

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยใช้ตัวสังเกตอัตราส่วนรวดเร็วสำหรับแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว
ที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่



นายสุทธิพงษ์ วชิรพงศ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

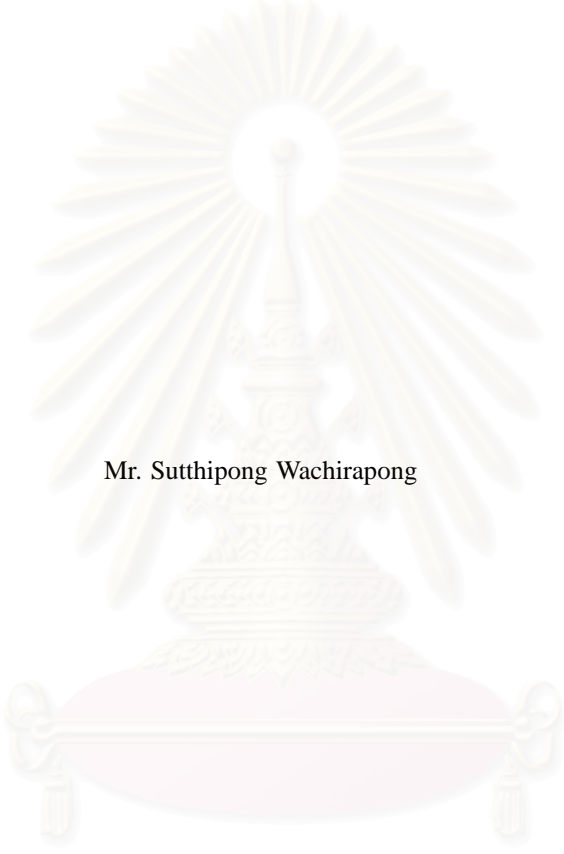
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3572-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VARIABLE STRUCTURE CONTROL USING OBSERVER WITH FAST SAMPLING RATE OF
A ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM WITH MISMATCHED UNCERTAINTIES



Mr. Sutthipong Wachirapong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3572-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมโครงสร้างแปรรูปไม้โดยใช้ตัวสังเกตอัตราสุ่มรวดเร็วสำหรับแขนกล
อัตโนมัติแบบข้อต่อเดียวที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่

โดย นายสุทธิพงษ์ วชิรพงศ์

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุทธิพงษ์ วชิรพงศ์: การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยใช้ตัวสังเกตอัตราสุ่มรวดเร็วสำหรับแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่ (VARIABLE STRUCTURE CONTROL USING OBSERVER WITH FAST SAMPLING RATE OF A ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM WITH MISMATCHED UNCERTAINTIES), อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.มานพ วงศ์สายสุวรรณ, 70 หน้า, ISBN 974-17-3572-2

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องสำหรับแขนกลแบบอ่อนตัวข้อต่อเดียว โดยความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้นกับระบบแขนกลนั้นไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่ ทำให้ไม่สามารถแก้ผลจากความไม่แน่นอนนี้ด้วยการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ในแบบทั่วไป ดังนั้นจึงพิจารณาหาขอบเขตเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากความไม่แน่นอน ในการทดลองได้พิจารณาแปรอัตราการส่งสัญญาณควบคุม และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออกที่แตกต่างกันออกไป เพื่อหลีกเลี่ยงการส่งสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ ผลการทดลองจริงแสดงให้เห็นแนวทางในการเลือกความถี่ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมระบบแขนกล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา
สาขาวิชา
ปีการศึกษา

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

##4470504021: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: DISCRETE-TIME VARIABLE STRUCTURE CONTROL / SLIDING MODE / CHATTERING / MATCHING CONDITION / MISMATCHED UNCERTAINTY

SUTTHIPONG WACHIRAPONG: VARIABLE STRUCTURE CONTROL USING OBSERVER WITH FAST SAMPLING RATE OF A ONE-LINK FLEXIBLE ROBOT ARM WITH MISMATCHED UNCERTAINTIES, THESIS ADVISOR: MANOP WONGSAISUWAN, D.Eng., 70 pp., ISBN 974-17-3572-2

This thesis presents discrete-time variable structure control of a one-link flexible robot arm. The parametric uncertainties considered herein do not satisfy the matching condition, and as a consequence, cannot be handled by general variable structure control techniques. Therefore the region of stability must be considered. In the simulation, we vary control and sampling rates in order to avoid high-frequency control signal. Experimental results lead to appropriate control frequency for the robot arm.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department

Field of study

Academic year

Student's signature

Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มานพ วงศ์สายสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และจุดประกายความคิดต่างๆ ทั้งในการทำวิทยานิพนธ์และการใช้งานคอมพิวเตอร์ ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้และสนใจในงานคอมพิวเตอร์มากยิ่งขึ้น จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ เชาว์วิศิษฐุ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เดวิด บรรณเจตพงศ์ชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้สละเวลาตรวจสอบและให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น อีกทั้งได้ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจขณะที่ข้าพเจ้าเข้ามาศึกษาใหม่ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถปรับตัวเข้ากับการเรียนได้ดียิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. สุชิน อรุณสวัสดิ์วงศ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำข้าพเจ้าเสมอมา ทั้งในเรื่องการเรียนและการใช้ชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในสาขาระบบควบคุมที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ และน้อง ที่ได้สนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียน คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจข้าพเจ้าเสมอมา

ขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องในห้องปฏิบัติการวิจัยควบคุมทุกคน ที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาตลอดจนให้กำลังใจ จนกระทั่งข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วง

ขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทรัพยากรและสิ่งอำนวยความสะดวกในการศึกษาและค้นคว้าวิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ช
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ช
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ช
คำอธิบายคำย่อ.....	ช
1 บทนำ.....	1
1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	1
1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....	4
2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว.....	5
2.1 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ.....	5
2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	6
2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง.....	8
3 ความไม่แน่นอนของระบบและเงื่อนไขการเข้าคู่.....	9
3.1 เงื่อนไขการเข้าคู่.....	9
3.2 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว.....	11
4 การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้.....	14
4.1 การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	15
4.1.1 การออกแบบพื้นผิวสลับ.....	15
4.1.2 การออกแบบกฎการควบคุม.....	16
4.2 การออกแบบตัวสังเกตสถานะ.....	19
5 การพิสูจน์ขอบเขตเสถียรภาพเนื่องจากความไม่แน่นอน.....	21
5.1 บทพิสูจน์ขอบเขตเสถียรภาพ.....	21

6	ประยุกต์ใช้การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้กับระบบแกนกล่อ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว.....	25
6.1	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับแกนหุ่นยนต์ ตอนที่ 1	27
6.2	ผลการจำลองควบคุมระบบแกนหุ่นยนต์ ตอนที่ 1	30
6.3	การออกแบบตัวควบคุมสำหรับแกนหุ่นยนต์ ตอนที่ 2	38
6.4	ผลการจำลองควบคุมระบบแกนหุ่นยนต์ ตอนที่ 2	41
6.5	ผลการทดลองควบคุมระบบแกนหุ่นยนต์	50
6.6	กรณีพิเศษ ศึกษาผลจากสัญญาณควบคุมความถี่สูง	60
7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	67
7.1	บทสรุป	67
7.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้	67
	รายการอ้างอิง	68
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

6.1	ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบปกติ)	27
6.2	ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบมีความไม่แน่นอน)	34
6.3	สรุปผลการควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 1	38
6.4	ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบปกติ)	38
6.5	ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบมีความไม่แน่นอน)	45
6.6	สรุปผลการจำลองควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 2	49
6.7	ตารางการทดลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์	50
6.8	สรุปผลการทดลองควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 2	59
6.9	การจำลองระบบที่ความถี่ในการควบคุมต่างๆ	61
6.10	แสดงความผิดพลาดของสัญญาณขาออกที่สภาวะอยู่ตัว	66

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

2.1	แขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว	5
2.2	พิกัดทั้งหมดที่เป็นสถานะของแบบจำลอง	6
3.1	แขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว (มุมสูง)	12
4.1	กราฟโบทเดเปรียบเทียบแบบจำลองระบบที่ประมาณแขนกลเป็น 1 และ 3 ท่อน	14
4.2	พื้นผิวสลับ $s[k]$	16
4.3	ทางเดินสถานะของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง	17
5.1	ทางเดินสถานะของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง	24
6.1	แผนผังการควบคุมระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว	25
6.2	แผนผังการส่งสัญญาณควบคุมและการสุ่มสัญญาณขาออก	26
6.3	สัญญาณควบคุมของระบบเวลาต่อเนื่อง (ซ้าย) และระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (ขวา)	26
6.4	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	31
6.5	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	31
6.6	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	31
6.7	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	32
6.8	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	32
6.9	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	32
6.10	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	33
6.11	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	33
6.12	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	33
6.13	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	35
6.14	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	35
6.15	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	35
6.16	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	36
6.17	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	36
6.18	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	36
6.19	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	37
6.20	สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	37
6.21	ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg	37
6.22	มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg	42

6.57 กราฟโบทเปรียบเทียบแบบจำลองระบบที่ประมาณแขนกลเป็น 1 และ 3 ท่อน	61
6.58 สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4	62
6.59 มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4	62
6.60 สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8	63
6.61 มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8	63
6.62 สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4	64
6.63 มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4	64
6.64 สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8	65
6.65 มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8	65



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายคำย่อ

VSC	Variable Structure Control
ZOH	Zero Order Hold



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้อาศัยการสับเปลี่ยนโครงสร้างของตัวควบคุมอย่างรวดเร็ว ระหว่างกฎการควบคุมมากกว่าหนึ่งแบบ เพื่อทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพ ข้อดีของการควบคุมชนิดนี้คือ ระบบควบคุมจะลู่เข้าสู่ค่าเป้าหมายได้รวดเร็ว และสามารถจัดผลของความไม่แน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ให้หมดไปได้ กฎการควบคุมจะถูกออกแบบเพื่อกำหนดให้สัญญาณควบคุมขับสถานะของระบบเข้าสู่พื้นผิวสลับ และเคลื่อนที่ลื่นไหลไปบนพื้นผิวสลับนั้น ในบางครั้งเรียกการควบคุมชนิดนี้ว่าการควบคุมลื่นไหล (sliding mode control) ในขณะที่สถานะของระบบกำลังเคลื่อนที่ลื่นไหลบนพื้นผิวสลับ (switching surface) กฎการควบคุมจะสับเปลี่ยนโครงสร้างไปมาอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ (chattering) โดยสัญญาณควบคุมนี้อาจไปกระตุ้นระบบอันดับสูงที่ไม่ได้นำมาออกแบบหรือถูกประมาณไว้ ทำให้ผลการควบคุมไม่เป็นไปตามต้องการ แต่ถ้าใช้การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องมาควบคุมระบบ สัญญาณควบคุมนี้จะถูกคงค่าไว้ในช่วงคาบการควบคุม เมื่อเรากำหนดความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมให้ต่ำลง สัญญาณควบคุมความถี่สูงที่เข้าสู่ระบบก็จะมีค่าต่ำลงได้

ปัจจุบันแขนงหุ่นยนต์แบบอ่อนตัว ได้รับความสนใจนำมาใช้แทนแขนงหุ่นยนต์แบบแข็งเกร็งมากขึ้น เนื่องจากมีน้ำหนักเบา เคลื่อนที่เร็ว และใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อย แต่เมื่อเปลี่ยนมวลภาระหรือระยะของมวลภาระ พบว่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นนี้เป็นแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ ทำให้ไม่สามารถจัดความไม่แน่นอนดังกล่าวโดยการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบทั่วๆไปได้ ดังนั้นจึงพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพของระบบที่เกิดจากความไม่แน่นอนด้วย สัญญาณควบคุมของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้จะใช้การป้อนกลับสถานะทั้งหมดของระบบ ซึ่งไม่สามารถวัดได้ทั้งหมดจากระบบแขนงแบบอ่อนตัว ในการออกแบบจึงใช้ตัวสังเกตสถานะเพื่อสร้างสถานะให้กับตัวควบคุม ถ้าความถี่ในการวัดค่าสัญญาณให้ตัวสังเกตสถานะมีค่ามาก จะทำให้ตัวสังเกตสร้างสถานะของระบบได้ถูกต้องมากขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจะกำหนดให้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณของตัวสังเกตมากกว่าความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม

1.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ริเริ่มโดยนักวิจัยชาวสหภาพโซเวียตในยุค 1950 และได้พัฒนาวิธีการออกแบบเรื่อยมา ทั้งสำหรับระบบเชิงเส้น ระบบไม่เชิงเส้น ระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต และระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น ข้อดีที่เด่นชัดของการควบคุมชนิดนี้คือให้ผลตอบที่รวดเร็ว และสามารถจัดความไม่แน่นอนเชิงพารามิเตอร์ (หรือความไม่แน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่) ออกได้อย่างสมบูรณ์ [1, 2] ในขณะที่สถานะของระบบกำลังลื่นไหลบนพื้นผิวสลับ ตัวควบคุมจะสับเปลี่ยนโครงสร้างรวดเร็ว ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมความถี่สูงเข้าสู่ระบบ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีแก้ไขโดย การประมาณ

ฟังก์ชันสลับให้ต่อเนื่อง [3, 4] โดยจะใช้ฟังก์ชันอิ่มตัว (saturation function) เข้ามาแทนการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น (step function) วิธีนี้จะสามารถช่วยแก้ปัญหาสัญญาณควบคุมความถี่สูงได้ แต่จะไม่ทำให้เกิดการลื่นไหลบนพื้นผิวสลับ เพราะถ้าใช้ฟังก์ชันสลับที่มีความต่อเนื่องจะเกิดขอบเขตการลื่นไหลรอบพื้นผิวสลับ (boundary layer) ขึ้นแทน เมื่อนำการควบคุมไปประยุกต์ใช้จริง ผลการควบคุมอาจมีการแกว่งอยู่ในขอบเขตการลื่นไหลด้วยความถี่ต่ำเนื่องจากพลวัตที่ไม่ได้ออกแบบหรือถูกประมาณไว้ ต่อมา Richter และ Misawa [13] ได้พิสูจน์ว่าภายในขอบเขตการลื่นไหลมีเสถียรภาพ และได้เสนอให้ใช้ตัวกรองสัญญาณอ้างอิง (X_d Generator) เพื่อลดการกระชากสัญญาณควบคุมในช่วงผลตอบสนองชั่วคราว

วิธีการแก้ปัญหาสัญญาณควบคุมความถี่สูงอีกวิธีหนึ่งคือ การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยอาศัยกฎการเข้าถึง เสนอโดย Gao และ Hung [5] กฎการเข้าถึงนี้จะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดลักษณะการลื่นไหลเข้าสู่พื้นผิวสลับได้ง่าย และรับประกันการทำให้สถานะของระบบเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับได้ในเวลาจำกัด ในตอนท้ายได้มีการจำลองออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบแขนหุ่นแบบแข็งแกร็งสองข้อต่อ ซึ่งเป็นระบบไม่เชิงเส้น จากผลการทดลองพบว่าข้อกำหนดลักษณะการลื่นไหลเข้าสู่พื้นผิวสลับจะส่งผลต่อขนาดของสัญญาณควบคุมความถี่สูง ดังนั้นในการออกแบบจะสามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณควบคุมความถี่สูงได้จากการกำหนดพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงอีกด้วย

Gao และคณะ ได้พัฒนากฎการเข้าถึงเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง [6] สำหรับการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง สัญญาณควบคุมจะถูกคงค่าไว้ตลอดคาบการควบคุม ทำให้ไม่สามารถขับสถานะของระบบให้เคลื่อนที่ลื่นไหลอยู่บนพื้นผิวสลับได้ตลอดเวลา Gao จึงได้กำหนดลักษณะการลื่นไหลบนพื้นผิวสลับของระบบเวลาไม่ต่อเนื่องขึ้น เรียกว่าการลื่นไหลแบบควาซี (quasi sliding mode) โดยในทุกๆคาบการควบคุมสถานะของระบบจะเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับไปมาในขอบเขตจำกัด แล้วเคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุล ข้อดีของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องคือ สามารถหลีกเลี่ยงการมีสัญญาณควบคุมความถี่สูงเข้าสู่ระบบได้หากผู้ออกแบบกำหนดอัตราการส่งสัญญาณควบคุมไม่สูงจนเกินไป

Hagiwara และ Araki ได้เสนอการประมาณสถานะของระบบโดยการสุ่มสัญญาณขาออกอย่างรวดเร็ว [7] โดยในคาบการควบคุมหนึ่งรอบ จะมีการสุ่มสัญญาณขาออกหลายๆครั้ง เพื่อนำมาคำนวณหาสถานะของระบบ ต่อมา Saaj และคณะ [9] ได้นำการประมาณสถานะชนิดนี้มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง การประมาณสถานะโดยวิธีนี้ จะไม่มีพลวัตในการประมาณสถานะ (ใช้ส่วนกลับเมตริกซ์คูณเพียงครั้งเดียว) ช่วยให้เกิดความซับซ้อนโดยรวมของตัวควบคุม ในการจำลอง ระบบสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่จุดสมดุลได้รวดเร็ว และสามารถจัดผลจากความไม่แน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ให้หมดไปได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าระบบที่ทำการออกแบบมีจำนวนสถานะมาก การประมาณสถานะโดยวิธีนี้จำเป็นต้องใช้ความถี่ในการสุ่มสัญญาณค่อนข้างมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม) และการประมาณสถานะโดยวิธีนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจริง เพราะตัวประมาณสถานะโดยวิธีนี้จะไม่สามารถกรองสัญญาณรบกวนแบบสุ่มจากเครื่องมือวัดออกได้ ทำให้การประมาณสถานะผิดพลาดและอาจส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

ต่อมา Furuta และ Pan [10, 11] ได้เสนอให้ใช้เซกเตอร์ลื่นไหล แทนพื้นผิวสลับ ใน

การออกแบบสำหรับระบบเวลาต่อเนื่อง จะสามารถแบ่งปริภูมิสถานะออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เสถียร (นอร์มของสถานะสามารถลดลงได้โดยไม่ต้องมีสัญญาณควบคุม) และส่วนที่ไม่เสถียร (ต้องมีสัญญาณควบคุม จึงจะทำให้ให้นอร์มของสถานะลดลงได้) เมื่อสถานะของระบบอยู่ในส่วนที่เสถียร ขนาดนอร์มของสถานะจะมีค่าลดลงได้โดยไม่ต้องมีสัญญาณควบคุมระบบ และเมื่อใดก็ตามที่สถานะเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนที่ไม่เสถียร จะมีสัญญาณควบคุมขับให้สถานะของระบบเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนที่เสถียรอีกครั้ง เพื่อหลีกเลี่ยงผลของสัญญาณควบคุมความถี่สูง Furuta และ Pan ได้กำหนดให้มีเชกเตอร์ส่วนในและเชกเตอร์ส่วนนอกขึ้น โดยกำหนดให้มีสัญญาณควบคุมระบบเมื่อสถานะของระบบเคลื่อนที่พ้นจากเชกเตอร์ส่วนนอกแล้ว และสัญญาณควบคุมนี้จะขับสถานะของระบบจนกระทั่งสถานะเคลื่อนที่เข้าสู่เชกเตอร์ส่วนใน สำหรับการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องโดยเชกเตอร์สั้นไหล ก็จะใช้หลักการเดียวกันกับการออกแบบของระบบเวลาต่อเนื่อง แต่จะไม่มีกำหนดเชกเตอร์ส่วนในและส่วนนอก เพราะจะไม่มีปัญหาจากสัญญาณควบคุมความถี่สูงกับการควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง การจำลองระบบได้นำผลการควบคุมดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับควบคุมแบบเหมาะสมที่สุดกำลังสอง (Linear Quadratic Control) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ชนิดนี้สามารถขับให้สถานะเคลื่อนที่ถึงจุดสมดุลได้รวดเร็วกว่า โดยใช้สัญญาณควบคุมน้อยกว่า

1.2 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ที่ใช้ตัวสังเกตสถานะรวดเร็วสำหรับแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่
2. นำตัวควบคุมที่ทำการออกแบบไปประยุกต์ใช้กับระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว

1.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยใช้กฎการเข้าถึง
2. ศึกษาการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ที่มีความไม่แน่นอนทั้งแบบสอดคล้องและไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่
3. วิเคราะห์ขอบเขตเสถียรภาพเมื่อระบบมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่
4. ศึกษาวิธีการประมาณสถานะแบบสุ่มสัญญาณขาออกอย่างรวดเร็วเปรียบเทียบกับการใช้ตัวสังเกตสถานะ
5. ศึกษาชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว และความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นต่อระบบ
6. ศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมภาษาซี และการทำงานของการ์ดเชื่อมต่อ
7. ทดลองควบคุมชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว โดยการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้
8. สรุปงานวิจัยที่ทำ และข้อดีข้อเสียของตัวควบคุมที่เสนอขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. วิธีออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้สำหรับระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่
2. ตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยใช้การสุ่มสัญญาณขาออกอย่างรวดเร็วสำหรับชุดทดลองแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่

1.5 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แบ่งออกเป็น 7 บท ดังนี้

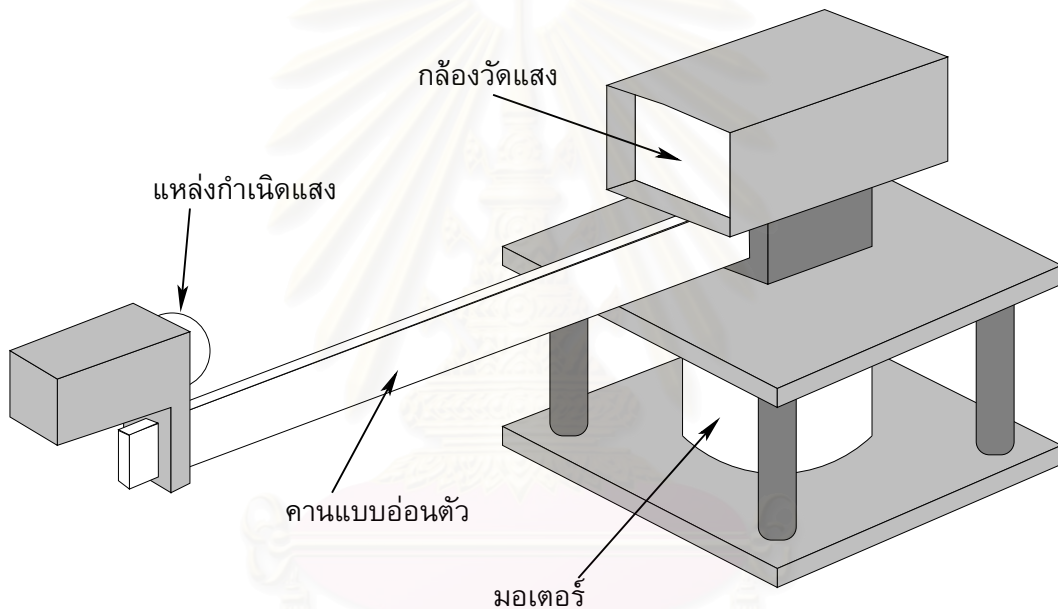
- บทที่ 1** กล่าวถึงบทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ขอบเขตวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
- บทที่ 2** พิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว
- บทที่ 3** กล่าวถึงชนิดของความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ และวิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว
- บทที่ 4** อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้โดยใช้กฎการเข้าถึง และตัวสังเกตสถานะ
- บทที่ 5** แสดงการพิสูจน์เสถียรภาพเมื่อระบบมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่
- บทที่ 6** แสดงวิธีการออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้สำหรับระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว และผลการทดลอง
- บทที่ 7** บทสรุป และข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว

ระบบแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อเดียวประกอบด้วยคานแบบอ่อนตัว โดยปลายด้านหนึ่งปลายจะต่ออยู่กับมอเตอร์และกล่องวัดแสง ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อกับแหล่งกำเนิดแสง สัญญาณขาออกที่วัดได้จากระบบคือ มุมที่แกนมอเตอร์ และระยะเบี่ยงเบนของปลายแขนกล สัญญาณควบคุมระบบคือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ที่แกนหมุน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: แขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว

2.1 ลักษณะคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ

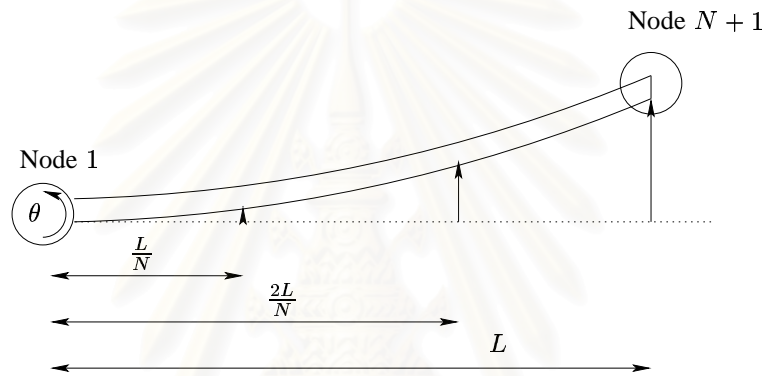
ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของระบบแขนหุ่นยนต์ดังนี้

- คานมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตลอดแนวความยาว
- ค่าความหนาแน่นมวลต่อความยาวและค่าความยืดหยุ่นมีค่าคงที่ตลอดแนวความยาว เนื่องจากทำจากวัสดุชนิดเดียวกัน
- ละเลยผลของแรงเฉือนและความเฉื่อยเชิงการหมุน เนื่องจากถือว่าความกว้างและความหนาของคานมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความยาว
- มวลที่ปลายคานถือว่าเป็นมวลแบบจุด

