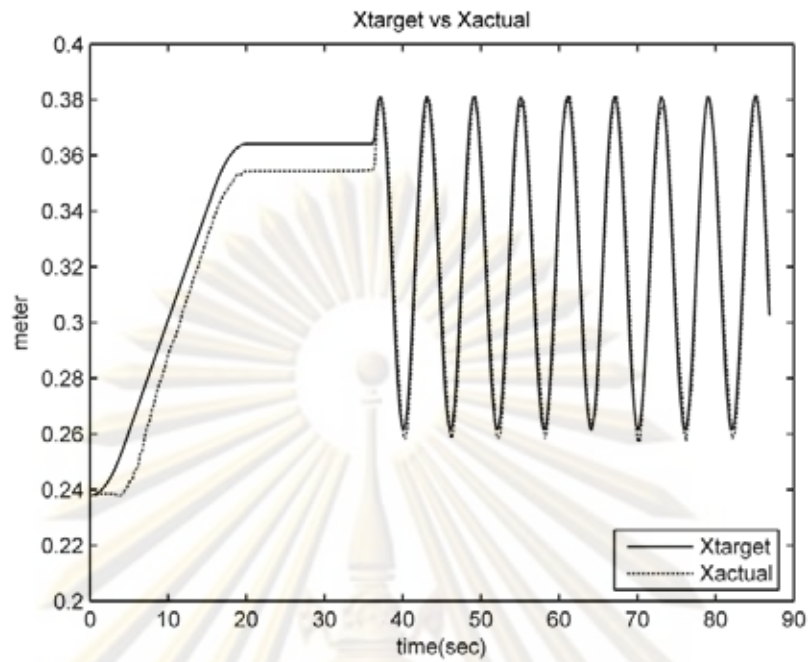


รูปที่ 4.39: แสดงสัญญาณควบคุมของก้านโยงที่ 1 และ 2 ของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย

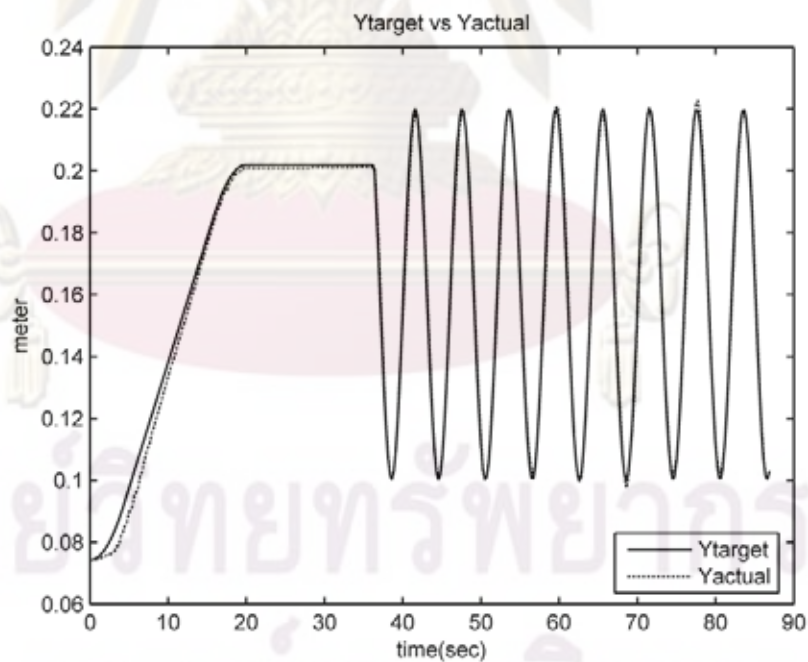


รูปที่ 4.40: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมในพิกัดคาร์ทีเซียนของการทดสอบด้วยการติดตามตำแหน่งเป้าหมาย