2.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้บรรยายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งถ้ามองในปริภูมิสถานะแล้วจะเป็นระบบมิตินันต์ ทำให้ยากต่อการออกแบบตัวควบคุม ดังนั้นเราจะประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปของระบบมิติจำกัดก่อน แล้วจึงออกแบบตัวควบคุมกับแบบจำลองนี้ ทั้งนี้การประมาณจะต้องละเอียดเพียงพอด้วย เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดี แบบจำลองที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมในวิทยานิพนธ์นี้ได้มาจาก [15] โดยวิธีขึ้นประกอบอันตะวิธีนี้มีข้อดีคือ ตัวแปรสถานะทุกตัวจะมีความหมายในทางกายภาพ อย่างไรก็ตามข้อเสียคือจะไม่สามารถแสดงองค์ประกอบความถี่ธรรมชาติของแขนกลได้

พิจารณาแขนหุ่นยนต์เป็น N ท่อน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2: พิกัดทั้งหมดที่เป็นสถานะของแบบจำลอง

ให้ θ คือมุมที่หมุนไปของแกนหมุน

J_h คือโมเมนต์ความเฉื่อยของแกนหมุนและมอเตอร์

L คือความยาวของแขนหุ่นยนต์

$$\hat{l} = \left[\frac{L}{n} \quad \frac{2L}{N} \quad \dots \quad L \right]^T$$

เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ได้พลังงานจลน์ของแกนหมุนคือ $\frac{1}{2} J_h \dot{\theta}^2$ และชิ้นส่วนตอนที่ i จะเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทาง $q_d(i) + \hat{l}(i)\theta$ ดังนั้นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ทั้งหมดของแขนหุ่นยนต์คือ

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \left[J_h \dot{\theta}^2 + (\dot{q} + \hat{l}\dot{\theta})^T \tilde{M} (\dot{q} + \hat{l}\dot{\theta}) \right] \\ V &= \frac{1}{2} q^T \tilde{K} q \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ \tilde{M} และ \tilde{K} คือเมตริกซ์มวลและเมตริกซ์ความแข็งตั้งตามลำดับ และ q คือระยะที่ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปจากจุดสมดุล กำหนดให้พลวัตของระบบเป็น θ และ q_d จากลากรองเจียน (Lagrangian) ของระบบ $\mathcal{L} = T - V$ จะได้สมการพลวัตของระบบดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} &= (J_h + \hat{l}^T \tilde{M} \hat{l}) \ddot{\theta} + \hat{l}^T \tilde{M} \ddot{q}_d = \tau \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_d} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_d} &= \tilde{M} \hat{l} \ddot{\theta} + \tilde{M} \ddot{q}_d + \tilde{K} q_d = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

พิจารณาพลวัตของมอเตอร์ โดยมีสัญญาณเข้าเป็นแรงดันไฟฟ้า ในที่นี้มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบควบคุมด้วยอาร์เมเจอร์ ถ้าคิดว่าความเหนี่ยวนำอาร์เมเจอร์มีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้ จะได้

$$\begin{aligned} v &= i_a R_m + K_b K_g \dot{\theta} \\ \tau &= K_\tau K_g i_a = -\frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} \dot{\theta} + \frac{K_\tau K_g}{R_m} v \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่ v คือ แรงดันเข้ามอเตอร์
 i_a คือ กระแสอาร์เมเจอร์
 R_m คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์
 K_τ คือ ค่าคงตัวของแรงบิด
 K_b คือ ค่าคงตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
 K_g คือ อัตราส่วนเกียร์

กำหนดให้ I_e คือ $J_h + \hat{I}^T \hat{M} \hat{I}$
 \bar{M} คือ $\hat{M} \hat{I}$

จากสมการ (2.2) และ (2.3) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_e & \bar{M}^T \\ \bar{M} & \hat{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_\tau K_g}{R_m} \\ 0 \end{bmatrix} v \quad (2.4)$$

กำหนดให้

$$\begin{bmatrix} I_e & \bar{M}^T \\ \bar{M} & \hat{M} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} (I_e - \bar{M}^T \hat{M}^{-1} \bar{M})^{-1} & -I_e^{-1} \bar{M}^T (\hat{M} - \bar{M} I_e^{-1} \bar{M}^T)^{-1} \\ -\hat{M}^{-1} \bar{M} (I_e - \bar{M}^T \hat{M}^{-1} \bar{M})^{-1} & (\hat{M} - \bar{M} I_e^{-1} \bar{M}^T)^{-1} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} X & Y \\ Z & W \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ดังนั้นจากสมการ (2.4) และ (2.5) จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{q}_d \end{bmatrix} + \frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} \begin{bmatrix} X & 0 \\ Z & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Y \hat{K} \\ 0 & W \hat{K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_d \end{bmatrix} = \frac{K_\tau K_g}{R_m} \begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} v$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{q}_d \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{q}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times N} & 1 & 0_{1 \times N} \\ 0 & 0_{1 \times N} & 0 & I_{N \times N} \\ 0 & -Y \hat{K} & -\frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} X & 0_{1 \times N} \\ 0 & -W \hat{K} & -\frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} Z & 0_{1 \times N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ q_d \\ \dot{\theta} \\ \dot{q}_d \end{bmatrix} + \frac{K_\tau K_g}{R_m} \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{1 \times N} \\ X \\ Z \end{bmatrix} v$$

ดังนั้นจะได้สมการสถานะที่อยู่ในรูปแบบ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

โดยที่ $x = [\theta \ q_d \ \dot{\theta} \ \dot{q}_d]^T$ คือเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ

y คือตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์

θ คือมุมของมอเตอร์ โดยคิดจากฟิวด์ท่อนแรก

q_d คือระยะที่เบนไปจากแกนมอเตอร์ของแต่ละท่อน

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times N} & 1 & 0_{1 \times N} \\ 0 & 0_{1 \times N} & 0 & I_{N \times N} \\ 0 & I_e^{-1} \bar{M}^T (\tilde{M} - \bar{M} I_e^{-1} \bar{M})^{-1} \tilde{K} & - (I_e - \bar{M}^T \tilde{M}^{-1} \bar{M})^{-1} \frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} & 0_{1 \times N} \\ 0 & - (\tilde{M} - \bar{M} I_e^{-1} \bar{M}^T)^{-1} & (I_e - \bar{M}^T \tilde{M} \bar{M})^{-1} \frac{K_\tau K_b K_g^2}{R_m} & 0_{1 \times N} \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{N \times 1} \\ \frac{K_\tau K_g}{R_m} (I_e - \bar{M}^T \tilde{M}^{-1} \bar{M})^{-1} \\ - \frac{K_\tau K_g}{R_m} \tilde{M}^{-1} \bar{M} (I_e - \bar{M}^T \tilde{M}^{-1} \bar{M})^{-1} \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0_{1 \times N-1} & \frac{1}{L} & 0_{1 \times N+1} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

2.3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวสำหรับแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย ดังนี้

- โมดูลัสของยัง $E = 200 \times 10^9 \text{ Nm}^{-1}$
- โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงพื้นที่หน้าตัดของแขนหุ่นยนต์ $I = 8.226 \times 10^{-13} \text{ m}^4$
- มวลต่อหน่วยความยาวของแขนหุ่นยนต์ $\rho = 0.1333 \text{ kgm}^{-1}$
- โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนส่งกำลังและกล่องเมื่อมองจากด้านโหลด $J_h = 2 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
- ความยาวของแขนหุ่นยนต์ (เปลี่ยนแปลงได้) $L = 0.45 \text{ m}$
- มวลของโหลดไฟและโหลด (เปลี่ยนแปลงได้) $m = 0.10 \text{ kg}$
- ค่าคงที่แรงบิดที่แกนโรเตอร์ $K_\tau = 7.67 \times 10^{-3} \text{ NmA}^{-1}$
- ค่าคงที่แรงดัน back emf $K_b = 7.67 \times 10^{-3} \text{ Vs}$
- อัตราการทรอบของเกียร์ $K_g = 70$

สงวนลิขสิทธิ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ความไม่แน่นอนของระบบและเงื่อนไขการเข้าสู่

ปัจจุบันได้มีการนำทฤษฎีควบคุมไปประยุกต์ใช้กับงานควบคุมมากมาย สิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เมื่อนำตัวควบคุมไปใช้งานจริงคือความไม่แน่นอนต่างๆที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้จะแบ่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบออกเป็นสองชนิดคือ ความไม่แน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่และความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่

3.1 เงื่อนไขการเข้าสู่

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ข้อดีที่เด่นชัดของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้คือสามารถขจัดความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ออกได้อย่างสมบูรณ์

นิยาม 3.1 พิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบที่มีสมการสถานะแสดงดังนี้

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu + f(t) \quad (3.1)$$

เมื่อ ΔA และ $f(t)$ คือความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบเนื่องจาก ความผิดพลาดของแบบจำลอง และสัญญาณรบกวนจากภายนอก ตามลำดับ ความไม่แน่นอนดังกล่าวจะสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ก็ต่อเมื่อ

$$\Delta A = B\Delta\tilde{A} \quad \text{และ} \quad f(t) = B\Delta\tilde{f}(t) \quad (3.2)$$

เมื่อ \tilde{A} และ $\tilde{f}(t)$ เป็นเวกเตอร์หรือค่าความไม่แน่นอนใดๆ ที่มีมิติเหมาะสม

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้จะสามารถขจัดความไม่แน่นอนเฉพาะแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ได้เท่านั้น เงื่อนไขดังกล่าว มิได้เป็นเงื่อนไขที่เข้มงวดมากเสียจนทำให้ไม่สามารถใช้การควบคุมชนิดนี้กับระบบใดๆได้เลย เพราะระบบทางกลส่วนมากจะมีสมการพลวัตแสดงดังนี้

$$y^{(n-1)} + q_{n-1}y^{(n-2)} + \dots + q_1\dot{y} + q_0y = u \quad (3.3)$$

เมื่อ y เป็นพลวัตของระบบ และ u เป็นสัญญาณควบคุมระบบ เมื่อพิจารณาความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นต่อพารามิเตอร์ของระบบ $q_i, i = 0, \dots, n-1$ จะได้

$$y^{(n-1)} + (q_{n-1} + \Delta q_{n-1})y^{(n-2)} + \dots + (q_1 + \Delta q_1)\dot{y} + (q_0 + \Delta q_0)y = u + \Delta u$$

เมื่อกำหนดให้ $y = x_1$ จะสามารถเขียนเป็นสมการสถานะรูปแบบบัญญัติควบคุมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -(q_0 + \Delta q_0) & -(q_1 + \Delta q_1) & \dots & -(q_{n-2} + \Delta q_{n-2}) & -(q_{n-1} + \Delta q_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (u + \Delta u) \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -q_0 & -q_1 & \dots & -q_{n-2} & -q_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -\Delta q_0 & -\Delta q_1 & \dots & -\Delta q_{n-2} & -\Delta q_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta u \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \Delta Ax(t) + B\Delta u(t) \\ \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B(\Delta \tilde{A}x(t) + \Delta u(t)) \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่

$$\Delta \tilde{A} = [-\Delta q_0 \quad -\Delta q_1 \quad \dots \quad -\Delta q_{n-2} \quad -\Delta q_{n-1}]$$

จาก (3.4) จะเห็นว่าความไม่แน่นอนที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ (3.3) นั้นจะอยู่ใน $\mathcal{R}\{B\}$ หรือสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่เสมอ และสามารถขจัดความไม่แน่นอนเหล่านั้นให้หมดไปด้วยการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ [5] พิจารณาสัญญาณควบคุม

$$u(t) = -(\sigma B)^{-1} [\sigma Ax(t) + \sigma \Delta Ax(t) + \sigma B \Delta u(t)] \quad (3.5)$$

โดยที่ $\sigma x = 0$ คือพื้นผิวสลับ เมื่อแทนสัญญาณควบคุม (3.5) ในระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ (3.4) จะได้

$$\dot{x}(t) = (A - B(\sigma B)^{-1} \sigma A)x(t) \quad (3.6)$$

จากสมการ (3.6) จะเห็นได้ว่า หากออกแบบให้เมตริกซ์ $A - B(\sigma B)^{-1}\sigma A$ เสถียร ระบบป้อนกลับจะมีเสถียรภาพ

อย่างไรก็ตาม ยังมีระบบในทางปฏิบัติบางชนิดที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าสู่ แสดงโดยสมการสถานะดังนี้

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + B(u(t) + \Delta u)$$

โดยที่ $\Delta A \notin \mathcal{R}(B)$ เมื่อแทนสัญกรณ์ควบคุม (3.5) ลงไปในระบบจะได้

$$\dot{x}(t) = \dot{x} = (A - B(\sigma B)^{-1}\sigma A)x(t) + (\Delta A - B(\sigma B)^{-1}\sigma \Delta A)x(t) \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) เห็นได้ว่า การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ไม่สามารถขจัดความไม่แน่นอนเหล่านี้ให้หมดไปได้ เมื่อความไม่แน่นอนเหล่านี้เข้าไปสู่สถานะของระบบ จะทำให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุล อย่างไรก็ตาม หากตัวควบคุมมีเสถียรภาพ ก็จะสามารถขับสถานะของสมดุลให้เข้าสู่จุดสมดุลได้อีกครั้ง ทำให้สถานะของระบบเคลื่อนที่อยู่ในขอบเขตจำกัด (ขึ้นอยู่กับขนาดของความไม่แน่นอน) เกิดเป็นขอบเขตเสถียรภาพขึ้น

3.2 วิเคราะห์ความไม่แน่นอนของระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเลือกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีระเบียบชั้นอันตะโดยมองแขนหุ่นยนต์เป็นหนึ่งท่อน [15] เนื่องจากตัวแปรสถานะของแบบจำลองชนิดนี้จะมีความหมายทางกายภาพทุกตัว สมการสถานะของระบบแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดยที่

$$x = [\theta \ d \ \dot{\theta} \ \dot{d}]^T$$

θ คือ มุมของมอเตอร์ (เรเดียน)

d คือ ระยะเบี่ยงที่ปลายแขนกล (เมตร)

y คือ ตำแหน่งเชิงมุมของโหลด (เรเดียน)

u คือ แรงดันที่เข้ามอเตอร์ (โวลต์)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Kl/I_h & -K_m^2 K_g^2 / I_h R_a & 0 \\ 0 & -K(I_h + MI^2) / MI_h & lK_m^2 K_g^2 / I_h R_a & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_m K_g / I_h R_a & -lK_m K_g / I_h R_a \end{bmatrix}^T$$

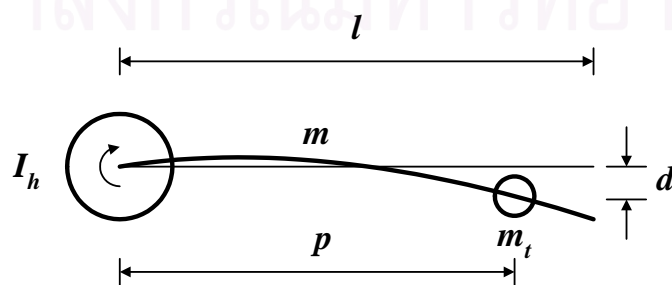
$$C = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3lp - p^2}{2l^3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \frac{3EI}{l^3}$$

$$M = \frac{99}{420}m + \left(\frac{1.5lp^2 - 0.5p^3}{l^3} \right)^2 m_t$$

ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่สภาวะการทำงานปกติแสดงดังนี้

- ความยาวของแขนหุ่นยนต์ $l = 0.45$ m
- ระยะมวลภาระ (เปลี่ยนแปลงได้) $p = 0.45$ m
- มวลของหลอดไฟและมวลภาระ (เปลี่ยนแปลงได้) $m_t = 0.10$ kg
- มวลของคาน $m = 0.06$ kg
- โมดูลัสของยัง $E = 200 \times 10^9$ Nm⁻¹
- โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงพื้นที่ที่หน้าตัดของแขนหุ่นยนต์ $I = 8.226 \times 10^{-13}$ m⁴
- โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ $I_h = 0.0039$ kg·m²/s²
- ความต้านทานของขดลวดโรเตอร์ $R_a = 2.6$ Ω
- ค่าคงที่แรงบิดของแกนโรเตอร์ $K_m = 7.67 \times 10^3$ N·m/A
- อัตราทดรอบของเกียร์ $K_g = 70$



รูปที่ 3.1: แขนกล่อ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว (มุมสูง)

แขนหุ่นยนต์มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบคือ มวลภาระ (m_t) เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.05 – 0.10 กิโลกรัม และตำแหน่งของมวลภาระ (p) เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.30 – 0.45 เมตร ผลจากความไม่แน่นอนดังกล่าวจะทำให้สมาชิกตัวที่ (3,2) และ (4,2) ของเมตริกซ์ A เปลี่ยนแปลงไป เมื่อพิจารณาร่วมกับเมตริกซ์ B จะเห็นได้ว่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบเวลาต่อเนื่องนี้ไม่สอดคล้องกับเงื่อนไขการเข้าคู่ และเมื่อผู้ออกแบบควบคุมแบบระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จะส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ด้วย [14] ดังนั้นตัวควบคุมจะไม่สามารถจัดความไม่แน่นอนให้หมดไป หากใช้การควบคุมแบบนี้ ต้องยอมให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ได้อยู่ในขอบเขตจำกัด ซึ่งต้องมีการพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพของการควบคุมด้วย



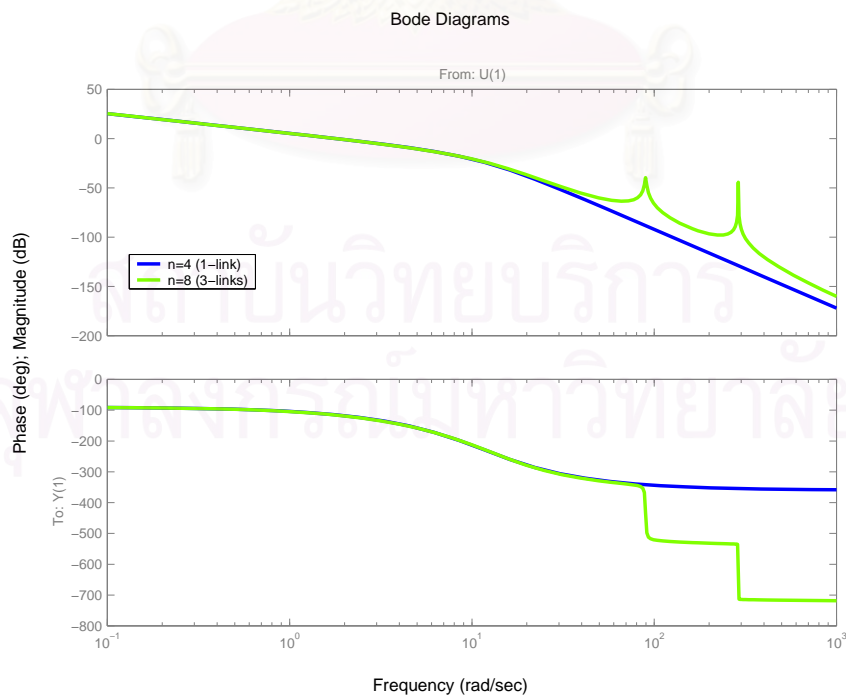
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้จะแบ่งการควบคุมออกได้ 3 ส่วนคือ ส่วนการเข้าถึง ส่วนการลื่นไหล และส่วนสภาวะคงตัว เมื่อสถานะของระบบเริ่มต้นที่จุดใด ๆ บนปริภูมิสถานะ จะมีสัญญาณควบคุมขับให้สถานะนั้นๆ เคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับ เราเรียกการทำงานส่วนนี้ว่า *ส่วนการเข้าถึง* หลังจากนั้นตัวควบคุมจะสับเปลี่ยนโครงสร้างอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ลื่นไหลไปบนพื้นผิวสลับเข้าสู่จุดสมดุล เรียกการทำงานส่วนนี้ว่า *ส่วนการลื่นไหล* และตัวควบคุมจะยังคงสับเปลี่ยนโครงสร้างอยู่เช่นนั้น เพื่อให้สถานะของระบบคงอยู่บนจุดสมดุล เรียกการทำงานส่วนนี้ว่า *ส่วนสภาวะคงตัว* จากการทำงานของส่วนการลื่นไหลนี้เอง ตัวควบคุมจะสับเปลี่ยนโครงสร้างอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดสัญญาณควบคุมความถี่สูงเข้าสู่ระบบ ในงานออกแบบตัวควบคุม ผู้ออกแบบมักจะจำลองออกแบบตัวควบคุมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อน ซึ่งมักจะอธิบายพลวัตต่างๆ ของระบบได้ไม่ครบถ้วน และเมื่อผู้ออกแบบนำตัวควบคุมนี้ไปใช้กับระบบจริง สัญญาณควบคุมความถี่สูงนี้อาจจะไปกระตุ้นระบบอันดับสูงที่ไม่ได้ออกแบบหรือถูกประมาณไว้ ส่งผลให้ระบบมีผลการควบคุมไม่เป็นไปตามต้องการ หรืออาจขาดเสถียรภาพได้

รูปที่ 4.1 แสดงการตอบสนองที่ความถี่ต่างๆ ของระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ประมาณแขนหุ่นยนต์เป็น 1 และ 3 ท่อน



รูปที่ 4.1: กราฟโบเดเปรียบเทียบแบบจำลองระบบที่ประมาณแขนกลเป็น 1 และ 3 ท่อน

จากรูปจะเห็นว่า การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ละเอียดขึ้น (ประมาณแขนหุ่นยนต์เป็น 3 ท่อน) จะมีโหมดที่ตอบสนองต่อความถี่สูงเพิ่มขึ้นมาด้วย ดังนั้น ผู้ออกแบบจึงไม่ควรออกแบบให้สัญญาณควบคุมมีความถี่สูงจนเกินไป

ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว [3, 4, 5, 11] อย่างไรก็ตาม สัญญาณควบคุมความถี่สูงสามารถเกิดได้กับการควบคุมระบบเวลาต่อเนื่องเท่านั้น แต่จะไม่เกิดกับการควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยเฉพาะกับการควบคุมด้วยความถี่ต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

4.1 การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การออกแบบพื้นผิวสลับ และการออกแบบกฎการควบคุม

พิจารณาระบบเวลาต่อเนื่องไม่แปรผันตามเวลาที่แสดงโดยสมการสถานะดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4.1)$$

โดยที่ $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ และ $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ เมื่อสุ่มระบบ (4.1) ด้วยอัตราสุ่ม τ จะได้สมการสถานะระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังนี้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \Phi x[k] + \Gamma u[k] \\ y[k] &= Cx[k] \end{aligned} \quad (4.2)$$

สมมุติฐานเบื้องต้นในการออกแบบตัวควบคุมคือ กำหนดให้คู่ (Φ, Γ) สามารถควบคุมได้ และคู่ (C, Φ) สามารถสังเกตได้

4.1.1 การออกแบบพื้นผิวสลับ

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้ทั่วไปจะกำหนดพื้นผิวสลับ ดังนี้

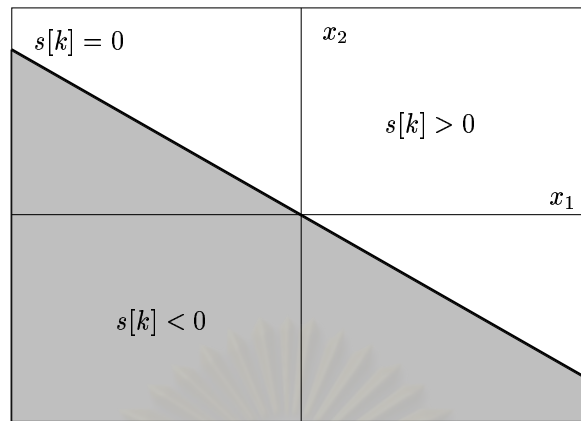
$$s[k] = \sigma x[k] = [\sigma_1 \ \cdots \ \sigma_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = 0 \quad (4.3)$$

พื้นผิวสลับจะแบ่งปริภูมิสถานะออกเป็นส่วนๆ ดังรูปที่ 4.2 เพื่อกำหนดสัญญาณควบคุม ในการออกแบบพื้นผิวสลับ σ จะทำการแปลงคล้ายให้ระบบ (4.2) ดังนี้

$$\hat{x}[k] = T x[k] \quad (4.4)$$

เพื่อให้ระบบมีรูปแบบสมการสถานะดังนี้

$$\hat{x}[k+1] = \bar{\Phi} \hat{x}[k] + \bar{\Gamma} u[k] \quad (4.5)$$

รูปที่ 4.2: พื้นผิวสลับ $s[k]$

โดยที่

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{11} & \bar{\Phi}_{12} \\ \bar{\Phi}_{21} & \bar{\Phi}_{22} \end{bmatrix}, \quad \bar{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{x}[k] = \begin{bmatrix} \hat{x}_1[k] \\ \hat{x}_2[k] \end{bmatrix}$$

เมื่อ $\bar{\Phi}_{22}$ และ $\hat{x}_2[k]$ เป็นปริมาณสเกลาร์ ดังนั้นจะได้พื้นผิวสลับแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} s[k] &= \sigma T^{-1} \hat{x}[k] = 0 \\ s[k] &= [\tilde{\sigma} \quad 1] \begin{bmatrix} \hat{x}_1[k] \\ \hat{x}_2[k] \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

จัดรูปสมการที่ (4.5) และ (4.6) ใหม่ จะได้

$$\hat{x}_1[k+1] = \bar{\Phi}_{11} \hat{x}_1[k] + \bar{\Phi}_{12} \hat{x}_2[k] \quad (4.7)$$

$$\hat{x}_2[k] = -\tilde{\sigma} \hat{x}_1[k] \quad (4.8)$$

เมื่อแทนสมการ (4.8) ลงใน (4.7) แล้ว จะได้ระบบลดอันดับแสดงโดยสมการสถานะดังนี้

$$\hat{x}_1[k+1] = (\bar{\Phi}_{11} - \bar{\Phi}_{12} \tilde{\sigma}) \hat{x}_1[k] \quad (4.9)$$

จากสมการ (4.9) จะเห็นได้ว่า เราสามารถวางขั้วของส่วนการสั่นไหวของระบบได้ถ้าคู่ $(\bar{\Phi}_{11}, \bar{\Phi}_{12})$ สามารถควบคุมได้ หรือเทียบเท่ากับคู่ $(\bar{\Phi}, \bar{\Gamma})$ สามารถควบคุมได้นั่นเอง ทั้งนี้ ขั้วของการสั่นไหวจะกำหนดความเร็วของสถานะขณะเคลื่อนที่สั่นไหวบนพื้นผิวสลับเข้าสู่จุดสมดุล

4.1.2 การออกแบบกฎการควบคุม

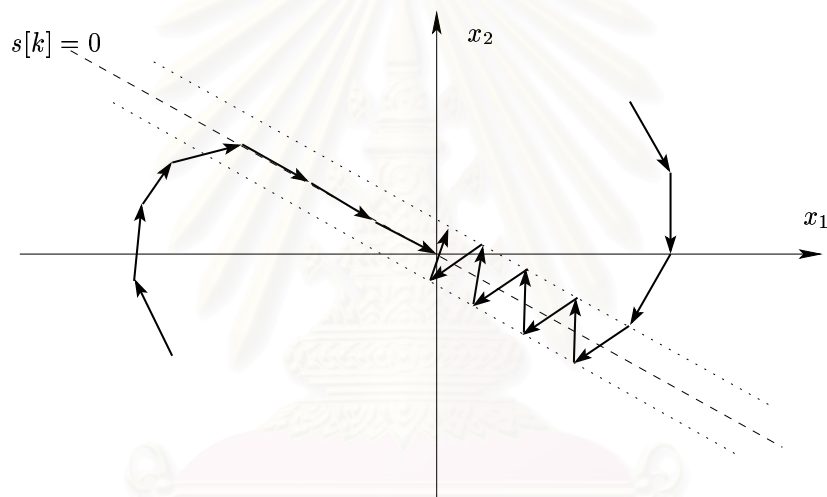
พื้นผิวสลับจะมีหน้าที่ในการกำหนดโครงสร้างของตัวควบคุม ตามกฎการควบคุม เช่น

$$u(x) = \begin{cases} u^+ & \text{เมื่อ } s[k] > 0 \\ u^- & \text{เมื่อ } s[k] < 0 \end{cases}$$

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องจะไม่ก่อปัญหาสัญญาณควบคุมความถี่สูง เนื่องจากสัญญาณควบคุมจะถูกคงค่าไว้ในช่วงควบคุมการควบคุม ซึ่งด้วยจุดนี้เอง จะทำให้ยากต่อการออกแบบตัวควบคุมที่สามารถขับให้สถานะของระบบลื่นไหลอยู่บนพื้นผิวสลับได้ตลอดเวลา ดังนั้น Gao จึงได้นิยามการลื่นไหลของการควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องขึ้น

การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องจะสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้ [6]

1. สถานะของระบบสามารถเข้าถึงพื้นผิวสลับได้ในเวลาจำกัดในทุกๆจุดเริ่มต้น
2. เมื่อสถานะของระบบเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับครั้งแรกแล้ว จะเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับกลับไปมาอีกทุกๆคาบการสุ่ม
3. ในระหว่างการเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับไปมา ขนาดของ s_k จะมีค่าอยู่ในขอบเขตจำกัด



รูปที่ 4.3: ทางเดินสถานะของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

นิยาม 4.1 กำหนดให้สถานะของระบบที่เคลื่อนไหวสอดคล้องกับเงื่อนไขที่ 2 และ 3 คือ การลื่นไหลแบบเควไซ และเรียกขอบเขตที่จำกัดขนาดของ s_k ว่า ขอบเขตการลื่นไหลเควไซ (Quasi Sliding Mode Band) ดังนี้

$$\{x \mid -\delta < s[k] < \delta\} \quad (4.10)$$

โดยที่ 2δ คือความกว้างของขอบเขตเควไซ

ในการออกแบบกฎการควบคุมจะใช้กฎการเข้าถึงมาช่วยในการออกแบบ เพื่อให้สามารถกำหนดลักษณะการเคลื่อนไหวของส่วนการเข้าถึงได้ง่าย และสถานะของระบบจากจุดเริ่มต้นใดๆ จะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับได้ในเวลาจำกัด กฎการเข้าถึงของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง แสดงดังนี้

$$s[k+1] - s[k] = -q\tau s[k] - \epsilon\tau \operatorname{sgn}(s[k]) \quad (4.11)$$

กฎการเข้าถึงจะกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับของสถานะระบบ หากกำหนดให้ q มีค่ามากแล้ว ยิ่งสถานะระบบอยู่ไกลก็ยิ่งเคลื่อนที่เข้าหาพื้นผิวสลับได้รวดเร็ว แต่ถ้ากำหนดให้ q มีขนาดใหญ่

มากเกินไป จะทำให้ใช้สัญญาณควบคุมในการควบคุมชั่วคราวมีค่าสูง (ไม่ควรออกแบบให้ขนาดของสัญญาณควบคุมมีค่าสูงเกิดความสามารถของตัวขับเคลื่อน) และค่า ϵ จะกำหนดความกว้างขอบเขตการลื่นไหลความเร็ว ถ้ากำหนดให้ ϵ มีค่ามาก จะทำให้ขอบเขตการลื่นไหลความเร็วกว้าง เป็นผลให้ผลการควบคุมแกว่ง แต่หากกำหนดให้น้อยเกินไป สถานะจะเคลื่อนที่ถึงพื้นผิวสลับช้า (สถานะจะไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับได้หาก $\epsilon = 0$) ในการออกแบบจึงต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงให้เหมาะสมด้วย

เมื่อจัดรูปสมการที่ (4.11) ใหม่ จะได้

$$s[k+1] = (1 - q\tau)s[k] - \epsilon\tau \operatorname{sgn}(s[k]) \quad (4.12)$$

เงื่อนไขการลื่นไหลแบบความเร็วกำหนดไว้ว่า สถานะของระบบจะต้องเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับไปมาทุก ๆ คาบการควบคุม หรือ $s[k]$ จะต้องเปลี่ยนเครื่องหมายในทุก ๆ คาบถัดไป ($s[k+1]$) ดังนั้น

$$\begin{aligned} (1 - q\tau)s[k] &< \epsilon\tau \operatorname{sgn}(s[k]) \\ \|s[k]\| &< \frac{\epsilon\tau}{1 - q\tau} \end{aligned} \quad (4.13)$$

จากสมการ (4.13) เห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในกฎการเข้าถึงและคาบการสุ่ม จะกำหนดขนาดความหนาขอบเขตความเร็วด้วย

เมื่อกำหนดให้ระบบมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ แสดงโดยสมการสถานะดังนี้

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] + \Delta \Phi x[k] + f[k] \quad (4.14)$$

พิจารณากฎการเข้าถึง (4.11) ร่วมกับสมการต่อไปนี

$$s[k+1] = \sigma x[k+1] = \sigma(\Phi x[k] + \Gamma u[k] + \Delta \Phi x[k] + f[k]) \quad (4.15)$$

จะได้กฎการควบคุมดังนี้

$$u[k] = Fx[k] + \gamma \operatorname{sgn}(s[k]) + S_c x[k] + f_c[k] \quad (4.16)$$

โดยที่

$$F = -(\sigma\Gamma)^{-1}(\sigma\Phi - \sigma I + q\tau\sigma) \quad (4.17)$$

$$\gamma = -(\sigma\Gamma)^{-1}\epsilon\tau \quad (4.18)$$

$$S_c = -(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\Delta\Phi \quad (4.19)$$

$$f_c = -(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma f[k] \quad (4.20)$$

แต่กฎการควบคุมดังสมการที่ (4.16) นี้ ยังไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมได้ เนื่องจากในการประยุกต์ใช้งานจริง จะไม่สามารถวัดค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบ ((4.19) และ (4.20)) เพื่อใช้ในการคำนวณเป็นสัญญาณควบคุมให้กับระบบได้ ดังนั้นเราจะกำหนดสัญญาณควบคุมใหม่ดังนี้

$$u[k] = Fx[k] + \gamma \operatorname{sgn}(s[k]) + \tilde{S}_c x[k] + \tilde{f}_c \quad (4.21)$$

โดยใช้สมมุติฐานว่า ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบจะมีค่าจำกัด

$$S_L \leq S_c \leq S_U \text{ และ } f_L \leq f_c \leq f_U$$

เมื่อพิจารณากฎการเข้าถึง (4.11), สมการ (4.14) และ (4.21) จะได้

$$s[k+1] - s[k] = -q\tau s[k] - \epsilon\tau \operatorname{sgn}(s[k]) + S_c - \tilde{S}_c + f_c - \tilde{f}_c$$

เพื่อให้เกิดการลื่นไหลแบบเควไซ (สถานะของระบบเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับ $s[k] = 0$) เมื่อ $s[k] > 0$ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันสลับต้องมีค่าน้อยกว่า 0 และเมื่อ $s[k] < 0$ อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันสลับต้องมีค่ามากกว่า 0 ดังนั้นจะพิจารณาการเลือกส่วนความไม่แน่นอนในสัญญาณควบคุมได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } s[k] > 0 \text{ ให้ } \tilde{S}_c &= S_U \text{ และ } \tilde{f}_c = f_U \\ \text{เมื่อ } s[k] < 0 \text{ ให้ } \tilde{S}_c &= S_L \text{ และ } \tilde{f}_c = f_L \end{aligned} \quad (4.22)$$

ถ้ากำหนดให้

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{S_U + S_L}{2}, & S_2 &= \frac{S_U - S_L}{2} \\ f_1 &= \frac{f_U + f_L}{2}, & f_2 &= \frac{f_U - f_L}{2} \end{aligned}$$

จะสามารถเขียนเงื่อนไขในการเลือกค่าความไม่แน่นอน (4.22) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \tilde{S}_c &= S_1 + S_2 \operatorname{sgn}(s[k]) \\ \tilde{f}_c &= f_1 + f_2 \operatorname{sgn}(s[k]) \end{aligned}$$

ดังนั้น จะได้กฎการควบคุมใหม่ดังนี้

$$u[k] = Fx[k] + \gamma \operatorname{sgn}(s[k]) + S_1 x[k] + f_1 + (S_2 x[k] + f_2) \operatorname{sgn}(s[k]) \quad (4.23)$$

4.2 การออกแบบตัวสังเกตสถานะ

การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้นั้นจำเป็นต้องใช้การป้อนกลับสถานะทั้งหมดของระบบ แต่ระบบในทางปฏิบัติส่วนมากจะไม่สามารถวัดสถานะทั้งหมดของระบบได้โดยตรง จึงต้องใช้ตัวสังเกตสถานะในการสร้างสถานะของระบบ ข้อดีของตัวสังเกตสถานะคือ จะสามารถกรองสัญญาณรบกวนแบบสุ่มออกได้ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นอยู่เสมอๆ จากเครื่องมือวัด จากสมการสถานะของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] \quad (4.24)$$

$$y[k] = Cx[k]$$

กำหนดให้ \hat{x} คือสถานะที่สร้างขึ้นเพื่อประมาณสถานะจริงของระบบ x

$$\hat{x}[k+1] = \Phi \hat{x}[k] + \Gamma u[k] \quad (4.25)$$

โดยระบบนี้จะใช้สัญญาณควบคุมเดียวกับระบบ (4.24) ถ้าแบบจำลอง Φ และ Γ ถูกต้อง และสถานะ \hat{x} มีค่าเริ่มต้นเดียวกันกับสถานะ x สถานะของระบบ (4.25) จะมีค่าเท่ากับสถานะของระบบ (4.24)

เสมอ แต่อย่างไรก็ตาม เราไม่สามารถหาค่าเริ่มต้นทั้งหมดที่ถูกต้องของระบบได้ และหากเกิดความผิดพลาดในแบบจำลองแล้ว กรณีเดียวที่สถานะ \hat{x} จะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่สถานะ x ได้คือ ระบบ (4.24) จะต้องมีเสถียรภาพ

สร้างระบบที่ใช้สังเกตสถานะของระบบขึ้นมาใหม่ โดยรวมค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณขาออกที่วัดได้กับสัญญาณขาออกที่ประมาณไว้ $(y - C\hat{x})$ เข้ากับสถานะ \hat{x} ด้วย ดังนี้

$$\hat{x}[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] + K(y[k] - C\hat{x}[k]) \quad (4.26)$$

เมื่อ K คือเมตริกซ์คงที่ขนาดเหมาะสม สังเกตว่าส่วนป้อนกลับ $K(y[k] - C\hat{x}[k])$ จะมีค่าเป็น 0 เมื่อสัญญาณขาออกของระบบสังเกตมีค่าเท่ากับระบบจริง (หรือสถานะของระบบสังเกตมีค่าเท่ากับระบบจริง) ในการกำหนดค่าเมตริกซ์ K ที่เหมาะสม จะพิจารณาค่าผิดพลาดจากการประมาณสถานะระบบดังนี้

$$\tilde{x} = x - \hat{x}$$

ลบสมการ (4.24) ด้วยสมการ (4.26) จะได้

$$\tilde{x}[k+1] = \Phi x[k] - K(y[k] - C\hat{x}[k]) = (\Phi - KC)\tilde{x}[k] \quad (4.27)$$

เพื่อให้ความผิดพลาดจากการสังเกตสถานะลดลง ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดค่าเมตริกซ์ K ที่ทำให้ $\Phi - KC$ มีเสถียรภาพ (จะสามารถกระทำได้ที่ต่อเมื่อคู่ (Φ, Γ) สามารถสังเกตได้)

ระบบในทางปฏิบัติส่วนมากจะมีสัญญาณรบกวนจากเครื่องมือวัดเป็นแบบสุ่ม ดังนี้

$$y[k] = Cx[k] + v[k]$$

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ตัวกรองคาลมานเป็นตัวสังเกตสถานะ เนื่องจากสามารถกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออกได้ ทำให้การประมาณสถานะถูกต้องมากขึ้นโดยกำหนดค่าเมตริกซ์ K ดังนี้

$$K = (C\Sigma C^T + R_o)^{-1} C\Sigma\Phi$$

โดยที่ Σ เป็นเมตริกซ์กึ่งบวกแน่นอนได้จากการแก้สมการรีคคาติ

$$\Sigma = \Phi^T \Sigma \Phi + Q_o - \Phi^T \Sigma C^T (C\Sigma C^T + R_o)^{-1} C\Sigma\Phi$$

โดยที่ Q_o เป็นเมตริกซ์กึ่งบวกแน่นอน และ R_o เป็นเมตริกซ์บวกแน่นอนขนาดเหมาะสม

บทที่ 5

การพิสูจน์ขอบเขตเสถียรภาพเนื่องจากความไม่แน่นอน

เนื่องจากระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ ตัวควบคุมโครงสร้างที่ออกแบบจะไม่สามารถขจัดความไม่แน่นอนนี้ให้หมดไปได้ ด้วยสมมุติฐานที่ว่า ความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบมีค่าจำกัด ดังนั้นจะสามารถพิจารณาขอบเขตเสถียรภาพของการควบคุมได้ดังนี้

5.1 บทพิสูจน์ขอบเขตเสถียรภาพ

จากสมการสถานะของระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่

$$x[k+1] = \Phi x[k] + \Gamma u[k] + \Delta \Phi x[k] + f[k] \quad (5.1)$$

และกฎการควบคุมที่ได้จากหัวข้อการออกแบบตัวควบคุม

$$u[k] = Fx[k] + \gamma \operatorname{sgn}(s[k]) + \tilde{S}_c x[k] + \tilde{f}_c \quad (5.2)$$

แทนสัญญาณควบคุม (5.2) ลงใน (5.1) จะได้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \left(\Phi - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma \left(\Phi - I + q\tau I + \frac{\epsilon\tau}{\|s[k]\|} I \right) \right) x[k] \\ &\quad + \left(\Delta\Phi - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\Delta\tilde{\Phi} \right) x[k] + \left(f[k] - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\tilde{f}[k] \right) \end{aligned}$$

เมื่อแยกส่วนความไม่แน่นอนออก จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$x[k+1] = \Phi_{eq} x[k] + \tilde{F}(x, k) \quad (5.3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \Phi_{eq} &= \Phi - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma \left(\Phi - I + q\tau I + \frac{\epsilon\tau}{\|s[k]\|} I \right) \\ \tilde{F}(x, k) &= \left(\Delta\Phi - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\Delta\tilde{\Phi} \right) x[k] + \left(f[k] - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\tilde{f}[k] \right) \end{aligned}$$

บทตั้ง 5.1 ถ้าเมตริกซ์จัตุรัส X มี $\operatorname{rank} = 1$ แล้ว

$$\det(I - X) = 1 - \operatorname{trace}(X)$$

ทฤษฎีบท 5.1 หากพื้นผิวสลับ σ ถูกออกแบบโดยวิธีในตอนต้นที่ 4.1.1 และกำหนดให้

$$\Phi_\sigma = \left(I - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma \right) \Phi \quad (5.4)$$

แล้วค่าเจาะจงของ Φ_σ คือค่าเจาะจงในการออกแบบพื้นผิวสลับและ 0 [12]

พิสูจน์ จากสมการที่ (5.4) จะเห็นได้ว่าผลรวมทางเส้นทแยงมุมของ $\Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma$ เท่ากับ 1 ดังนั้น

$$\det(\Phi_\sigma) = \det(I - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma)\det(\Phi) = (1 - 1)\det(\Phi) = 0$$

แสดงว่า Φ_σ จะมีค่าเจาะจงเท่ากับ 0 อย่างน้อยหนึ่งตัว และจากการออกแบบส่วนลื่นไหลในหน้าที่ 4.1.1 ออกแบบที่ $s[k] = 0$ ดังนั้น พิจารณาการลื่นไหลของระบบที่ $s[k] = 0$

$$\begin{aligned} s[k] = s[k+1] &= 0 \\ \sigma\Phi x[k] + \sigma\Gamma u[k] &= 0 \\ u_e[k] &= -(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma\Phi x[k] \end{aligned}$$

เมื่อแทนสัญญาณควบคุม $u_e[k]$ ลงในสมการสถานะจะได้

$$x[k+1] = (I - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma)\Phi x[k]$$

ดังนั้นหากพื้นผิวสลับ σ ได้ถูกออกแบบในตอนหน้าที่ 3.1 จะได้ว่าข้อของ Φ_σ ก็คือข้อของการออกแบบส่วนลื่นไหลด้วย \square

ทฤษฎีบท 5.2 กำหนดให้ $\rho = 1 - q\tau - \frac{\epsilon\tau}{\|s[k]\|}$ จาก (5.3) จะได้

$$\Phi_{eq} = \Phi - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma(\Phi - \rho I) = \Phi_\sigma + \rho\Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma$$

โดยค่าเจาะจงของ Φ_{eq} คือ ค่า ρ และค่าเจาะจงของ Φ_σ ทุกตัว นอกจากตัวที่เท่ากับ 0 (ค่าเจาะจงที่ใช้ในการออกแบบพื้นผิวสลับ σ) ดังที่กล่าวไว้ในทฤษฎีบทที่ 5.1

พิสูจน์ พิจารณา

$$\begin{aligned} \det(\Phi_{eq} - \rho I) &= \det((I - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma)\Phi + \rho\Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma - \rho I) \\ &= \det(I - \Gamma(\sigma\Gamma)^{-1}\sigma)\det(\Phi - \rho I) = 0 \end{aligned}$$

ดังนั้น ρ เป็นค่าเจาะจงของ Φ_{eq} โดย ρ จะมีเสถียรภาพเมื่อ

$$\|\rho\| = \left\| 1 - q\tau - \frac{\epsilon\tau}{\|s[k]\|} \right\| < 1$$

จาก (4.13) ขนาด $\|s[k]\| > 0$ เสมอ ดังนั้น $1 - q\tau > 0$ ด้วย จึงทำให้ $\rho < 1$

ต่อไปพิจารณา

$$\begin{aligned} -1 < \rho = 1 - q\tau - \frac{\epsilon\tau}{\|s[k]\|} \\ \|s[k]\| > \frac{\epsilon\tau}{2 - q\tau} \end{aligned} \quad (5.5)$$

ดังนั้น ρ จะมีเสถียรภาพ (สถานะจะเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวสลับ) เมื่อสอดคล้องกับ (5.5)

กำหนดให้ $g(\lambda)$ และ $h(\lambda)$ คือสมการคุณลักษณะของ Φ_σ และ Φ_{e_q} ตามลำดับ จากทฤษฎีบทที่ 5.1 จะได้ $g(\lambda) = \lambda \bar{g}(\lambda)$ เมื่อ $\bar{g}(\lambda)$ มีอันดับ $n - 1$ จะเห็นได้ว่า

$$g(\lambda) = \det(\Phi_\sigma - \lambda I)$$

แทนค่า $\lambda = \Phi_{e_q}$ จะได้

$$g(\Phi_{e_q}) = \det(\Phi_\sigma - \Phi_{e_q}) = \det(-\rho\Gamma(\sigma\Gamma)^{-1})\sigma = 0$$

ดังนั้น

$$g(\Phi_{e_q}) = \Phi_{e_q} \bar{g}(\Phi_{e_q}) = 0$$

เมตริกซ์ Φ_{e_q} สอดคล้องกับสมการคุณลักษณะของ Φ_σ และ $\bar{g}(\Phi_{e_q}) = 0$ กำหนดให้ Φ_{e_q} มีค่าเจาะจงไม่ซ้ำกันอย่างน้อย $n - 1$ ตัว ดังนั้น $\bar{g}(\lambda) = \frac{1}{\lambda}g(\lambda)$ เป็นตัวประกอบของ $h(\lambda)$ (ค่าเจาะจงทุกตัวยกเว้น 0 ของ Φ_σ เป็นค่าเจาะจงของ Φ_{e_q} ด้วย) \square

ทฤษฎีบท 5.3 ถ้า $\|\tilde{F}\| \leq \beta(x, t)$ แล้วระบบที่มีความไม่แน่นอน (5.3) จะมีผลการควบคุมอยู่ในขอบเขตจำกัด

พิสูจน์ กำหนดฟังก์ชันเลียฟุโนฟ

$$V[k] = x^T[k]Px[k]$$

พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

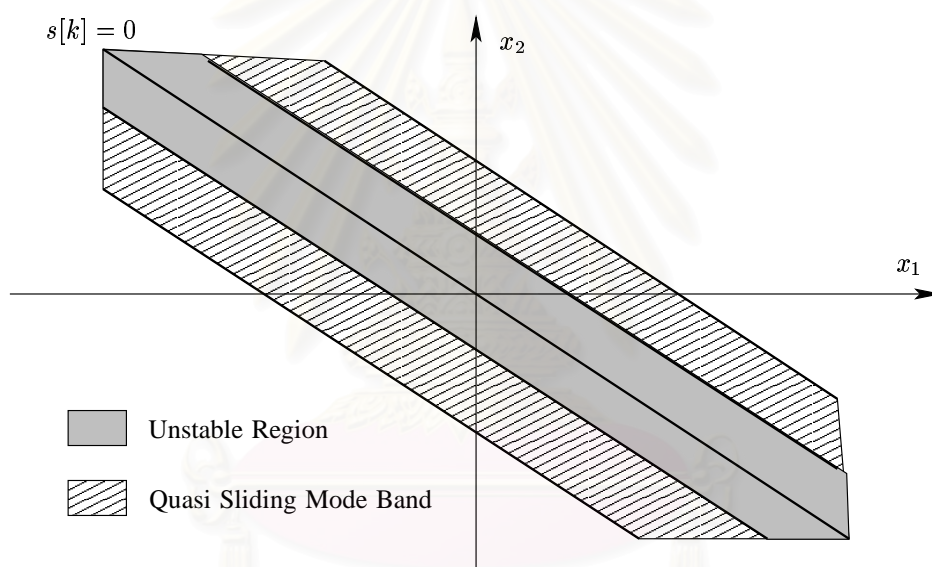
$$\begin{aligned} V[k+1] - V[k] &= x^T[k+1]Px[k+1] - x^T[k]Px[k] \\ &= x^T[k]\Phi_{e_q}^T P \Phi_{e_q} x[k] + x^T[k]Px[k] + 2\tilde{F}^T(x, k)P\Phi_{e_q}x[k] + \tilde{F}^T(x, k)P\tilde{F}(x, k) \\ &= -x^T[k]Qx[k] + 2\tilde{F}^T(x, k)P\Phi_{e_q}x[k] + \tilde{F}^T(x, k)P\tilde{F}(x, k) \end{aligned}$$

จากทฤษฎีบทที่ 5.2 เมตริกซ์ Φ_{e_q} มีเสถียรภาพ ทำให้มีเมตริกซ์บวกแน่นอน P เป็นผลเฉลยของสมการเลียฟุโนฟ $\Phi_{e_q}^T P \Phi_{e_q} + P = -Q$ สำหรับเมตริกซ์บวกแน่นอน Q ใดๆ ดังนั้น

$$V[k+1] - V[k] \leq -\lambda_{\min}(Q)\|x\|^2 + 2\beta\|P\|\|x[k]\| + \|P\|\beta^2 \quad (5.6)$$

เนื่องจาก $\lambda_{\min}(Q) > 0$ ทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันเลียฟุโนฟลดลงสำหรับทุกช่วงการสุ่มที่ $x[k] \in B^c(\eta)$ เมื่อ $B^c(\eta)$ เป็นคอมพลีเมนต์ของทรงกลม $B(\eta)$ มีจุดศูนย์กลางที่ 0 รัศมี $\eta = \max(r_1, r_2)$ เมื่อ r_1 และ r_2 เป็นรากของพหุนาม (5.6) \square

พิจารณาเพิ่มเติม จากเงื่อนไขขอบเขตเสถียรภาพ (5.5) และเงื่อนไขขอบเขตการสั่นไหวแบบเคาไซ (4.13) จะกินบริวณบนปริภูมิสถานะดังรูปที่ 5.1 จากขอบเขตดังกล่าว และการออกแบบกฎการเข้าถึงให้ฟังก์ชันสลับ $s[x]$ สลับเครื่องหมายทุกๆ คาบการสุ่ม ทำให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ข้ามพื้นผิวสลับไปมา เกิดเป็นการสั่นไหวแบบเคาไซขึ้น