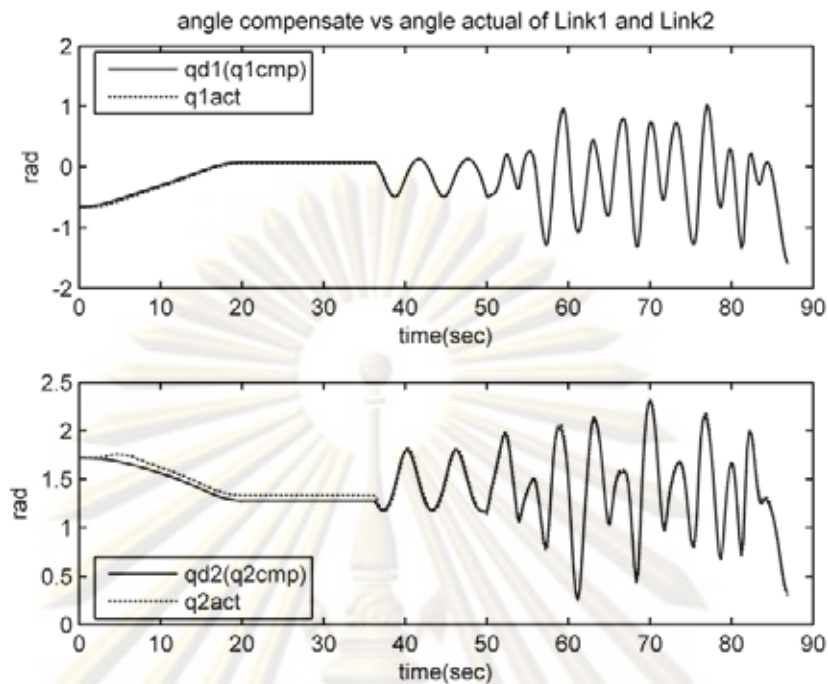
จากรูปเมื่อเขียนในพิกัดคาร์ทีเซียนจะได้เส้นตรงจากตำแหน่ง $X=0.2379\text{m}$, $Y=0.07421\text{m}$ ไปสู่ตำแหน่งเริ่มต้นของวงกลมคือ $X=0.3641\text{m}$, $Y=0.202\text{m}$ และวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร โดยช่วงเวลา 20 วินาทีแรกแกนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นเป็นเส้นตรงไปสู่จุดเริ่มต้นของวงกลมและเมื่อถึงวินาทีที่ 37 จึงเริ่มต้นเขียนวงกลม



รูปที่ 4.41: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน X เส้นที่ป
คือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล



รูปที่ 4.42: แสดงตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเทียบกับตำแหน่งจริงในแนวแกน Y เส้นที่ป
คือตำแหน่งเป้าหมายและเส้นประคือตำแหน่งของปลายแขนกล



รูปที่ 4.43: แสดงมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานเทียบกับค่าจริงของแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2

จากรูป $q1Cmp$, $q2Cmp$ คือตำแหน่งมุมชดเชยการเคลื่อนที่จากฐานหุ่นยนต์ของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2 และ $q1act$, $q2act$ คือตำแหน่งของแขนกลก้านโยงที่ 1, 2

4.5 สรุป

ในบทนี้นำเสนอผลการจำลองระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบกับชุดทดลองจริง เมื่อเทียบผลพบว่าแตกต่างกันเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการจำลองระบบบนเครื่องคอมพิวเตอร์กับการทดสอบจริงนั้นมีความแตกต่างกันเช่น แรงเสียดทาน, มวลของก้านโยง ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้มีผลต่อการจำลองและทดสอบจึงเป็นผลให้ผลของการจำลองกับการทดสอบจริงมีความแตกต่างกัน

ในการทดสอบจริงการปรับแต่งค่าอัตราขยายมีผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยถ้าหากปรับแต่งค่าอัตราขยายให้แขนกลสามารถติดตามสัญญาณเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพสูงก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนจากฐานที่ต่ำ ทำให้ผู้ใช้งานจริงต้องเลือกระหว่างประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณเป้าหมายหรือการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนจากฐาน

ในการทดสอบจริงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกประการหนึ่งก็คือการปรับแต่งตำแหน่งการวางฐานหุ่นยนต์กับแท่นทดสอบซึ่งส่งผลโดยตรงกับค่าความผิดพลาดของการทดสอบจริง โดยค่าการปรับแต่งตำแหน่งได้จากการวัดจริงดังนั้นถ้าหากได้ค่าการปรับแต่งตำแหน่งที่มีความแม่นยำก็จะทำให้ลดค่าความผิดพลาดในส่วนนี้ลงได้

จากผลการทดสอบจริงค่าความผิดพลาดของการทดสอบด้วยตำแหน่งเป้าหมายคงที่มีค่า 5.3 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับการทดสอบด้วยการเขียนวงกลมซึ่งมีค่า 10.49 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแขนกลเมื่อฐานไม่อยู่หนึ่งด้วยตัวควบคุมปรับตัวแบบเฉื่อยงานทำการควบคุมแบบตำแหน่งเป้าหมายคงที่ได้เหมาะสมกว่า



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการควบคุมหุ่นยนต์เมื่อฐานไม่อยู่นิ่งด้วยตัวควบคุมปรับตัวแบบเฉื่อยงาน ด้วยหุ่นยนต์แบบ 2 ก้านโยงและฐานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในระนาบคาร์ทีเซียน มีจำนวนแกนการเคลื่อนที่ของระบบทั้งหมด 5 แกน แกนการเคลื่อนที่ของฐานจำนวน 3 แกนและแกนการเคลื่อนที่ของแขนกลจำนวน 2 แกน ซึ่งการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์จะส่งผลต่อการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลดังนั้นจึงต้องชดเชยการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ โดยนำเสนอวิธีการชดเชยการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ผกผันและวิธี นิวตัน-ราฟสัน ทำการแก้สมการหาตำแหน่ง, ความเร็วและความเร่งของแขนกลแต่ละก้านโยง จากตำแหน่ง, ความเร็วและความเร่งของเป้าหมายในพิกัดคาร์ทีเซียนและการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ ดังนั้นการชดเชยการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จึงต้องทราบค่าตำแหน่ง, ความเร็วและความเร่งจากการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ด้วย

ในการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบได้รวมแบบจำลองตัวขับเคลื่อนและแรงเสียดทานเข้าไปในระบบด้วย โดยแบบจำลองตัวขับเคลื่อนได้ใช้แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร และจำลองแรงเสียดทานความหนืด, แรงเสียดทานสถิตเข้าไปด้วยเพื่อให้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบมีความใกล้เคียงกับชุดทดลองจริง ซึ่งความแตกต่างระหว่างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบกับชุดทดลองจริงนั้นมีผลกับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองจริง โดยในการสร้างชุดทดลองจริงนั้นไม่สามารถสร้างได้ตามคุณสมบัติทางอุดมคติเช่น แกนของตัวขับเคลื่อนแขนกลก้านโยงที่ 1 และ 2 ต้องตรงกัน (ชุดทดลองจริงแกนของตัวขับเคลื่อนทั้ง 2 ไม่ตรงกันอย่างมากทำให้เกิดแรงเสียดทานอย่างมากและไม่สม่ำเสมอในช่วงของการเคลื่อนที่ของแขนกลแต่ละก้านโยง), ความยาวของแต่ละก้านโยง, แขนกลแต่ละก้านโยงคดงไม่ตรง จากสิ่งเหล่านี้จึงทำให้แบบจำลองทางพลศาสตร์กับชุดทดลองจริงมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งและความผิดพลาดในการทดลองจริงมีมาก

ประสิทธิภาพในการทดสอบจริงต้องเลือกระหว่างประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งเป้าหมายกับช่วงความถี่ของสัญญาณการควบคุมการเคลื่อนที่จากฐานหุ่นยนต์ เนื่องจากในการปรับแต่งค่าอัตราขยายของหุ่นยนต์ถ้าหากปรับแต่งค่าอัตราขยายให้สามารถติดตามตำแหน่งเป้าหมายได้ดีจะทำให้ช่วงความถี่ของสัญญาณการควบคุมการเคลื่อนที่จากฐานหุ่นยนต์มีค่าน้อย

โดยหุ่นยนต์จะมีการสั้นอย่างมากถ้าหากกระบวนการเคลื่อนที่ฐานของหุ่นยนต์ด้วยช่วงความถี่ที่สูงกว่าที่รับได้ และถ้าหากปรับแต่งอัตราขยายของหุ่นยนต์ให้สามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่การเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ให้มีค่าสูงแล้วจะทำให้ประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งเป้าหมายของแขนกลต่ำและมีค่าความผิดพลาดมาก โดยผลของการทดลองที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกให้ระบบสามารถตอบสนองต่อช่วงความถี่การเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ให้มีค่าสูงเนื่องจากระบบยังมีประสิทธิภาพในการควบคุมเมื่อเลือกใช้งานแบบตำแหน่งเป้าหมายคงที่และเพื่อถนอมการใช้งานของหุ่นยนต์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งเป้าหมายต่ำและมีค่าความผิดพลาดมากเมื่อเลือกการใช้งานแบบติดตามตำแหน่งเป้าหมาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานของวิทยานิพนธ์สามารถให้ข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. ช่วงการเคลื่อนที่ของฐานที่ทำการทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่แพร่กระจายทั่วทั้งระนาบคาร์ทีเซียนเนื่องจากแท่นทดสอบของฐานเป็นแบบ 1 แกนการเคลื่อนที่ ดังนั้นหากต้องการทดสอบการเคลื่อนที่ของฐานให้ทั่วทั้งระนาบสามารถทดสอบโดยให้แกนการเคลื่อนที่ของแท่นทดสอบเป็นการเคลื่อนที่แบบ X และ Y อาทิเช่นเครื่องพล็อตเตอร์ (plotter) หรือเครื่อง X-Y Table
2. ในการทดลอง ทำการตรวจวัดสัญญาณการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์จาก Encoder ของแท่นทดสอบ โดยในการใช้งานจริงเช่นเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสัญญาณการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์คือเซนเซอร์จำพวก Inertial Measurement Unit (IMU) อาทิเช่น Gyroscope, Accelerometer, Digital compass
3. สัญญาณตำแหน่งเป้าหมายที่สร้างให้กับการทดลองนี้มีความเร็วไม่ต่อเนื่องจึงทำให้ช่วงเปลี่ยนเส้นทางระหว่างเส้นตรงกับวงกลมมีการกระตุก ทำให้มีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นในการทดลอง โดยสามารถลดค่าความผิดพลาดจากสาเหตุนี้ได้โดยสร้างสัญญาณการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเป้าหมายให้มีความต่อเนื่องเช่น การสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นแบบ s-curve
4. การปรับแต่งตำแหน่งการวางฐานหุ่นยนต์กับแท่นทดสอบมีผลต่อค่าความผิดพลาดของการทดลอง ดังนั้นการปรับแต่งตำแหน่งการวางที่มีความแม่นยำก็จะลดค่าความผิดพลาดในส่วนนี้ลงได้