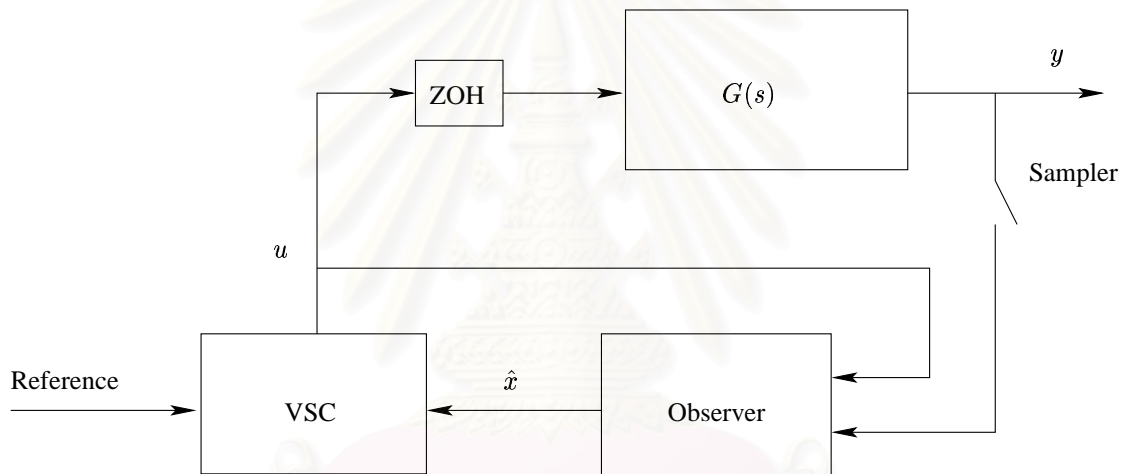
รูปที่ 5.1: ทางเดินสถานะของการควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

ประยุกต์ใช้การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้กับระบบแกนกลอ่อนตัวแบบ ข้อต่อเดียว

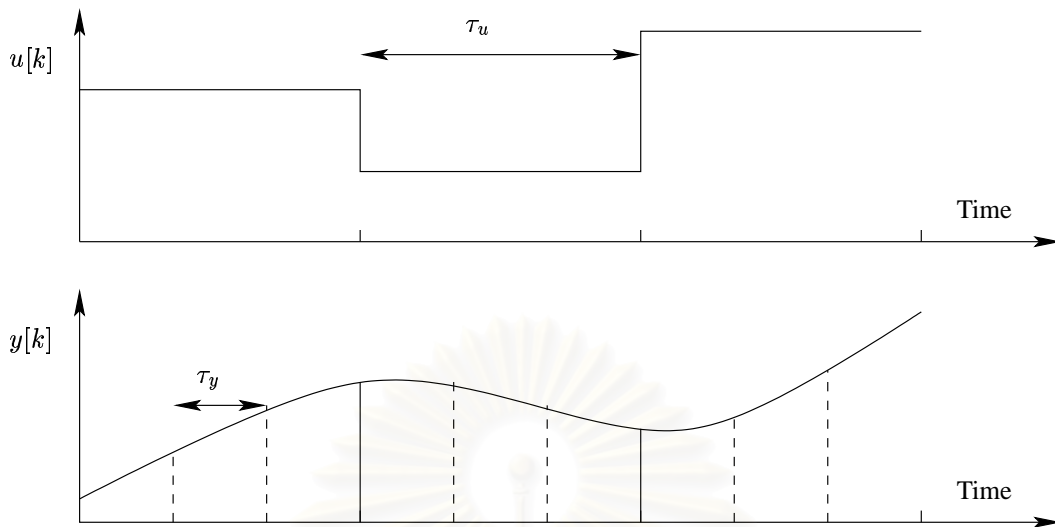
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้สำหรับระบบแกนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว การควบคุมโครงสร้างแปรผันได้นั้นจำเป็นต้องใช้การป้อนกลับสถานะทั้งหมดของระบบ ซึ่งไม่สามารถวัดทั้งหมดได้จากชุดทดลองระบบแกนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตัวสังเกตสถานะให้กับตัวควบคุมด้วย แผนผังในการควบคุมแสดงดังรูปที่ 6.1



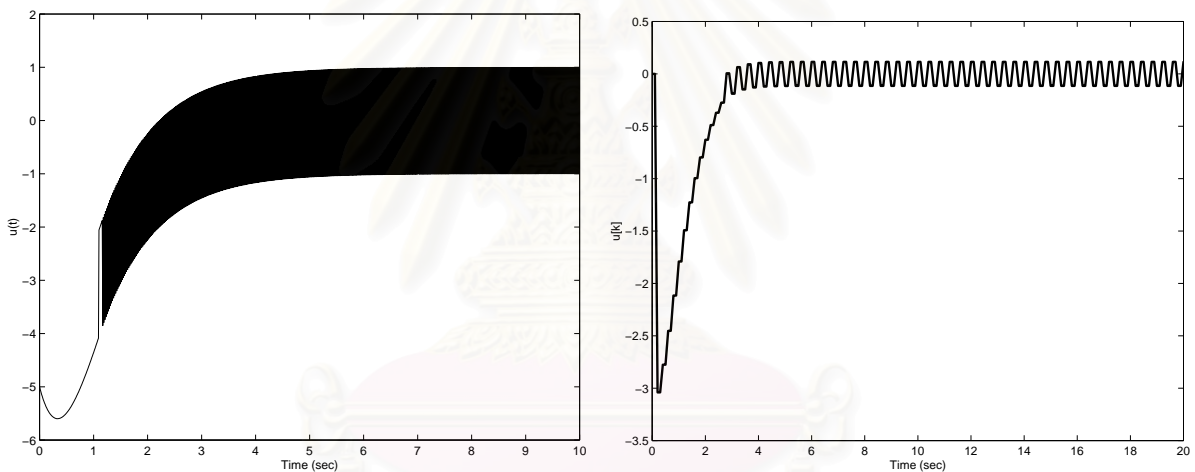
รูปที่ 6.1: แผนผังการควบคุมระบบแกนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว

ตัวสังเกตสถานะจะสุ่มสัญญาณขาออกจากระบบแกนหุ่นยนต์ด้วยอัตราสุ่ม f_y แล้วส่งค่าสถานะของระบบที่สังเกตได้มาให้กับตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมจะเปรียบเทียบสถานะที่ได้มากับสัญญาณอ้างอิง แล้วสร้างสัญญาณควบคุมเข้าสู่ระบบ โดยส่งผ่านตัวคงค่าอันดับศูนย์ (Zero Order Hold) ที่มีอัตราการคงค่าสัญญาณ f_u ในการควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่องโดยทั่วไป ผู้ออกแบบตัวควบคุมมักจะกำหนดให้อัตราการส่งสัญญาณควบคุม f_u และอัตราในการสุ่มสัญญาณขาออก f_y มีค่าเท่ากัน เช่นหากผู้ออกแบบกำหนดใช้ความถี่ในการควบคุมให้สูงขึ้น (ทั้งการส่งสัญญาณควบคุมและการสุ่มสัญญาณขาออก) ก็จะทำให้ตัวสังเกตสถานะได้รับข้อมูลมากขึ้น ทำให้การสังเกตสถานะถูกต้องยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ตัวควบคุมก็จะส่งสัญญาณด้วยความถี่สูง ทั้งนี้อาจไปกระตุ้นระบบอันดับสูงที่ไม่ได้ออกแบบหรือประมาณไว้ ทำให้ได้ผลตอบสนองไม่เป็นไปตามต้องการหรืออาจขาดเสถียรภาพได้

ในทางกลับกัน หากผู้ออกแบบกำหนดใช้ความถี่ในการควบคุมให้ต่ำลง (ทั้งการส่งสัญญาณควบคุมและการสุ่มสัญญาณขาออก) จะสามารถช่วยจำกัดความถี่สูงสุดที่จะเข้าสู่ระบบให้มีค่าต่ำลงได้ แต่ทางด้านตัวสังเกตสถานะ เมื่อสุ่มสัญญาณขาออกด้วยความถี่ต่ำลงก็จะได้อะเอียดในการสังเกตสถานะน้อยลง ทำให้



รูปที่ 6.2: แผนผังการส่งสัญญาณควบคุมและการสุ่มสัญญาณขาออก



รูปที่ 6.3: สัญญาณควบคุมของระบบเวลาต่อเนื่อง (ซ้าย) และระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (ขวา)

การประมาณสถานะไม่ดีเท่าที่ควร เมื่อนำสถานะดังกล่าวไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมระบบ อาจทำให้ผลการควบคุมที่ไม่ดี (ตัวควบคุมไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ) ในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำข้อดีของการสุ่มสัญญาณขาออกด้วยความถี่ที่สูงขึ้นและการส่งสัญญาณควบคุมด้วยความถี่ที่ต่ำลงมารวมกัน

ในการออกแบบตัวควบคุม ชั้นแรกจะทดลองใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแขนหุ่นยนต์ก่อน เมื่อได้ผลจำลองการควบคุมที่น่าพอใจแล้วจึงนำตัวควบคุมนั้นๆไปทดลองใช้กับระบบจริง ในการทดลองจะกำหนดความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นกับระบบคือ การเปลี่ยนขนาดของมวลภาระที่ติดอยู่ที่แขนหุ่นยนต์จาก 0.10 กิโลกรัม ไปเป็น 0.05 กิโลกรัม และเปลี่ยนแปลงระยะของมวลภาระจาก 0.45 เมตร ไปเป็น 0.30 เมตร

6.1 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับแขนหุ่นยนต์ ตอนที่ 1

ในการจำลองออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบ จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีระเบียบขึ้นอันดับ โดยประมาณแขนหุ่นยนต์เป็น 1 ท่อน แขนหุ่นยนต์มีมวลภาระหนัก 0.10 กิโลกรัม ติดอยู่ที่ระยะ 0.45 เมตร จากสมการสถานะของแบบจำลอง (3.8) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 21.41 & -28.27 & 0 \\ 0 & -327.08 & 12.72 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 52.65 \\ -23.69 \end{bmatrix} u \\ y &= [1 \ 2.22 \ 0 \ 0] x \end{aligned} \quad (6.1)$$

โดยที่ $x = [\theta \ d \ \dot{\theta} \ \dot{d}]^T$

θ คือ มุมของมอเตอร์ (เรเดียน)

d คือ ระยะเบี่ยงที่ปลายแขนกล (เมตร)

y คือ ตำแหน่งเชิงมุมของโหลด (เรเดียน)

u คือ แรงดันที่เข้ามอเตอร์ (โวลท์)

ในการออกแบบจะเปรียบเทียบการควบคุมด้วยอัตราการสุมและอัตราการส่งสัญญาณควบคุมดังนี้ ดังนั้น

ตารางที่ 6.1: ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุมสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบปกติ)

กรณีที่	อัตราการส่งสัญญาณควบคุม f_u	อัตราการสุมสัญญาณขาออก f_y
1.1	10 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที
1.2	2 ครั้งต่อวินาที	2 ครั้งต่อวินาที
1.3	2 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที

การออกแบบตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้และตัวสังเกตสถานะ จะแบ่งออกเป็นสองความถี่ และในการออกแบบตัวควบคุมแต่ละความถี่จะกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่ใช้ขนาดสัญญาณควบคุมใกล้เคียงกันด้วย

- ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 10$ รอบต่อวินาที ในการออกแบบ จะสุมระบบ (6.1) ด้วยความถี่เท่ากับอัตราการส่งสัญญาณควบคุม สมการสถานะระบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \begin{bmatrix} 1 & 1.15 & 0.04 & 0.05 \\ 0 & 0.28 & 0.02 & 0.07 \\ 0 & 11.05 & 0.39 & 1.15 \\ 0 & -8.30 & 0.23 & 0.28 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} 0.10 \\ -0.04 \\ 1.14 \\ -0.42 \end{bmatrix} u[k] \\ y[k] &= [1 \ 2.22 \ 0 \ 0] x[k] \end{aligned} \quad (6.2)$$

ในการออกแบบจะกำหนดขั้วการลื่นไหลของระบบคือ $\{0.45 \pm 0.56i, 0.80\}$ ทำให้ได้พหุนามลักษณะ

$$\sigma = [1.82 \ -3.97 \ 0.94 \ 1.04]$$

และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงดังนี้

$$s[k+1] = 2s[k] + 0.001 \operatorname{sgn}(s[k])$$

เพื่อหาขอบเขตเสถียรภาพในกรณีที่ระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ จากสมการพหุนาม (5.6) กำหนดให้เมตริกซ์ $Q = 0.001I$ ดังนั้นจะแก้สมการเลียฟโนฟหามาเมตริกซ์ P ได้

$$P = \begin{bmatrix} 0.012 & -0.001 & -0.008 & -0.010 \\ -0.001 & 0.002 & 0.008 & -0.003 \\ -0.008 & 0.008 & 0.105 & -0.043 \\ -0.010 & -0.003 & -0.043 & 0.072 \end{bmatrix}$$

จากนั้นกำหนดขนาดความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะมวลถ่วงไปเป็น 0.30 เมตร และขนาดมวลถ่วงไปเป็น 0.05 กิโลกรัม ก็จะได้เมตริกซ์ความไม่แน่นอน \tilde{F}

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & -0.702 & -0.014 & -0.054 \\ 0 & 0.814 & 0.010 & 0.043 \\ 0 & -3.901 & -0.130 & -0.458 \\ 0 & 7.876 & 0.182 & 0.675 \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการ (5.6) จะได้ขอบเขตเสถียรภาพดังนี้

$$-0.001\|x\|^2 + 23.991\|x\| + 106.7 < 0$$

จะได้ค่ารากของสมการ $r_1 = 2403.5$ และ $r_2 = -4.4392$ แต่เนื่องจาก $\|x\| > 0$ ดังนั้นจะได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อ $\|x\| > 2403.5$

- *ความถี่ในการสุ่มสัญญาณ $f_y = 10$ รอบต่อวินาที* กำหนดให้การสุ่มสัญญาณขาออกมีความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัด ดังนี้

$$y[k] = Cx[k] + v[k]$$

จากการทดลองหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องมือวัดในชุดทดลองพบว่าเป็นสัญญาณแบบสุ่ม มีค่าความแปรปรวนดังนี้ $\operatorname{var}(v[k]) = 0.01$ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออก จึงใช้ตัวกรองคาล์มานเป็นตัวสังเกตสถานะระบบ ตัวสังเกตมีโครงสร้างดังสมการ (4.26) ค่าเมตริกซ์ K หาได้จากการแก้สมการรีคคาติ

$$\Sigma = \Phi^T \Sigma \Phi + Q_o - \Phi^T \Sigma C^T (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi$$

โดยที่ Φ และ Γ ได้จากระบบ (6.2), $Q_o = C^T \operatorname{var}(v[k])C$ และ $R_o = 1$ จะได้ค่าเมตริกซ์ K ดังนี้

$$K = (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi = [0.28 \quad 0.01 \quad 0.70 \quad 0.78]$$

- ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 2$ รอบต่อวินาที ในการออกแบบ จะสุ่มระบบ (6.1) ด้วยความถี่เท่ากับอัตราการส่งสัญญาณควบคุม สมการสถานะระบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0.21 & 0.23 & 0.44 \\ 0 & -0.07 & 0.01 & 0.01 \\ 0 & -2.10 & 0.14 & 0.21 \\ 0 & 0.66 & -0.04 & -0.07 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} 0.50 \\ -0.01 \\ 1.61 \\ 0.08 \end{bmatrix} u[k] \\ y[k] &= [1 \ 2.22 \ 0 \ 0] x[k] \end{aligned} \quad (6.3)$$

ในการออกแบบจะกำหนดชั่วคราวสั้นไหลทั้งหมดของระบบไว้ที่ 0 ทำให้ได้พื้นผิวสลับ

$$\sigma = [1.08 \ 0.03 \ 0.26 \ 0.49]$$

และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงดังนี้

$$s[k+1] = s[k] + 0.001 \operatorname{sgn}(s[k])$$

เพื่อหาขอบเขตเสถียรภาพในกรณีที่ระบบที่ความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ จากสมการพหุนาม (5.6) กำหนดให้เมตริกซ์ $Q = 0.001I$ ดังนั้นจะแก้สมการเลียฟุนอฟหาเมตริกซ์ P ได้

$$P = \begin{bmatrix} 0.004 & -1.017 \times 10^{-005} & -0.002 & 9.895 \times 10^{-005} \\ -1.017 \times 10^{-005} & 0.001 & 0.001 & -4.479 \times 10^{-005} \\ -0.002 & 0.001 & 0.006 & -0.001 \\ 9.895 \times 10^{-005} & -4.479 \times 10^{-005} & -0.001 & 0.001 \end{bmatrix}$$

จากนั้นกำหนดขนาดความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะมวลภาระไปเป็น 0.30 เมตร และขนาดมวลภาระไปเป็น 0.05 กิโลกรัม ก็จะได้เมตริกซ์ความไม่แน่นอน \tilde{F}

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & -2.685 & 0.150 & 0.260 \\ 0 & 0.115 & -0.015 & -0.044 \\ 0 & -13.411 & -0.329 & -1.196 \\ 0 & 12.911 & -0.154 & 0.063 \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการ (5.6) จะได้ขอบเขตเสถียรภาพดังนี้

$$-0.001\|x\|^2 + 0.262\|x\| + 2.465 < 0$$

จะได้ค่ารากของสมการ $r_1 = 270.92$ และ $r_2 = -9.098$ แต่เนื่องจาก $\|x\| > 0$ ดังนั้นจะได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อ $\|x\| > 270.92$

- ความถี่ในการสุ่มสัญญาณ $f_y = 2$ รอบต่อวินาที กำหนดให้การสุ่มสัญญาณขาออกมีความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัด ดังนี้

$$y[k] = Cx[k] + v[k]$$

จากการทดลองหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องมือวัดในชุดทดลองพบว่าเป็นสัญญาณแบบสุ่ม มีค่าความแปรปรวนดังนี้ $\text{var}(v[k]) = 0.01$ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออก จึงใช้ตัวกรองคาล์มานเป็นตัวสังเกตสถานะระบบ ตัวสังเกตมีโครงสร้างดังสมการ (4.26) ค่าเมตริกซ์ K หาได้จากการแก้สมการรีคคาติ

$$\Sigma = \Phi^T \Sigma \Phi + Q_o - \Phi^T \Sigma C^T (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi$$

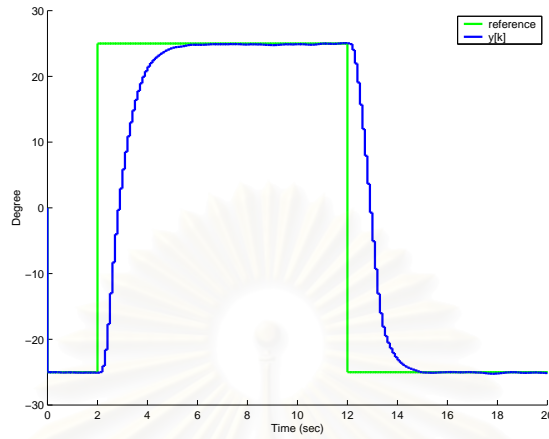
โดยที่ Φ และ Γ ได้จากระบบ (6.3), $Q_o = C^T \text{var}(v[k]) C$ และ $R_o = 1$ จะได้ค่าเมตริกซ์ K ดังนี้

$$K = (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi = [0.10 \quad -0.01 \quad -0.20 \quad 0.06]$$

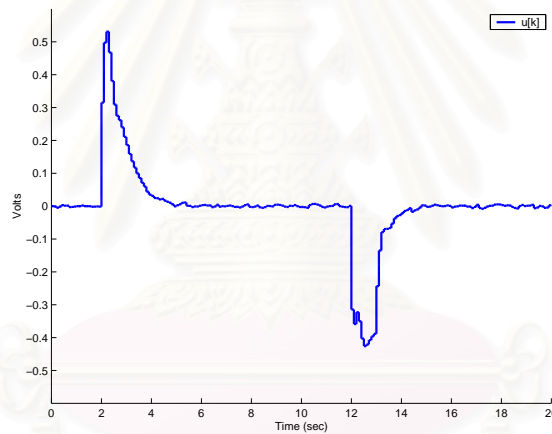
6.2 ผลการจำลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์ ตอนที่ 1

จากที่ได้ออกแบบตัวควบคุมไว้ในหัวข้อ 6.1 ในหัวข้อนี้จะนำตัวควบคุมดังกล่าวมาจำลองระบบแขนหุ่นยนต์ที่สภาวะปรกติ (มวลภาระ 0.10 กิโลกรัม และระยะมวลภาระ 0.45 เมตร) ด้วยความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณขาออก ดังตารางที่ 6.1 ได้ผลการจำลองระบบดังต่อไปนี้

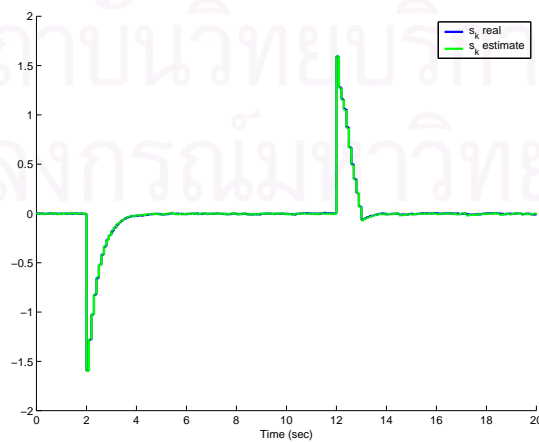
- กรณีที่ 1.1 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 10$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 10$ รอบต่อวินาที ระบบมีสถานะปกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.4, 6.5 และ 6.6



รูปที่ 6.4: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

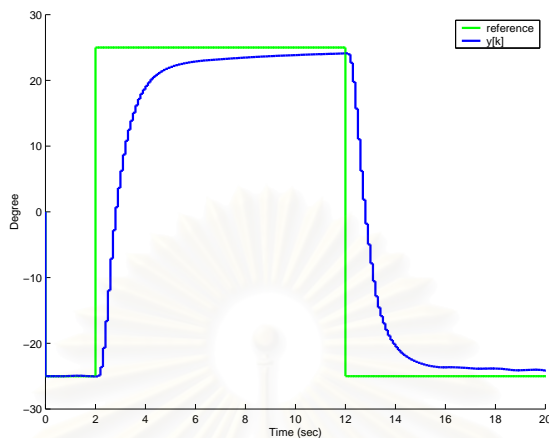


รูปที่ 6.5: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

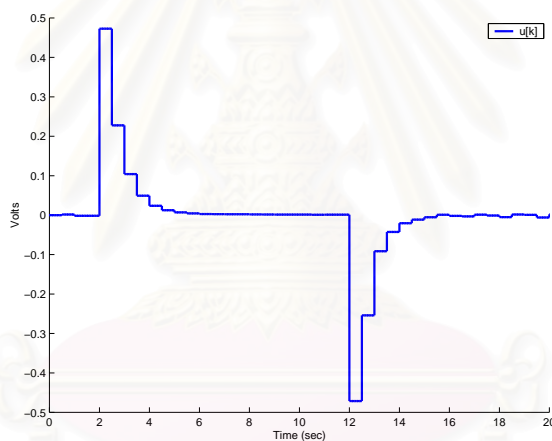


รูปที่ 6.6: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

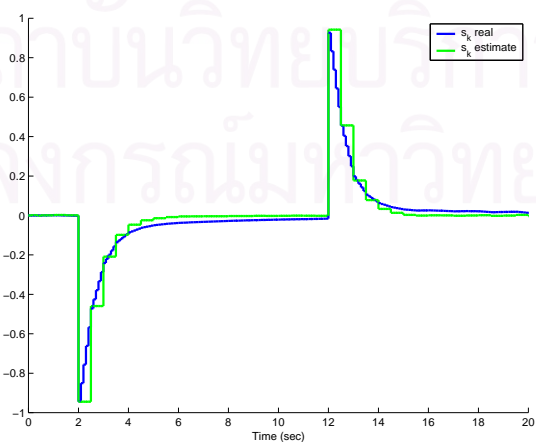
- กรณีที่ 1.2 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 2$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 2$ รอบต่อวินาที ระบบมีสถานะปรกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.7, 6.8 และ 6.9



รูปที่ 6.7: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

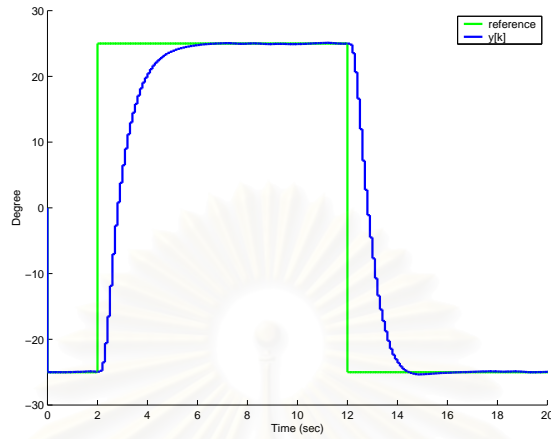


รูปที่ 6.8: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

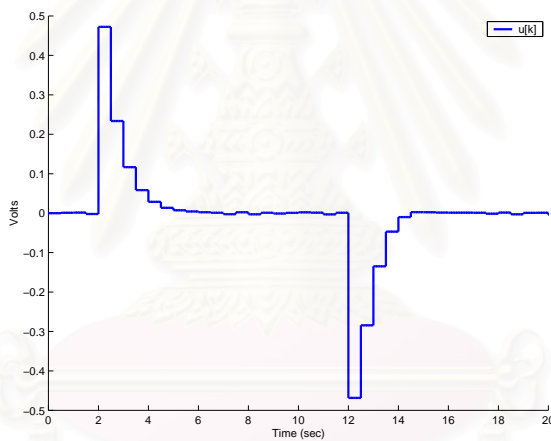


รูปที่ 6.9: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

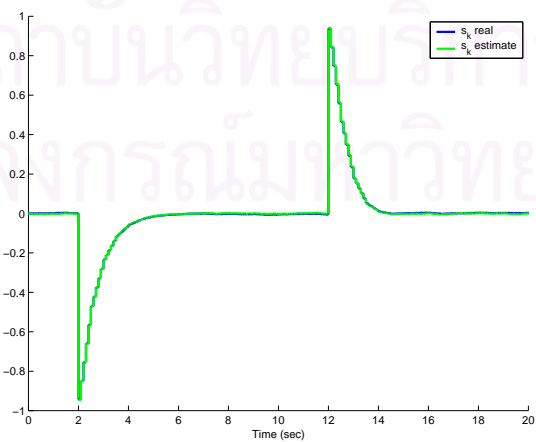
- กรณีที่ 1.3 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 2$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 10$ รอบต่อวินาที ระบบมีสถานะปกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.10, 6.11 และ 6.12



รูปที่ 6.10: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg



รูปที่ 6.11: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg



รูปที่ 6.12: พังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกรณีที่ 1.1 (อัตราการป้อนสัญญาณควบคุม 10 รอบต่อวินาที) กับกรณีที่ 1.3 (อัตราการป้อนสัญญาณควบคุม 2 รอบต่อวินาที) จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมทั้งสองสร้างสัญญาณควบคุมขนาดใกล้เคียงกัน และทำให้สถานะของระบบเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าอ้างอิง (มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ 25 องศา) ได้ในเวลาใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะลดความถี่ในการป้อนสัญญาณควบคุมให้มีค่าต่ำลง ระบบก็ยังมีเสถียรภาพและสามารถให้ผลตอบสนองที่ดีได้ เมื่อพิจารณาสัญญาณควบคุมของกรณีที่ 1.1 เทียบกับกรณีที่ 1.3 จะพบว่าสัญญาณควบคุมของกรณีที่ 1.1 สั่น ทำให้ปลายแขนกลแกว่ง

พิจารณาผลการทดลองกรณีที่ 1.2 เปรียบเทียบกับกรณีที่ 1.3 จะเห็นได้ว่า ผลการควบคุมของกรณีที่ 1.2 สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าอ้างอิงได้ช้ากว่ากรณีที่ 1.3 ทั้งๆที่ทั้งสองกรณีมีอัตราการส่งสัญญาณควบคุมเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากกรณีที่ 1.2 มีอัตราการสุ่มสัญญาณ (2 รอบต่อวินาที) ที่ต่ำกว่ากรณีที่ 1.3 (10 รอบต่อวินาที) เมื่อพิจารณาฟังก์ชันพื้นผิวสลับ $\sigma x[k]$ ของกรณีที่ 1.2 จะพบว่าค่าฟังก์ชันพื้นผิวสลับที่ประมาณได้มีความผิดพลาดไปจากค่าฟังก์ชันพื้นผิวสลับจริง หรือสังเกตสถานะของระบบผิดพลาดนั่นเอง ส่งผลให้ตัวควบคุมทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ

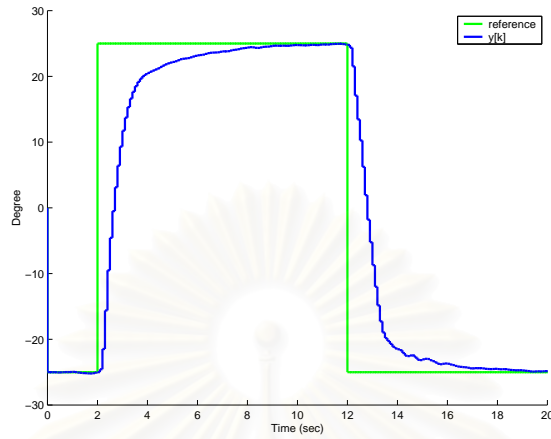
ต่อไปจะทดลองนำตัวควบคุมตัวเดิมนี้ไปจำลองควบคุมระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่มีความไม่แน่นอน คือ มวลภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.10 ไปเป็น 0.05 กิโลกรัม และระยะมวลภาระจาก 0.45 ไปเป็น 0.30 เมตร โดยใช้ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม และความถี่ในการสุ่มสัญญาณขาออกดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2: ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบมีความไม่แน่นอน)

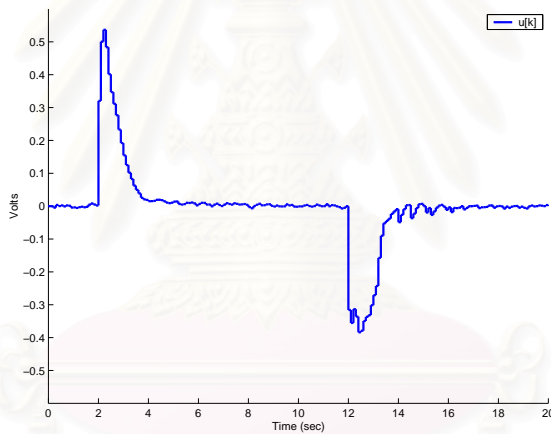
กรณีที่	อัตราการส่งสัญญาณควบคุม f_u	อัตราการสุ่มสัญญาณขาออก f_y
1.4	10 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที
1.5	2 ครั้งต่อวินาที	2 ครั้งต่อวินาที
1.6	2 ครั้งต่อวินาที	10 ครั้งต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

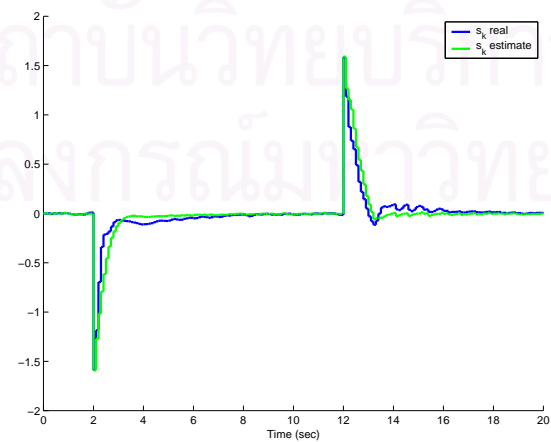
- กรณีที่ 1.4 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 10$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 10$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.13, 6.14 และ 6.15



รูปที่ 6.13: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

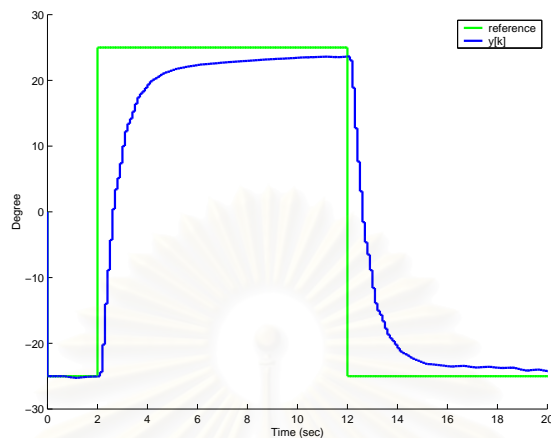


รูปที่ 6.14: สัญญาณควบคุม (โวลท์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

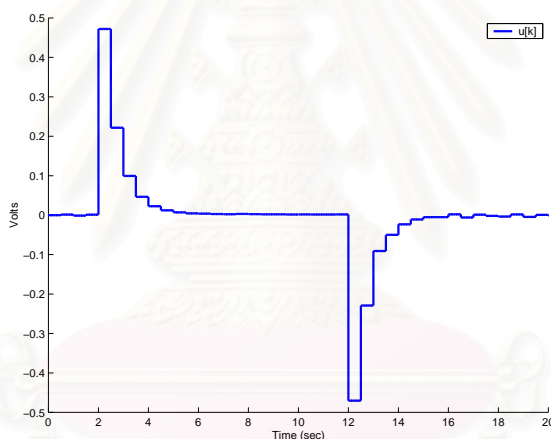


รูปที่ 6.15: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 10$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

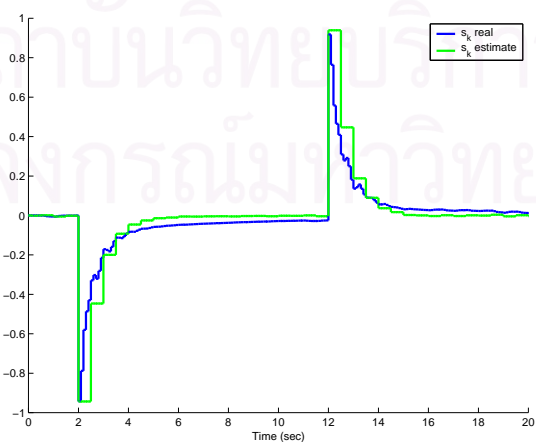
- กรณีที่ 1.5 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 2$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 2$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.16, 6.17 และ 6.18



รูปที่ 6.16: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

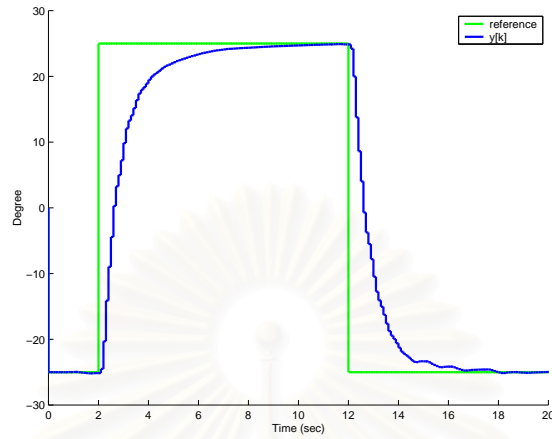


รูปที่ 6.17: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

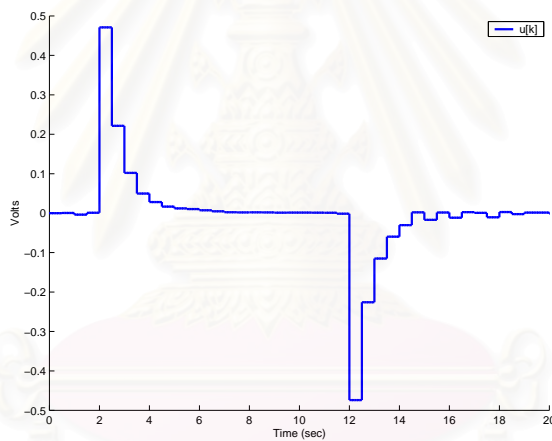


รูปที่ 6.18: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 2$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

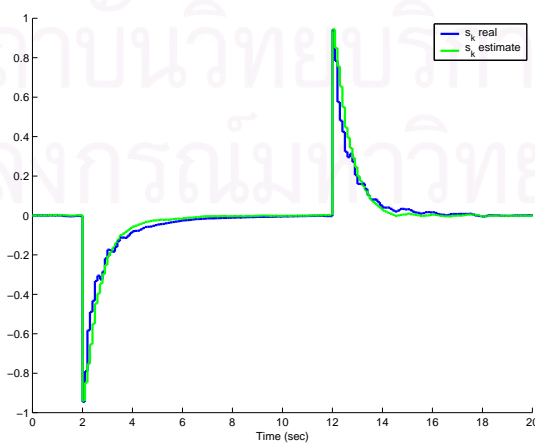
- กรณีที่ 1.6 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 2$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 10$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.19, 6.20 และ 6.21



รูปที่ 6.19: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg



รูปที่ 6.20: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg



รูปที่ 6.21: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 2$ Hz, $f_y = 10$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_l = 0.05$ kg

ตารางที่ 6.3: สรุปผลการควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 1

กรณี	f_u (Hz)	f_y (Hz)	m (กิโลกรัม)	l (เมตร)	t_s (วินาที)	u_{\max} (โวลต์)	$(\Sigma x[k] - \hat{x}[k])/N$
1.1	10	10	0.10	0.45	3.1	0.53	0.0119
1.2	2	2	0.10	0.45	10.0	0.48	0.0580
1.3	2	10	0.10	0.45	3.2	0.48	0.0144
1.4	10	10	0.05	0.30	5.1	0.55	0.0445
1.5	2	2	0.05	0.30	> 10.0	0.47	0.0868
1.6	2	10	0.05	0.30	5.0	0.47	0.0401

ค่าเฉลี่ยการสังเกตสถานะผิดพลาด $(\Sigma||x[k] - \hat{x}[k]||)/N$ ของทุกกรณี จะลู่สู่สถานะจริงและสถานะที่สังเกตได้ด้วยความถี่ 10 รอบต่อวินาที ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาที โดย N คือจำนวนครั้งที่ลู่

จากผลการจำลองระบบ ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ที่ขึ้นกับระบบ ตัวควบคุมจะยังสามารถควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพได้ โดยผลการควบคุมของระบบที่มีความไม่แน่นอน (กรณี 1.4, 1.5 และ 1.6) สถานะของระบบจะเคลื่อนที่สู่ค่าอ้างอิงได้ช้ากว่าระบบที่สภาวะปกติ (กรณี 1.1, 1.2 และ 1.3)

จากผลการทดลองตอนที่ 1 แสดงให้เห็นข้อดีของการควบคุมด้วยความถี่ต่ำและการลู่สู่สัญญาณขาออกด้วยความถี่สูง อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลองนำตัวควบคุมนี้ไปใช้กับระบบจริงพบว่าปลายของแขนหุ่นยนต์แกว่งด้วยความถี่ต่ำ เนื่องจากความถี่ที่ออกแบบในตอน 1 นี้มีค่าต่ำเกินไป ดังนั้นจะพิจารณาออกแบบตัวควบคุมที่ค่าความถี่สูงขึ้นในตอน 2

6.3 การออกแบบตัวควบคุมสำหรับแขนหุ่นยนต์ ตอนที่ 2

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมสำหรับแขนหุ่นยนต์ตอนที่ 2 นี้ ยังคงใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีระเบียบชั้นอันดับโดยประมาณแขนหุ่นยนต์เป็น 1 ท่อน แต่จะพิจารณาเปลี่ยนอัตราการส่งสัญญาณควบคุมและอัตราการลู่สู่สัญญาณให้มีค่าสูงขึ้นจากการทดลองในตอน 1 ตารางแสดงอัตราการส่งสัญญาณควบคุมและอัตราการลู่สู่สัญญาณขาออกแสดงดังตารางต่อไปนี้ โดยจะจำลองในทำนองเดียวกับตอนที่ 1 คือ ออกแบบตัวควบคุมและจำลองควบคุมระบบที่สภาวะปกติและระบบที่มีความไม่แน่นอน

ตารางที่ 6.4: ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการลู่สู่สัญญาณควบคุม (สภาวะระบบปกติ)

กรณี	อัตราการส่งสัญญาณควบคุม f_u	อัตราการลู่สู่สัญญาณขาออก f_y
2.1	100 ครั้งต่อวินาที	100 ครั้งต่อวินาที
2.2	20 ครั้งต่อวินาที	20 ครั้งต่อวินาที
2.3	20 ครั้งต่อวินาที	100 ครั้งต่อวินาที

- ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 100$ รอบต่อวินาที ในการออกแบบ จะสุ่มระบบ (6.1) ด้วยความถี่เท่ากับอัตราการส่งสัญญาณควบคุม สมการสถานะระบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0.028 & 0.009 & 0 \\ 0 & 0.985 & 0.001 & 0.010 \\ 0 & 5.383 & 0.755 & 0.028 \\ 0 & -2.895 & 0.110 & 0.985 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} 0.002 \\ -0.001 \\ 0.457 \\ -0.205 \end{bmatrix} u[k] \\ y[k] &= [1 \ 2.222 \ 0 \ 0] x[k] \end{aligned} \quad (6.4)$$

ในการออกแบบจะกำหนดชั่วคราวสั้นไหลของระบบคือ $\{0.909, 0.909, 0.904\}$ ทำให้ได้พื่นผิวสลับ

$$\sigma = [36.605 \ -41.298 \ 11.302 \ 20.91]$$

และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงดังนี้

$$s[k+1] = 6s[k] + 0.1 \operatorname{sgn}(s[k])$$

เพื่อหาขอบเขตเสถียรภาพในกรณีที่ระบบที่ความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ จากสมการพหุนาม (5.6) กำหนดให้เมตริกซ์ $Q = 0.001I$ ดังนั้นจะแก้สมการเลียฟุนอฟหาเมตริกซ์ P ได้

$$P = \begin{bmatrix} 0.0796 & -0.002 & -0.050 & -0.114 \\ -0.002 & 0.007 & 0.113 & -0.050 \\ -0.0499 & 0.113 & 3.128 & -1.513 \\ -0.114 & -0.050 & -1.513 & 0.996 \end{bmatrix}$$

จากนั้นกำหนดขนาดความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะมวลภาระไปเป็น 0.30 เมตร และขนาดมวลภาระไปเป็น 0.05 กิโลกรัม ก็จะได้เมตริกซ์ความไม่แน่นอน \tilde{F}

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & -0.073 & -1.465 \times 10^{-005} & -0.001 \\ 0 & 0.040 & 7.333 \times 10^{-006} & 0.001 \\ 0 & -13.951 & -0.003 & -0.070 \\ 0 & 7.749 & 0.002 & 0.039 \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการ (5.6) จะได้ขอบเขตเสถียรภาพดังนี้

$$-0.001\|x\|^2 + 125.02\|x\| + 997.59 < 0$$

จะได้ค่ารากของสมการ $r_1 = 1.25 \times 10^{005}$ และ $r_2 = -7.9792$ แต่เนื่องจาก $\|x\| > 0$ ดังนั้นจะได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อ $\|x\| > 1.25 \times 10^{005}$

- ความถี่ในการสุ่มสัญญาณ $f_y = 100$ รอบต่อวินาที กำหนดให้การสุ่มสัญญาณขาออกมีความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัด ดังนี้

$$y[k] = Cx[k] + v[k]$$

จากการทดลองหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องมือวัดในชุดทดลองพบว่าเป็นสัญญาณแบบสุ่ม มีค่าความแปรปรวนดังนี้ $\text{var}(v[k]) = 0.01$ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออก จึงใช้ตัวกรองคาล์มานเป็นตัวสังเกตสถานะระบบ ตัวสังเกตมีโครงสร้างดังสมการ (4.26) ค่าเมตริกซ์ K หาได้จากการแก้สมการรีคาคติ

$$\Sigma = \Phi^T \Sigma \Phi + Q_o - \Phi^T \Sigma C^T (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi$$

โดยที่ Φ และ Γ ได้จากระบบ (6.4), $Q_o = C^T \text{var}(v[k]) C$ และ $R_o = 1$ จะได้ค่าเมตริกซ์ K ดังนี้

$$K = (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi = [0.099 \quad 0.152 \quad 1.451 \quad -0.815]$$

- ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที ในการออกแบบ จะสุ่มระบบ (6.1) ด้วยความถี่เท่ากับอัตราการส่งสัญญาณควบคุม สมการสถานะระบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังนี้

$$\begin{aligned} x[k+1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0.479 & 0.028 & 0.009 \\ 0 & 0.728 & 0.010 & 0.045 \\ 0 & 14.404 & 0.325 & 0.479 \\ 0 & -8.616 & 0.295 & 0.728 \end{bmatrix} x[k] + \begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.018 \\ 1.257 \\ -0.549 \end{bmatrix} u[k] \\ y[k] &= [1 \quad 2.222 \quad 0 \quad 0] x[k] \end{aligned} \quad (6.5)$$

ในการออกแบบจะกำหนดขีดการลื่นไหลของระบบไว้ที่ 0.460.460.60 ทำให้ได้พื่นผิวสลั

$$\sigma = [14.816 \quad 5.785 \quad 3.412 \quad 6.903]$$

และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกฎการเข้าถึงดังนี้

$$s[k+1] = 4s[k] + 0.1 \text{sgn}(s[k])$$

เพื่อหาขอบเขตเสถียรภาพในกรณีที่ระบบที่ความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ จากสมการพหุนาม (5.6) กำหนดให้เมตริกซ์ $Q = 0.001I$ ดังนั้นจะแก้สมการเลียฟุโนฟหาเมตริกซ์ P ได้

$$P = \begin{bmatrix} 0.018 & -0.001 & -0.009 & -0.023 \\ -0.001 & 0.002 & 0.020 & -0.008 \\ -0.009 & 0.020 & 0.646 & -0.314 \\ -0.023 & -0.008 & -0.314 & 0.203 \end{bmatrix}$$

จากนั้นกำหนดขนาดความไม่แน่นอนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระยะมวลภาระไปเป็น 0.30 เมตร และขนาดมวลภาระไปเป็น 0.05 กิโลกรัม ก็จะได้เมตริกซ์ความไม่แน่นอน \tilde{F}

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} 0 & 0.175 & 0.013 & 0.003 \\ 0 & -0.126 & 0.012 & 0.038 \\ 0 & 0.592 & -0.617 & 0.258 \\ 0 & -0.562 & 0.267 & -0.165 \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการ (5.6) จะได้ขอบเขตเสถียรภาพดังนี้

$$-0.001\|x\|^2 + 1.7739\|x\| + 0.97231 < 0$$

จะได้ค่ารากของสมการ $r_1 = 1774.4$ และ $r_2 = -0.54796$ แต่เนื่องจาก $\|x\| > 0$ ดังนั้นจะได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพเมื่อ $\|x\| > 1774.4$

- *ความถี่ในการสุ่มสัญญาณ* $f_y = 20$ รอบต่อวินาที กำหนดให้การสุ่มสัญญาณขาออกมีความไม่แน่นอนจากเครื่องมือวัด ดังนี้

$$y[k] = Cx[k] + v[k]$$

จากการทดลองหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากเครื่องมือวัดในชุดทดลองพบว่าเป็นสัญญาณแบบสุ่ม มีค่าความแปรปรวนดังนี้ $\text{var}(v[k]) = 0.01$ เพื่อกรองสัญญาณรบกวนดังกล่าวออก จึงใช้ตัวกรองคาล์มานเป็นตัวสังเกตสถานะระบบ ตัวสังเกตมีโครงสร้างดังสมการ (4.26) ค่าเมตริกซ์ K หาได้จากการแก้สมการรีคคาติ

$$\Sigma = \Phi^T \Sigma \Phi + Q_o - \Phi^T \Sigma C^T (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi$$

โดยที่ Φ และ Γ ได้จากระบบ (6.3), $Q_o = C^T \text{var}(v[k]) C$ และ $R_o = 1$ จะได้ค่าเมตริกซ์ K ดังนี้

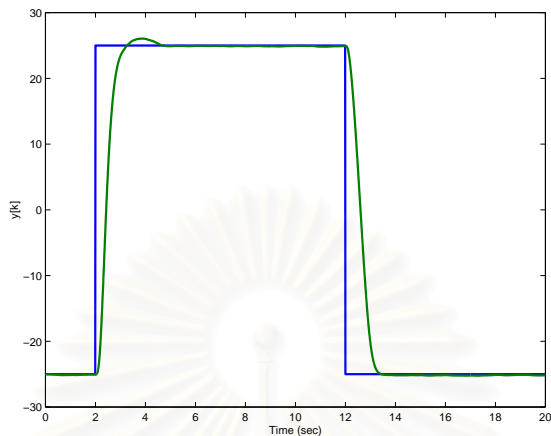
$$K = (C \Sigma C^T + R_o)^{-1} C \Sigma \Phi = [0.226 \quad 0.065 \quad 1.672 \quad -1.201]$$

6.4 ผลการจำลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์ ตอนที่ 2

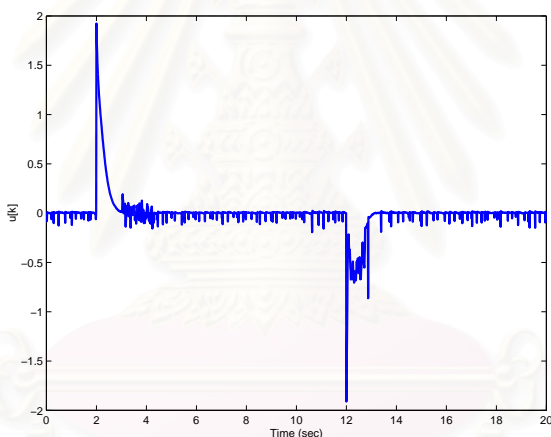
ในการจำลองระบบจะนำตัวควบคุมที่ออกแบบในหัวข้อที่แล้วมาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเปลี่ยนค่าความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณตามค่าในตารางที่ 6.4 ได้ผลการจำลองระบบดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

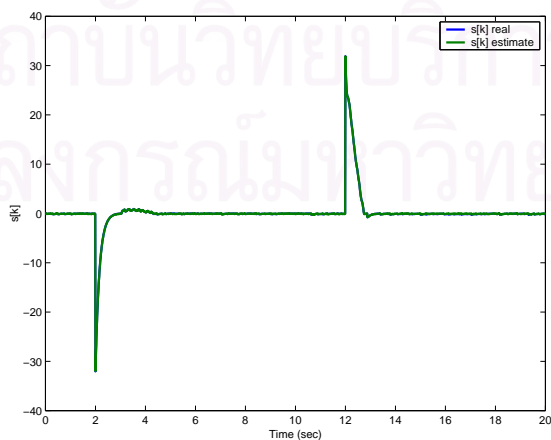
- กรณีที่ 2.1 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 100$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที ระบบมีสภาวะปรกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.22, 6.23 และ 6.24