รายการอ้างอิง

- [1] Li, B. and D. Hullender. Self-Tuning Controller for Nonlinear Inertial Stabilization Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 6,3 (May 1998): 428-439.
- [2] Kennedy, P. J. and R. L. Kennedy. Direct versus Indirect line of sight (LOS) stabilization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 11,1(January 2003): 3-15.
- [3] Guelman, M., A. KOGAN, A. Kazarian, A. Livne, M. Orenstein, H. Michalik, S. Arnon. Acquisition and pointing control for inter-satellite laser communications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 40,4 (October 2004): 1239-1249.
- [4] Kazemy, A., S. A. Hosseini and M. d Farrokhi. Target-based line-of-sight stabilization in periscopes. *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation* (July 2007): 1-5.
- [5] Setoodeh, E., A. Khayatian and E. Farjah. Backstepping-based control of a strapdown boatboard camera stabilizer. *International Journal of Control Automation and Systems* 5,1 (February 2007): 15-23.
- [6] Tsai, L.-W. *Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*. New York: Wiley, 1999.
- [7] Spong, M. W. and M. Vidyasagar. *Robot Dynamics and Control*. (n.p.): John Wiley & Sons, 1989.
- [8] Spong, M. W., S. Hutchinson and M. Vidyasagar. *Robot Dynamics and Control*. (n.p.): John Wiley & Sons, 2006.
- [9] Kincaid, D. and W. Cheney. *Numerical Analysis: Mathematics of Scientific Computing*. (n.p.): Thomson-Brooks-Cole, 2002.
- [10] Fongjun, T., M. Wongsaisuwan and S. Phoojaruenchanachai. Stabilization of two - link planar manipulator platform with parallel base motion disturbance using passivity - based adaptive control. *Proceedings of the 2009 ECTI Conference on Robotics and Automation* (in press).

- [11] Slotine, J.-J. E. and Weiping LI. *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall International, 1991.
- [12] Slotine, J.-J. E. and Weiping LI. Adaptive manipulator control: A case study. *IEEE Transaction on Automatic Control* 33,11 (November 1988): 95-1003.
- [13] อีรพงศ์ ฟองจันทร์ และ มานพ วงศ์สายสุวรรณ. การควบคุมเสถียรภาพของแท่นยกพื้นสำหรับแขนกลระนาบสองมิติสองก้านโยง ภายใต้การรบกวนการเคลื่อนที่จากฐานแบบขนาน ด้วยวิธีปรับตัวแบบเฉื่อยงาน. *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON 31)* (ตุลาคม 2551): 811-814.
- [14] Fongjun, T., M. Wongsaisuwan and S. Phoojaruenchanachai. Stabilization of two - link planar manipulator platform with parallel base motion disturbance using passivity - based adaptive control. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (February 2009): 1463-1468.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรพงศ์ ฟองจันทร์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2545 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษา 2549 ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย สำนักงานพัฒนา วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (TGST) ตลอดจนได้รับการสนับสนุนให้มีโอกาสได้ศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโทจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

ผลงานที่ได้ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเป็นดังนี้

1. ธีรพงศ์ ฟองจันทร์ และ มานพ วงศ์สายสุวรรณ. “การควบคุมเสถียรภาพของ แท่นยกพื้นสำหรับแขนกลระนาบสองมิติสองก้านโยง ภายใต้การรบกวนการเคลื่อนที่ จากฐานแบบขนาน ด้วยวิธีปรับตัวแบบเฉื่อยงาน”. *CD-ROM รวบรวมบทความ วิชาการที่ได้นำเสนอต่อที่ประชุมสัมมนา (Proceedings) ของการประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31 (EECON 31)* จัดโดย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ณ รอยแผล ฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา จ.นครนายก ระหว่างวันที่ 29-31 ตุลาคม 2551 หน้า 811-814
2. Fongjun, T., M. Wongsaisuwan and S. Phoojaruenchanachai. “Stabilization of two - link planar manipulator platform with parallel base motion disturbance using passivity - based adaptive control”. in *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2008)*, at Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand. On 23 February 2009, p.1463-1468.
3. Fongjun, T., M. Wongsaisuwan and S. Phoojaruenchanachai. “Stabilization of two - link planar manipulator platform with parallel base motion disturbance using passivity - based adaptive control”. in *Proceedings of the 2009 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI-Con 2009) on Robotics and Automation*, at Ambassador City Jomtien Pattaya, Thailand. During 6-9 May 2009.