รูปที่ 6.22: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

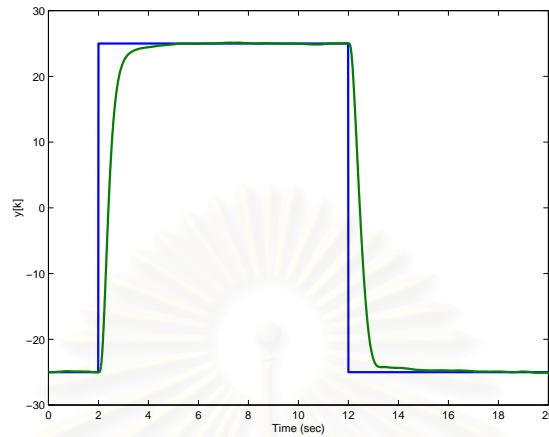


รูปที่ 6.23: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

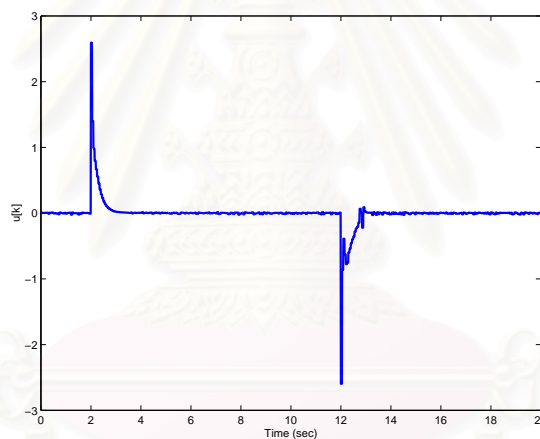


รูปที่ 6.24: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

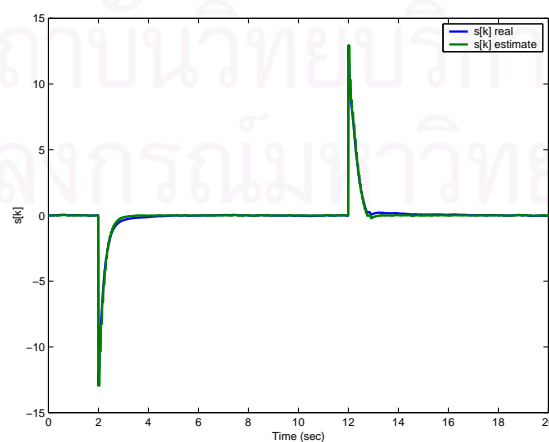
- กรณีที่ 2.2 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 20$ รอบต่อวินาที ระบบมีสภาวะปรกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.25, 6.26 และ 6.27



รูปที่ 6.25: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

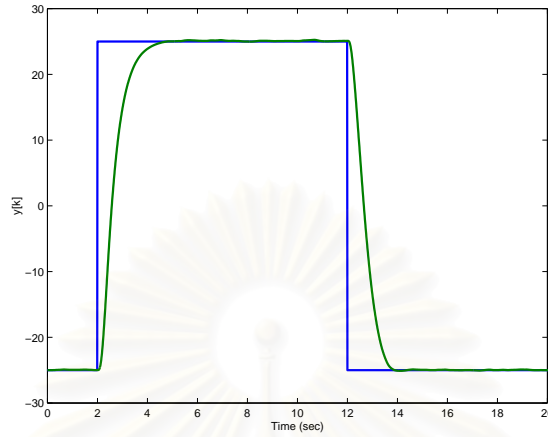


รูปที่ 6.26: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

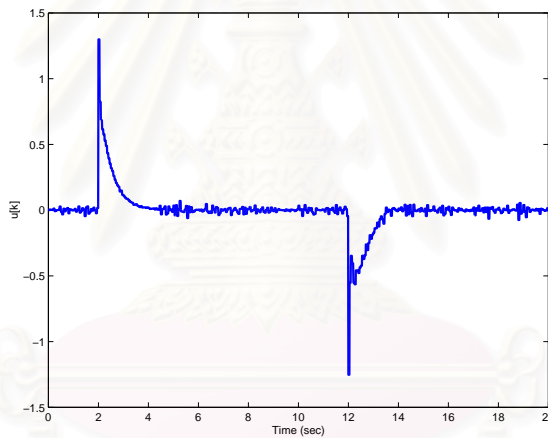


รูปที่ 6.27: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

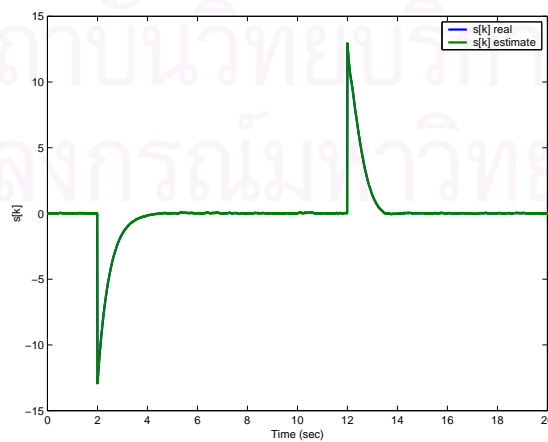
- กรณีที่ 2.3 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที ระบบมีสถานะปรกติจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.28, 6.29 และ 6.30



รูปที่ 6.28: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg



รูปที่ 6.29: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg



รูปที่ 6.30: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

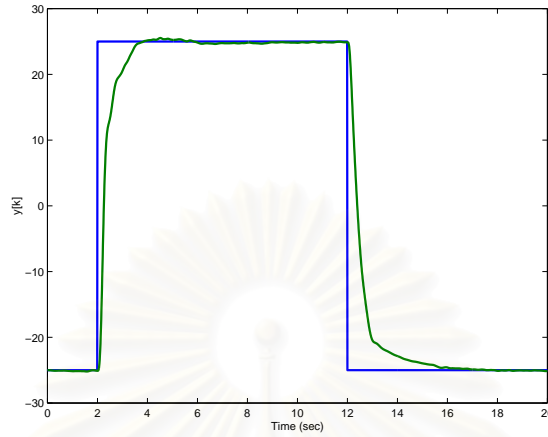
ในการจำลองระบบตอนที่ 2 นี้ได้ทดลองเพิ่มความถี่ในการควบคุมขึ้นจากการจำลองตอนที่ 1 ผลการจำลองที่ได้ยังคงชี้ให้เห็นถึงข้อดีในการสุ่มสัญญาณให้ช้าลง คือทำให้มุมของปลายแขนหุ่นยนต์แกว่งน้อย (พิจารณามุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์กรณีที่ 2.1 จะแกว่งมากกว่าของกรณี 2.2 และ 2.3 เนื่องจากใช้ความถี่ในการควบคุมมากกว่า) และข้อดีในการสุ่มสัญญาณขาออกให้สูงขึ้นเพื่อสังเกตสถานะ (พิจารณาค่าฟังก์ชันสลับ $s[k]$ ของกรณีที่ 2.2 จะมีค่าผิดพลาดมากกว่ากรณี 2.1 และ 2.3 เนื่องจากใช้อัตราการสุ่มสัญญาณขาออกน้อยกว่า ทำให้ตัวควบคุมทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ)

ต่อไปจะจำลองการควบคุมโดยนำตัวควบคุมตัวนี้ ไปจำลองควบคุมระบบแขนกลอ่อนตัวที่มีความไม่แน่นอน คือขนาดของมวลภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.10 กิโลกรัม ไปเป็น 0.05 กิโลกรัม และระยะของมวลภาระเปลี่ยนแปลงจาก 0.45 เมตร ไปเป็น 0.30 เมตร โดยจะจำลองเปลี่ยนอัตราในการส่งสัญญาณควบคุมและอัตราในการสุ่มสัญญาณขาออกมีค่าดังตารางที่ 6.5 จะได้ผลการจำลองระบบดังตารางที่ 6.5

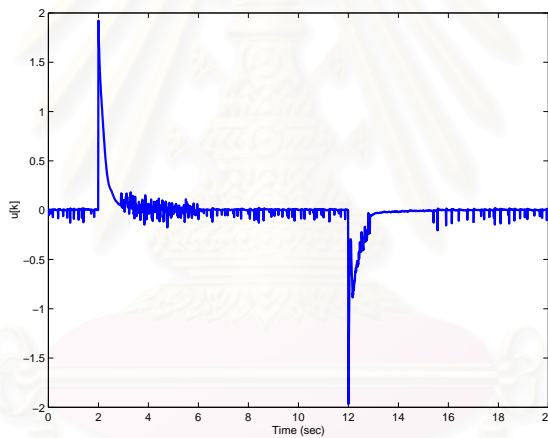
ตารางที่ 6.5: ความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณควบคุม (สภาวะระบบมีความไม่แน่นอน)

กรณี	อัตราการส่งสัญญาณควบคุม f_u	อัตราการสุ่มสัญญาณขาออก f_y
2.4	100 ครั้งต่อวินาที	100 ครั้งต่อวินาที
2.5	20 ครั้งต่อวินาที	20 ครั้งต่อวินาที
2.6	20 ครั้งต่อวินาที	100 ครั้งต่อวินาที

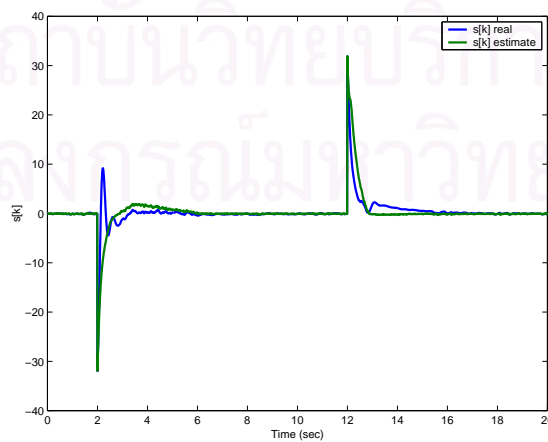
- กรณีที่ 2.4 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 100$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.31, 6.32 และ 6.33



รูปที่ 6.31: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

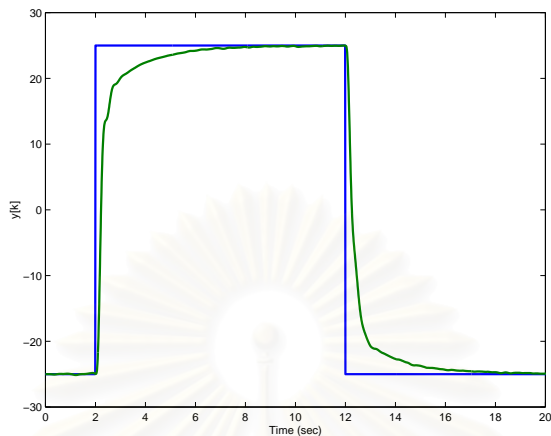


รูปที่ 6.32: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

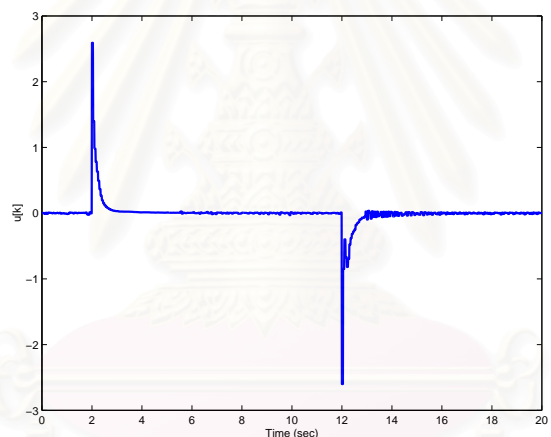


รูปที่ 6.33: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

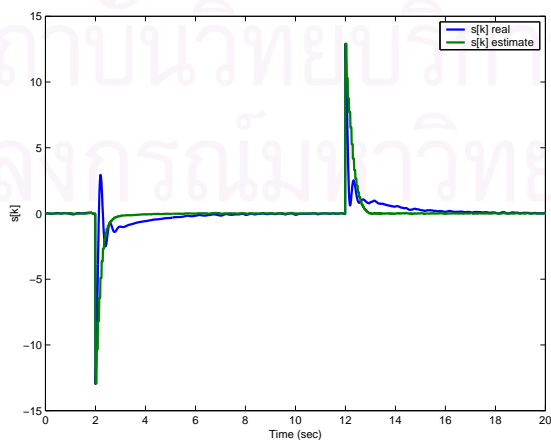
- กรณีที่ 2.5 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 20$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.34, 6.35 และ 6.36



รูปที่ 6.34: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

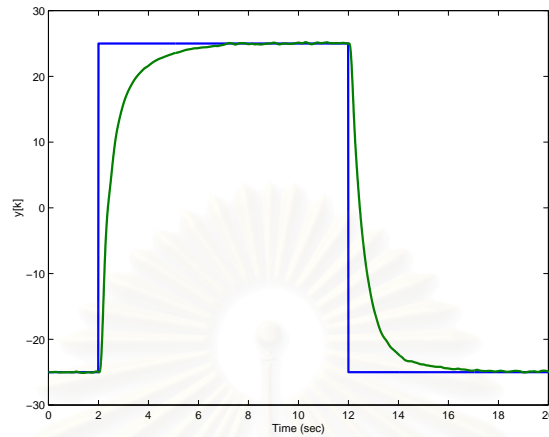


รูปที่ 6.35: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

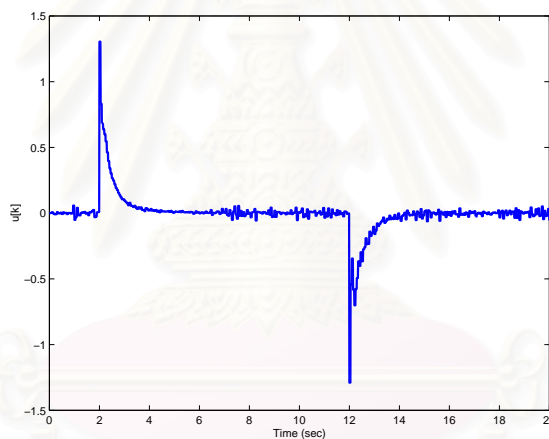


รูปที่ 6.36: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

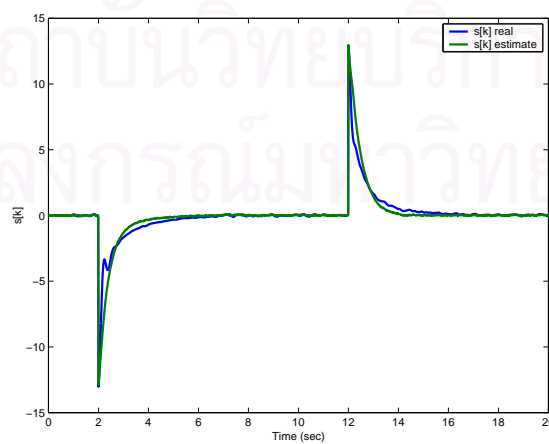
- กรณีที่ 2.6 อัตราการส่งสัญญาณควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที และอัตราการสุ่มสัญญาณขาออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที ระบบมีความไม่แน่นอนจะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.37, 6.38 และ 6.39



รูปที่ 6.37: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg



รูปที่ 6.38: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg



รูปที่ 6.39: ฟังก์ชันสลับ $\sigma x[k]$ $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

ตารางที่ 6.6: สรุปผลการจำลองควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 2

กรณี	f_u (Hz)	f_y (Hz)	m (กิโลกรัม)	l (เมตร)	t_s (วินาที)	u_{\max} (โวลต์)	$(\sum x[k] - \hat{x}[k])/N$
2.1	100	100	0.10	0.45	1.2	1.85	0.0255
2.2	20	20	0.10	0.45	3.1	2.21	0.0491
2.3	20	100	0.10	0.45	2.4	1.27	0.0261
2.4	100	100	0.05	0.30	3.8	1.85	0.0535
2.5	20	20	0.05	0.30	6.1	2.63	0.0860
2.6	20	100	0.05	0.30	5.1	1.28	0.0458

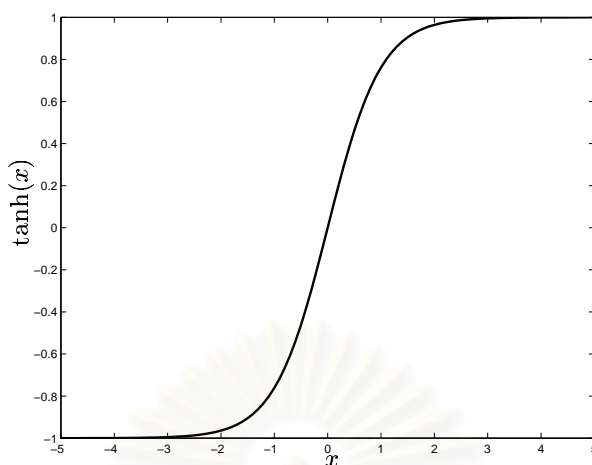
ค่าเฉลี่ยการสังเกตสถานะผิดพลาด $(\sum ||x[k] - \hat{x}[k]||)/N$ ของทุกกรณี จะสัมพันธ์กับสถานะจริงและสถานะที่สังเกตได้ด้วยความถี่ 100 รอบต่อวินาที ตั้งแต่เวลา 0 ถึง 20 วินาที โดย N คือจำนวนครั้งที่สุ่ม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้ระบบจะมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ก็ตาม (กรณี 2.4, 2.5 และ 2.6) ระบบควบคุมก็ยังคงมีเสถียรภาพ เมื่อพิจารณาผลการทดลองกรณี 2.2 และ 2.3 ทั้งคู่ใช้อัตราการส่งสัญญาณควบคุมเท่ากัน กรณี 2.3 ใช้อัตราการส่งสัญญาณขาออกมากกว่า สรุปได้ว่าถ้าอัตราการส่งสัญญาณของตัวสังเกตมีค่าสูงจะทำให้การสังเกตสถานะถูกต้องมากขึ้น สำหรับกรณี 2.1 ซึ่งใช้อัตราการส่งสัญญาณขาออกเท่ากับกรณี 2.3 แต่ในผลการทดลองกลับให้ค่าผิดพลาดการสังเกตสถานะมากกว่าเนื่องจากกรณี 2.1 มีอัตราการส่งสัญญาณควบคุมสูงกว่า (เมื่อสัญญาณควบคุมเปลี่ยนแปลง สถานะของระบบก็จะเคลื่อนที่ อาจทำให้การสังเกตสถานะผิดพลาดได้) จากการทดลองพบว่าค่าผิดพลาดการสังเกตสถานะของกรณี 2.4 มีค่าสูงกว่ากรณีอื่น ๆ มาก เนื่องจากตัวควบคุมที่ออกแบบมีความผิดพลาดในแบบจำลองมาก และสัญญาณควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงบ่อย จะส่งผลให้มีการประมาณผิดพลาดมากขึ้น

จากผลการจำลองควบคุมระบบพบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบได้ดี ต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวไปทดลองควบคุมระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว แต่เนื่องจากขีดทดลองแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีแรงเสียดทานต้านการหมุน เทียบเป็นสัญญาณแรงดันของมอเตอร์ได้ประมาณ ± 0.2 โวลต์ ดังนั้นโปรแกรมควบคุมจึงมีการใส่ฟังก์ชันส่วนกลับขอบเขตไร้ผลตอบสนอง (inverse deadzone) กำหนดดังนี้

$$v_i = v + 0.2 \tanh(hv)$$

เมื่อ v คือแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากกฎการควบคุม, v_i คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้มอเตอร์ขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ และ h คือค่าพารามิเตอร์กำหนดความชัน ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้ $h = 1$ ฟังก์ชัน $\tanh(x)$ แสดงดังนี้

รูปที่ 6.40: ฟังก์ชัน $\tanh(x)$

6.5 ผลการทดลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์

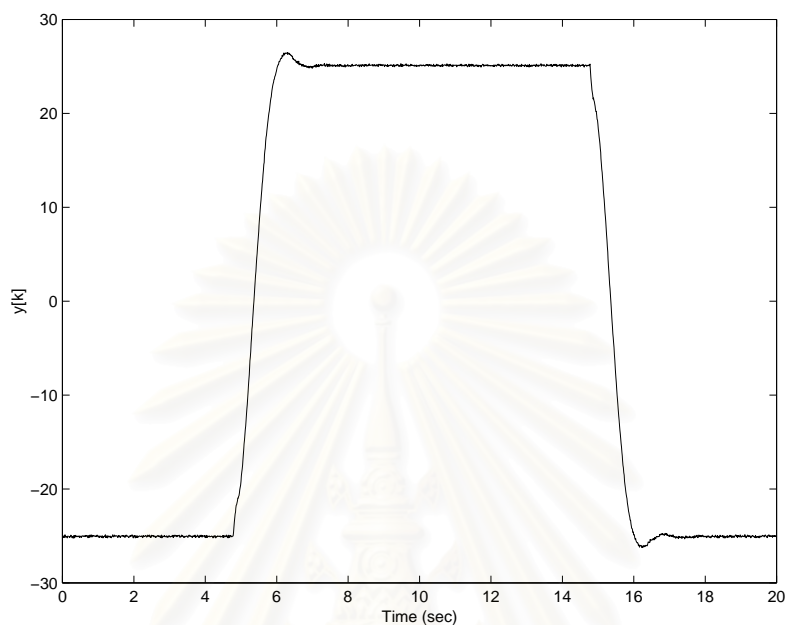
เนื่องจากความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม 2 รอบต่อวินาที ที่ออกแบบไว้ในตอนที่ 1 นั้นมีค่าต่ำเกินไป เมื่อนำตัวควบคุมไปใช้ควบคุมระบบจริง จะทำให้ปลายแขนหุ่นยนต์แกว่ง ดังนั้นในการทดลองจะกำหนดค่าความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมให้มีค่าสูงขึ้น ดังที่ออกแบบไว้ในตอนที่ 2 ความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมและความถี่ในการสุ่มสัญญาณขาออกมีค่าดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.7: ตารางการทดลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์

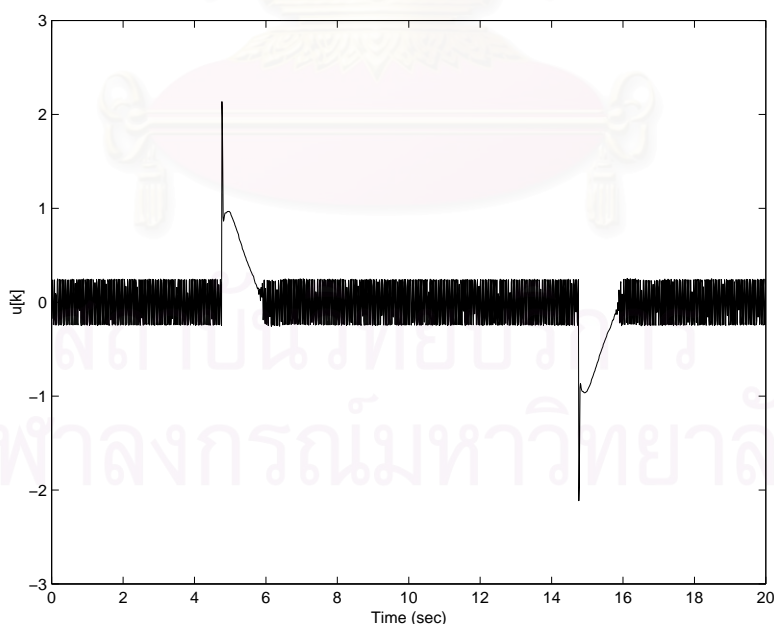
กรณีที่	f_u (Hz)	f_y (Hz)	m (กิโลกรัม)	l (เมตร)
3.1	100	100	0.10	0.45
3.2	20	20	0.10	0.45
3.3	20	100	0.10	0.45
3.4	10	100	0.10	0.45
3.5	100	100	0.05	0.30
3.6	20	20	0.05	0.30
3.7	20	100	0.05	0.30
3.8	10	100	0.05	0.30

โดยในการควบคุมระบบจริงจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แต่ละความถี่จากการจำลองระบบตอนที่ 1 และตอนที่ 2 ได้ผลการควบคุมดังต่อไปนี้

- กรณีที่ 3.1 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 100$ รอบต่อวินาที, อัตราสุมสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลถาระ $p = 0.45$ เมตร และมวลถาระ $m_t = 0.10$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.41 และ 6.42

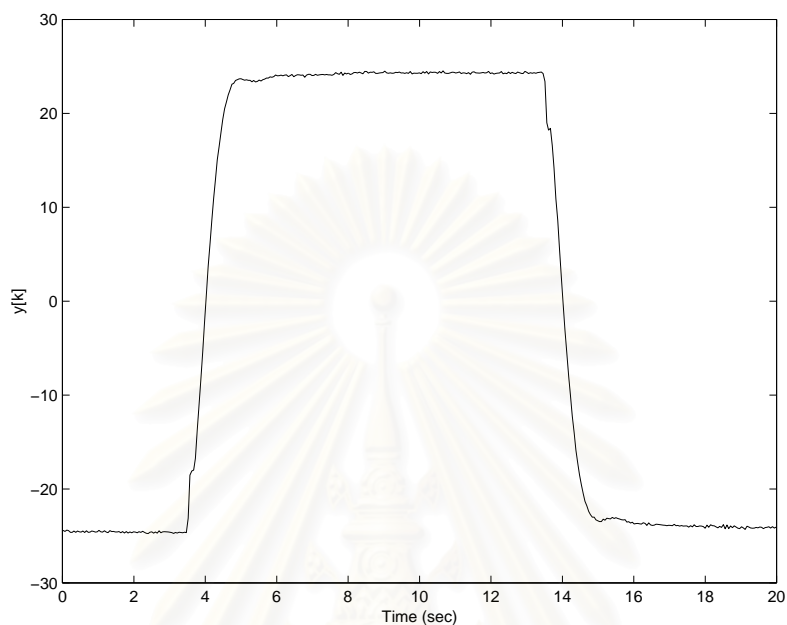


รูปที่ 6.41: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

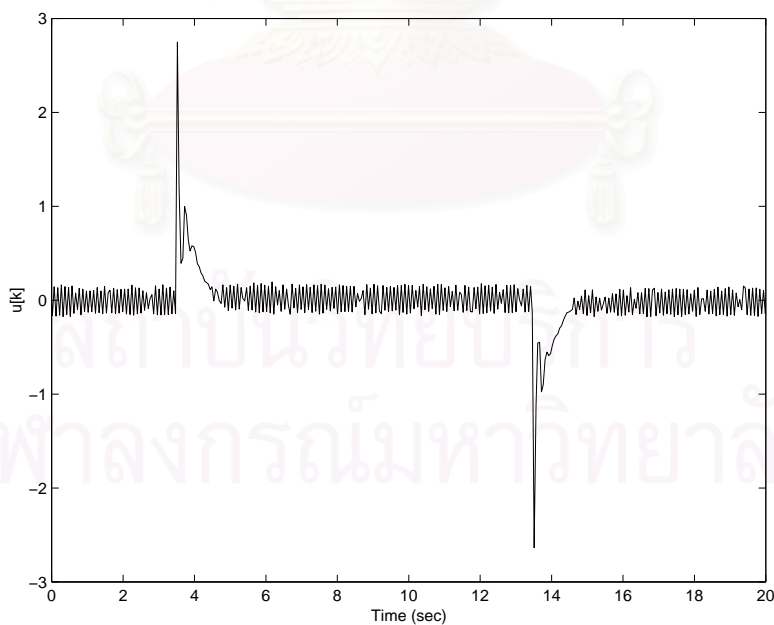


รูปที่ 6.42: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

- กรณีที่ 3.2 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, อัตราสุมสัญญาณออก $f_y = 20$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลถาระ $p = 0.45$ เมตร และมวลถาระ $m_t = 0.10$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.43 และ 6.44

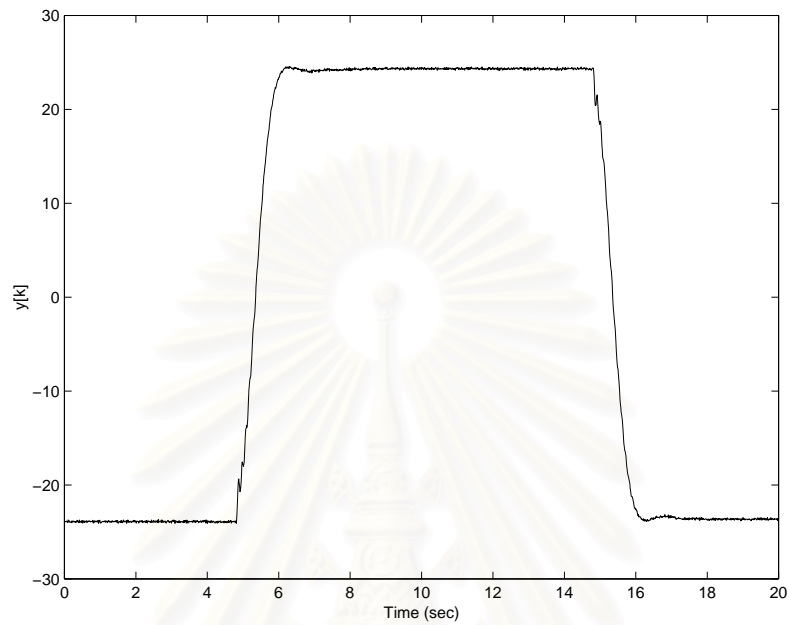


รูปที่ 6.43: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

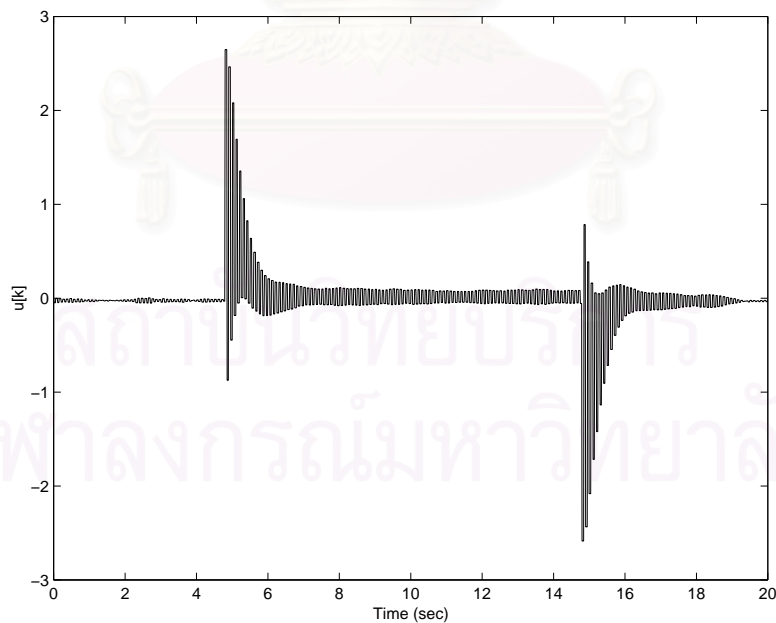


รูปที่ 6.44: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

- กรณีที่ 3.3 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, อัตราสุมสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลถาระ $p = 0.45$ เมตร และมวลถาระ $m_t = 0.10$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.45 และ 6.46

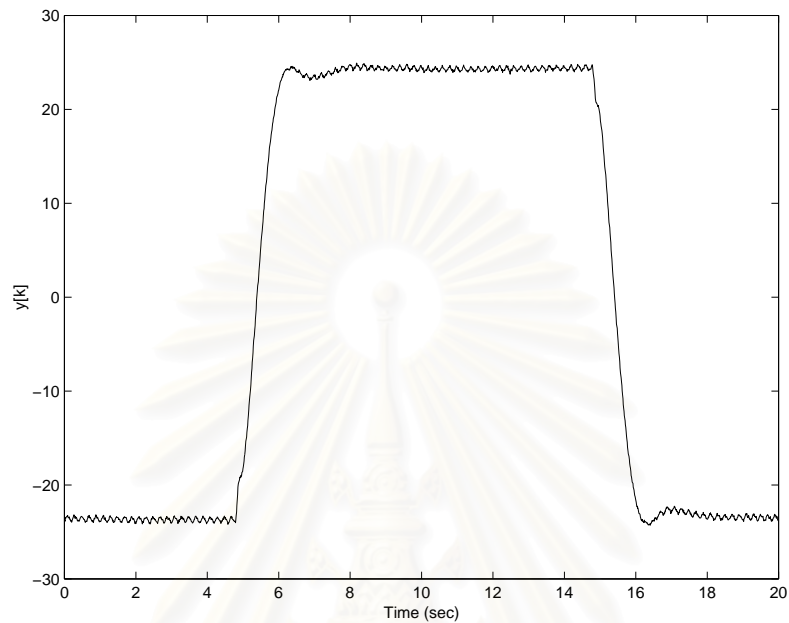


รูปที่ 6.45: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

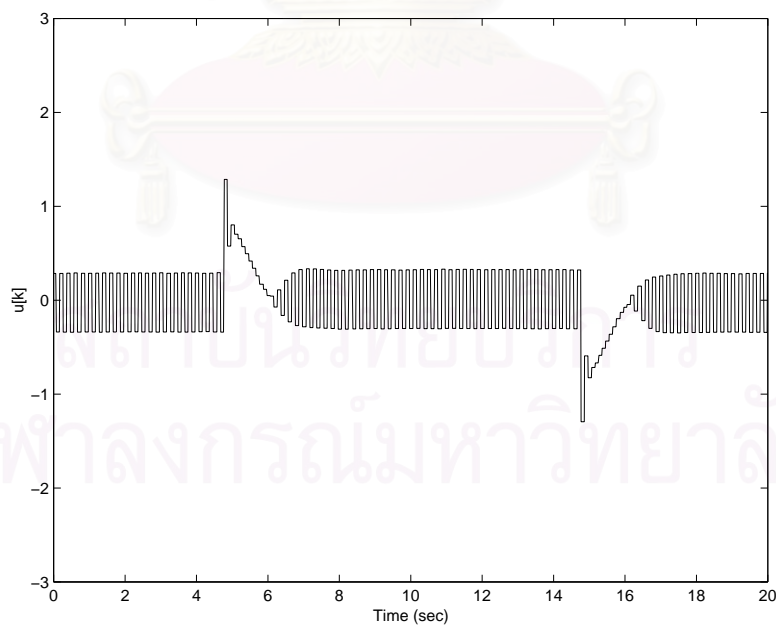


รูปที่ 6.46: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

- กรณีที่ 3.4 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, อัตราสุมสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลภาระ $p = 0.45$ เมตร และมวลภาระ $m_t = 0.10$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.47 และ 6.48

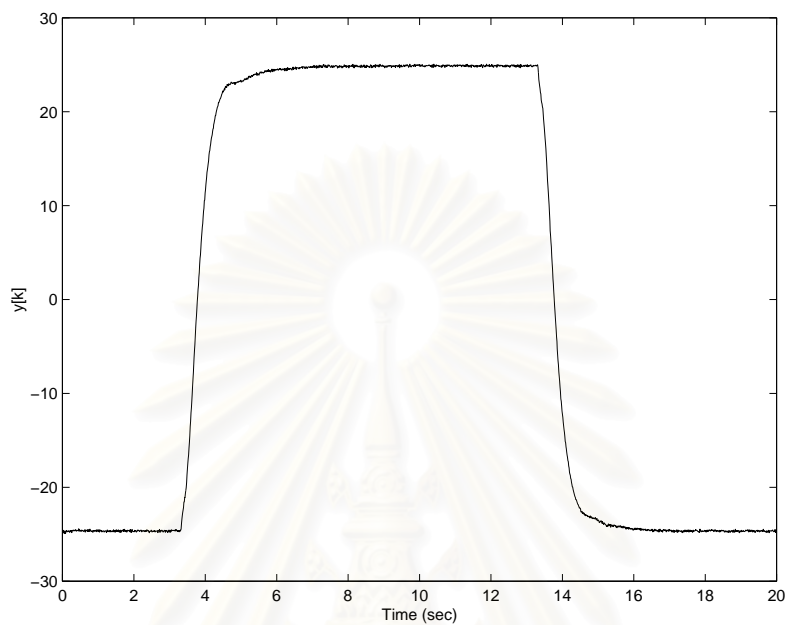


รูปที่ 6.47: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

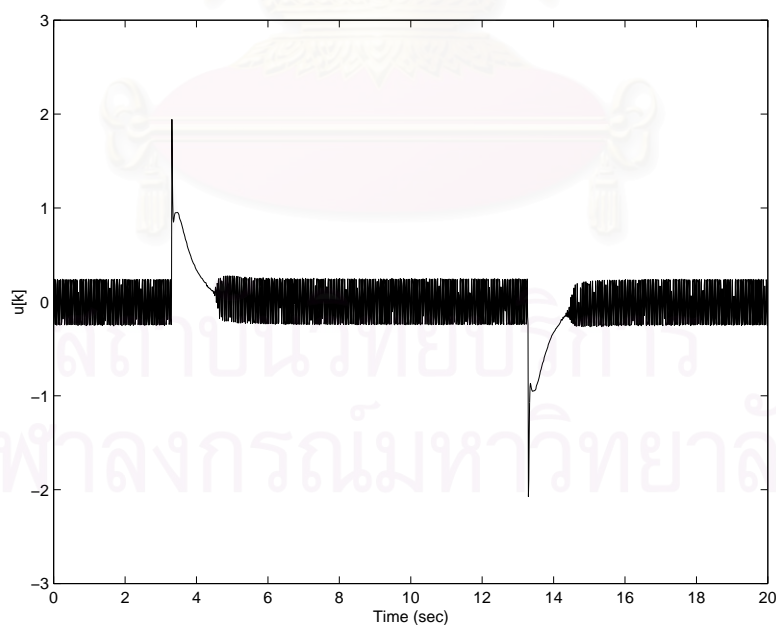


รูปที่ 6.48: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.45$ m, $m_t = 0.10$ kg

- กรณีที่ 3.5 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 100$ รอบต่อวินาที, อัตราสุ่มสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลเกาะ $p = 0.30$ เมตร และมวลเกาะ $m_t = 0.05$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.49 และ 6.50

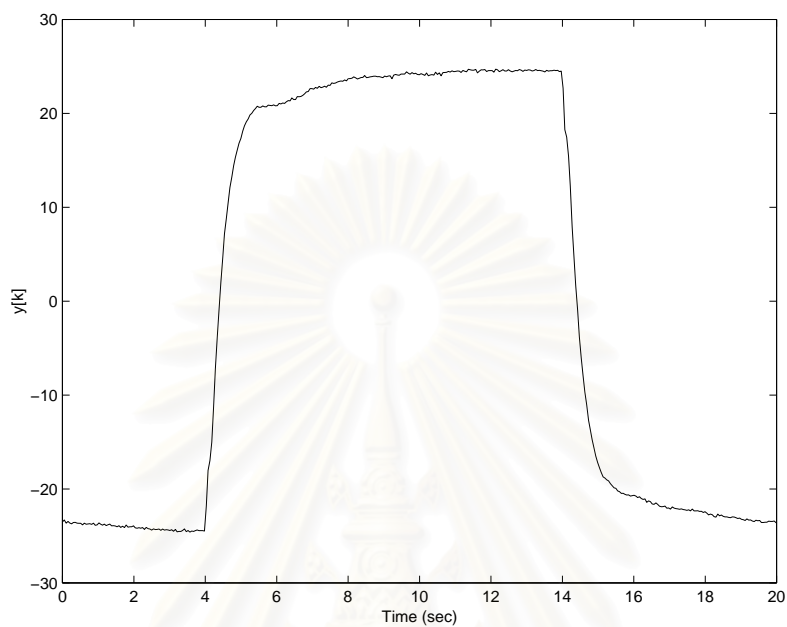


รูปที่ 6.49: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

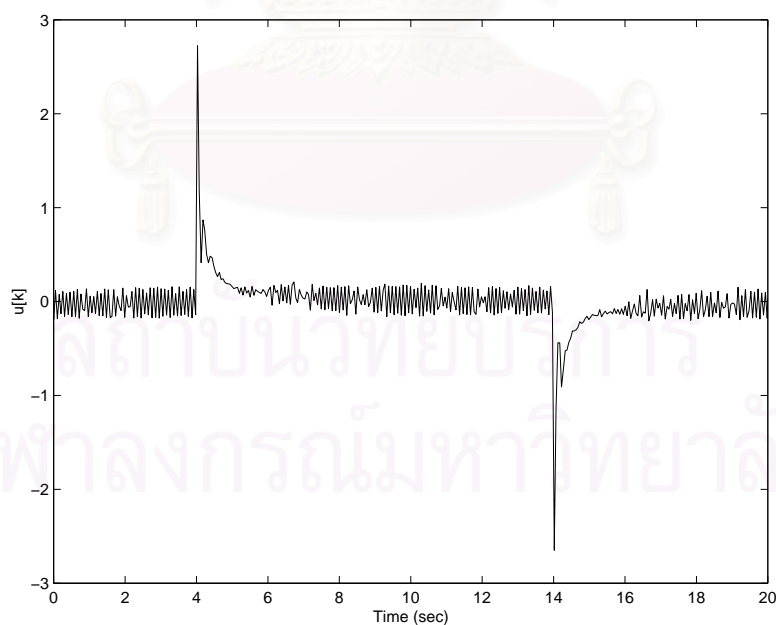


รูปที่ 6.50: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 100$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

- กรณีที่ 3.6 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, อัตราสุ่มสัญญาณออก $f_y = 20$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลเกาะ $p = 0.30$ เมตร และมวลเกาะ $m_t = 0.05$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.51 และ 6.52

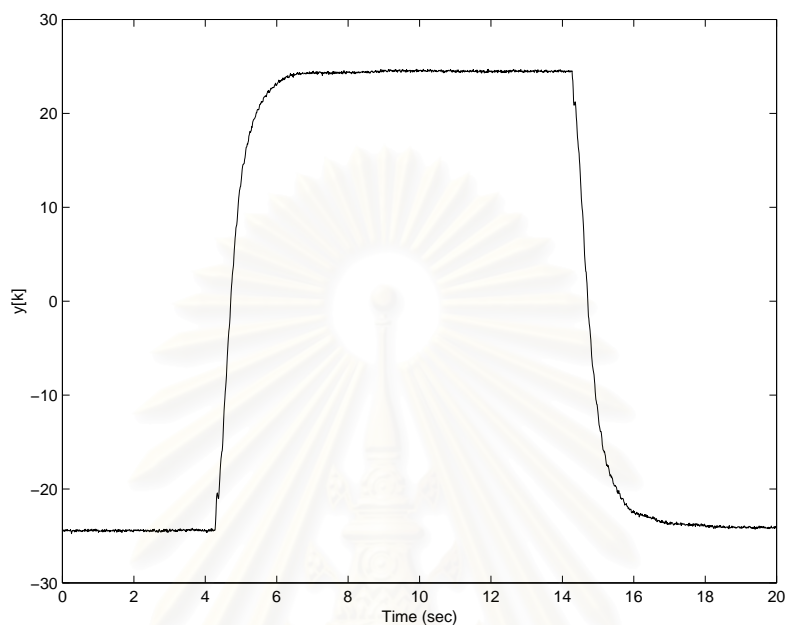


รูปที่ 6.51: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

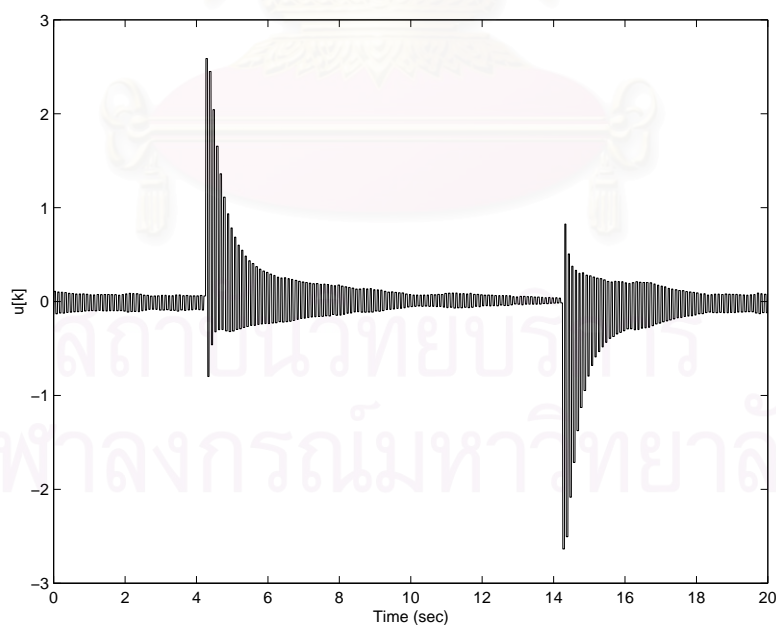


รูปที่ 6.52: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 20$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

- กรณีที่ 3.7 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, อัตราสุ่มสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลถ่วง $p = 0.30$ เมตร และมวลถ่วง $m_t = 0.05$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.53 และ 6.54

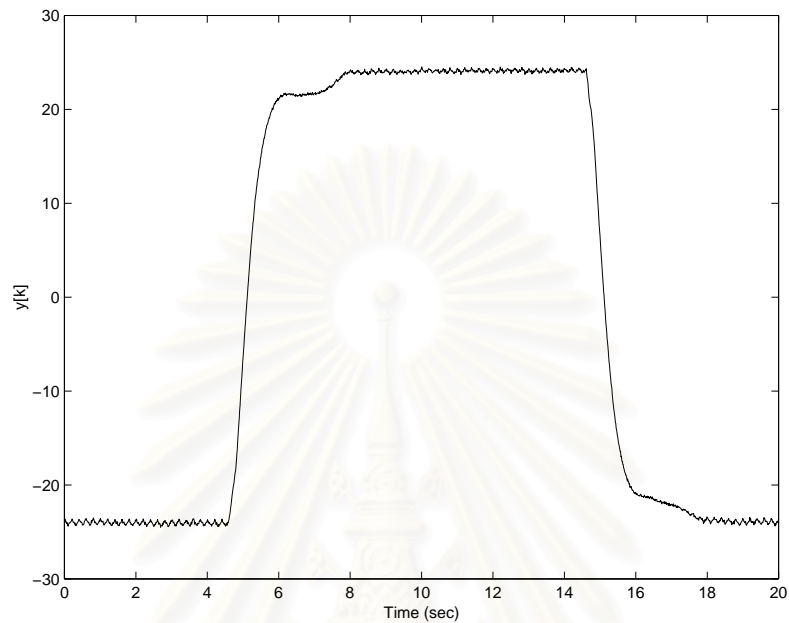


รูปที่ 6.53: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

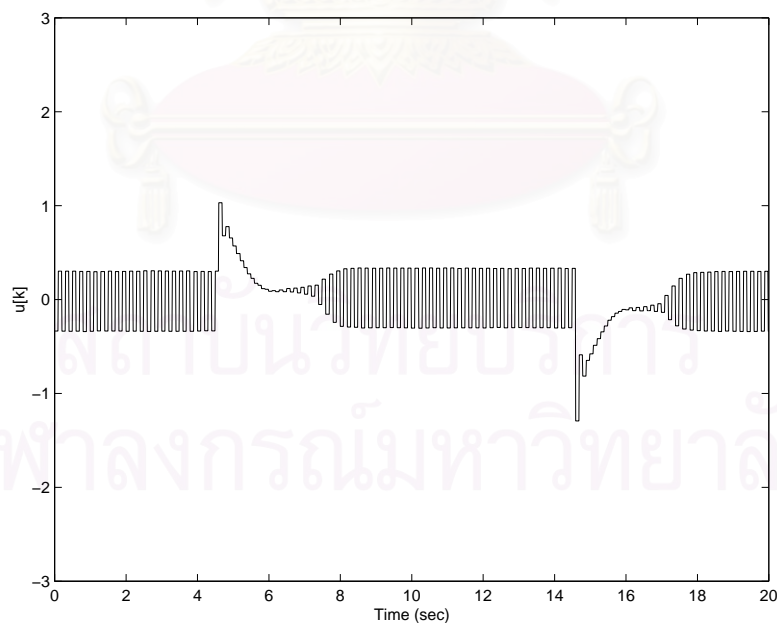


รูปที่ 6.54: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 20$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

- กรณีที่ 3.8 เมื่อควบคุมระบบด้วย $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, อัตราสุ่มสัญญาณออก $f_y = 100$ รอบต่อวินาที, ระยะมวลภาวะ $p = 0.30$ เมตร และมวลภาวะ $m_t = 0.05$ กิโลกรัม จะได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 6.55 และ 6.56



รูปที่ 6.55: มุมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ (องศา) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg



รูปที่ 6.56: สัญญาณควบคุม (โวลต์) $f_u = 10$ Hz, $f_y = 100$ Hz, $p = 0.30$ m, $m_t = 0.05$ kg

ตารางที่ 6.8: สรุปผลการทดลองควบคุมระบบที่ภาวะการทำงานต่างๆ ตอนที่ 2

กรณี	f_u (Hz)	f_y (Hz)	m (กิโลกรัม)	l (เมตร)	t_s (วินาที)	u_{max} (โวลต์)
3.1	100	100	0.10	0.45	2.3	2.23
3.2	20	20	0.10	0.45	2.6	2.76
3.3	20	100	0.10	0.45	2.3	2.67
3.4	10	100	0.10	0.45	2.6	1.68
3.5	100	100	0.05	0.30	2.6	2.72
3.6	20	20	0.05	0.30	6.2	2.63
3.7	20	100	0.05	0.30	2.4	2.63
3.8	10	100	0.05	0.30	3.3	1.19

จากการควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์จริงพบว่า ผลการควบคุมที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลการจำลองระบบ ยกเว้นกรณีที่ควบคุมด้วยความถี่ 10 รอบต่อวินาที (กรณี 3.4 และ 3.8) โดยปลายของแขนหุ่นยนต์จะมีการสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุม เนื่องจากอัตราการส่งสัญญาณควบคุมต่ำเกินไป ส่วนในกรณีอื่นๆ ในสภาวะปรกติตัวควบคุมสามารถขับให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังค่าอ้างอิงได้ กรณีที่ 3.2 จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังค่าอ้างอิงนานกว่ากรณีอื่นๆ (กรณีที่ 3.1 และ 3.3) เล็กน้อย เมื่อพิจารณาผลการควบคุมระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าสู่ (กรณีที่ 3.5, 3.6 และ 3.7) พบว่าตัวควบคุมจะยังคงสามารถควบคุมสถานะของระบบให้เคลื่อนที่ไปยังค่าอ้างอิงได้ แต่จะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังค่าอ้างอิงนานกว่ากรณีระบบที่สภาวะปรกติ (กรณีที่ 3.1, 3.2 และ 3.3) และสังเกตว่าเมื่อเมื่อส่งสัญญาณขาออกด้วยความถี่ 20 รอบต่อวินาทีและระบบมีความไม่แน่นอนกรณีที่ 3.6 ใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าอ้างอิงนานกว่าระบบสภาวะปรกติกรณี 3.2 มาก

จากการทดลองออกแบบพารามิเตอร์ของฟังก์ชันส่วนกลับขอบเขตไร้ผลตอบสนอง (inverse dead-zone) เพื่อแก้ปัญหาความผิดของระบบแขนหุ่นยนต์

$$v_i = v + 0.2 \tanh(hv)$$

พบว่าไม่ควรกำหนดค่าความชัน h มากจนเกินไป เพราะจะทำให้สถานะของระบบในระหว่างการลื่นไหลไม่เข้าสู่จุดสมดุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.6 กรณีพิเศษ ศึกษาผลจากสัญญาณควบคุมความถี่สูง

เพื่อศึกษาผลจากสัญญาณความถี่สูงที่อาจไปกระตุ้นระบบอันดับสูงที่ไม่ได้ออกแบบหรือประมาณไว้ของระบบจริง โดยในการออกแบบจะพิจารณาความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 10$ และ $f_u = 20$ รอบต่อวินาที โดยจะทดลองออกแบบตัวควบคุมสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวที่ประมาณแขนหุ่นกลเป็น 1 และ 3 ท่อน จะได้สถานะของระบบขนาด 4 และ 8 สถานะ ตามลำดับ สมการสถานะของระบบแสดงดังนี้ (เมื่อประมาณแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวเป็น N ท่อน) [15]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \quad , x(t) = [\theta \quad d \quad \dot{\theta} \quad \dot{d}]^T\end{aligned}$$

โดยที่ y คือ ตำแหน่งปลายแขนกล และ θ กับ d มีขนาด 1×1 และ $N \times 1$ ตามลำดับ และ

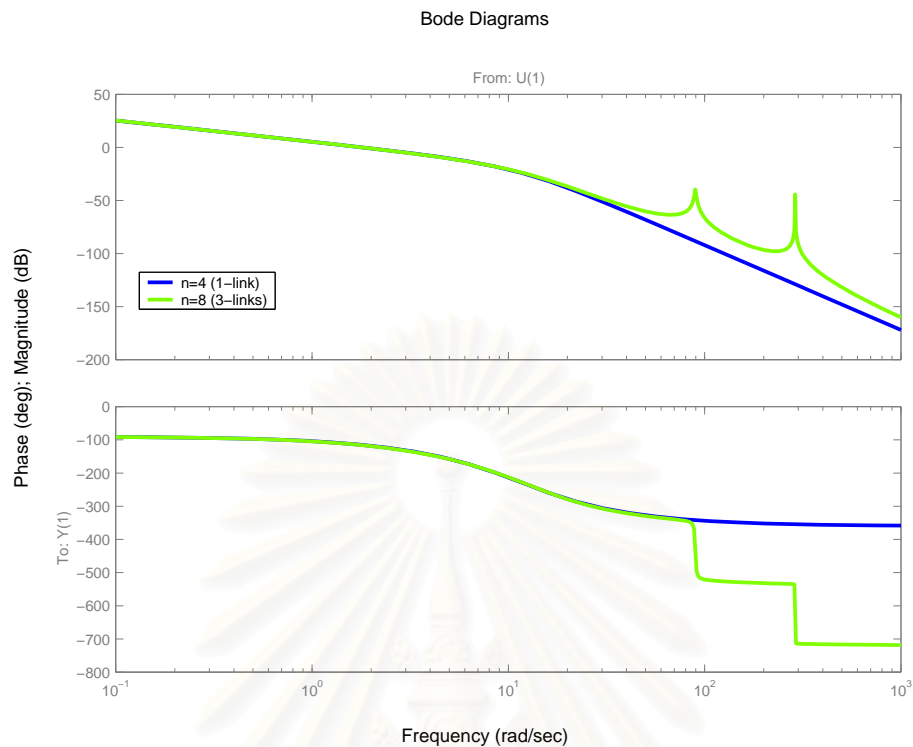
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0_{1 \times N} & 1 & 0_{1 \times N} \\ 0 & 0_{1 \times N} & 0 & I_{N \times N} \\ 0 & \frac{1}{I_e} \bar{M}^T \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \tilde{K} - \left\{ \frac{1}{I_e^2} \bar{M}^T \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \bar{M} + \frac{1}{I_e} \right\} \frac{K_m^2 K_g^2}{R_a} & 0 \\ 0 & - \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \tilde{K} & \frac{1}{I_e} \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \bar{M} \frac{K_m^2 K_g^2}{R_a} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{N \times 1} \\ \left\{ \frac{1}{I_e^2} \bar{M}^T \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \bar{M} + \frac{1}{I_e} \right\} \frac{K_m K_g}{R_a} \\ - \frac{1}{I_e} \left[\tilde{M} - \frac{\bar{M}\bar{M}^T}{I_e} \right]^{-1} \bar{M} \frac{K_m K_g}{R_a} \end{bmatrix}$$

$$C = \left[1 \quad 0_{1 \times N-1} \quad \frac{1}{L} \quad 0_{1 \times N+1} \right]$$

โดยที่ R_a คือ ความต้านทานอาร์เมเจอร์
 K_m คือ ค่าคงตัวของแรงบิดซึ่งเท่ากับค่าคงตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
 K_g คือ อัตราส่วนเกียร์
 และกำหนดให้ $I_e = I_h + \hat{I}^T \tilde{M} \hat{I}$
 $\bar{M} = \tilde{M} \hat{I}$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆกำหนดให้มวลถวามีขนาด 0.1 กิโลกรัม และระยะมวลถวาระ 0.45 เมตร โดยประมาณแขนกลเป็น 1 และ 3 ท่อน ทำไปวาดกราฟโบเด (Bode plot) เปรียบเทียบกันจะเห็นว่าระบบแขนกลอ่อนตัวจะตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมความถี่สูง ดังรูปที่ (6.57)



รูปที่ 6.57: กราฟโบเดเปรียบเทียบแบบจำลองระบบที่ประมาณแขนกลเป็น 1 และ 3 ท่อน

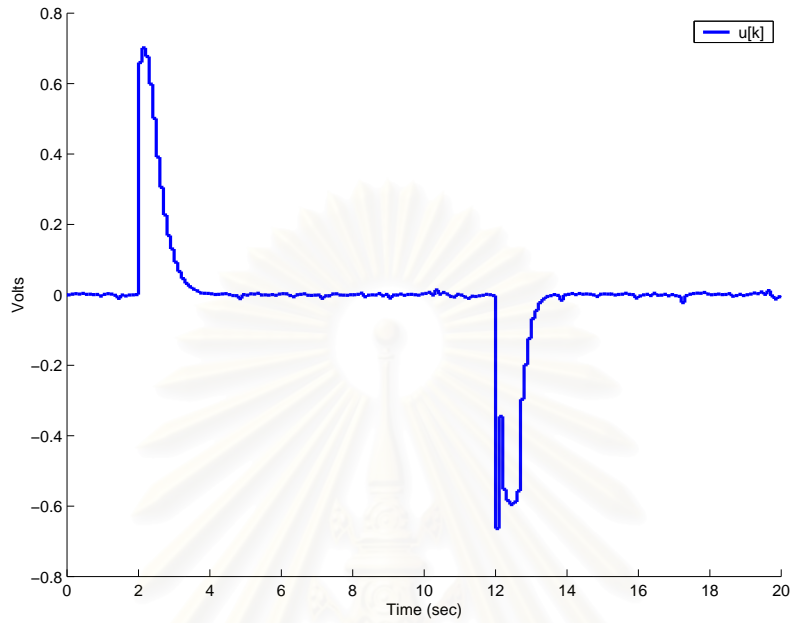
จากรูปพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประมาณระบบแขนหุ่นยนต์เป็น 3 ท่อนจะมีส่วนที่ตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงปรากฏขึ้นมา หรือกล่าวได้ว่าการประมาณแขนหุ่นยนต์เป็น 1 ท่อนนั้น ได้ละเลยระบบอันดับสูงดังกล่าวเอาไว้

ต่อไปจะเป็นการจำลองระบบแขนหุ่นยนต์แยกเป็นกรณีต่างๆ เพื่อศึกษาผลจากสัญญาณควบคุมความถี่สูง ดังตารางต่อไปนี้

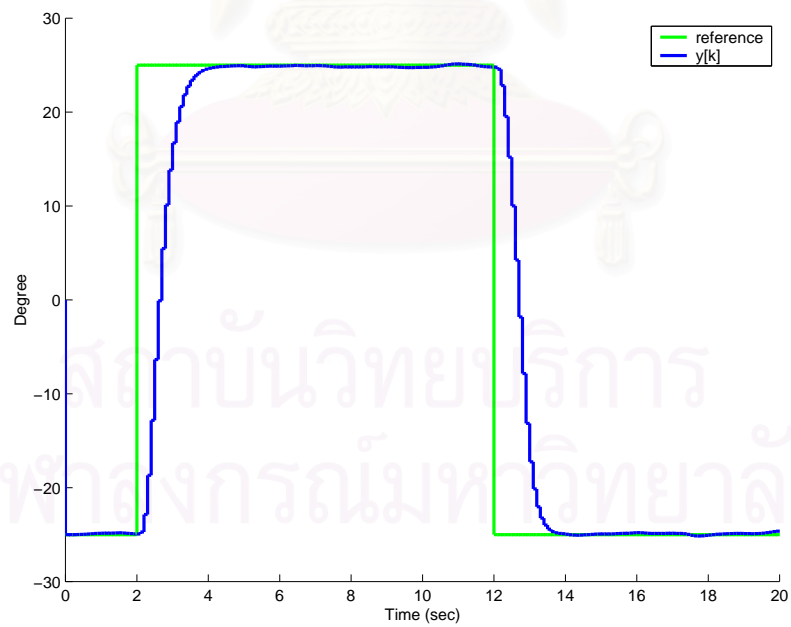
ตารางที่ 6.9: การจำลองระบบที่ความถี่ในการควบคุมต่างๆ

กรณีที่	f_u (รอบต่อวินาที)	ประมาณแขนกลเป็น (ท่อน)	ระบบอันดับ
4.1	10	1	4
4.2	10	3	8
4.3	20	1	4
4.4	20	3	8

- กรณีที่ 4.1 กำหนดค่าการควบคุม $f_u = 10$ รอบต่อวินาที ควบคุมระบบที่ประมาณแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวเป็น 1 ท่อน (ระบบอันดับ 4) แสดงดังรูปที่ (6.58) และ (6.59)

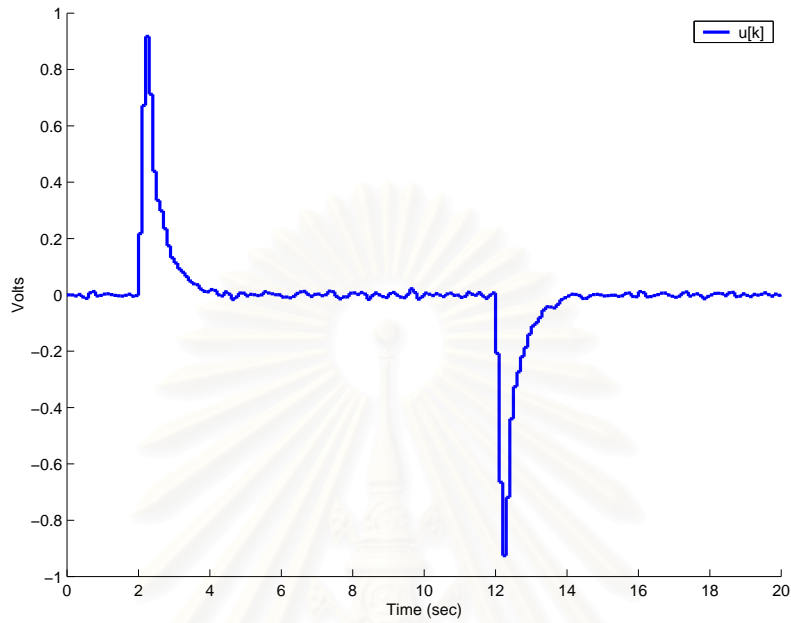


รูปที่ 6.58: สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4

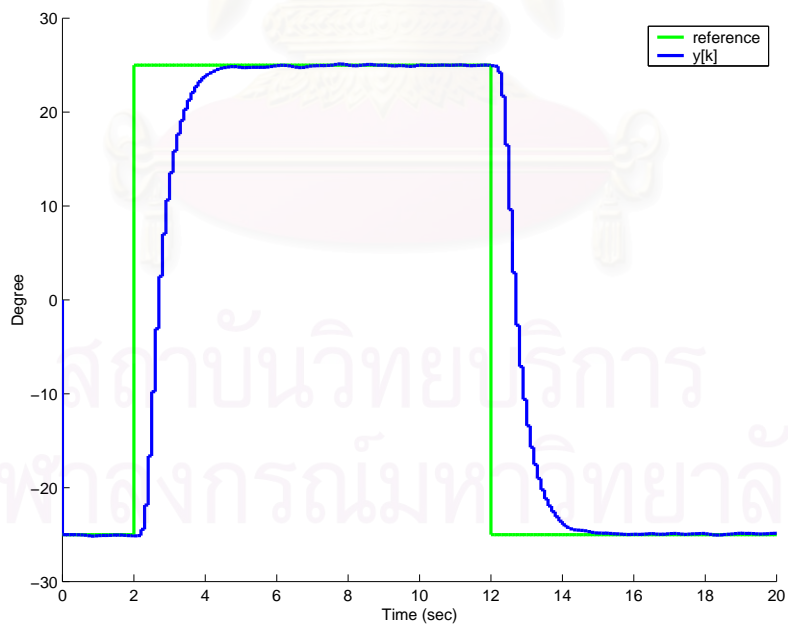


รูปที่ 6.59: มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4

- กรณีที่ 4.2 กำหนดค่าการควบคุม $f_u = 10$ รอบต่อวินาที ควบคุมระบบที่ประมาณแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวเป็น 3 ท่อน (ระบบอันดับ 8) แสดงดังรูปที่ (6.60) และ (6.61)



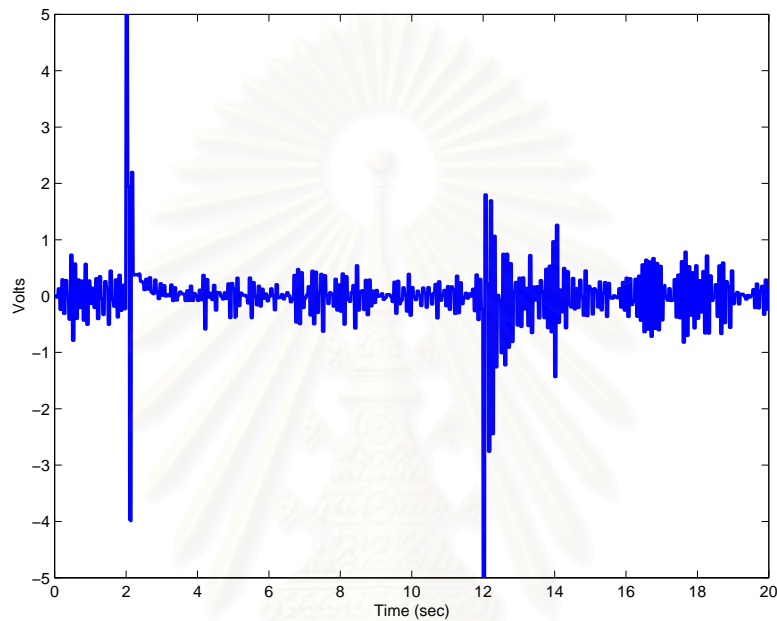
รูปที่ 6.60: สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8



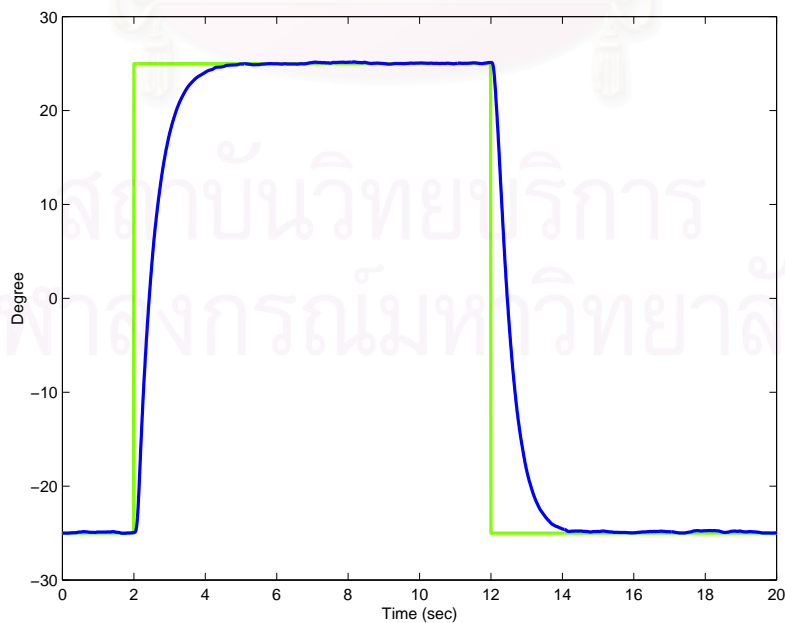
รูปที่ 6.61: มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 10$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8

จากผลการจำลองระบบที่คาบการควบคุม $f_u = 10$ วินาที ยังไม่เห็นผลจากสัญญาณควบคุมความถี่สูงทั้งในระบบอันดับ 4 และระบบอันดับ 8 ดังนั้นจึงทดลองจำลองระบบด้วยอัตราควบคุมที่สูงขึ้น ($f_u = 20$ รอบต่อวินาที)

- กรณีที่ 4.3 กำหนดคาบการควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที ควบคุมระบบที่ประมาณแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวเป็น 1 ท่อน (ระบบอันดับ 4) แสดงดังรูปที่ (6.62) และ (6.63)

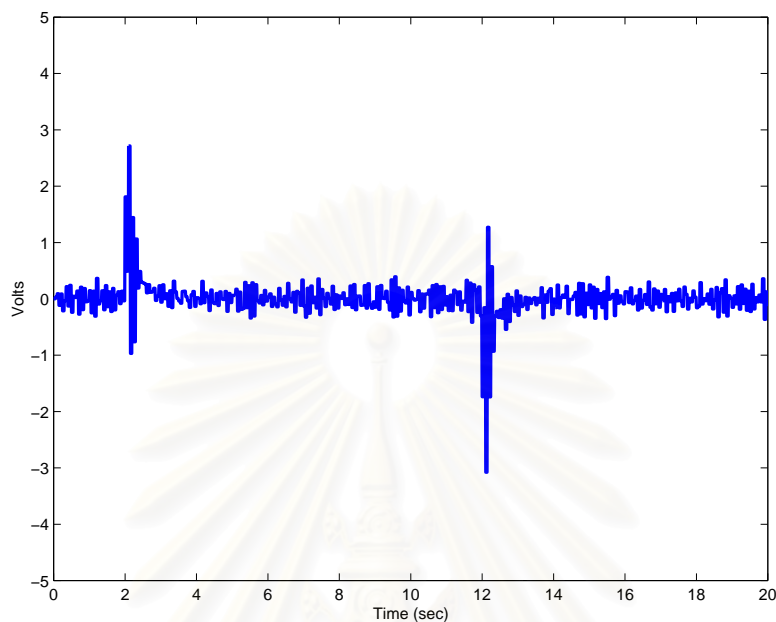


รูปที่ 6.62: สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4

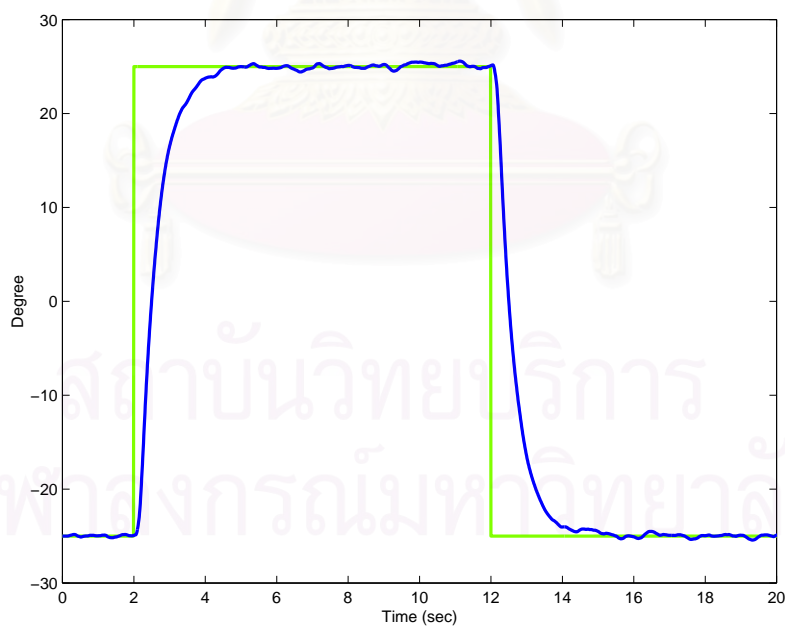


รูปที่ 6.63: มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 4

- กรณีที่ 4.4 กำหนดค่าการควบคุม $f_u = 20$ รอบต่อวินาที ควบคุมระบบที่ประมาณแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวเป็น 3 ท่อน (ระบบอันดับ 8) แสดงดังรูปที่ (6.64) และ (6.65)



รูปที่ 6.64: สัญญาณควบคุมระบบ $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8



รูปที่ 6.65: มุมที่ปลายแขนกล $f_u = 20$ รอบต่อวินาที, สถานะของระบบ = 8

ตารางที่ 6.10: แสดงความผิดพลาดของสัญญาณขาออกที่สถานะอยู่ตัว

กรณี	f_u (รอบต่อวินาที)	จำนวนท่อน	ระบบอันดับ	u_{\max} (โวลต์)	$\Sigma(y_k - y_r)^2, t = [5, 12]$
4.1	10	1	4	0.73	0.00009
4.2	10	3	8	0.98	0.00025
4.3	20	1	4	5.00	0.00040
4.4	20	3	8	2.91	0.00661

จากผลการจำลองสรุปผลได้ดังตารางที่ (6.10) จากผลการจำลองเห็นได้ว่าที่สถานะอยู่ตัว ($t = [5, 12]$ วินาที) ปลายของแกนกล่อ่นตัวจะเกิดการสั่นมากขึ้นเมื่อสัญญาณควบคุมมีความถี่สูงขึ้น (จาก $f_u = 10$ ไปเป็น $f_u = 20$ รอบต่อวินาที) และยิ่งส่งผลมากเมื่อระบบมีอันดับสูงขึ้น (จากระบบอันดับ 4 ไปเป็นอันดับ 8) ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมสำหรับนำไปใช้งานจริงจึงควรคำนึงถึงความถี่ที่ใช้ในการควบคุมด้วย ควรให้มีค่าไม่สูงเกินไป เพื่อหลีกเลี่ยงผลตอบสนองจากระบบอันดับสูงที่ไม่ได้ออกแบบหรือประมาณไว้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เสนอการใช้ตัวควบคุมโครงสร้างแปรผันได้แบบเวลาไม่ต่อเนื่องควบคุมระบบแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอให้ใช้การควบคุมชนิดนี้ได้กับระบบที่มีความแน่นอนแบบสอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่เท่านั้น แต่จากบทพิสูจน์ขอบเขตเสถียรภาพในวิทยานิพนธ์นี้ ได้พิสูจน์ว่าตัวควบคุมนี้สามารถใช้ได้กับระบบที่มีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ด้วย โดยจะเกิดเป็นขอบเขตเสถียรภาพขึ้น ในการออกแบบ ได้ทดลองควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์ทั้งที่สภาวะการทำงานปรกติและสภาวะมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมสามารถขับให้สถานะของระบบเคลื่อนที่ไปยังค่าอ้างอิงได้ถึงแม้ระบบจะมีความไม่แน่นอนแบบไม่สอดคล้องเงื่อนไขการเข้าคู่ และได้ทดลองออกแบบตัวควบคุมที่มีอัตราการส่งสัญญาณควบคุมและอัตราการสุ่มสัญญาณควบคุมต่างกัน จากผลการจำลองและทดลองควบคุมสรุปได้ว่า ถ้าตัวสังเกตสถานะมีอัตราการสุ่มสัญญาณขาออกมากขึ้นก็จะสามารถสังเกตสถานะได้ดีขึ้น เมื่อนำสถานะที่ประมาณได้นี้ไปออกแบบสัญญาณควบคุมจะทำให้ตัวควบคุมสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และถ้ากำหนดความถี่ในการส่งสัญญาณควบคุมให้ต่ำลงจะช่วยลดผลจากสัญญาณควบคุมความถี่สูง (chattering) ได้ โดยเมื่อลดความถี่ในการควบคุมมาแล้วจะยังคงให้ผลการควบคุม (เวลาเข้าถึงค่าอ้างอิง) ใกล้เคียงกันอยู่

7.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

จากผลการจำลองควบคุมที่ความถี่ต่างๆพบว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมให้สถานะเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าอ้างอิงได้ดี แต่เมื่อนำตัวควบคุมมาประยุกต์ใช้จริงพบว่าในบางความถี่การควบคุม ตัวควบคุมจะขับให้สถานะของระบบให้เคลื่อนที่ไปสู่ค่าอ้างอิงทั้งสอง (± 25 องศา) ไม่ได้ตรงตามต้องการ เนื่องจากการควบคุมที่ใช้การป้อนกลับสถานะจะมีค่าสัญญาณต่ำเมื่อสถานะเคลื่อนที่เข้าใกล้ค่าอ้างอิง ทำให้ค่าสัญญาณควบคุมนี้ไม่สามารถเอาชนะผลจากแรงเสียดทานได้ (ผลจากแรงเสียดทานทางด้านบวกและด้านลบมีค่าไม่เท่ากัน) จึงควรมีการแก้ปัญหาที่แขนหุ่นยนต์ให้มีความฝืดลดลง

รายการอ้างอิง

1. R. A. DeCarlo, S. H. Zak and G. P. Matthews. "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 3, 1988, pp. 212–232.
2. J. Y. Hung, W. B. Gao and J. C. Hung. "Variable structure control: A survey," *IEEE trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, 1993, pp. 2–20.
3. J. A. Burton and A. S. I. Zinober. "Continuous approximation of variable structure control," *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 17, no. 6, 1986, pp. 875–885.
4. N. S. Luo and C. B. Feng. "A new method for suppressing high-frequency chattering in variable structure control systems," *Proc. IFAC Symp. Nonlinear Control System Design*, 1989
5. W. B. Gao, and J. C. Hung. "Variable structure control of nonlinear systems: A new approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 1, 1993, pp. 45–55.
6. W. B. Gao, Y. Wang, and A. Homaifa. "Discrete-time variable structure control system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 42, no. 2, 1995, pp. 117–122.
7. T. Hagiwara, and M. Araki. "Design of a stable state feedback controller based on the multirate sampling of the plant output," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 9, 1998, pp. 812–819.
8. H. Werner. "Multimodel robust control by fast output sampling—An LMI approach," *Automatica*, vol. 34, no. 12, 1998, pp. 1025–1030.
9. M. C. Saaj, B. Bandyopadhyay, and H. Unbehauen. "A new algorithm for discrete-time sliding-mode control using fast output sampling feedback," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 3, 2002 pp. 518–523.
10. Y. Pan, K. Furuta, S. Suzuki and S. Hatakeyama. "Design of variable structure control - from sliding mode to sliding sector -" *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, 2000, pp. 1685–1690.
11. K. Furuta and Y. Pan. "Variable structure control with sliding sector," *Automatica* vol. 36, 2000, pp. 211–228.
12. H. Richter. "Hyperplane design in observer-based discrete sliding mode control," *Master of Science Thesis, Oklahoma State University*, May 1997.
13. H. Richter and E. A. Misawa. "Boundary layer eigenvalues in observer-based discrete-time sliding mode control," *Proc. American Control Conference*, 2002, pp. 2935-2936.

14. A. Tesfaye and M. Tomizuka. "Sliding control of discretized continuous systems via the euler operator", *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, 1993, pp. 871–876.
15. P. Chaichanovong and D. Banjerdpongchai. "A case study of robust control experimental on one-link flexible robot arm," *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, 1999, pp. 4319–4324.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุทธิพงษ์ วชิรพงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2523 จังหวัดสุพรรณบุรี เป็นบุตรของนายสุรพล วชิรพงศ์ และนางสุทิน วชิรพงศ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยระบบควบคุม เมื่อ พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย