

การควบคุมระยะไกลที่มีเวลาหนึ่งโดยใช้ตัวแปรคลื่น



นายธงชัย วินิจการ

สถาบันวิทยบริการ
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1101-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TELEOPERATION CONTROL WITH TIME DELAY
USING WAVE VARIABLES



Mr. Thongchai Vinijkomthon

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-53-1101-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมระยะไกลที่มีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น
โดย นายธงชัย วินิจการ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิทยา วันณสุโกประสิทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธงชัย วินิจการ : การควบคุมระยะไกลที่มีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น
(TELEOPERATION CONTROL WITH TIME DELAY USING WAVE VARIABLES)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 83 หน้า. ISBN 974-53-1101-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นโดยมีองศาความอิสระเท่ากับ 2 ซึ่งการควบคุมด้วยวิธีนี้จะทำให้พลังงานของหุ่นมาสเตอร์ที่ส่งให้กับหุ่นสเลฟ มีค่ามากกว่าพลังงานที่หุ่นสเลฟส่งกลับมายังหุ่นมาสเตอร์ หรือเรียกว่าทำให้ระบบเป็นพาสซีฟ(Passive) จากนั้นผลต่างของพลังงานส่งจากหุ่นมาสเตอร์ไปยังหุ่นสเลฟกับพลังงานที่หุ่นสเลฟส่งให้หุ่นมาสเตอร์จะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ นั่นคือระบบจะมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์

การทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ทำการทดลองโดยสร้างระบบเสมือน(Simulation System)ในคอมพิวเตอร์ แล้วทำการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ ซึ่งในการส่งสัญญาณไปกลับให้มีค่าตัวหน่วงเวลาอยู่ระหว่าง 400 มิลลิวินาที ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้วิธีควบคุมแบบ Wave variables with predictor, a Kalman filter and Energy regulator ส่วนที่ 2 ทำการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ โดยควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ ซึ่งในการส่งสัญญาณไปกลับให้มีค่าตัวหน่วงเวลาอยู่ระหว่าง 320 มิลลิวินาที ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้วิธีควบคุมแบบ Wave variables ซึ่งผลจากการควบคุมมุมของหุ่นมาสเตอร์กับมุมของหุ่นสเลฟในระบบเสมือน พบว่าค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนผลจากการทดลองควบคุมมุมของหุ่นมาสเตอร์กับมุมของหุ่นสเลฟจริง พบว่าค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัว มีค่าน้อยกว่า 0.8 องศาหรือน้อยกว่า 0.013 เรเดียน และผลจากการควบคุมตำแหน่ง(X,Y)ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟน้อย พบว่ามีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน X น้อยกว่า 1.9 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน Y น้อยกว่า 1.7 มิลลิเมตร

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2547.....

4470326621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: WAVE VARIABLES CONTROL / TIME DELAY

THONGCHAI VINIJKOMTHON : TELEOPERATION CONTROL WITH TIME DELAY USING WAVE VARIABLES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 83 pp. ISBN 974-53-1101-4.

This thesis describes the teleoperation control with time delay using Wave variables. Control of master-slave robot with 2 degree of freedom is base on the concept of “the control system will be passive when the power from master robot to slave robot is more than the power from slave robot to master robot”. And then the different of the power from master robot to slave robot and the power from slave robot to master robot will decrease to be zero.

The experiments have 2 parts. Part1 : The simulation system with round time delay 400 ms to 1000 ms is controlled by Wave variables with predictor, Kalman filter and Energy regulator. Part2 : The experiment by master-slave robot with round time delay 320 ms to 400 ms is controlled by Wave variables. The results of simulation system show that the steady state error decreases to zero. The steady state error of the joint space and cartesian space control in X and Y directions are less than 0.8 degree or less than 0.013 radian and less than 1.9 mm in X-direction and 1.7 mm in Y-direction, respectively.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Mechanical Engineering.....Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.....2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยคำแนะนำสั่งสอน และช่วยเหลือทั้งในส่วนเนื้อหาและการปฏิบัติของ รศ. ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการปฏิบัติซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำวิจัยฉบับนี้ จนเสร็จสมบูรณ์ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ อย่างสูงที่ให้หุ่นยนต์แบบ Haptic Interface ที่มี 3 องศาความอิสระ ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ทั้งปริญญาโท และปริญญาเอกที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาต่างๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งคอยดูแลและให้กำลังใจข้าพเจ้าอยู่ตลอดเวลา และสุดท้ายขอขอบคุณ น้องตุนที่คอยเป็นกำลังใจให้อย่างสม่ำเสมอ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน.....	2
2 ทฤษฎี Wave Variables Transform.....	3
2.1 Wave Variables.....	3
2.2 Wave Prediction and Regulator.....	6
2.2.1 การทดลองโดยใช้ตัวทำนายค่า.....	8
2.2.2 เรกูเลเตอร์(Regulator).....	9
2.3 เสถียรภาพของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่.....	11
2.3.1 การปรับตำแหน่งของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่.....	12
2.4 วิธีการหาค่าเมตริกซ์ซึ่งใช้ในการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น.....	14
3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์กับหุ่นสเตฟ.....	16
3.1 หุ่นยนต์จู่พา2 มี 5 ระดับขั้นความเสรี.....	16
3.1.1 การหา Homogeneous Transformation Matrix ของหุ่นจู่พา2.....	19
3.1.2 อุปกรณ์ของหุ่นยนต์จู่พา2.....	20
3.1.2.1 มอเตอร์กระแสตรง(DC Motor).....	20
3.1.2.2 เอนโคเดอร์ (Encoder).....	20
3.1.2.3 แอมพลิไฟเออร์ (Power Amplifier).....	20

3.1.2.4	การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์กับหุ่นยนต์ทั้งสองตัว.....	20
3.2	หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเร็ว.....	21
3.2.1	การทำ Homogeneous Transformation Matrix ของหุ่น Haptic Interface.....	22
3.2.2	อุปกรณ์ของหุ่น Haptic Interface.....	23
3.2.2.1	มอเตอร์กระแสตรง(DC Motor) พร้อมเอนโคดเดอร์(Encoder).....	23
3.2.2.2	เอนโคดเดอร์(Encoder).....	23
3.3	หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface และหุ่นยนต์สเลฟ จูฬา2 โดยพิจารณาเพียง 2 ระดับขั้นความเร็ว.....	23
4	การทดลองโดยใช้ระบบเสมือน(Simulation System).....	25
4.1	ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง.....	25
4.2	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที.....	27
4.3	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	28
4.4	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman Filter and Energy Regulator.....	32
4.5	ผลการทดลองโดยใช้ระบบเสมือน(Simulation System).....	34
4.5.1	ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง.....	34
4.5.2	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที.....	36
4.5.3	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	38
4.5.4	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่าพร้อมกับ Kalman filter and Energy regulator.....	41
4.6	การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยระบบเสมือน(Simulation System).....	43
5	ผลการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ.....	45
5.1	ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง.....	45
5.2	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วง.....	55
5.3	ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	62
5.4	การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	72
6	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	74
	รายการอ้างอิง.....	77

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	83



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์สเลฟ จูฟา2.....	18
3.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface.....	22



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ระบบระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 แบบ bilateral teleoperation.....	3
2.2 การส่งสัญญาณโดยการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น.....	5
2.3 ระบบควบคุมโดยการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น ซึ่งมีตัวทำนาค่าและเรกูเลเตอร์.....	6
2.4 ระบบควบคุมโดยใช้ตัวทำนาค่า.....	8
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบเฉพาะทางด้านขวามมือ.....	11
3.1 หุ่นยนต์จู่พว2 มี 5 ระดับขั้นความเสรี.....	16
3.2 การตั้งแกนหุ่นยนต์จู่พว2 มี 5 ระดับขั้นความเสรี.....	17
3.3 การตั้งแกนตามวิธีของ Denavit-Hartenberg.....	18
3.4 หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเสรี.....	21
3.5 การตั้งแกนหุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเสรี.....	21
4.1 ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง.....	25
4.2 สัญญาณเข้า τ_m (สัญญาณแรงบิดหรือทอร์ก) ที่ส่งให้กับหุ่นมาสเตอร์.....	25
4.3 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ส่งผ่านPD Controllerไปยังหุ่นสเลฟ.....	26
4.4 ส่วนของการแสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับสเลฟ.....	27
4.5 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที.....	27
4.6 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	29
4.7 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมให้เป็นตัวแปรคลื่นด้านหุ่นมาสเตอร์.....	29
4.8 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลื่นเป็นสัญญาณความเร็วเชิงมุมที่ต้องการ.....	30
4.9 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมให้เป็นตัวแปรคลื่นด้านหุ่นสเลฟ.....	30
4.10 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลื่นเป็นสัญญาณแรงบิด.....	31
4.11 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนาค่า.....	32
4.12 ตัวทำนาค่า.....	33
4.13 ระบบผลการทดลองระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง.....	34
4.14 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที.....	36
4.15 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที.....	38
โดยใช้ตัวแปรคลื่น.....

4.16 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที..... 41
 โดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman filter and Energy regulator.....

5.1 ข้อต่อที่1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 4 วินาที..... 45

5.2 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 4 วินาที..... 46

5.3 ข้อต่อที่2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 4 วินาที..... 47

5.4 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 4 วินาที..... 47

5.5 ข้อต่อที่1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที..... 48

5.6 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที..... 48

5.7 ข้อต่อที่2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที..... 49

5.8 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที..... 50

5.9 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)..... 51

5.10 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนX ของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จาก..... 51
 ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182).....

5.11 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนYของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จาก..... 52
 ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182).....

5.12 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146)..... 52

5.13 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนX ของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จาก..... 53
 ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146).....

5.14 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนY หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จาก..... 53
 ตำแหน่ง (300,300) ถึง ตำแหน่ง (465,146).....

5.15 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34)..... 54

5.16 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนX ซึ่งหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จาก..... 54
 ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34).....

5.17 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนY ซึ่งหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จาก..... 55
 ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34).....

5.18 ข้อต่อที่1 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่1... 56

5.19 ข้อต่อที่2 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่1... 56

5.20 ข้อต่อที่1ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่2... 57

5.21 ข้อต่อที่2 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10มิลลิวินาทีถึง 40มิลลิวินาทีแบบที่2... 58

5.22 เวลาหน่วงในการส่งสัญญาณตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 20 วินาที..... 59

ภาพประกอบ	หน้า
5.23 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่1ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร.....	60
5.24 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่1ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมี ค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที.....	60
5.25 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่2ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร.....	61
5.26 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่2ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสาร ซึ่งมี ค่าตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที.....	62
5.27 ข้อต่อที่1 เคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาระหว่าง 320 มิลลิวินาที..... ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	63
5.28 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่1 ซึ่งเคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา..... ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	63
5.29 ข้อต่อที่2 เคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	64
5.30 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่2 ซึ่งเคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา..... ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	65
5.31 ข้อต่อที่1 เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	66
5.32 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่1 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	66
5.33 ข้อต่อที่2 เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	67
5.34 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่2 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น.....	67
5.35 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182).....	69
5.36 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนX ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182).....	69
5.37 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนY ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182).....	70
5.38 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150).....	71
5.39 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนX ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150).....	71
5.40 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกนY ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น..... จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150).....	72

ภาพประกอบ	หน้า
ก.1 การ์ด SENSORAY Model 626.....	80
ก.2 มอเตอร์พร้อมเอนโคเดอร์ Sanyo Denki Model R506-042E.....	80
ก.3 เอนโคเดอร์ British Encoder No.750754.....	81
ก.4 มอเตอร์ Electro-Craft และเอนโคเดอร์ RENCO.....	81
ก.5 ชุดขยายกระแส LA-5600.....	82



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการนำระบบควบคุมมาใช้กับงานต่างๆ มากมาย ระบบควบคุมระยะไกลเป็นอีกระบบหนึ่งซึ่งมีการค้นคว้าและวิจัยอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การสำรวจอวกาศ การสำรวจใต้ทะเลลึก การเข้าไปสำรวจยังพื้นที่ที่อันตรายหรือพื้นที่ที่มนุษย์สามารถเข้าไปไม่ได้ การใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เป็นต้น แต่ระบบควบคุมระยะไกล จะมีค่าตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลงและตัวแปรไม่ทราบค่าเกิดขึ้น ซึ่งอาจทำให้ระบบอาจไม่เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีการพยายามหาวิธีการควบคุมระบบที่มีค่าตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การควบคุมระบบทางไกลและทางไฟฟ้า นั้น ระบบจะมีค่าตัวหน่วงเวลาเกิดขึ้นในทุกๆ ระบบ แต่ค่าตัวหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถถือว่าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นจึงไม่ต้องคิดค่าตัวหน่วงเวลาที่เกิดขึ้น แต่บางระบบค่าตัวหน่วงเวลาในระบบทำให้ระบบไม่เสถียรภาพได้ ซึ่งระบบควบคุมระยะไกลเป็นระบบหนึ่งที่มีค่าตัวหน่วงเวลาทำให้ระบบไม่เสถียรภาพได้ วิธีการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลามีหลายวิธี เช่น 1.วิธี a time forward observer developed for a supervisory control over the Internet by Brady and Tarn [1,2,3] 2.วิธี a position-based force-feedback scheme implemented by Oboe and Fiorini [4] และ 3.วิธี a wave variable based technique developed by Niemeyer and Slotine [5,6,7] และ S.Munir and W.Book [8,9] ซึ่งทั้งสามวิธีนี้สามารถชดเชยผลของตัวหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นในระบบได้ แต่สองวิธีแรกนั้นต้องการรู้ค่าตัวแปรที่อยู่ในระบบควบคุมระยะไกล ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ส่วนใหญ่ไม่สามารถหาค่าที่ถูกต้องได้ ดังนั้นเสถียรภาพของระบบในสองวิธีแรกนั้นจะขึ้นอยู่กับว่าสามารถหาค่าตัวแปรต่างที่อยู่ในระบบควบคุมระยะไกลได้แม่นยำเท่าใด ส่วนวิธีที่สามนั้นไม่ต้องทราบค่าของตัวแปรเหล่านี้ ก็สามารถทำการควบคุมระบบควบคุมระยะไกลได้

งานวิจัยฉบับนี้ใช้วิธีการควบคุมแบบ Wave Variables with Predictor, a Kalman filter and Energy regulator ซึ่งเป็นการควบคุมแบบที่สาม เพื่อจะได้นำวิธีนี้ไปใช้ประโยชน์ในการวิจัย การควบคุมระยะไกลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือ อุปกรณ์สื่อสาร แบบไร้สายอื่นๆต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อควบคุมระบบที่มีค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลงให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาระบบควบคุมระบบที่มีระดับขั้นความเสถียรเท่ากับ 2 ซึ่งมีค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยใช้วิธี Wave variables with predictor, a Kalman filter and Energy regulator

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1) ใช้เป็นพื้นฐานในการวิจัย การควบคุมระยะไกลผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือ อุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายอื่นๆต่อไป
- 2) ใช้เป็นพื้นฐานในการวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมระบบซึ่งมีค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลง และมีค่าระดับขั้นความเสถียรมากขึ้น

1.5 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

- 1) ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการควบคุมระบบที่มีค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลง จากงานวิจัยและบทความทางวิชาการ
- 2) ทดลองโดยการสร้างแบบจำลองระบบมาสเตอร์กับสเลฟลงในคอมพิวเตอร์ แล้วทดลองทำการควบคุมระบบ ที่มีการสมมุติค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลงในขอบเขตที่กำหนด
- 3) เขียนโปรแกรมควบคุมระบบมาสเตอร์กับสเลฟ
- 4) ทำการทดลองควบคุมมาสเตอร์กับสเลฟ โดยควบคุมระบบที่มีการสมมุติค่าตัวนำเวลาแบบเปลี่ยนแปลง ในขอบเขตที่กำหนด และบันทึกผลการทดลอง
- 5) วิเคราะห์ผลการทดลอง
- 6) สรุปผลการทดลองและเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎี Wave Variables Transform

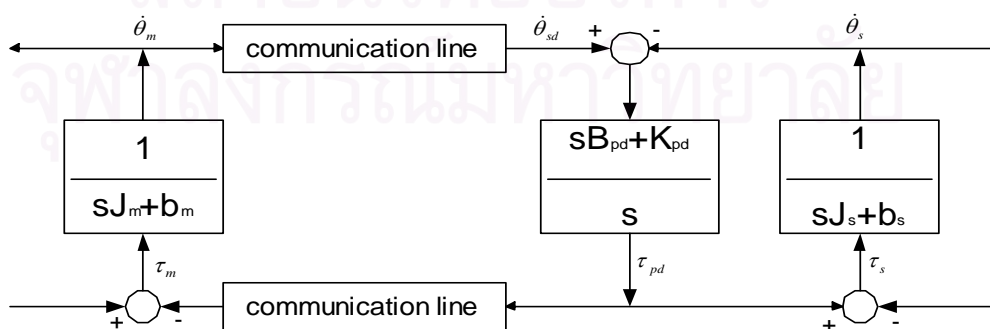
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง Wave Variables, Wave Prediction and Regulation, Stability for a Varying Delay มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 Wave Variables

พิจารณาระบบระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 แบบ bilateral teleoperation โดยคิดว่าหุ่นยนต์ มาตรฐานกับสเลฟมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 (1-DOF) เหมือนกันจะสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = \tau_m \quad (2.1)$$

โดยที่ J_m คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแครง (crank inertia)
 b_m คือ ค่าแดมป์ของแครง (crank damping)
 $\ddot{\theta}_m$ คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแครง (crank acceleration)
 $\dot{\theta}_m$ คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแครง (crank velocity)
 τ_m คือ ค่าแรงบิดที่กระทำ (applied torque)
 ตัวห้อย “m” คือ มาตรฐาน และ ตัวห้อย “s” คือ สเลฟ



รูปที่ 2.1 ระบบระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 1 แบบ bilateral teleoperation

จากรูปที่ 1 τ_{pd} คือ แรงบิดที่ได้จากตัวควบคุมแบบสัดส่วนกับแบบอนุพันธ์ (PD controller)

B_{pd} คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (derivative gain)

K_{pd} คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน (proportional gain)

$$\tau_m = -\tau_{pd} \quad (2.2)$$

$$\tau_s = \tau_{pd} \quad (2.3)$$

$$\tau_{pd} = K_{pd} (\theta_m - \theta_s) + B_{pd} (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_s) \quad (2.4)$$

จากรูปที่ 2.1 ระบบจะมีประสิทธิภาพในการควบคุม เมื่อระบบไม่มี ตัวหน่วงเวลา แต่เมื่อมีค่าตัวหน่วงเวลาของระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการควบคุมระบบจะลดลงและระบบจะไม่เสถียรภาพอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดสถานะนอนพาสซีฟ (nonpassive) ขึ้นในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร (communication line) ซึ่งกำลังงานในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_{in} = \dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_{pd} \quad (2.5)$$

ทำการแปลงรูปสมการเพื่อให้แรงบิด และ ความเร็วเชิงมุมแยกออกจากกัน โดยวิธี Wave transformation ดังนี้

$$\text{ให้ } u_m(t) = A_w \dot{\theta}_m(t) + B_w \tau_m(t) \quad (2.6)$$

$$v_s(t) = C_w \dot{\theta}_{sd}(t) - D_w \tau_{pd}(t) \quad (2.7)$$

$$v_m(t) = C_w \dot{\theta}_m(t) - D_w \tau_m(t) \quad (2.8)$$

$$u_s(t) = A_w \dot{\theta}_{sd}(t) + B_w \tau_{pd}(t) \quad (2.9)$$

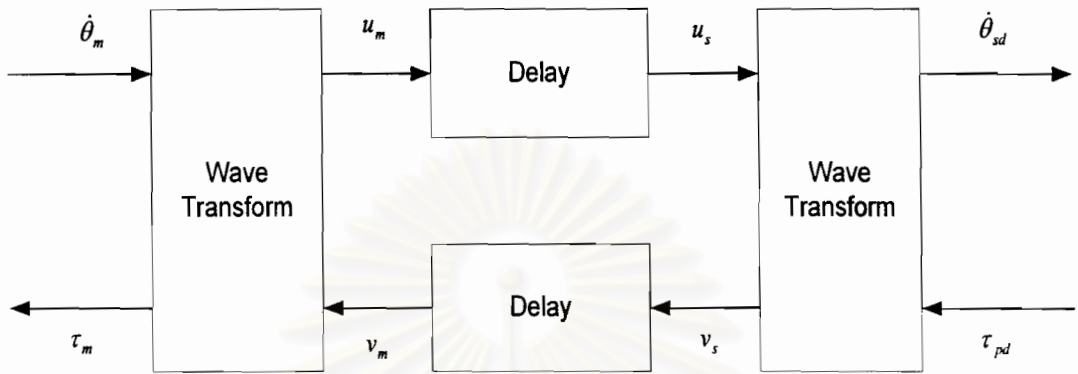
โดยที่ A_w, B_w, C_w และ D_w เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$
 n คือ ระดับขั้นความเสรีของระบบที่ทำการควบคุม

$$A_w = C_w \quad (2.10)$$

$$B_w = D_w \quad (2.11)$$

$$I = 2A_w B_w \quad (2.12)$$

เมื่อทำการแยกแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมในสมการที่ (2.5) โดยใช้วิธี wave transformation ตามสมการ (2.6) ถึงสมการ (2.12) เมื่อระบบมี ตัวหน่วงเวลาเกิดขึ้นระบบจะไม่เกิดสถานะนอนพาสซีฟ



รูปที่ 2.2 การส่งสัญญาณ โดยการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น

พลังงานที่เข้าทางด้านซ้ายมือของรูปที่ 2.2 คิดเสมือนจุดที่ส่งพลังงานของ Niemeyer

$$P = \dot{\theta}_m^T \tau_m = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m \quad (2.13)$$

พิจารณาพลังงานทั้งหมดในช่วงเวลา 0 ถึง t

$$\int_0^t P d\tau = \int_0^t \dot{\theta}_m^T \tau_m d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (2.14)$$

โดยที่ P_{diss} คือ กำลังที่สูญเสีย (power dissipated)

$E(0)$ คือ พลังงานสะสมตอนเริ่มต้น

$E(t)$ คือ พลังงานสะสมเมื่อเวลา t

โดยพลังงานที่ส่งผ่านสายสื่อสารในรูปของตัวแปรคลื่น “u” กับ “v” หมายถึงข้อมูลที่ส่งผ่านสายสื่อสาร ส่วนพลังงานสะสมหมายถึงข้อมูลที่อยู่ในสายสัญญาณซึ่งยังส่งไปไม่ถึงอีกด้านหนึ่ง เพราะการควบคุมระยะไกลจะมีค่าเวลาหน่วงเกิดขึ้น
แทนค่าสมการที่(2.13)ลงในสมการที่(2.14) จะได้

$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau = E_{store}(t) - E_{store}(0) + \int_0^t P_{diss} d\tau \quad (2.15)$$

เรกูเลเตอร์ (Regulator) สมมติให้เป็นจุดเชื่อมต่อแบบผลรวม (summing junction) ตำแหน่งที่แตกต่างกัน ของแต่ละด้านของ wave transformation คือ

$$\Delta\theta(t) = \theta_m(t) - \theta_{sd}(t) \quad (2.18)$$

แปลงให้อยู่ในรูป wave variables จะได้

$$\Delta\theta(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t (u_m + v_m - u_s - v_s) d\tau \quad (2.19)$$

แปลงรูปสมการโดยใช้การแปลงลาปลาซ จะได้

$$\Delta\theta(s) = \frac{1}{2s} A_w^{-1} (1 - e^{-sT_R} + G_p(s)) u_m(s) - \frac{1}{2s} A_w^{-1} (1 - e^{-sT_L}) V_s(s) \quad (2.20)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} u_s(t) &= u_m(t - T_R) \\ v_m(t) &= v_s(t - T_L) + v_p(t) \\ v_p(t) &= G_p(s) u_m(t) \end{aligned}$$

พิจารณาให้ระบบมีค่าความผิดพลาดภาวะสม่ำเสมอ (steady-state error) เท่ากับศูนย์

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta\theta(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta\theta(s) = 0 \quad (2.21)$$

ซึ่งที่ภาวะสม่ำเสมอ จะมีคลื่นสัญญาณ (wave signal) ลดลงจนเป็นศูนย์ ดังนั้นต้องการให้

$$\lim_{s \rightarrow 0} G_p(s) = 0 \quad (2.22)$$

เพื่อทำให้ระบบเป็นพาสซีฟ ที่ตำแหน่งตัวทำนาค่าสแตตต้องไม่ทำให้พลังงานรวมที่ส่งกลับมามีค่ามากกว่าพลังงานที่ส่งเข้าไปตอนแรก ดังนั้น

$$\int_0^t \frac{1}{2} v_a^T v_a d\tau \geq \int_0^t \frac{1}{2} v_m^T v_m d\tau \quad (2.23)$$

พิจารณาค่าตัวหน่วงเวลาทั้งหมดของระบบ คือ

$$T_T = T_R + T_L \quad (2.24)$$

โดยที่ T_T คือ ค่าตัวหน่วงเวลาทั้งหมดของระบบ (total delay time)

T_R คือ ค่าตัวหน่วงเวลาของการส่งสัญญาณไปข้างหน้า

T_L คือ ค่าตัวหน่วงเวลาของการส่งสัญญาณป้อนกลับ

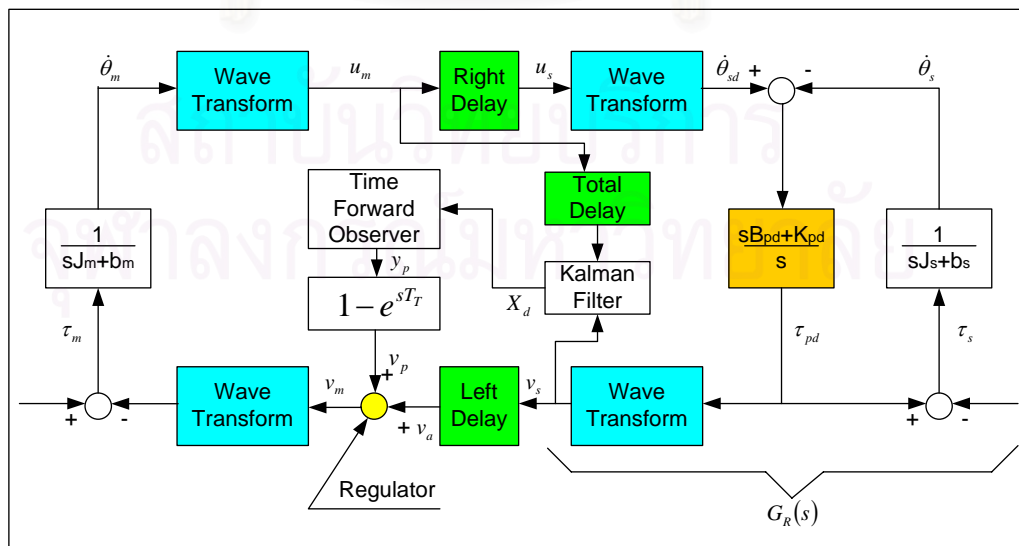
ทำการสร้างตัวสังเกตการณ์แบบไปข้างหน้า (time forward observer) ต่อจาก Kalman filter ซึ่งคิด ค่าตัวหน่วงเวลาทั้งหมดของระบบ (T_T) จะได้ สัญญาณของตัวทำนายค่าสเตรตนำมา แปลงลาปลาซได้

$$V_p(s) = (1 - e^{sT_T})Y(s) \quad (2.25)$$

โดยที่ $V_p(s)$ คือ สัญญาณของตัวทำนายค่าสเตรต

$y(t)$ คือ สัญญาณจากตัวสังเกตการณ์แบบไปข้างหน้า (time forward observer)

2.2.1 การทดลองโดยใช้ตัวทำนายค่า



รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมโดยใช้ตัวทำนายค่า

พิจารณาทางด้านขวามือของระบบ

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu_m(t - T_R) \\ v_s(t) &= Cx(t) + Du_m(t - T_R) \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

แทนค่า $x_d(t) = x(t - T_L)$ ลงในสมการจะได้

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_d(t) &= Ax_d(t) + Bu_m(t - T_T) \\ v_a(t) &= v_s(t - T_L) = Cx_d(t) + Du_m(t - T_T) \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

ให้ $x_p(t)$ คือ เวกเตอร์ของตัวทำนายค่าสแตต (predicted state vector) ที่เกิดจากตัวสังเกตการณ์แบบไปข้างหน้า จะได้

$$x_p(t) = e^{AT_T} x_d(t) + \int_{t-T_T}^t e^{A(t-\tau)} Bu_m(\tau) d\tau \quad (2.28)$$

จะได้ผลลัพธ์จากตัวสังเกตการณ์แบบไปข้างหน้าเป็น $y_p(t)$

$$y_p(t) = Cx_p(t) + Du_m(t) \quad (2.29)$$

ทำการอินทิเกรต สมการที่(2.28) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + Bu_m(t) \\ g(t) &= z(t) - e^{AT_T} z(t - T_T) \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$g(t) = \int_{t-T_T}^t e^{A(t-\tau)} Bu_m(\tau) d\tau \quad (2.31)$$

2.2.2 เรกูเลเตอร์ (Regulator)

พิจารณาที่เรกูเลเตอร์ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (2.18) จึงทำให้ระบบเป็นพาสซีฟ

$$\text{ให้} \quad v_r(t) = v_a(t) + v_p(t) \quad (2.32)$$

ให้ $D_{ig}(t)$ คือ “distance-to-go”

จุดมุ่งหมาย คือ การทำให้ “distance-to-go” มีค่าน้อยที่สุด

$$\text{โดยที่ } D_{ig}(t) = \int_0^t (v_i(\tau) - v_m(\tau)) d\tau \quad (2.33)$$

สมมติให้ พลังงานสะสม (Energy reservoir) = $E_r(t)$ จะได้ว่า

$$E_r(t) = \int_0^t (v_a^T(\tau)v_a(\tau) - v_m^T(\tau)v_m(\tau)) d\tau \quad (2.34)$$

ทำให้ $D_{ig}(t)$ มีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

$$v_m(t) = \alpha(1 - e^{-\beta E_r(t)}) D_{ig}(t) \quad (2.35)$$

โดยที่ $\alpha > 0$ และ $\beta > 0$ จะได้ว่า

$$0 < (1 - e^{-\beta E_r(t)}) < 1 \quad (2.36)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.35) และ (2.36) แสดงว่า $v_m(t)$ และ $D_{ig}(t)$ จะมีเครื่องหมายเหมือนกัน พิจารณาที่ภาวะสม่ำเสมอผลของการตอบสนองชั่วคราว (transient response) ลดลงและไม่มีแรงกระทำในระบบ

$$\text{จะได้ว่า } \lim_{t \rightarrow \infty} V_p(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} V_a(t) \text{ แล้ว } \lim_{t \rightarrow \infty} V_i(t) = 0 \quad (2.38)$$

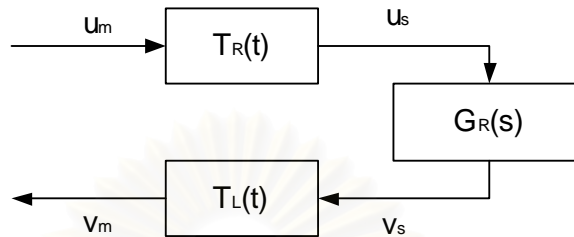
พิจารณาสมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.38) จะได้

$$\frac{d}{dt} D_{ig} = -v_m(t) \quad (2.39)$$

$$\text{แสดงว่า } D_{ig}(t) \rightarrow 0 \quad (2.40)$$

$$\text{ถ้า } E_r(t) \rightarrow 0 \text{ จะได้ } (1 - e^{-\beta E_r(t)}) \rightarrow 0 \quad (2.41)$$

2.3 เสถียรภาพของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบเฉพาะทางด้านขวามือ

$$\text{ให้ } T_R(t) = T_R + \Delta T_R(t) \quad (2.42)$$

$$T_L(t) = T_L + \Delta T_L(t) \quad (2.43)$$

โดยที่ $\Delta T_R(t)$ คือ ค่าตัวหน่วงเวลาที่แกว่งขึ้นลง ขณะสัญญาณไปข้างหน้าในเวลา t ใดๆ

$\Delta T_L(t)$ คือ ค่าตัวหน่วงเวลาที่แกว่งขึ้นลง ขณะสัญญาณป้อนกลับที่เวลา t ใดๆ

$$\text{ให้ } u_s(t) = u_m(t - T_R) - \Delta u_m(t) \quad (2.44)$$

$$v_m(t) = v_s(t - T_L) - \Delta v_s(t) \quad (2.45)$$

ระบบจะเป็นพาสซีฟ เมื่อพลังงานส่งเข้ามากกว่าพลังงานที่กลับมา ดังนั้น

$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau > 0 \quad (2.46)$$

ให้ $E_d(t)$ เป็น พลังงานสูญเสีย (energy dissipated) ในการควบคุมผ่านระบบควบคุมระยะไกล (remote system)

$$E_d(t) = \frac{1}{2} \int_0^t u_s^T u_s d\tau - \frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau \quad (2.47)$$

เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณทางด้านขวา (right moving wave) คือ

$$\frac{1}{2} \int_0^t u_m^T u_m d\tau = \frac{1}{2} \int_0^t u_s^T u_s d\tau + E_{T_R}(t) - E_R(t) \quad (2.48)$$

เงื่อนไขของการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณทางด้านซ้าย (left moving wave) คือ

$$\frac{1}{2} \int_0^t v_s^T v_s d\tau = \frac{1}{2} \int_0^t v_m^T v_m d\tau + E_{T_L}(t) - E_L(t) \quad (2.49)$$

โดยที่ $E_{T_R}(t)$ และ $E_{T_L}(t)$ เป็น instantaneous energy store ในสายที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร
ค่า $E_R(t)$ และ $E_L(t)$ เป็นพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากตัวหน่วงเวลาแบบเปลี่ยนแปลง แทน
สมการที่ (2.47), (2.48), (2.49) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้ว่า

$$E_d(t) + E_{T_R}(t) + E_{T_L}(t) - E_R(t) - E_L(t) > 0 \quad (2.50)$$

2.3.1 การปรับตำแหน่งของระบบที่เวลาหน่วงไม่คงที่

ผลจากการเปลี่ยนแปลงของตัวหน่วงเวลาทำให้ความผิดพลาดภาวะสมร่าเสมอไม่เป็นศูนย์

$$\Delta\theta_2(t) = \theta_m(t) - \theta_{sd}(t - T_L(t)) \quad (2.51)$$

แปลงให้อยู่ในรูป wave variable

$$\Delta\theta_2(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t [\hat{u}_m(\tau) + v_m(\tau) - u_s(\tau - T_L(\tau)) - v_s(\tau - T_L(\tau))] d\tau \quad (2.52)$$

$$u_m(t) = \hat{u}_m(t) + \Delta\hat{u}_m(t) \quad (2.53)$$

โดยที่ $\hat{u}_m(t)$ คือ การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณทางด้านขวา(right moving wave)

$\Delta\hat{u}_m(t)$ คือ minor correction

สัญลักษณ์ “ \hat{u} ” เรียกว่า หมวก (hat) แสดงถึง สัญญาณที่ไม่ถูกต้องจากต้นกำเนิดสัญญาณ (origin uncorrected signal)

สมมุติให้ $T_L \approx T_R$ จะได้ว่า

$$u_s(t - T_L(t)) = u_m(t - 2T_L(t)) + \omega_1(t) \quad (2.54)$$

$$v_s(t - T_L(t)) = v_a(t) + \omega_2(t) \quad (2.55)$$

โดยที่ $\omega_1(t)$ และ $\omega_2(t)$ คือ ค่าการแกว่งขึ้นลงเล็กน้อยเนื่องจากการเปลี่ยนของค่าตัวหน่วงเวลาที่เวลาใดๆ

แทนสมการที่ (2.53), (2.54) และ (2.55) ลงในสมการที่ (2.51) จะได้ว่า

$$\Delta\theta_2(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_{t-2T_L}^t u_m(\tau) d\tau + \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t (v_m(\tau) - v_a(\tau)) d\tau - \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t \Delta\hat{u}_m(\tau) d\tau \quad (2.56)$$

โดยที่ให้ค่า $\omega_1(t)$ และ $\omega_2(t)$ รวมอยู่ใน $\Delta\hat{u}_m$ เมื่อพิจารณาสภาวะอุดมคติ คือ $\Delta\hat{u}_m = 0$
ให้ $d(t)$ คือ ความผิดพลาดลอยเลื่อน(drift error)

$$d(t) = \text{ค่า } \Delta\theta_2 \text{ ที่คาดการณ์ไว้ (expected } \Delta\theta_2) - \text{ค่า } \Delta\theta_2 \text{ แท้จริง (actual } \Delta\theta_2) \quad (2.57)$$

แทนค่าจะได้ว่า

$$\Delta\theta_2(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_{t-2T_L}^t u_m(\tau) d\tau + \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t (v_m(\tau) - v_a(\tau)) d\tau - (\theta_m(t) - \theta_{sd}(t - T_L(t))) \quad (2.58)$$

และ $d(t)$ สามารถเขียนในรูปของสมการดังนี้

$$d(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \int_0^t \hat{u}_m(\tau) d\tau \quad (2.59)$$

จุดมุ่งหมาย คือ การทำให้ $d(t)$ เป็นศูนย์

ให้ $E_d(t)$ เป็น second energy reservoir ซึ่งถูกปล่อยออกมาในระบบของสเลฟ

$$E_d(t) = \int_0^t u_m^T u_m - v_m^T v_m d\tau \quad (2.60)$$

แก้สมการที่ (2.59) จะได้

$$\Delta \hat{u}_m = -\gamma(1 - e^{-\delta E_d(t)}) A_w d(t) \quad (2.61)$$

โดยที่ $\gamma > 0$ และ $\delta > 0$

นำสมการที่ (2.59) มาหาอนุพันธ์ จะได้

$$\frac{d}{dt} d(t) = \frac{1}{2} A_w^{-1} \Delta \hat{u}_m \quad (2.62)$$

นำสมการที่ (2.61) มาแทนลงในสมการที่ (2.62) จะได้ว่า

$$\frac{d}{dt} d(t) = -\frac{1}{2} \gamma(1 - e^{-\delta E_d(t)}) d(t) \quad (2.63)$$

ให้ $E_d(t) \geq 0$ จะได้ว่า

$$0 < (1 - e^{-\delta E_d(t)}) < 1 \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.63) และ (2.64) ค่า $d(t)$ และอนุพันธ์ของ $d(t)$ มีเครื่องหมายตรงข้ามกันแสดงว่า

$$d(t) \rightarrow 0 \quad (2.65)$$

2.4 วิธีการหาค่าเมตริกซ์ซึ่งใช้ในการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น

$$P = \dot{\theta}_m^T \tau_m = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m$$

ทำการแปลงรูปสมการเพื่อให้แรงบิดและความเร็วเชิงมุมแยกออกจากกัน โดยวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ให้} \quad u_m(t) &= A_w \dot{\theta}_m(t) + B_w \tau_m(t) & u_s(t) &= A_w \dot{\theta}_{sd}(t) + B_w \tau_{pd}(t) \\ v_s(t) &= C_w \dot{\theta}_{sd}(t) - D_w \tau_{pd}(t) & v_m(t) &= C_w \dot{\theta}_m(t) - D_w \tau_m(t) \end{aligned}$$

โดยที่ A_w, B_w, C_w และ D_w เป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$
 n คือ ระดับชั้นความเสรีของระบบที่ทำการควบคุม
 $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 2 สามารถหาเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่อนได้โดยกำหนดให้

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

โดยที่ W_1, W_2 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่อนให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้งานและเป็นไปตามเงื่อนไข $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ 3 สามารถหาเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่อนได้โดยกำหนดให้

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{W_3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{W_3 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

โดยที่ W_1, W_2, W_3 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่อนให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้งานและเป็นไปตามเงื่อนไข $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

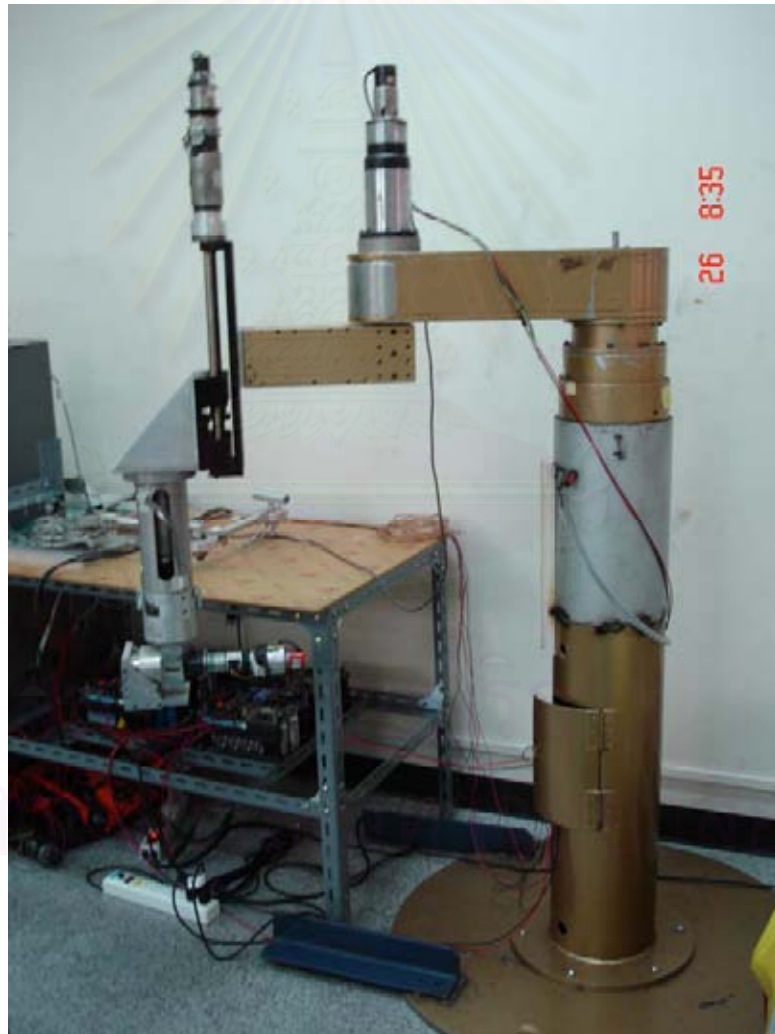
วิธีการหาค่า W_1, W_2, \dots, W_n ของระบบควบคุมซึ่งมีระดับชั้นความเสรีเท่ากับ n ทำได้โดยการควบคุมให้เคลื่อนที่ทีละข้อต่อเดียวเท่านั้น เช่น ให้ข้อต่อที่ i เคลื่อนที่แล้วทำการปรับค่า W_i ของข้อต่อ นั้นจนความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นก็ทำเช่นเดียวกันกับข้อต่ออื่นๆจนได้ค่า W ครบทุกข้อต่อ

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์กับหุ่นสเตลฟ

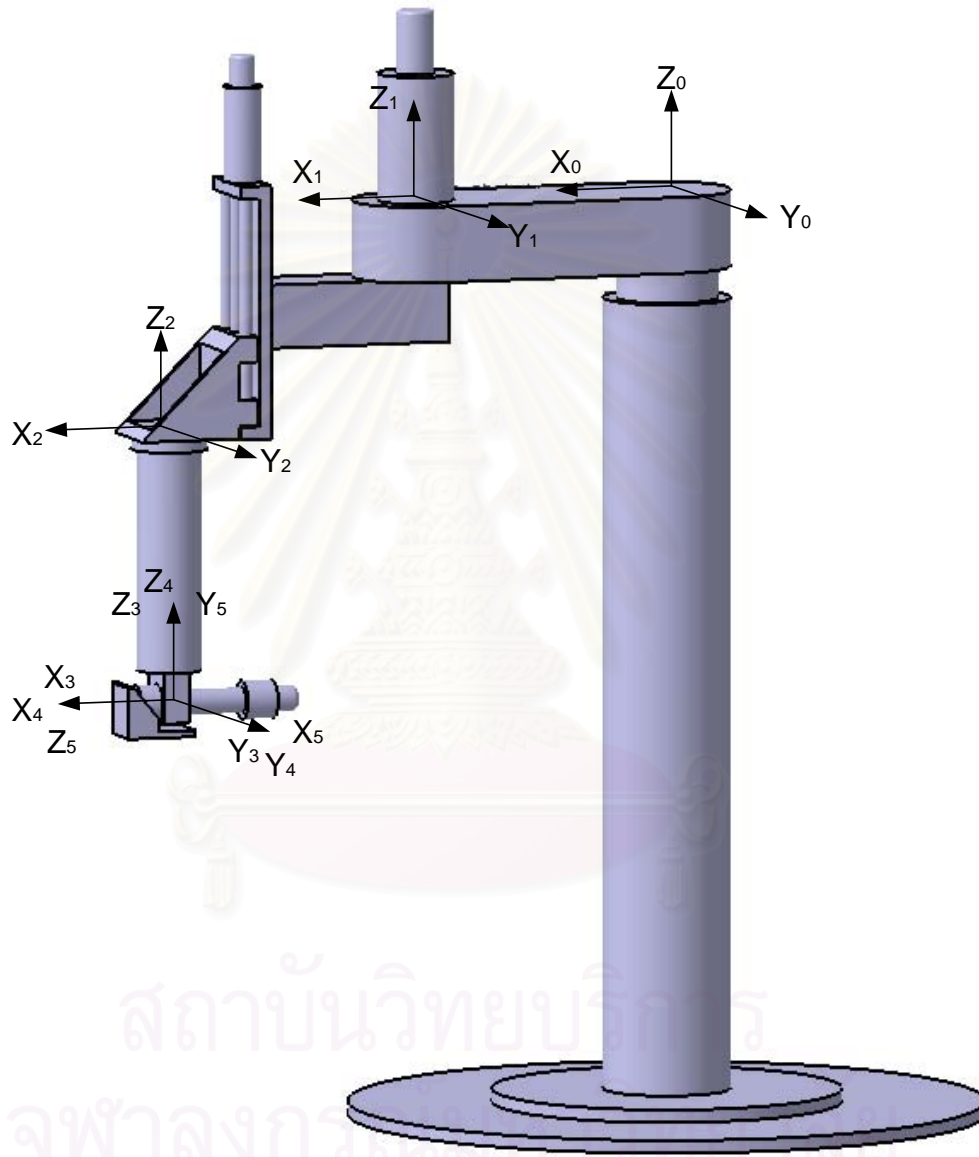
หุ่นยนต์มาสเตอร์เป็นหุ่นยนต์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเร็ว ส่วนหุ่นยนต์สเตลฟเป็นหุ่นยนต์จู่พา2 ที่มี 5 ระดับขั้นความเร็ว แต่ในการทดลองจะใช้เพียง 2 ระดับขั้นความเร็วเท่านั้น

3.1 หุ่นยนต์สเตลฟ จู่พา2 ที่มี 5 ระดับขั้นความเร็ว



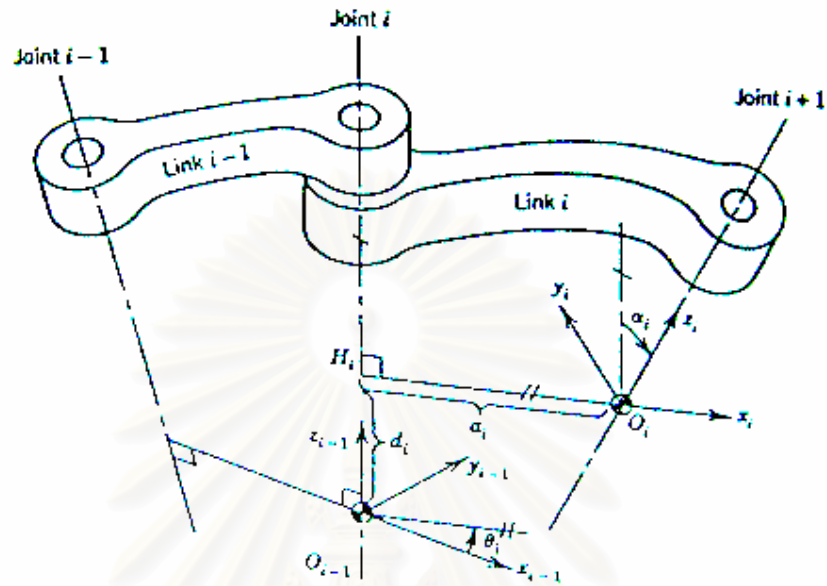
รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์จู่พา2 มี 5 ระดับขั้นความเร็ว

จากรูปที่ 3.1 หุ่นยนต์จู่พา 2 มีการตั้งเฟรมบนข้อต่อต่างๆ ของแขนกล โดยใช้วิธีของ Denavit-Hartenberg ซึ่งจะได้ค่าตัวแปรต่างๆ ดังตารางต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 การตั้งแกนหุ่นยนต์จู่พา 2 มี 5 ระดับขั้นความเสรี

การตั้งแกนของหุ่นยนต์ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg



รูปที่ 3.3 การตั้งแกนตามวิธีของ Denavit-Hartenberg

รูปที่ 3.3 แสดงค่าตัวแปรต่างๆและการตั้งแกนของ Denavit-Hartenberg โดยที่ θ_i คือ มุมระหว่าง x_{i-1} กับ x_i โดยวัดรอบแกน z_{i-1} ตามกฎมือขวา d_i คือ ระยะระหว่าง x_{i-1} กับ x_i ตามแนวแกน z_{i-1} a_i คือ ระยะระหว่าง o_{i-1} กับ o_i ตามแนวแกน x_i α_i คือ มุมระหว่าง z_{i-1} กับ z_i โดยวัดรอบแกน x_i ตามกฎมือขวา

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์สเลฟ จูพา2

Link No.	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	l_1	d_1	θ_1
2	0	l_2	d_2	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	0	0	0	θ_4
5	90	0	0	θ_5

3.1.1 การหา Homogeneous Transformation Matrix ของหุ่นจูปา2

จากรูปที่3.2 และตารางที่3.1 นำมาหา homogeneous transformation matrix ของหุ่นจูปา2 ได้ดังนี้

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & l_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & l_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & l_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & \sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & -\cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4$$

$$A_5^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.1.2 อุปกรณ์ของหุ่นยนต์จุฬา2

3.1.2.1 มอเตอร์กระแสตรง(DC Motor)

เป็นมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (permanent magnet) ของบริษัท Electro-Craft

ข้อต่อที่1 ใช้มอเตอร์ Serial No. 0643-33-004

ข้อต่อที่2 ใช้มอเตอร์ Serial No. 0643-33-004

ข้อต่อที่3 ใช้มอเตอร์ Serial No. 0588-33-500

ข้อต่อที่4 ใช้มอเตอร์ Serial No. 0588-33-500

ข้อต่อที่5 ใช้มอเตอร์ Serial No. 0552-10-500

3.1.2.2. เอนโคเดอร์ (Encoder)

เอนโคเดอร์ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งที่ให้สัญญาณออกมาเป็น digital โดยที่จะส่งสัญญาณออกมาเป็นพัลส์ 2 ช่องและสัญญาณของแต่ละช่องจะมีมุมเฟสต่างกัน 90 องศา เพื่อใช้ในการตรวจเช็คทิศทาง

ข้อต่อที่1 และข้อต่อที่3 ใช้เอนโคเดอร์ ยี่ห้อSUMTEX ความละเอียด 2048 พัลส์ต่อรอบ ส่วนข้อต่อที่2 ข้อต่อที่4 และข้อต่อที่5 ใช้เอนโคเดอรี่ี่ห้อ RENCO ความละเอียด 1000 พัลส์ต่อรอบ

3.1.2.3. แอมพลิไฟเออร์ (Power Amplifier)

แอมพลิไฟเออร์ เป็นอุปกรณ์ที่จ่ายไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ของหุ่นยนต์ ซึ่งหุ่นจุฬา2 ใช้แอมพลิไฟเออร์ LA-5600 ของบริษัท Electro Craft ทั้ง5 ข้อต่อ ซึ่งทำงานได้ทั้งแบบควบคุมความต่างศักย์ และแบบควบคุมกระแสไฟฟ้า

3.1.2.4. การ์ดติดต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์กับหุ่นยนต์ทั้งสองตัว

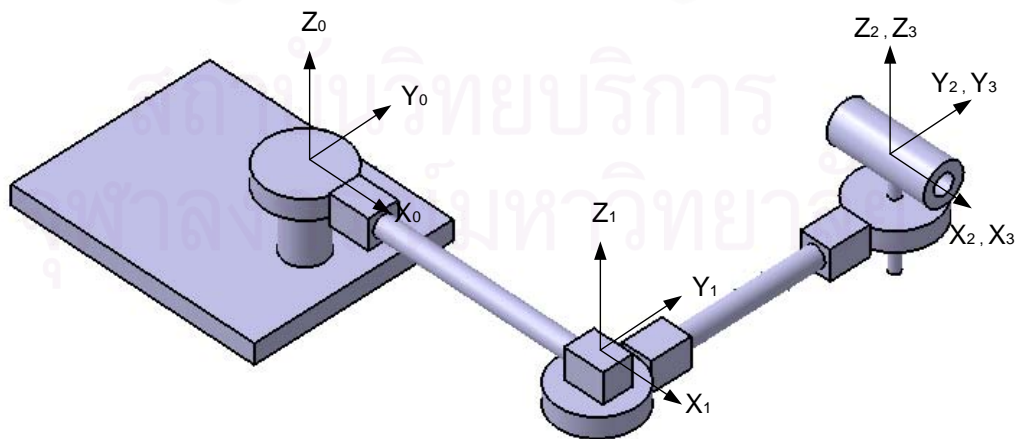
การ์ด SENSORAY Model 626 ของบริษัท SENSORAY

3.2 หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเสรี



รูปที่ 3.4 หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเสรี

จากรูปที่ 3.4 เป็นการตั้งเฟรมบนข้อต่อต่างๆ ของแขนกล โดยใช้วิธีของ Denavit-Hartenberg ซึ่งจะได้ค่าตัวแปรต่างๆดังตารางต่อไปนี้



รูปที่ 3.5 การตั้งแกนหุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface ที่มี 3 ระดับขั้นความเสรี

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface

Link No.	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	0	l_1	d_1	θ_1
2	0	l_2	d_2	θ_2
3	0	0	0	θ_3

3.2.1 การหา Homogeneous Transformation Matrix ของหุ่น Haptic Interface

จากรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.2 นำมาหา Homogeneous Transformation Matrix ของหุ่น Haptic Interface ได้ดังนี้

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & l_1 \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & l_1 \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_2 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & l_2 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2$$

$$A_3^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2.2 อุปกรณ์ของหุ่น Haptic Interface

3.2.2.1 มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) พร้อมเอนโคเดอร์ (Encoder)

มอเตอร์ Sanyo Denki Model R506-042E ขนาด 60 วัตต์

3.2.2.2 เอนโคเดอร์ (Encoder)

เอนโคเดอร์ British Encoder No.750754 จำนวนพัลส์ 2500 พัลส์ต่อรอบ

3.3 หุ่นยนต์มาสเตอร์ Haptic Interface และหุ่นยนต์สเลฟ จูฬา2 โดยพิจารณาเพียง 2 ระดับขั้นความเสรี

พิจารณาเฉพาะตำแหน่ง (X,Y) ในระนาบที่ขนานกับพื้นเท่านั้น หุ่นมาสเตอร์ความยาวข้อต่อที่1และข้อต่อที่2 ยาว 300 มิลลิเมตร ส่วนหุ่นสเลฟข้อต่อที่1ยาว 415 มิลลิเมตร และข้อต่อที่2 ยาว 425 มิลลิเมตร ทำการหา Forward Kinematics and Inverse Kinematics ของมาสเตอร์กับหุ่น สเลฟ ดังต่อไปนี้

กำหนดให้ ความยาวข้อต่อที่1 ของหุ่นมาสเตอร์ คือ $L_{m1} = 300$ mm

ความยาวข้อต่อที่2 ของหุ่นมาสเตอร์ คือ $L_{m2} = 300$ mm

ความยาวข้อต่อที่1 ของหุ่นสเลฟ คือ $L_{s1} = 415$ mm

ความยาวข้อต่อที่2 ของหุ่นสเลฟ คือ $L_{s2} = 425$ mm

มุมของข้อต่อที่1 ของหุ่นมาสเตอร์ คือ θ_{m1} rad/sec

มุมของข้อต่อที่2 ของหุ่นมาสเตอร์ คือ θ_{m2} rad/sec

มุมของข้อต่อที่1 ของหุ่นสเลฟ คือ θ_{s1} rad/sec โดยที่ $\theta_{s1} \in [-\pi/2, \pi/2]$

มุมของข้อต่อที่2 ของหุ่นสเลฟ คือ θ_{s2} rad/sec โดยที่ $\theta_{s2} \in [0, \pi]$

ตำแหน่งตามแกนX ของหุ่นมาสเตอร์ คือ $MasterX$

ตำแหน่งตามแกนY ของหุ่นมาสเตอร์ คือ $MasterY$

ตำแหน่งตามแกนX ของหุ่นสเลฟ คือ $SlaveX$

ตำแหน่งตามแกนY ของหุ่นสเลฟ คือ $SlaveY$

พิจารณาค่าแห่ง (X,Y) ของหุ่นมาสเตอร์หาได้ดังนี้

$$MasterX = L_{m1} \cos(\theta_{m1}) + L_{m2} \cos(\theta_{m1} + \theta_{m2}) \quad (3.1)$$

$$MasterY = L_{m1} \sin(\theta_{m1}) + L_{m2} \sin(\theta_{m1} + \theta_{m2}) \quad (3.2)$$

หาค่ามุม θ_{s1} และมุม θ_{s2} ของหุ่นสเลฟ เพื่อให้ได้ตำแหน่ง(X,Y) ที่ต้องการดังนี้

$$\cos(\theta_{s2}) = \frac{[(MasterX)^2 + (MasterY)^2 - L_{s1}^2 - L_{s2}^2]}{(2 * L_{s1} * L_{s2})} \quad (3.3)$$

$$\theta_{s2} = \arccos(\cos(\theta_{s2})) \quad (3.4)$$

$$\sin(\theta_{s1}) = \frac{[(L_{s1} + L_{s2} * \cos(\theta_{s2})) * MasterY - L_{s2} * \sin(\theta_{s2}) * MasterX]}{(MasterX)^2 + (MasterY)^2} \quad (3.5)$$

$$\theta_{s1} = \arcsin(\sin(\theta_{s1})) \quad (3.6)$$

พิจารณาค่าแห่ง (X,Y) ของหุ่นสเลฟหาได้ดังนี้

$$SlaveX = L_{s1} \cos(\theta_{s1}) + L_{s2} \cos(\theta_{s1} + \theta_{s2}) \quad (3.7)$$

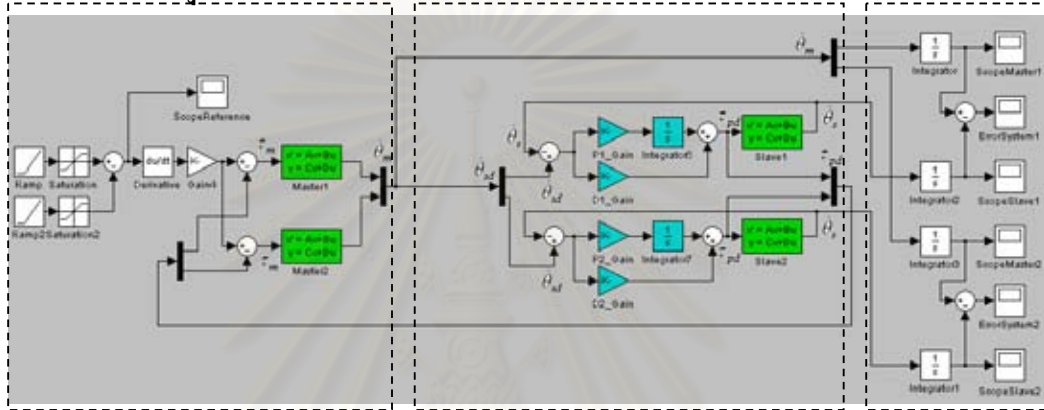
$$SlaveY = L_{s1} \sin(\theta_{s1}) + L_{s2} \sin(\theta_{s1} + \theta_{s2}) \quad (3.8)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

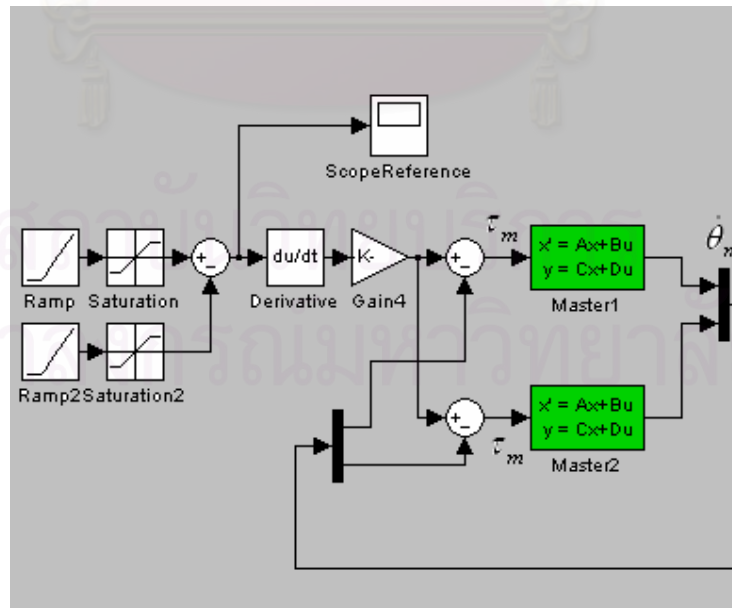
การทดลองโดยใช้ระบบเสมือน(Simulation System)

4.1 ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง



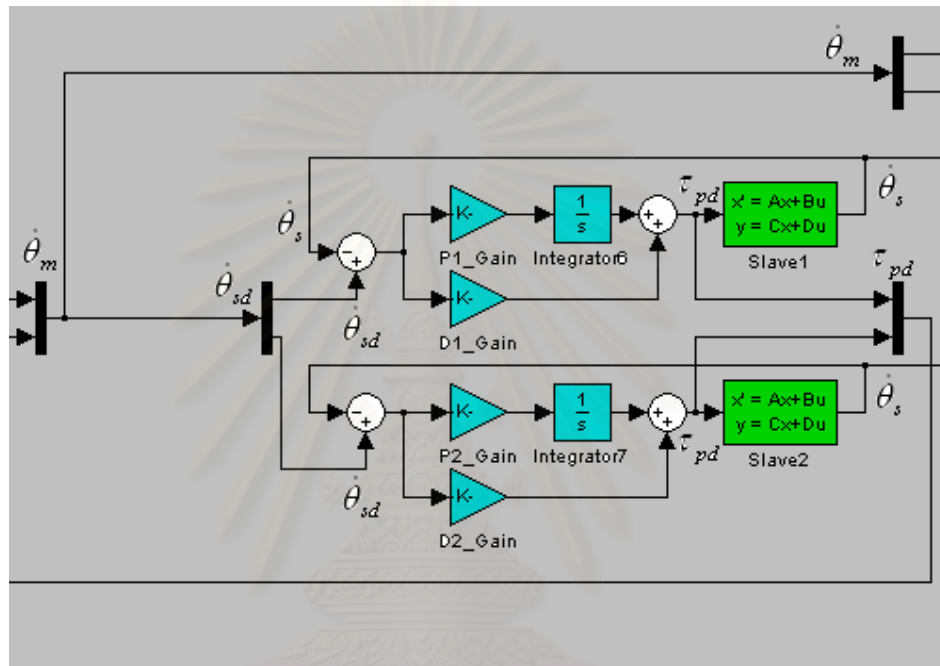
รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง

รูปที่ 4.1 เป็นรูปของระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 ซึ่งใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์โดยระบบควบคุมไม่มีเวลาหน่วงมีรายละเอียดของส่วนต่างๆดังนี้



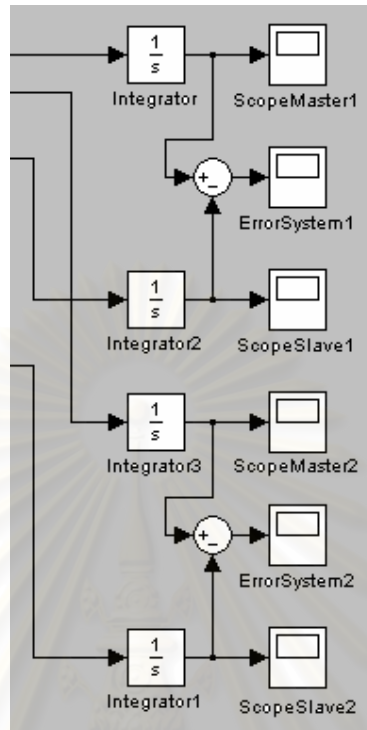
รูปที่ 4.2 สัญญาณเข้า τ_m (สัญญาณแรงบิดหรือทอร์ก) ที่ส่งให้กับหุ่นมาสเตอร์

รูปที่ 4.2 มาจากรูปที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้าย จากรูปที่ 4.2 แสดงสัญญาณเข้า τ_m (สัญญาณแรงบิดหรือทอร์ก) ที่ส่งให้กับหุ่นมาสเตอร์ โดยจะเริ่มส่งสัญญาณเมื่อผ่านไป 10 วินาที



รูปที่ 4.3 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ส่งผ่าน PD Controller ไปยังหุ่นสเลฟ

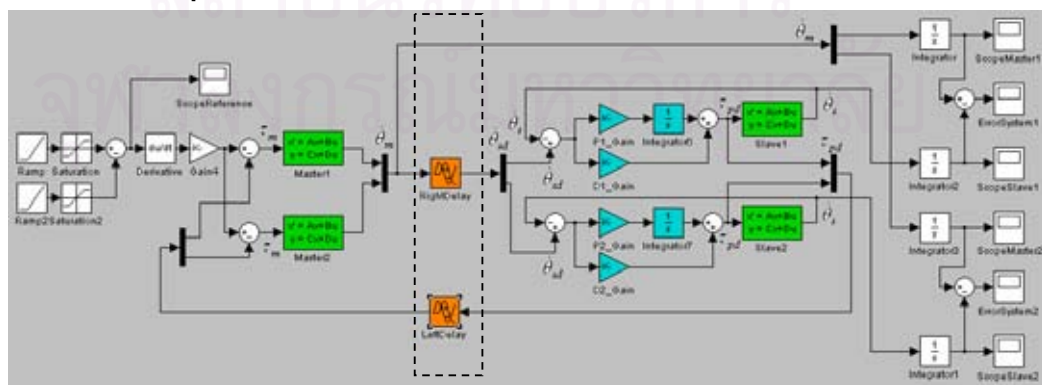
รูปที่ 4.3 มาจากรูปที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลาง จากรูปสัญญาณความเร็วเชิงมุมของหุ่นมาสเตอร์ ($\dot{\theta}_m$) ส่งผ่านสายสื่อสารมาถึงด้านของหุ่นสเลฟกลายเป็นสัญญาณความเร็วเชิงมุมของหุ่นสเลฟที่ต้องการ ($\dot{\theta}_{sd}$) จากนั้นนำมาลบกับค่าความเร็วเชิงมุมของหุ่นสเลฟ ($\dot{\theta}_s$) แล้วนำค่าที่ได้มาผ่านตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ (PD Controller) ได้ค่าแรงบิด (τ_{pd}) ซึ่งใช้ในการควบคุมหุ่นสเลฟและส่งกลับไปด้านหุ่นมาสเตอร์



รูปที่ 4.4 ส่วนของการแสดงผลการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับสเลฟ

รูปที่ 4.4 มาจากรูปที่ 4.1 ซึ่งอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวา จากรูปแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ โดยการนำสัญญาณความเร็วเชิงมุมของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟมาทำการอินทิเกรต จะได้การกระจัดเชิงมุมของหุ่นมาสเตอร์ที่ScopeMaster1กับScopeMaster2 และการกระจัดเชิงมุมของหุ่นสเลฟที่ScopeSlave1กับScopeSlave2 จากนั้นนำการกระจัดของหุ่นมาสเตอร์มาลบกับหุ่นสเลฟจะได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ErrorSystem1กับErrorSystem2

4.2 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.5 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที

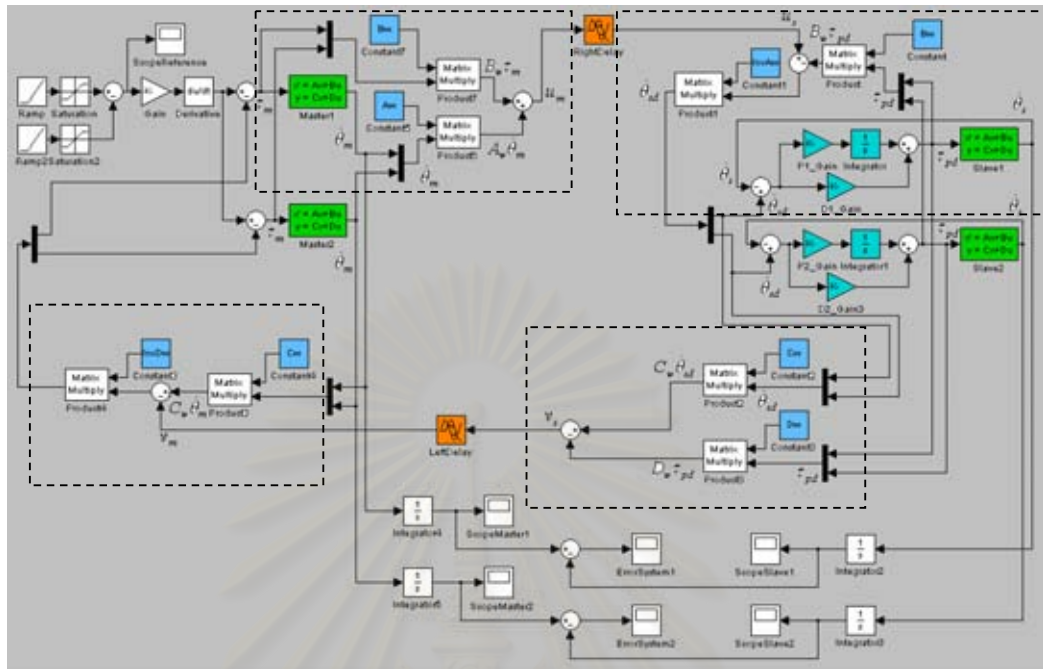
ในงานวิจัยของ Saghir Munir และ Wayne J. Book ได้ทำการหาเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณจาก Atlanta,USA ไปถึง Metz,France แล้วส่งสัญญาณกลับมายัง Atlanta,USA โดยใช้การส่งสัญญาณระบบ UDP Protocol พบว่าค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับมีค่าน้อยสุดเท่ากับ 100 มิลลิวินาทีและค่ามากที่สุดเท่ากับ 250 มิลลิวินาที ในการสร้างระบบเสมือน (Simulation System) ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าเวลาหน่วงเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า คือ ให้ระบบเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับระหว่าง 400 มิลลิวินาทีถึง 1000 มิลลิวินาที

ลักษณะรูปที่ 4.5 เป็นระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ ซึ่งมีองค์ประกอบทุกส่วนเหมือนกับระบบควบคุมแบบไม่มีตัวหน่วงเวลาในรูปที่ 4.1 ซึ่งส่วนที่แตกต่างกันคือบริเวณตรงกลางรูปที่ 4.5 ในกรอบสี่เหลี่ยมซึ่งแสดงค่าตัวหน่วงเวลาซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นมา โดยค่าตัวหน่วงเวลาขณะส่งสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ผ่านสายสื่อสารไปยังด้านของหุ่นสเลฟ คือ RightDelay ซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 200 มิลลิวินาทีถึง 500 มิลลิวินาทีและค่าเวลาหน่วงขณะส่งสัญญาณจากหุ่น สเลฟผ่านสายสื่อสารกลับมาด้านของหุ่นมาสเตอร์ คือ LeftDelay ซึ่งมีค่าหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 200 มิลลิวินาทีถึง 500 มิลลิวินาที โดยการกำหนดค่าเวลาหน่วงแบบไม่คงที่ได้จากการใช้คำสั่ง “0.2+0.3*rand” ใส่ให้กับบล็อก RightDelay และ LeftDelay ของการต่อ Simulink ในโปรแกรม MATLAB

4.3 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น

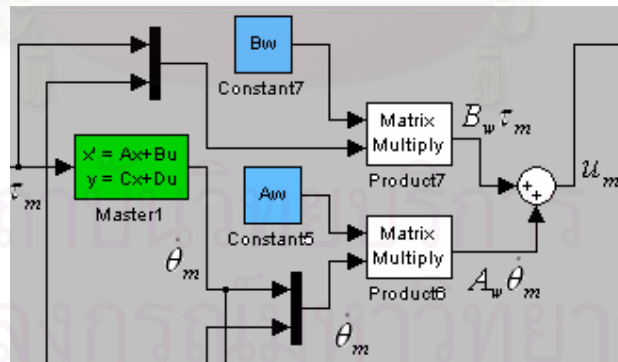
ทำการแปลงสัญญาณจากความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดให้อยู่ในรูปของตัวแปรคลื่น u กับ v ดังสมการ

$$P_{in} = \dot{\theta}_m^T \tau_m - \dot{\theta}_{sd}^T \tau_{pd} = \frac{1}{2} u_m^T u_m - \frac{1}{2} v_m^T v_m \quad (2.5)$$

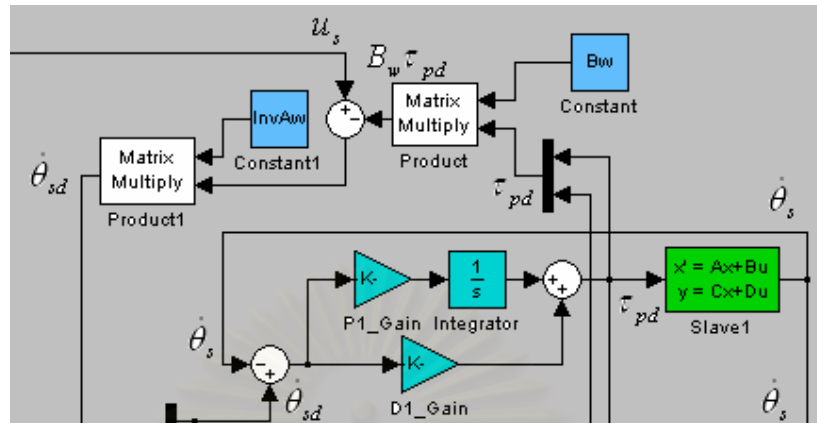


รูปที่ 4.6 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 4.6 เป็นรูปองค์ประกอบโดยรวมของระบบควบคุมที่มีระดับชั้นความถี่เท่ากับ 2 ซึ่งมีค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับระหว่าง 400 มิลลิวินาทีถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้วิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น

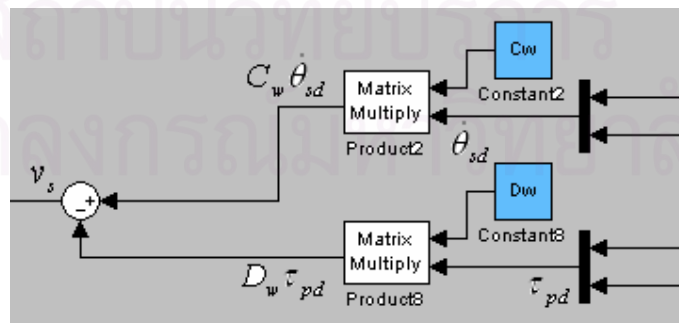


รูปที่ 4.7 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมให้เป็นตัวแปรคลื่นด้านหุ่นศาสตร์

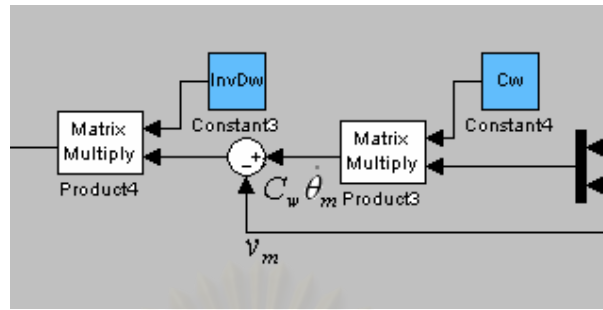


รูปที่ 4.8 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลื่นเป็นสัญญาณความเร็วเชิงมุมที่ต้องการ

รูปที่ 4.7 มาจากรูปที่ 4.6 ในกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลางด้านบน จากรูปที่ 4.7 ทำการแปลงรูป จากค่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้านหุ่นมาสเตอร์ให้เป็นตัวแปรคลื่นซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ “ u_m ” โดยใช้สมการ $u_m(t) = A_w \dot{\theta}_m(t) + B_w \tau_m(t)$ เมื่อได้ค่า u_m แล้วจึงทำการส่งสัญญาณผ่านสายสื่อสาร เมื่อสัญญาณ u_m ส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 200 มิลลิวินาทีถึง 500 มิลลิวินาทีไปยังด้านสเลฟ โดยสัญญาณตัวแปรคลื่นที่มาถึงด้านสเลฟแทนด้วยสัญลักษณ์ “ u_s ” รูปที่ 4.7 มาจากรูปที่ 4.6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวาบน จากรูปที่ 4.8 นำตัวแปรคลื่น u_s ซึ่งมีสมการ $u_s(t) = A_w \dot{\theta}_{sd}(t) + B_w \tau_{pd}(t)$ มาทำการจัดรูปสมการใหม่เป็น $\dot{\theta}_{sd} = A_w^{-1}(u_s - B_w \tau_{pd})$ ทำให้ได้ค่าความเร็วเชิงมุมของหุ่นสเลฟที่ต้องการนำมาลบกับค่าความเร็วเชิงมุมของหุ่นสเลฟ แล้วนำค่าที่ได้มาผ่านตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดสำหรับควบคุมหุ่นสเลฟ โดยที่ A_w, B_w, C_w และ D_w เป็นเมตริกซ์ขนาด 2×2 ซึ่งเมตริกซ์ $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$



รูปที่ 4.9 การแปลงสัญญาณแรงบิดกับความเร็วเชิงมุมให้เป็นตัวแปรคลื่นด้านหุ่นสเลฟ



รูปที่ 4.10 การแปลงสัญญาณตัวแปรคลื่นเป็นสัญญาณแรงบิด

รูปที่ 4.9 มาจากรูปที่ 4.6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านขวาล่าง จากรูปที่ 4.9 ทำการแปลงรูปจากค่าแรงบิดและความเร็วเชิงมุมด้านหุ่นสเลฟให้เป็นตัวแปรคลื่นซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ “ v_s ” โดยใช้สมการ $v_s = C_w \dot{\theta}_{sd} - D_w \tau_{pd}$ เมื่อได้ค่า v_s แล้วจึงทำการส่งสัญญาณผ่านสายสื่อสาร เมื่อสัญญาณ v_s ส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 200 มิลลิวินาทีถึง 500 มิลลิวินาทีไปยังด้านหุ่นมาสเตอร์โดยสัญญาณตัวแปรคลื่นที่มาถึงด้านหุ่นมาสเตอร์แทนด้วยสัญลักษณ์ “ v_m ” รูปที่ 4.10 มาจากรูปที่ 4.6 ในกรอบสี่เหลี่ยมด้านซ้ายล่าง จากรูปที่ 4.10 นำตัวแปรคลื่น v_m ซึ่งมีสมการ $v_m = C_w \dot{\theta}_m - D_w \tau_m$ มาทำการจัดรูปสมการใหม่เป็น $\tau_m = D_w^{-1}(C_w \dot{\theta}_m - v_m)$ ทำให้ได้ค่าแรงบิดของหุ่นมาสเตอร์ โดยที่ A_w, B_w, C_w และ D_w เป็นเมตริกซ์ขนาด 2×2 ซึ่งเมตริกซ์ $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

การหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่น A_w, B_w, C_w และ D_w สำหรับระบบที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 ได้โดยกำหนดให้

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ W_1 \times \sqrt{2} & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

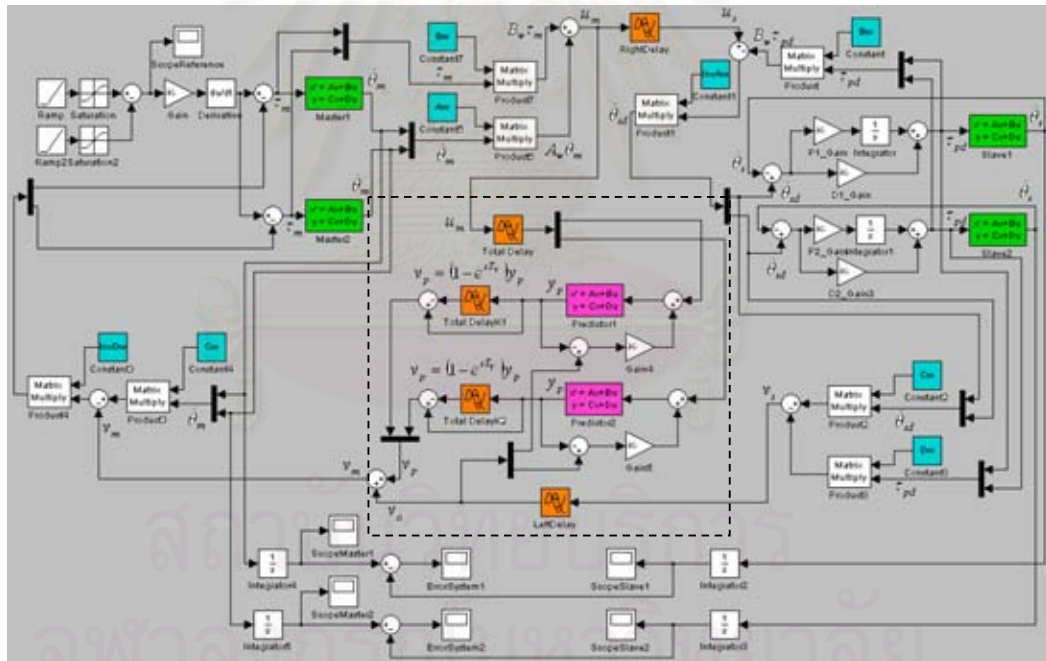
โดยที่ W_1, W_2 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นให้เหมาะสมกับระบบที่นำไปใช้งาน

การปรับค่าให้เริ่มจากการกำหนดค่าคงที่ขึ้นมาค่าหนึ่ง เช่น ให้ $W_1 = 20$ แล้วทำการทดลองควบคุมกับระบบควบคุม จากนั้นดูว่าค่าความผิดพลาดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับสเลฟมีค่าที่ลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ จากนั้นกำหนดค่า W_1 ใหม่ เช่น $W_1 = 10$ แล้วทำการทดลองควบคุมกับระบบควบคุม จากนั้นดูว่าค่าความผิดพลาดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับสเลฟมีค่าที่ลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ และเมื่อเทียบกับครั้งแรกแล้วมีค่าความผิดพลาดน้อยลงหรือไม่ การลดลงของค่าความผิดพลาดจนเป็นศูนย์เร็วขึ้นหรือไม่ ซึ่งถ้าค่าความผิดพลาดน้อยลงและลดลงเป็นศูนย์เร็วขึ้นก็แสดงว่าค่า $W_1 = 10$ ดีกว่าค่า $W_1 = 20$ จากนั้นให้ $W_1 = 5$ แล้วทำ

การทดลองควบคุมกับระบบควบคุม จากนั้นดูว่าค่าความผิดพลาดในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับสเลฟมีค่าอยู่ลดลงจนเป็นศูนย์หรือไม่ และเมื่อเทียบกับค่า $W_1 = 10$ ซึ่งถ้าค่าความผิดพลาดมากขึ้นและการลดลงเป็นศูนย์ช้าลงแสดงว่าค่า W_1 ควรจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 20 จากนั้นทำการทดลองปรับค่า W_1 จนได้ค่าที่ทำให้ความผิดพลาดมีค่าน้อยและลดลงเป็นศูนย์เร็ว เมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้วก็ให้ปรับค่า W_2 เช่นเดียวกับการหาค่า W_1 ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ค่า $W_1 = 8$ และ $W_2 = 8$

ผลจากการปรับค่าเกณฑ์พบว่าเมื่อค่า W_1, W_2 มีค่ามากเกินไปจะทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งของคำสั่งอ้างอิงช้าลง แต่ถ้าค่า W_1, W_2 มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้ค่าความผิดพลาดขณะเคลื่อนที่มีค่ามากขึ้น

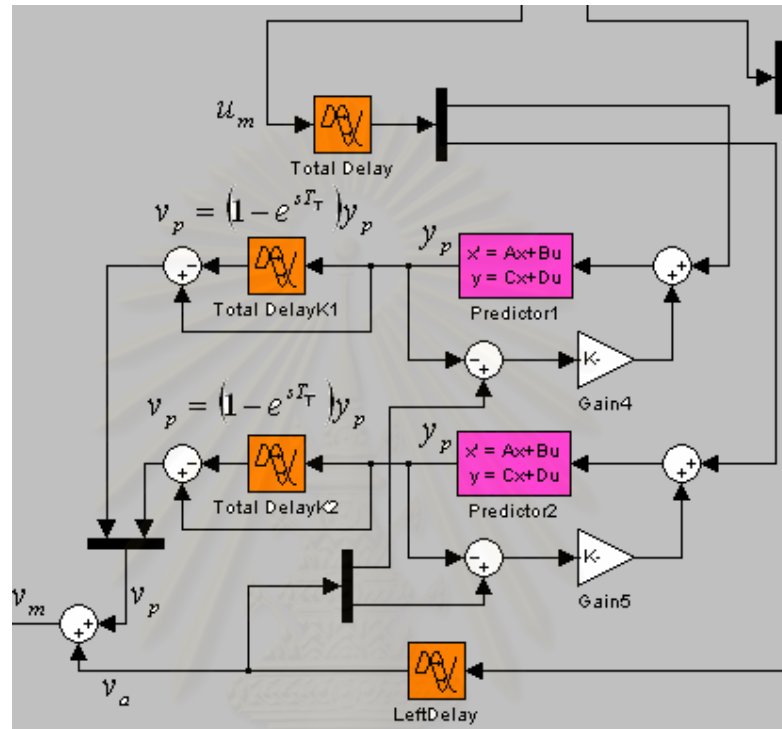
4.4 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman Filter and Energy Regulator



รูปที่ 4.11 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า

รูปที่ 4.11 เป็นรูปองค์ประกอบโดยรวมของระบบควบคุมที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 ซึ่งมีค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับระหว่าง 400 มิลลิวินาทีถึง 1000 มิลลิวินาทีโดยใช้วิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า โดยทุกส่วนในระบบควบคุมนี้เหมือนกับวิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับ

วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นในรูปที่ 4.6 ซึ่งส่วนที่แตกต่างกันคือมีตัวทำนายค่าซึ่งอยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมตรงกลางรูปที่ 4.11 เพิ่มขึ้นมา



รูปที่ 4.12 ตัวทำนายค่า

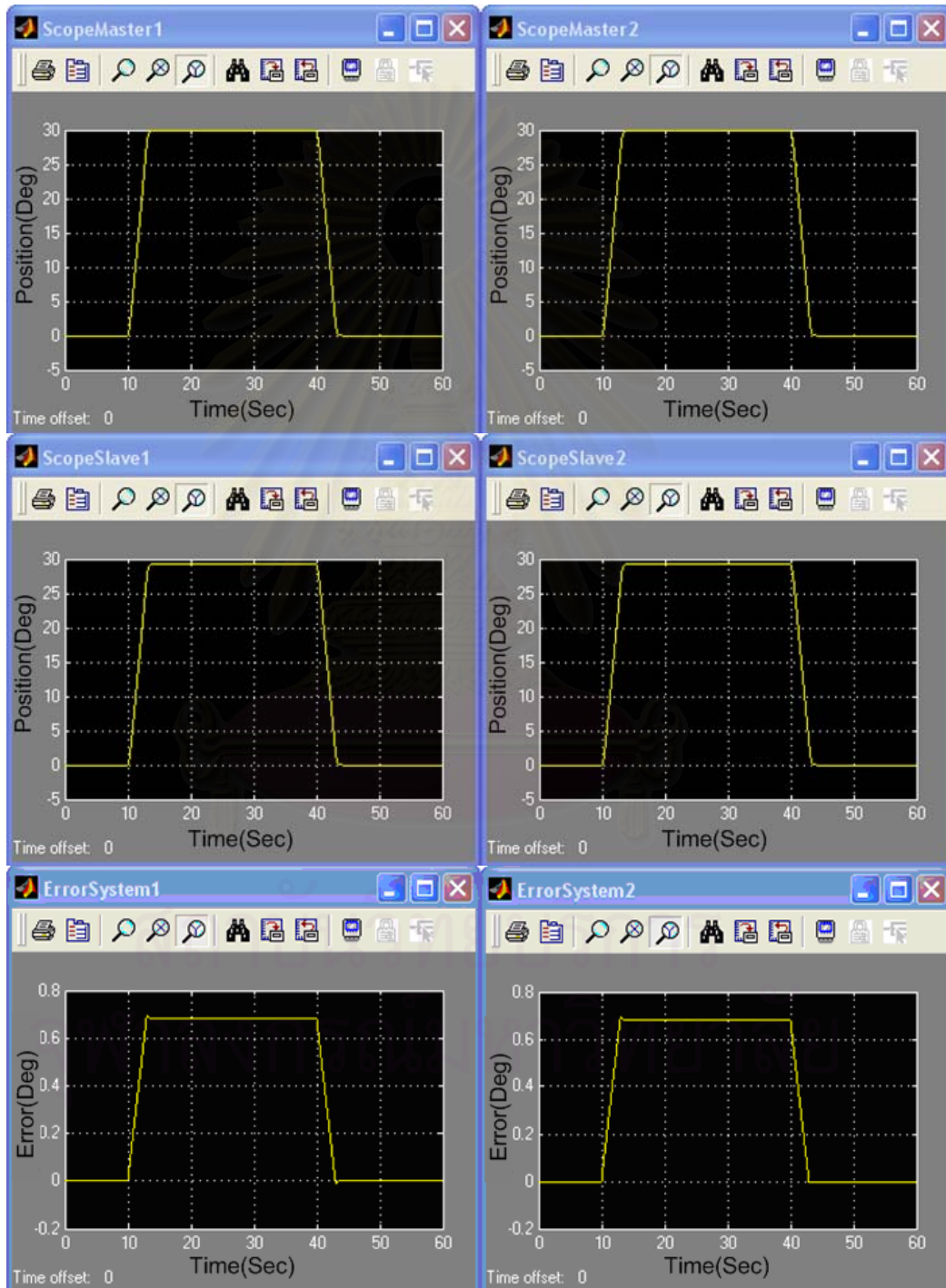
รูปที่ 4.12 มาจากรูปที่ 4.11 ในกรอบสี่เหลี่ยมบริเวณตรงกลาง จากรูปที่ 4.12 บล็อก Total Delay ทำหน้าที่สร้างเวลาหน่วงโดยมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ Right Delay บวกกับ Left Delay ดังนั้น Total Delay มีค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1000 มิลลิวินาที ส่วนบล็อก Total DelayK1 กับ Total DelayK2 ทำหน้าที่สร้างค่าเวลาหน่วงเหมือนกับบล็อก Total Delay และมีค่าเวลาหน่วงเท่ากับ 1000 มิลลิวินาทีเช่นกัน จากรูปที่ 4.12 ทำการนำสัญญาณ u_m และ v_a มาทำนายค่า y_p จากนั้นนำค่า y_p มาคูณกับ $(1 - e^{-sT_r})$ จะได้ค่า v_p ซึ่งค่า v_p คือค่าสัญญาณชดเชยผลจากค่าเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นในระบบควบคุม

รูปที่ 4.12 ในการควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วงนั้นเมื่อมีเวลาหน่วงเกิดขึ้นสัญญาณ v_a จะขาดหายไป ระบบควบคุมจะใช้ค่าสุดท้ายของ v_a ที่ได้รับมาแทนค่า v_a ที่ยังส่งมาไม่ถึง ส่วนค่า v_p คือค่าสัญญาณซึ่งใช้ชดเชยค่า v_a ค่าสุดท้ายที่ได้รับให้มีค่าเท่ากับค่าของ v_a ที่ยังส่งมาไม่ถึง

4.5 ผลการทดลองโดยใช้ระบบเสมือน(Simulation System)

การทดลองมีเป้าหมายเพื่อต้องการให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.5.1 ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง



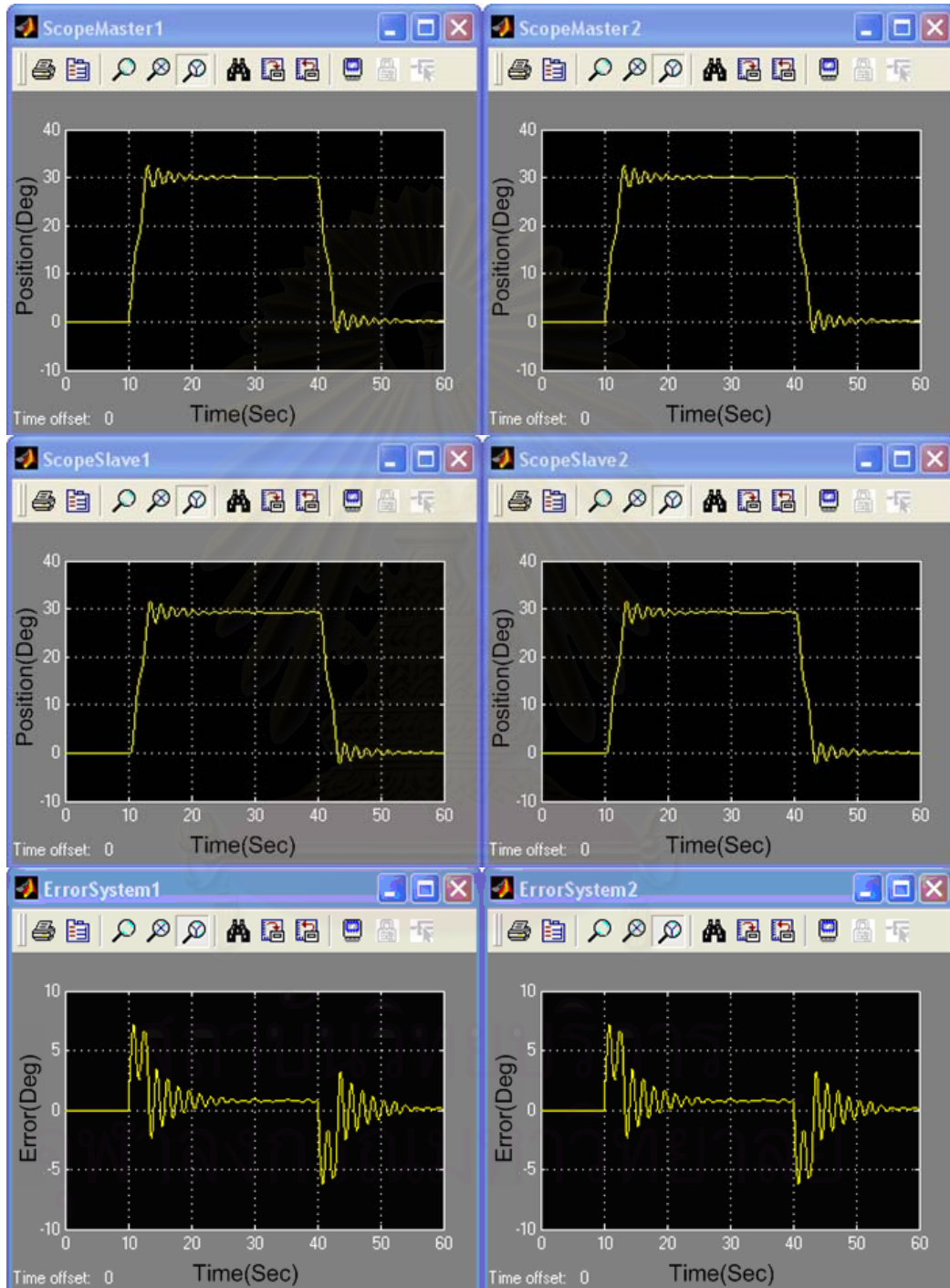
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง

รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงโดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ ซึ่งรูปที่ 4.13 ด้านบนซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster1 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.13 ด้านบนซ้ายพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิง รูปที่ 4.13 ด้านตรงกลางซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave1 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 ด้านล่างซ้ายมีชื่อรูปว่า ErrorSystem1 ซึ่งจาก ErrorSystem1 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดเคลื่อนที่และหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 ก็หยุดเคลื่อนที่เช่นกันซึ่งขณะนั้นมีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.7 องศา จากนั้นเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที หุ่นสเลฟก็จะเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นเช่นกันทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

รูปที่ 4.13 ด้านบนขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster2 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.13 ด้านบนขวามองพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิง รูปที่ 4.13 ด้านตรงกลางขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave2 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.13 ด้านล่างขวามีชื่อรูปว่า ErrorSystem2 ซึ่งจาก ErrorSystem2 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 หยุดเคลื่อนที่และหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 ก็หยุดเคลื่อนที่เช่นกันซึ่งขณะนั้นมีค่าความผิดพลาดประมาณ 0.7 องศา จากนั้นเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที หุ่นสเลฟก็จะเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้นเช่นกันทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

เนื่องจากไม่มีค่าเวลาหน่วงดังนั้นผลการทดลองทุกครั้งจะได้ผลดังรูปที่ 4.13

4.5.2 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที



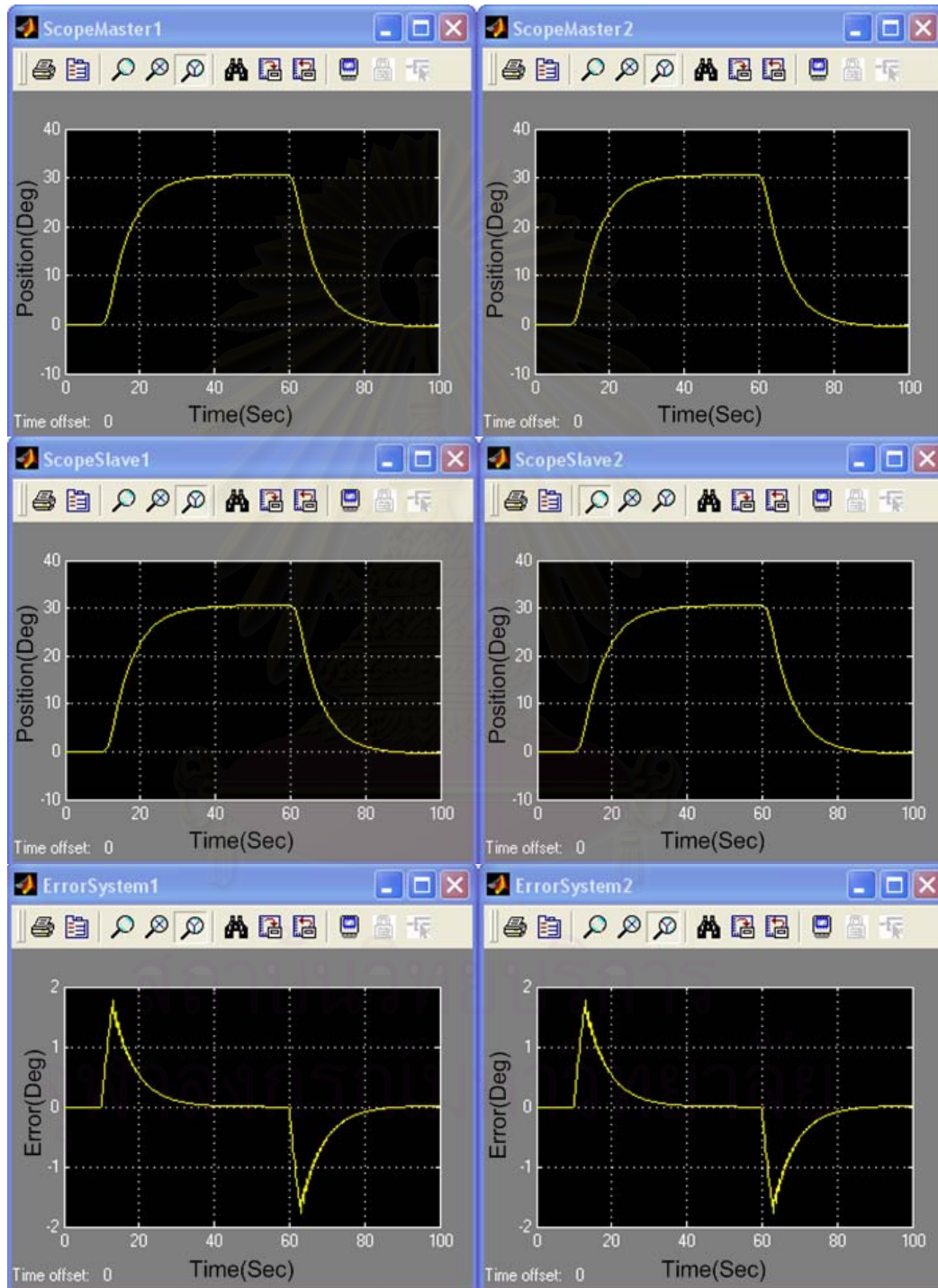
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที

รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ ซึ่งรูปที่ 4.14 ด้านบนซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster1 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.14 ด้านบนซ้ายพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่โดยมีการแกว่งเนื่องจากค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณสื่อสาร รูปที่ 4.14 ด้านตรงกลางซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave1 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 แต่ก็มีลักษณะการเคลื่อนที่โดยมีการแกว่งเนื่องจากเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณสื่อสารเช่นกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.14 ด้านล่างซ้ายมีชื่อรูปว่า ErrorSystem1 ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีการเคลื่อนที่โดยมีการแกว่งทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มมากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่แบบไม่มีเวลาหน่วง ซึ่งการแกว่งนี้อาจทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้

รูปที่ 4.14 ด้านบนขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster2 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.14 ด้านบนขวาพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่โดยมีการแกว่งเนื่องจากค่าเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณสื่อสาร รูปที่ 4.14 ด้านตรงกลางขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave2 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 แต่ก็มีลักษณะการเคลื่อนที่โดยมีการแกว่งเนื่องจากเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณสื่อสารเช่นกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.14 ด้านล่างซ้ายมีชื่อรูปว่า ErrorSystem2 ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีการเคลื่อนที่โดยมีการแกว่งทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มมากเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่แบบไม่มีเวลาหน่วง ซึ่งการแกว่งนี้อาจทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้

จากผลการทดลองหลายๆครั้งพบว่าส่วนใหญ่ผลการทดลองจะมีลักษณะคล้ายรูปที่ 4.14 แต่อาจมีค่าความผิดพลาดสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อยจึงใช้รูปที่ 4.14 แทนผลการทดลองการควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์

4.5.3 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น ซึ่งรูปที่ 4.15 ด้านบนซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster1 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่ที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.15 ด้านบนซ้ายพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแต่ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามคำสั่งอ้างอิงเนื่องจากวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นทำให้หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้ากว่าการควบคุมแบบไม่มีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น แต่ทำให้สามารถควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.15 ด้านตรงกลางซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave1 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 ด้านล่างซ้ายมีชื่อรูปว่า ErrorSystem1 ซึ่งจาก ErrorSystem1 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์

รูปที่ 4.15 ด้านบนขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster2 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่ที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.15 ด้านบนขวาพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแต่ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามคำสั่งอ้างอิงเนื่องจากวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นทำให้หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้ากว่าการควบคุมแบบไม่มีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น แต่ทำให้สามารถควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.15 ด้านตรงกลางขวาคือรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave2 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.15 ด้านล่างขวามีชื่อรูปว่า ErrorSystem2 ซึ่งจาก ErrorSystem2 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อ

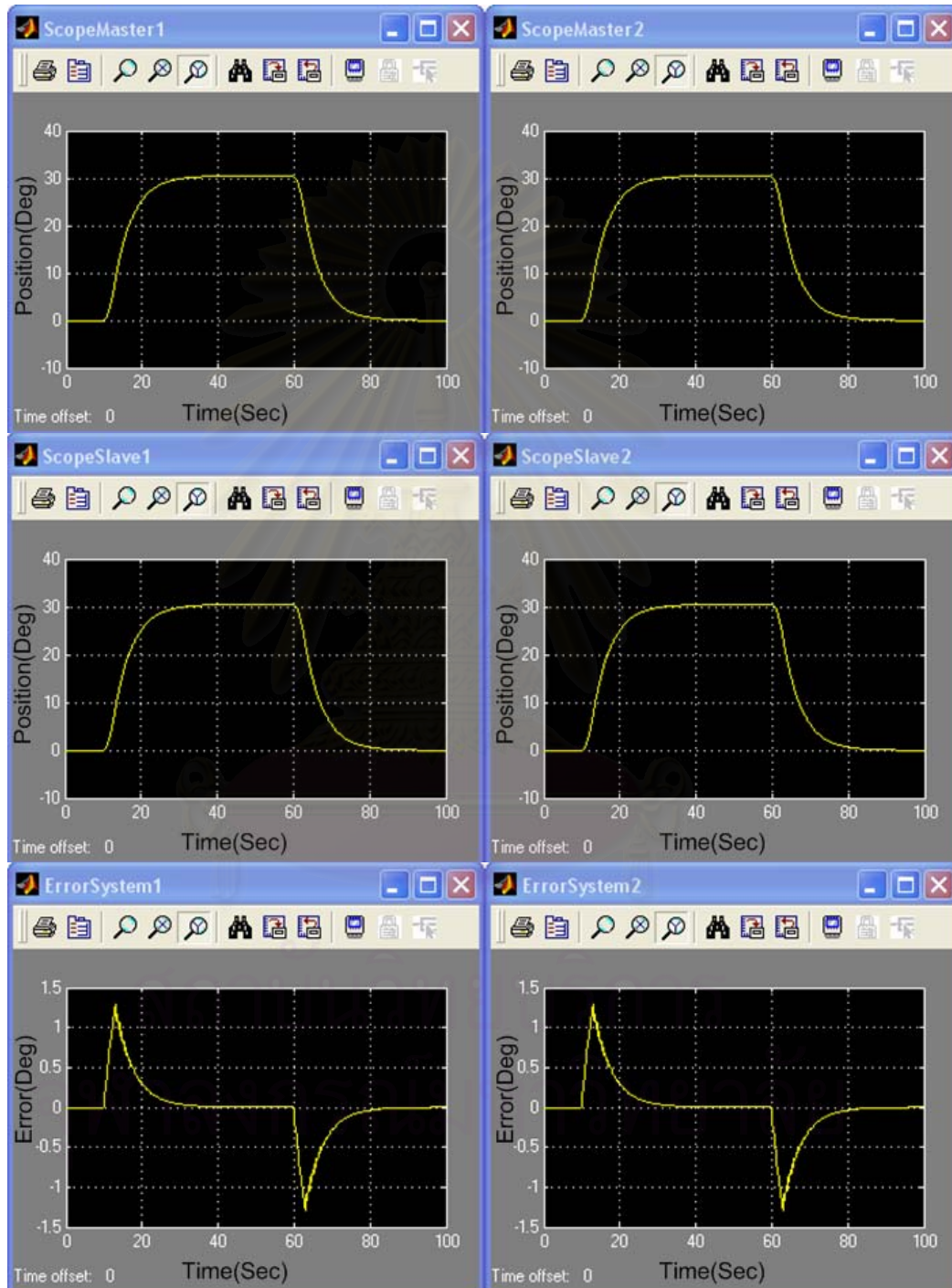
ต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์

จากผลการทดลองหลายๆครั้งพบว่าส่วนใหญ่ผลการทดลองจะมีลักษณะคล้ายรูปที่ 4.15 แต่อาจมีค่าความผิดพลาดสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อยจึงใช้รูปที่ 4.15 แทนผลการทดลองการควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.4 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman filter and Energy regulator



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman filter and Energy regulator

รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนาค่า ซึ่งรูปที่ 4.16 ด้านบนซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster1 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.16 ด้านบนซ้ายพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแต่ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามคำสั่งอ้างอิงเนื่องจากวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นทำให้หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้ากว่าการควบคุมแบบไม่มีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น แต่ทำให้สามารถควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.16 ด้านตรงกลางซ้ายเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave1 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.16 ด้านล่างซ้ายมีชื่อรูปว่า ErrorSystem1 ซึ่งจาก ErrorSystem1 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์

รูปที่ 4.16 ด้านบนขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeMaster2 โดยมีคำสั่งอ้างอิงให้เคลื่อนที่เมื่อเวลาวินาทีที่ 10 ด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาทีจากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแล้วหยุดเคลื่อนที่ครู่หนึ่งจนถึงเวลาวินาทีที่ 40 แล้วเคลื่อนที่กลับยังตำแหน่งเริ่มต้นด้วยความเร็วคงที่ 10 องศาต่อวินาที จากรูปที่ 4.16 ด้านบนขวาพบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศาแต่ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามคำสั่งอ้างอิงเนื่องจากวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นทำให้หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้ากว่าการควบคุมแบบไม่มีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น แต่ทำให้สามารถควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 4.16 ด้านตรงกลางขวาเป็นรูปการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีชื่อรูปว่า ScopeSlave2 ซึ่งเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 เทียบกับหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4.16 ด้านล่างขวามีชื่อรูปว่า ErrorSystem2 ซึ่งจาก ErrorSystem2 พบว่าเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เริ่มเคลื่อนที่วินาทีที่ 10 จากตำแหน่ง 0 องศาถึง 30 องศา ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อ

ต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 หยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ ต่อมาเมื่อหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 จะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคำสั่งอ้างอิงสั่งให้หุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 หยุดอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้นหลังจากนั้นค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์

จากผลการทดลองหลายๆครั้งพบว่าส่วนใหญ่ผลการทดลองจะมีลักษณะคล้ายรูปที่ 4.16 แต่อาจมีค่าความผิดพลาดสูงสุดแตกต่างกันเล็กน้อยจึงใช้รูปที่ 4.16 แทนผลการทดลองการควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาที โดยการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนาค่า

4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยระบบเสมือน(Simulation System)

ในการทดลองระบบเสมือน (Simulation System) นั้นมีเป้าหมายเพื่อควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลองควบคุมระบบแบบไม่มีตัวหน่วงเวลา โดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ พบว่าหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพและหุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน โดยขณะที่หุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟเคลื่อนที่จนกระทั่งหยุดอยู่ที่ตำแหน่ง 30 องศาตามคำสั่งอ้างอิง จะมีค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นจาก 0 องศาถึงประมาณ 0.7 องศาจากนั้นเมื่อหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นพบว่าค่าความผิดพลาดค่อยๆลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งแสดงว่าสามารถควบคุมให้หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงได้และหุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อมีเวลาหน่วงไม่คงที่ในการส่งสัญญาณไปกลับซึ่งมีค่าระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีใส่เข้าไปในระบบ จะทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟมีการแกว่งเกิดขึ้นและมีค่าโอเวอร์ชูตสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับการควบคุมที่ไม่มีค่าหน่วงเวลา ซึ่งผลที่เกิดขึ้นจะทำให้ระบบควบคุมแบบมีตัวหน่วงเวลาไม่มีเสถียรภาพ

เมื่อนำวิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ มาใช้ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นแล้วทำการควบคุมระบบที่มีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีในการส่งสัญญาณไปกลับ ซึ่งพบว่าผลการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟมีการเคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้าลง แต่ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้นเหมือนการควบคุมที่ไม่ใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น และค่าโอเวอร์ชูตของระบบมีค่าน้อยกว่าระบบควบคุมที่ไม่ใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นเช่นกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟเทียบกับหุ่นมาสเตอร์จะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ และมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์ ซึ่งตรงกับทฤษฎี Wave Variables Transformation ดังนั้น

แสดงว่าการนำวิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ มาใช้ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น สามารถทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากนั้นเมื่อเพิ่มตัวทำนายค่าให้กับระบบควบคุม ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ ระหว่าง 400 ถึง 1000 มิลลิวินาทีในการส่งสัญญาณ ไปกลับ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า Kalman filter and Energy regulator จะทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟมีการเคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้าลง แต่ไม่มีการแกว่งเกิดขึ้นเหมือนการควบคุมที่ไม่ใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น และค่าโอเวอร์ชูตของระบบมีค่าน้อยกว่าระบบควบคุมที่ไม่ใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นเช่นกัน โดยที่ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟเทียบกับหุ่นมาสเตอร์จะค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ และมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับศูนย์ ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบควบคุมที่ไม่มีตัวทำนายค่าพบว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟเทียบกับหุ่นมาสเตอร์จะลดลงเป็นศูนย์ได้เร็วขึ้น ดังนั้นแสดงว่าการนำวิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ มาใช้ร่วมกับวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่า สามารถทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ

การทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟแบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบควบคุมมุมที่แกนของหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ กับแบบควบคุมตำแหน่ง (X,Y) ในแนวระนาบที่ขนานกับพื้น โดยในการทดลองใช้โปรแกรม Microsoft Visual C++ ในการเขียนโปรแกรมควบคุม

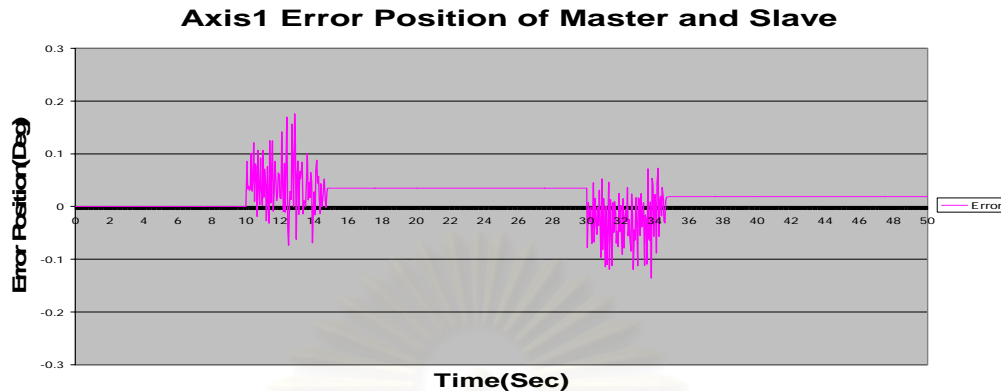
5.1 ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วง

ทำการทดลองโดยควบคุมหุ่นมาสเตอร์ให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แล้วหยุดนิ่งครู่หนึ่ง จากนั้นเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิมด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิม ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากหุ่นยนต์โดยทั่วไปสามารถการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ได้

ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงซึ่งข้อต่อที่ 1เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 4 วินาที ส่วนข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 4 วินาที



รูปที่ 5.1 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 4 วินาที

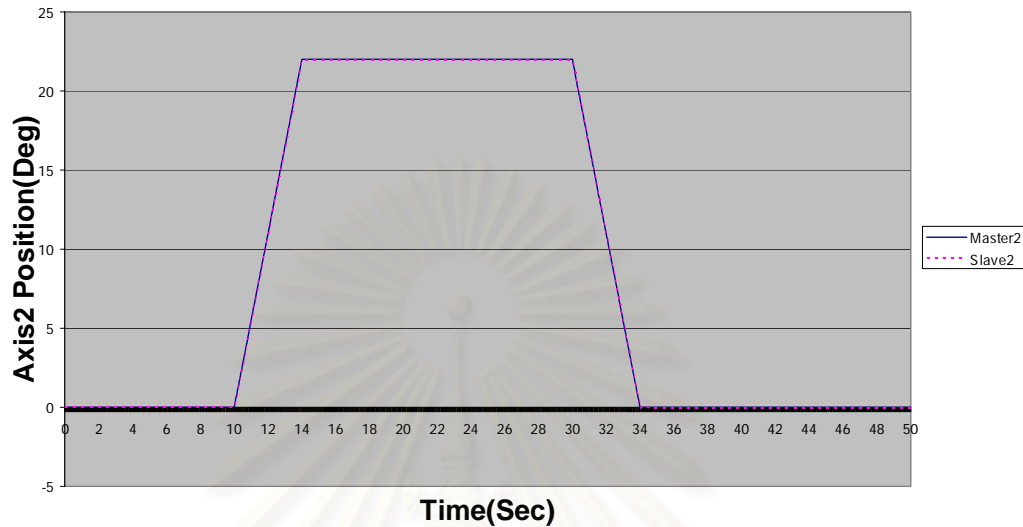


รูปที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 4 วินาที

รูปที่ 5.1 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 14 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม ดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 34 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 1 ของหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 35 น้อยกว่า 0.1 องศาหรือน้อยกว่า 0.002 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 องศาหรือ 0.002 เรเดียน

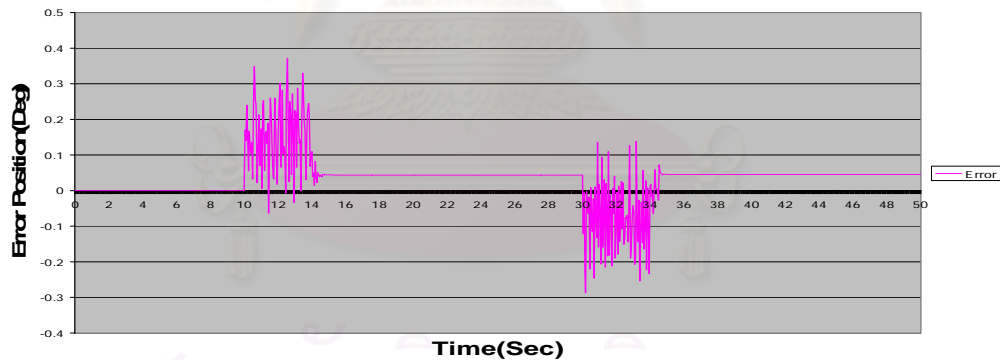
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Axis2 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.3 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 4 วินาที

Axis2 Error Position of Master and Slave



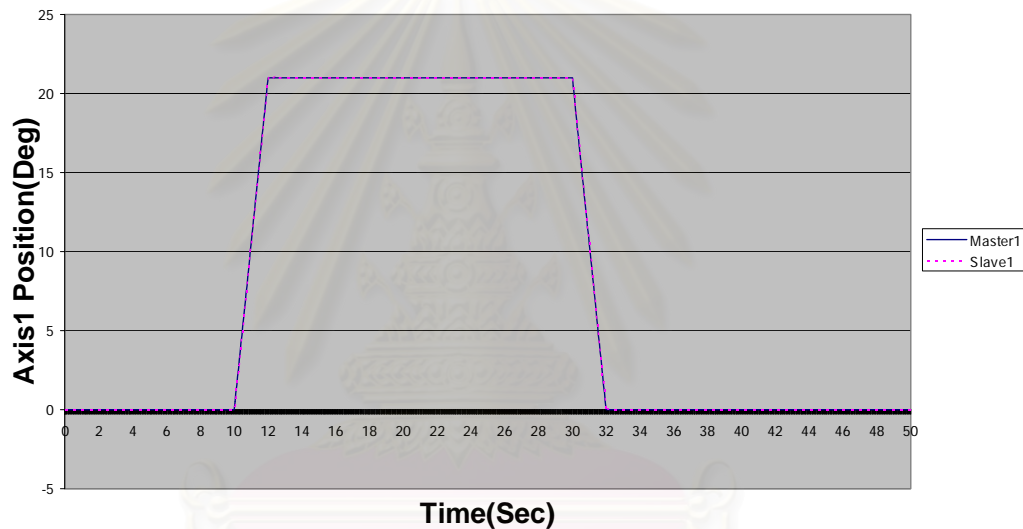
รูปที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 4 วินาที

รูปที่ 5.3 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บ่งแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 14 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม ดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 34 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม

กลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 2 ของหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 35 น้อยกว่า 0.1 องศาหรือน้อยกว่า 0.002 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 องศาหรือ 0.002 เรเดียน

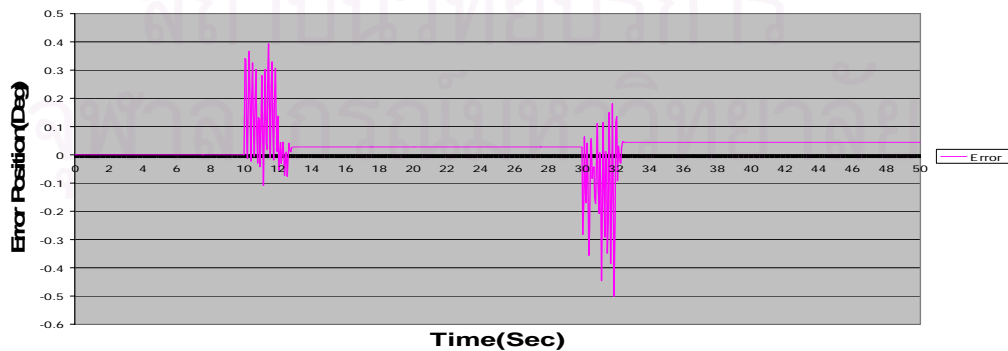
ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงซึ่งข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที ส่วนข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที

Axis1 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.5 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที

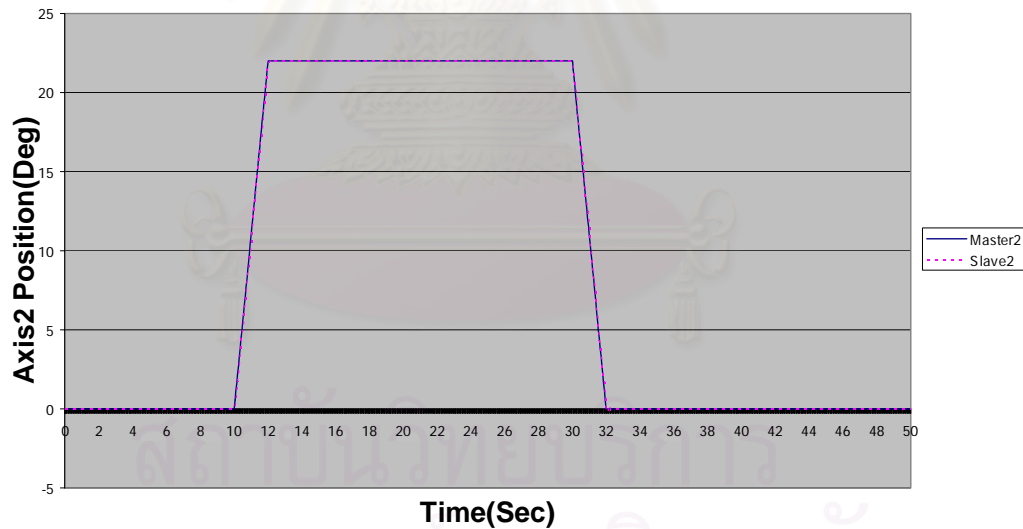
Axis1 Error Position of Master and Slave



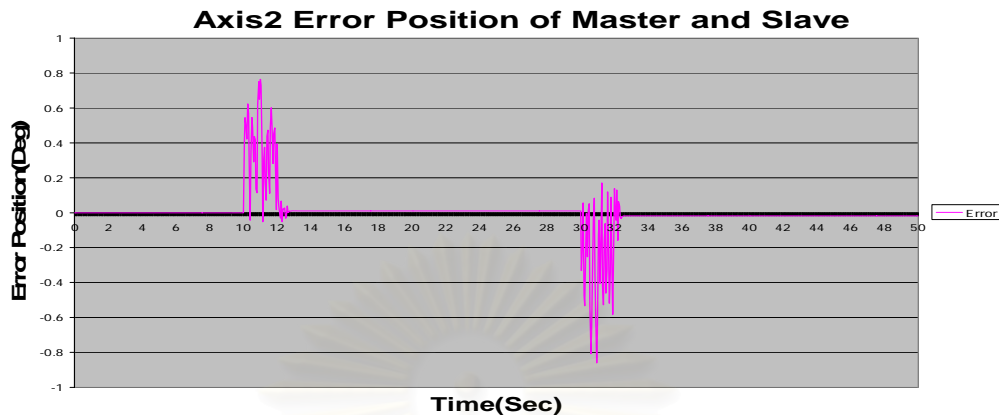
รูปที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที

รูปที่ 5.5 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บ่งแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นประแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม ดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 1 ของหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ตั้งแต่วันที่ 10 ถึงวินาทีที่ 33 น้อยกว่า 0.1 องศาหรือน้อยกว่า 0.002 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 องศาหรือ 0.002 เรเดียน

Axis2 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.7 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที

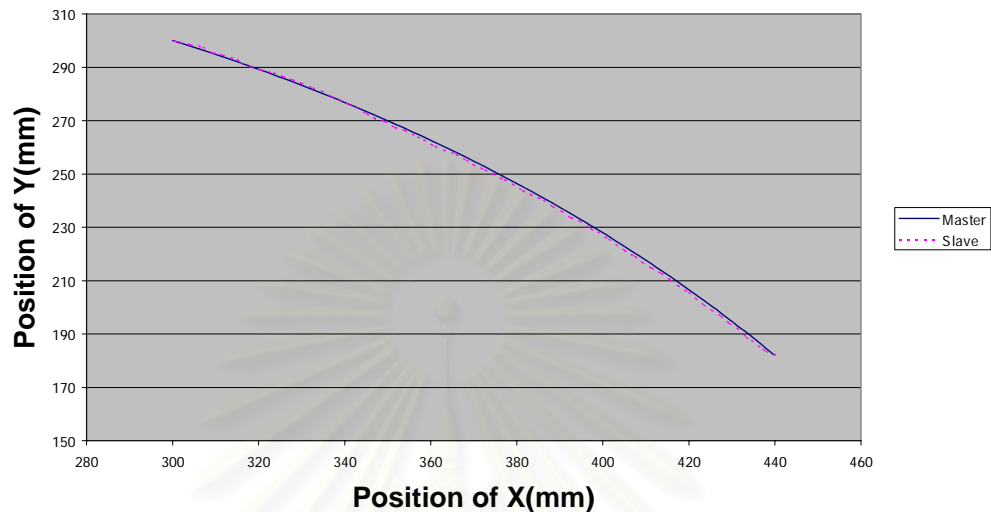


รูปที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที

รูปที่ 5.7 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม ดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวก จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม กลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 2 ของหุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 33 เท่ากับ 0.2 องศาหรือเท่ากับ 0.003 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 องศาหรือ 0.002 เรเดียน

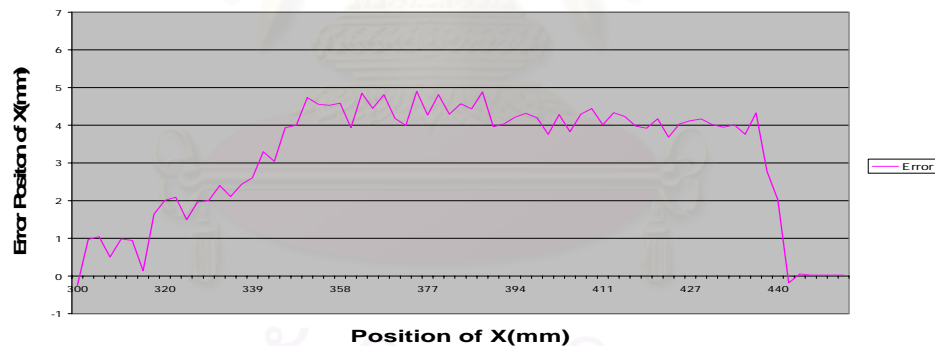
ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงซึ่งทำการควบคุมตำแหน่งที่ปลายของหุ่นยนต์มาสเตอร์สเลฟให้เคลื่อนที่ในระนาบ XY จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

Realtime Position(X,Y) of Master and Slave



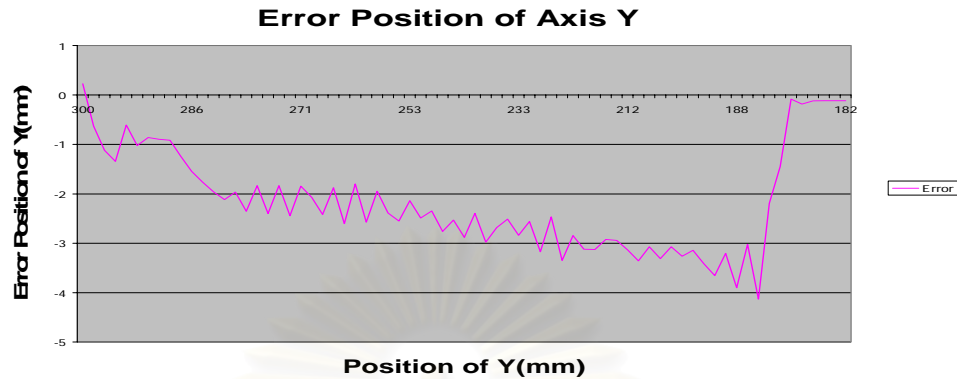
รูปที่ 5.9 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

Error Positon of Axis X



รูปที่ 5.10 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

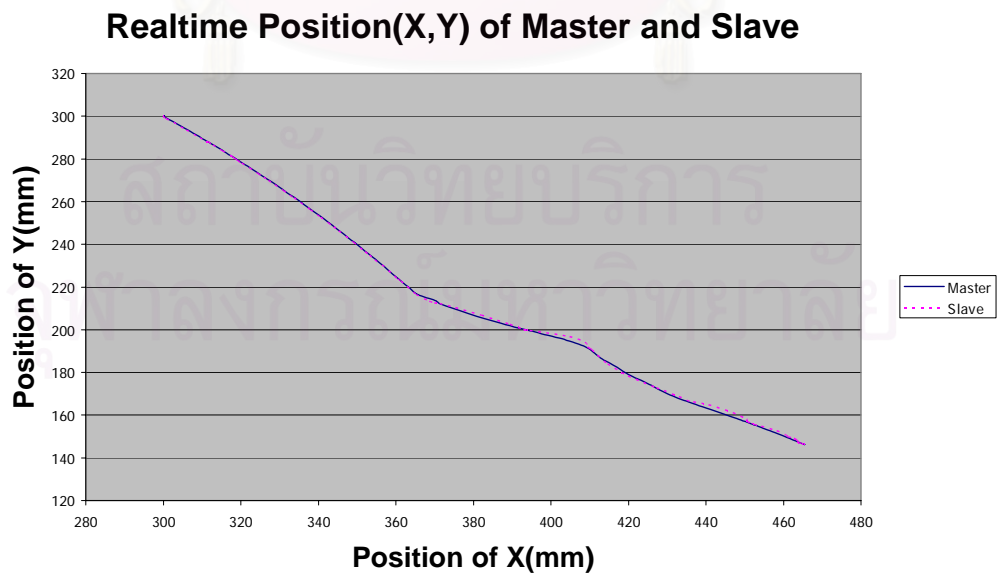
รูปที่ 5.9 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ รูปที่ 5.10 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182) เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร และมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร



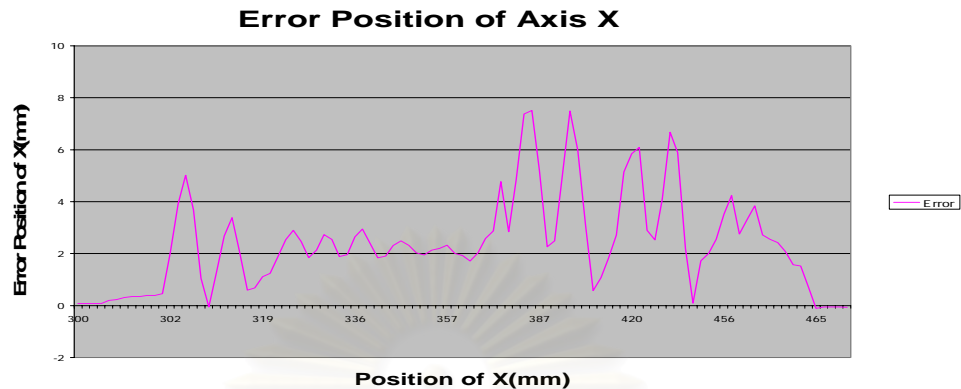
รูปที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

รูปที่ 5.11 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182) เท่ากับ -2.4 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร

ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงซึ่งทำการควบคุมตำแหน่ง โดยให้ผู้ควบคุมจับที่ปลายของหุ่นยนต์มาสเตอร์แล้วเคลื่อนตำแหน่งตามต้องการ โดยเริ่มต้นที่ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146)

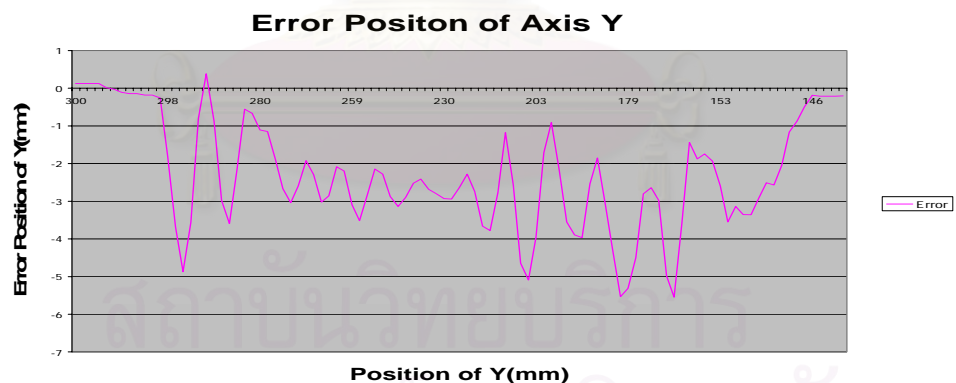


รูปที่ 5.12 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146)



รูปที่ 5.13 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146)

รูปที่ 5.12 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ รูปที่ 5.13 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146) มีค่าเท่ากับ 3.0 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร

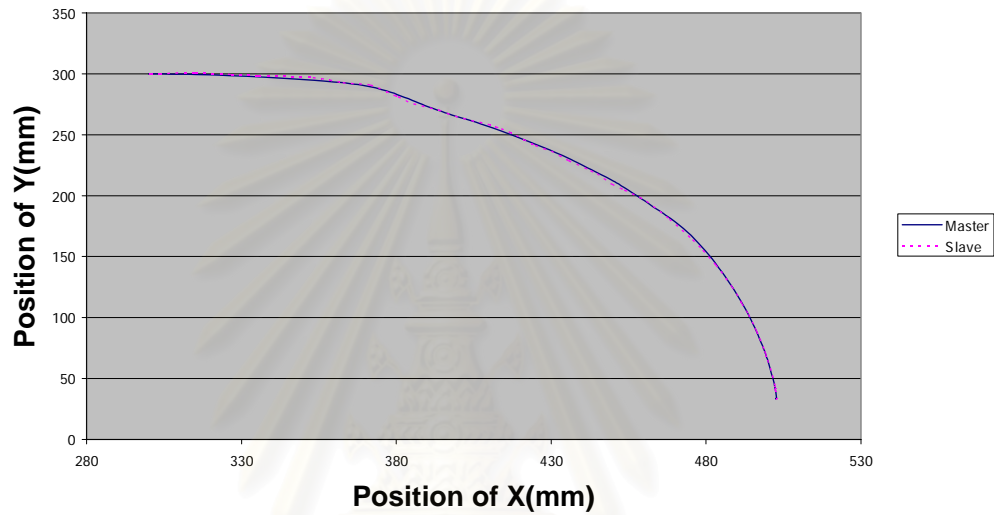


รูปที่ 5.14 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึง ตำแหน่ง (465,146)

รูปที่ 5.14 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (465,146) มีค่าเท่ากับ 2.7 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร

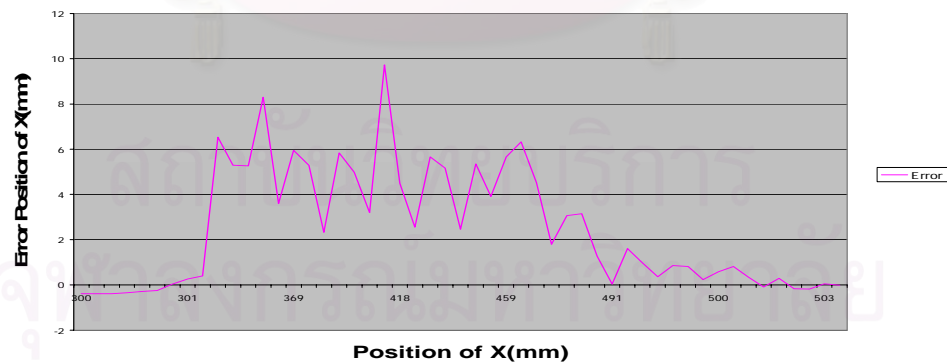
ระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงซึ่งทำการควบคุมตำแหน่ง โดยให้ผู้ควบคุมจับที่ปลายของหุ่นยนต์มาสเตอร์แล้วเคลื่อนตำแหน่งตามต้องการโดยเริ่มต้นที่ตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34)

Realtime Position (X,Y) of Master and Slave



รูปที่ 5.15 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34)

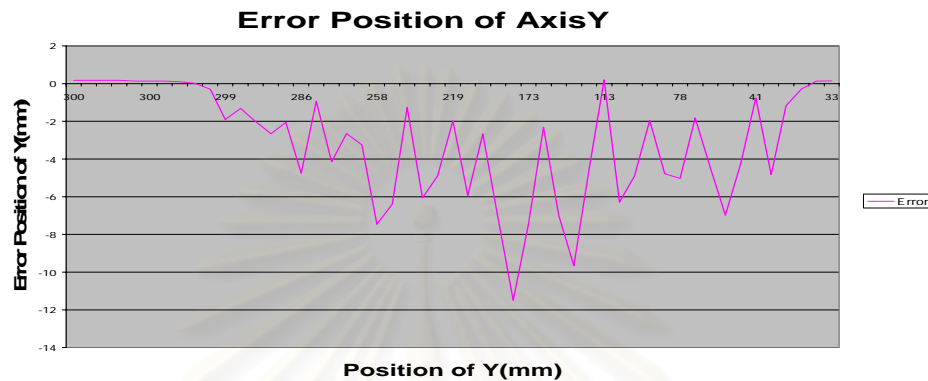
Error Position of Axis X



รูปที่ 5.16 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ซึ่งหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34)

รูปที่ 5.15 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ รูปที่ 5.16 แสดงค่าความผิดพลาดตาม

แนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34) มีค่าเท่ากับ 3.6 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.17 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ซึ่งหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟเคลื่อนที่จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34)

รูปที่ 5.17 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (503,34) มีค่าเท่ากับ 4.3 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร

5.2 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วง

พิจารณาระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงโดยนำระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงมาใช้ค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาที โดยค่าเวลาหน่วงเกิดขึ้นจากการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual C++ ให้หน่วงสัญญาณไว้

ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาที โดยส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 1.5 วินาที



รูปที่ 5.18 ข้อต่อที่ 1 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่ 1

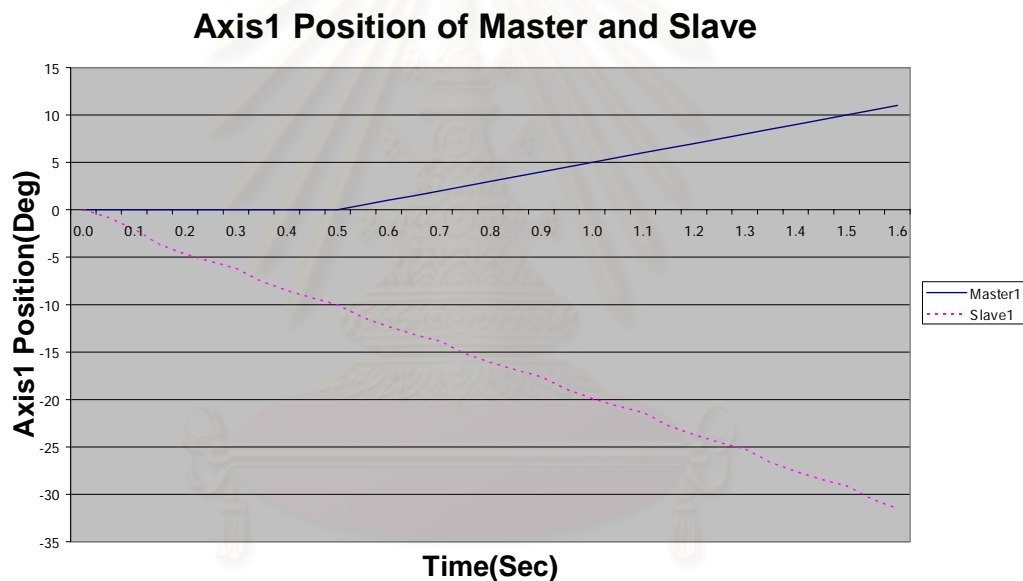


รูปที่ 5.19 ข้อต่อที่ 2 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่ 1

รูปที่ 5.18 แสดงการเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 1 ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีโดยส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 1.5 วินาที โดยเส้นทึบแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของ

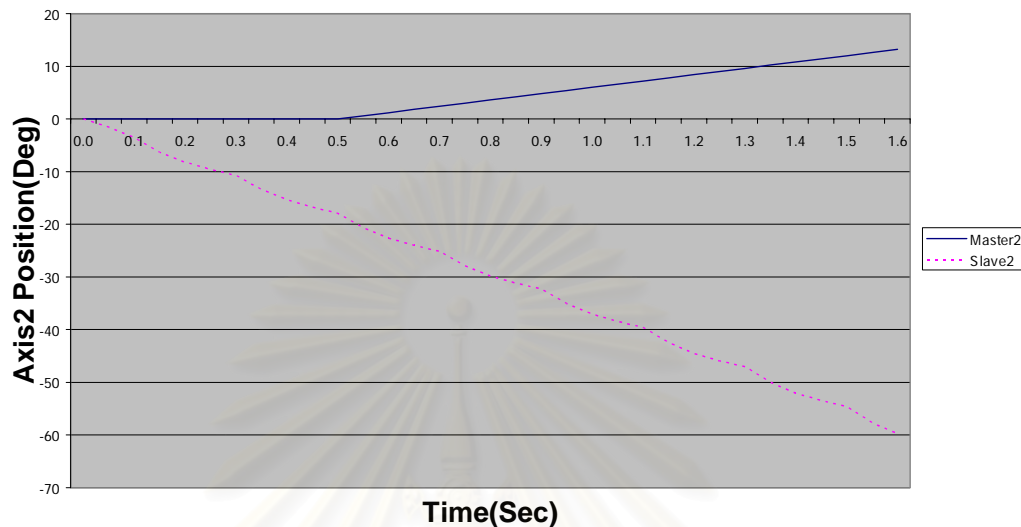
หุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.18 แสดงว่าการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟไม่มีเสถียรภาพ รูปที่ 5.19 แสดงการเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 2 ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีโดยส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 1.5 วินาที โดยเส้นทึบแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นประแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.19 แสดงว่าการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟไม่มีเสถียรภาพ

ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาที ซึ่งข้อต่อที่ 1 ส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.5 วินาทีจากนั้นให้เคลื่อนที่ 10 องศาต่อวินาที ส่วนข้อต่อที่ 2 ส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.5 วินาทีจากนั้นให้เคลื่อนที่ 12 องศาต่อวินาที



รูปที่ 5.20 ข้อต่อที่ 1 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่ 2

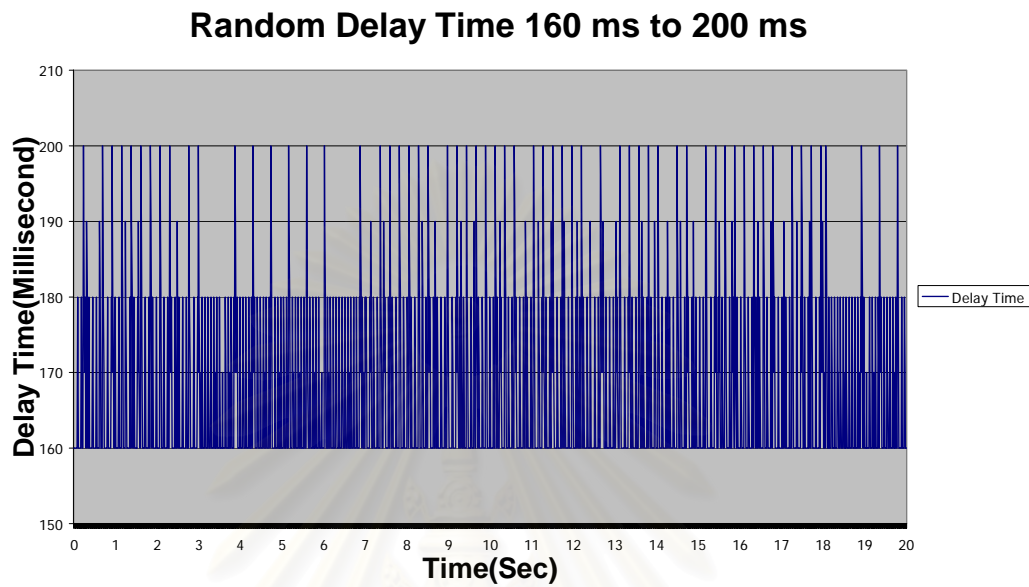
Axis2 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.21 ข้อต่อที่ 2 ของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีแบบที่ 2

รูปที่ 5.20 แสดงการเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 1 ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีโดยส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.5 วินาทีจากนั้นให้เคลื่อนที่ 10 องศาต่อวินาที โดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.20 แสดงว่าการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟไม่มีเสถียรภาพ รูปที่ 5.21 แสดงการเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 2 ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟของระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีโดยส่งสัญญาณเท่ากับ 0 องศา ตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 0.5 วินาทีจากนั้นให้เคลื่อนที่ 12 องศาต่อวินาที โดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.21 แสดงว่าการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟไม่มีเสถียรภาพ

จากงานวิจัยของ Saghir Munir และ Wanye J. Book ทำการทดลองควบคุมระยะไกลโดยส่งสัญญาณแบบ UDP Protocol จาก Atlanta USA ถึง Tokyo Japan แล้วส่งสัญญาณกลับไปยัง Atlanta USA เพื่อให้ระยะทางในการส่งสัญญาณมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโลก พบว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณไปกลับมีค่าเท่ากับ 364 มิลลิวินาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการสร้างเวลาหน่วงไม่คงที่ในการส่งสัญญาณระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที ทำให้การส่งสัญญาณไปกลับมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที เพื่อให้ครอบคลุมค่าเฉลี่ยการส่งสัญญาณจาก Atlanta USA ถึง Tokyo Japan แล้วส่งสัญญาณกลับไปยัง Atlanta USA ซึ่งเท่ากับ 364 มิลลิวินาที



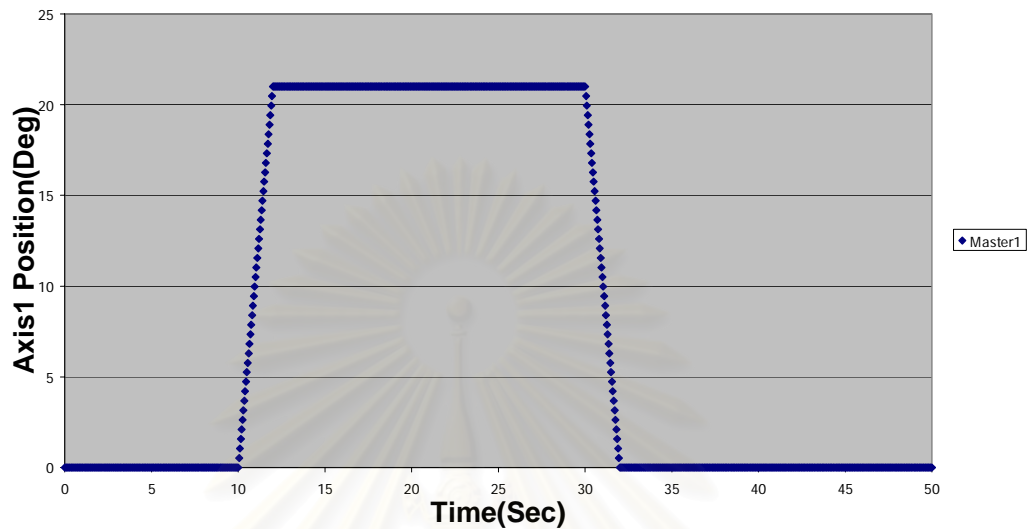
รูปที่ 5.22 เวลาหน่วงในการส่งสัญญาณตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 20 วินาที

รูปที่ 5.22 แสดงเวลาหน่วงที่สร้างขึ้นโดยเขียนโปรแกรม Microsoft Visual C++ ซึ่งมีค่าเวลาหน่วงระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาทีตั้งแต่เวลา 0 วินาทีถึง 20 วินาที โดยค่าเฉลี่ยของเวลาหน่วงมีค่าเท่ากับ 167.15 มิลลิวินาทีและมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 10.73 มิลลิวินาที

ทำการทดลองส่งสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 มื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาที

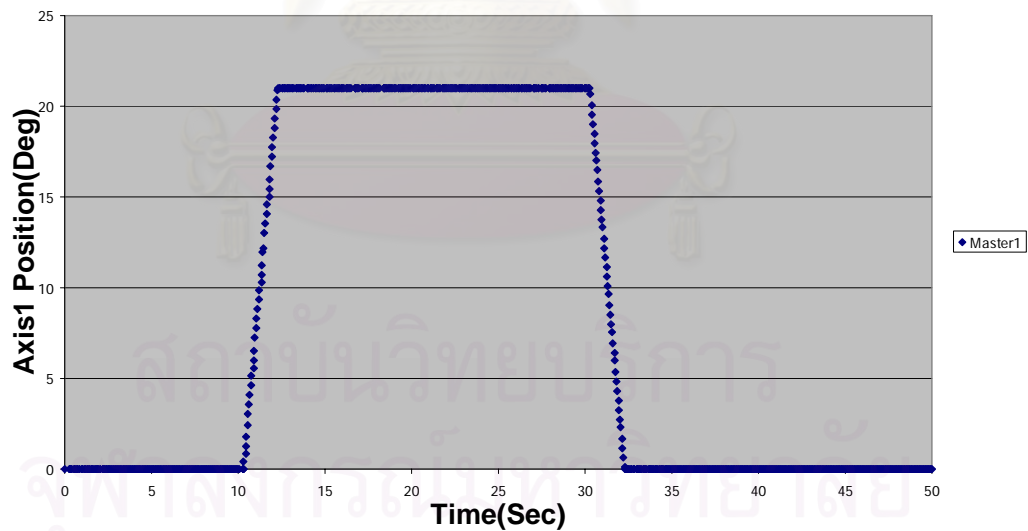
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reference Axis1 Position



รูปที่ 5.23 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีที่ก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร

Random Delay Time of Axis1 Position

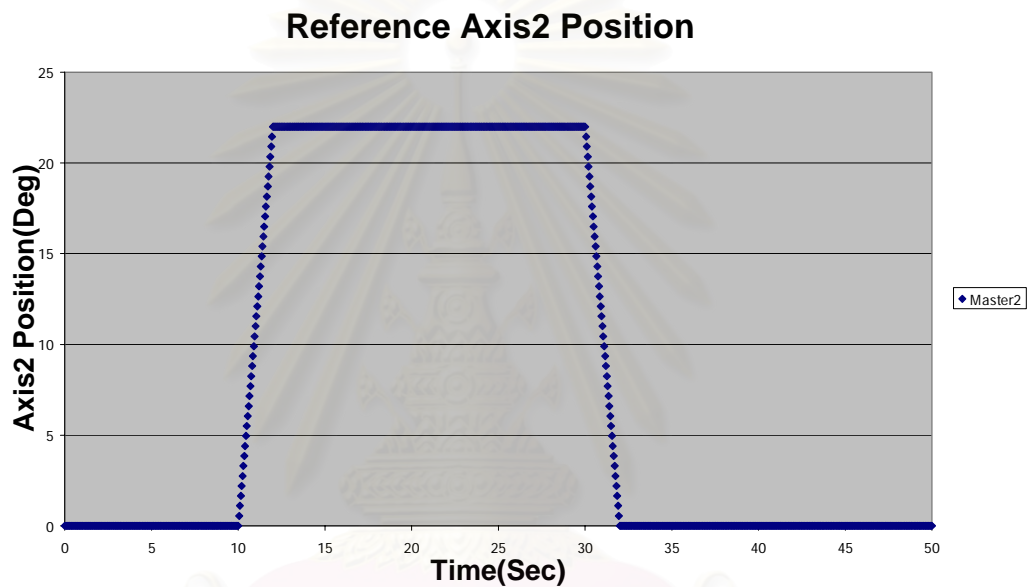


รูปที่ 5.24 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที

รูปที่ 5.23 แสดงค่าสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณที่ส่งมีความสม่ำเสมอเนื่องจากยังไม่มีเวลาหน่วง รูปที่ 5.24

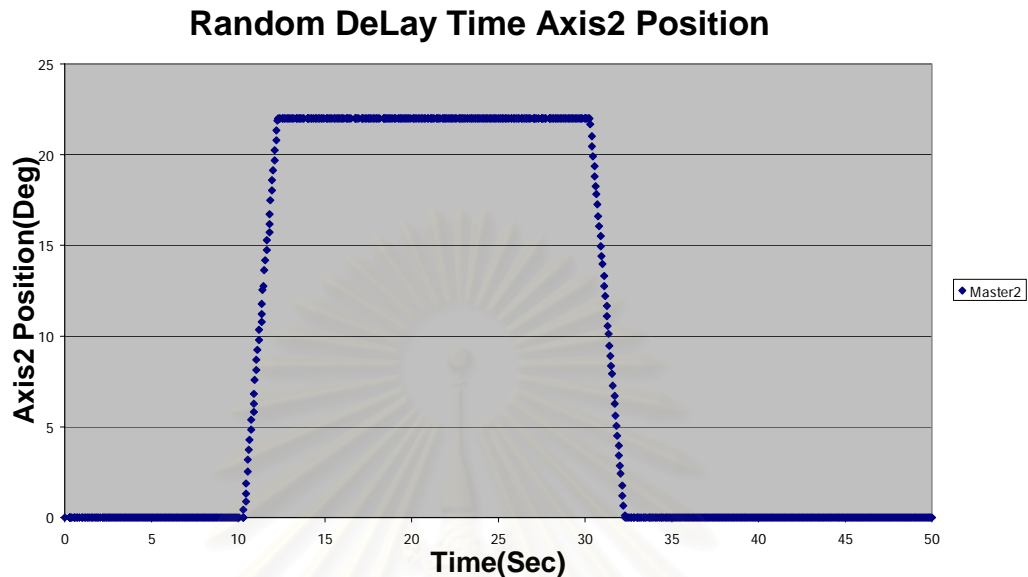
แสดงค่าสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 1 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณที่ส่งผ่านสายสื่อสารมีค่าไม่สม่ำเสมอ

สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 เมื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาที



รูปที่ 5.25 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.26 สัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสาร ซึ่งมีค่าตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที

รูปที่ 5.25 แสดงค่าสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีก่อนส่งผ่านสายสื่อสาร ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณที่ส่งมีความสม่ำเสมอเนื่องจากยังไม่มีเวลาหน่วง รูปที่ 5.26 แสดงค่าสัญญาณจากหุ่นมาสเตอร์ข้อต่อที่ 2 ในช่วงเวลา 0 ถึง 50 วินาทีเมื่อส่งผ่านสายสื่อสารซึ่งมีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 160 มิลลิวินาทีถึง 200 มิลลิวินาที ซึ่งพบว่าค่าสัญญาณที่ส่งผ่านสายสื่อสารมีค่าไม่สม่ำเสมอ

5.3 ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงโดยใช้ตัวแปรคลื่น

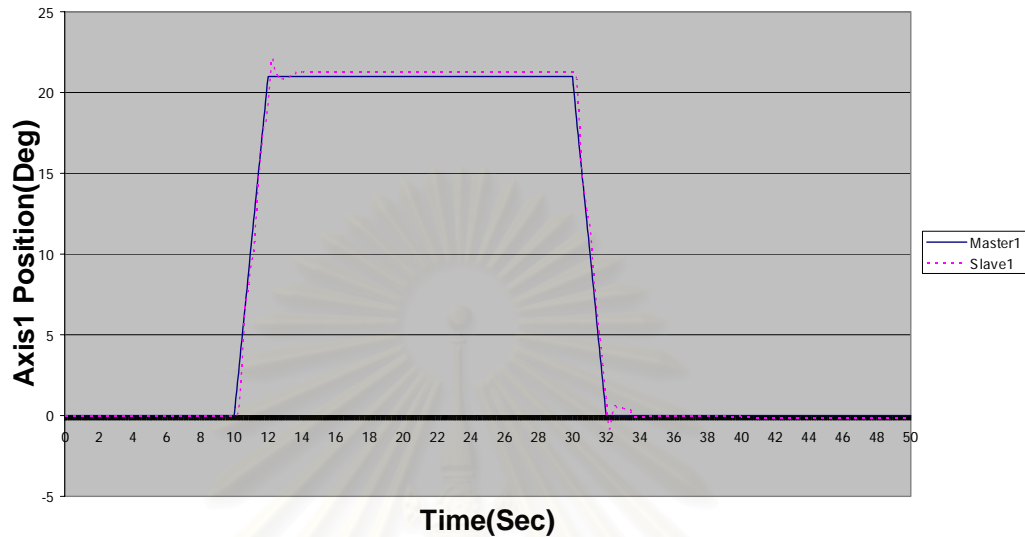
การหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่น A_w, B_w, C_w และ D_w สำหรับระบบที่มีระดับชั้นความเร็วเท่ากับ 2 ได้โดยกำหนดให้

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } W_1, W_2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

จากนั้นทำการปรับค่าจนได้ค่าที่เหมาะสมพบว่าค่า $W_1 = 8.45$ และค่า $W_2 = 10.7$

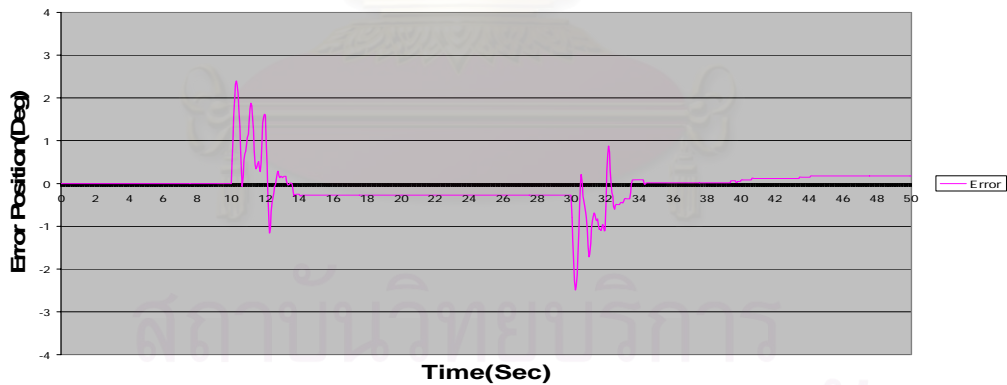
ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที เมื่อควบคุมข้อต่อที่ 1 เพียงข้อต่อเดียว โดยเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที

Axis1 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.27 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาระหว่าง 320 มิลลิวินาที ถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น

Axis1 Error Position of Master and Slave

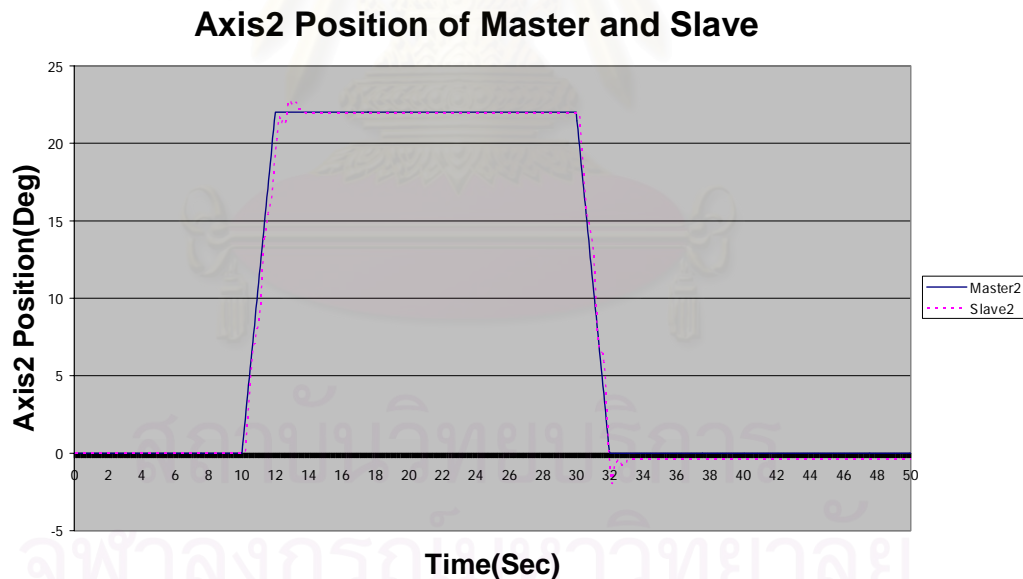


รูปที่ 5.28 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 5.27 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟซึ่งเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 1 เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น ซึ่งเส้นทึบแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.28 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์

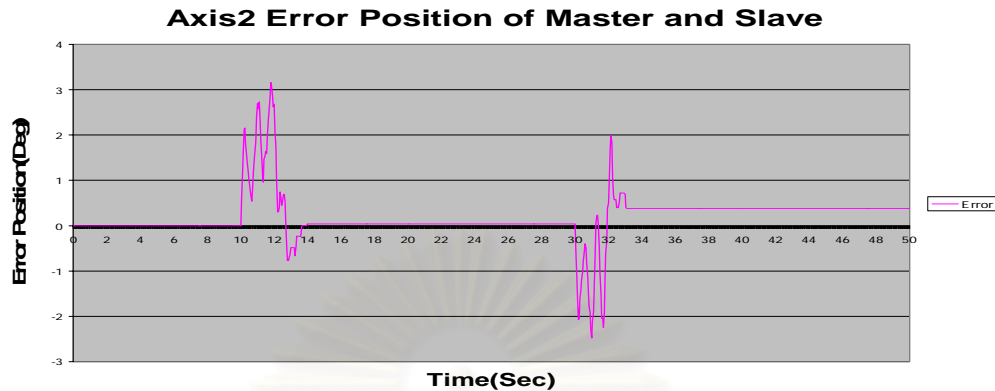
เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามคั้งนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวกซึ่งที่วินาทีที่ 12 จะเกิดค่า overshoot ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นลบซึ่งที่วินาทีที่ 32 จะเกิดค่า overshoot ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง ค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.28 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.6 องศาหรือเท่ากับ 0.010 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.2 องศาหรือเท่ากับ 0.003 เรเดียน

ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที เมื่อควบคุมข้อต่อที่ 2 เพียงข้อต่อเดียว โดยเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที



รูปที่ 5.29 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาทีโดยใช้ตัวแปรคลื่น

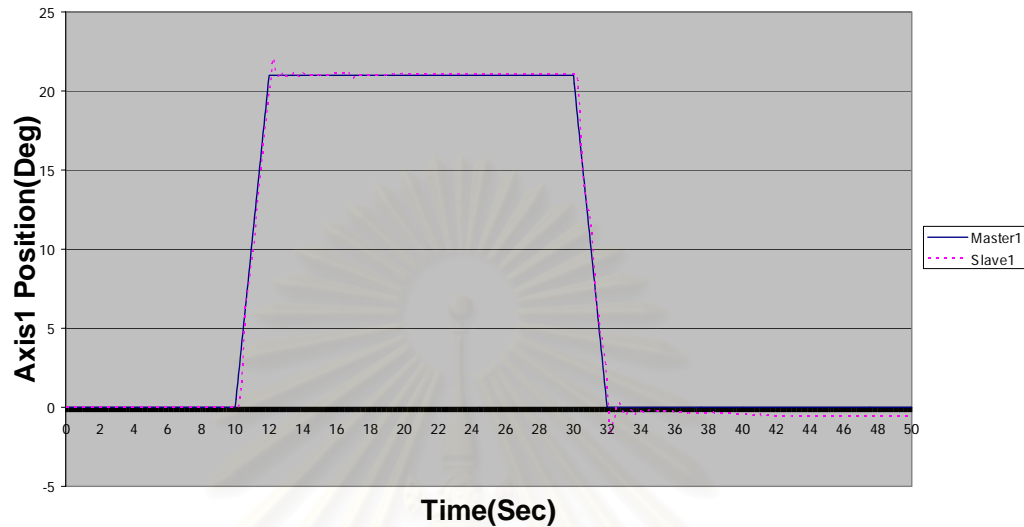


รูปที่ 5.30 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 5.29 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟซึ่งเคลื่อนที่ข้อต่อที่ 2 เพียงข้อต่อเดียวในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น ซึ่งเส้นทึบแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.30 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามคั้งนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวกซึ่งที่วินาทีที่ 12 จะเกิดค่า overshoot ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆ ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบซึ่งที่วินาทีที่ 32 จะเกิดค่า overshoot ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆ ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.30 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.7 องศาหรือเท่ากับ 0.013 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.4 องศาหรือเท่ากับ 0.007 เรเดียน

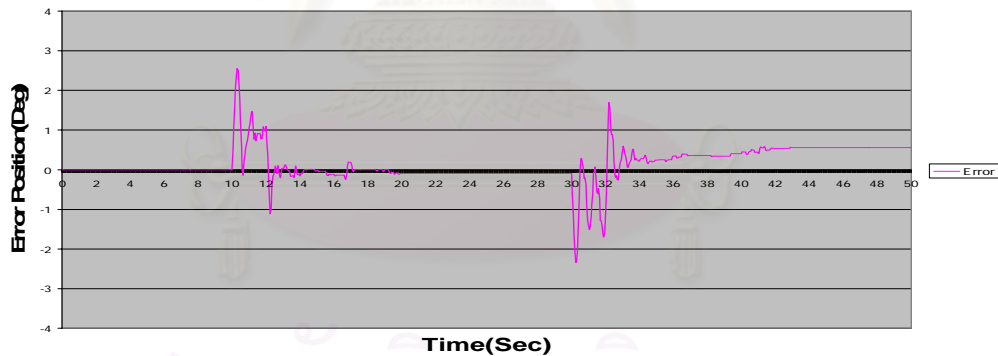
ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที เมื่อควบคุมทั้ง 2 ข้อต่อพร้อมกัน โดยข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ในเวลา 2 วินาที และข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ในเวลา 2 วินาที

Axis1 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.31 ข้อต่อที่ 1 เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

Axis1 Error Position of Master and Slave

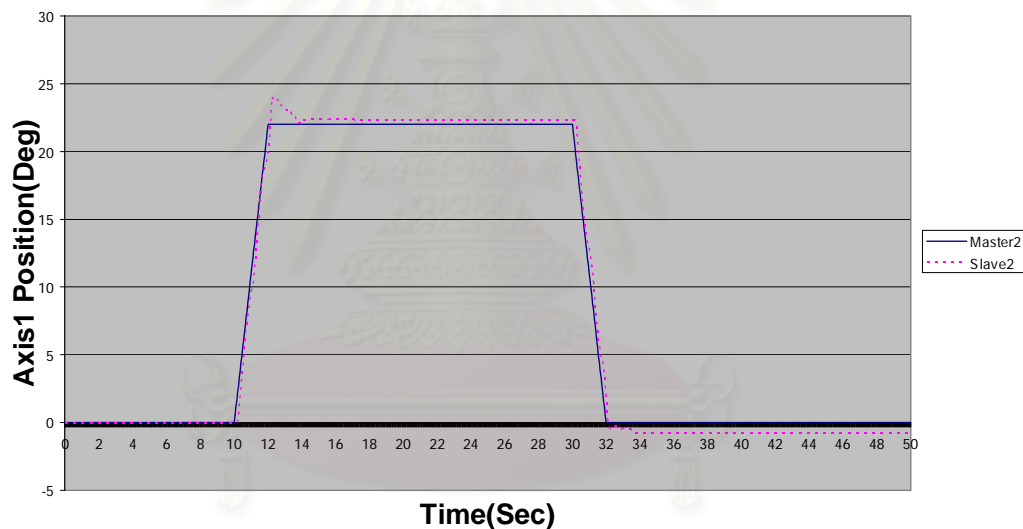


รูปที่ 5.32 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 5.31 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น ซึ่งเส้นที่บ่งแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ โดยเส้นที่บ่งแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.32 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 1 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวกซึ่งที่วินาทีที่ 12 จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้ว

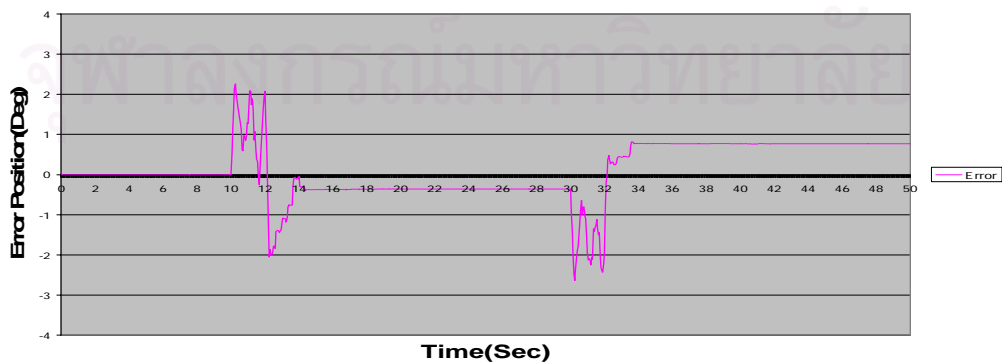
ค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบซึ่งที่วินาทีที่ 32 จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.32 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 1 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 21 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.5 องศาหรือเท่ากับ 0.009 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.6 องศาหรือเท่ากับ 0.010 เรเดียน

Axis2 Position of Master and Slave



รูปที่ 5.33 ข้อต่อที่ 2 เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

Axis2 Error Position of Master and Slave

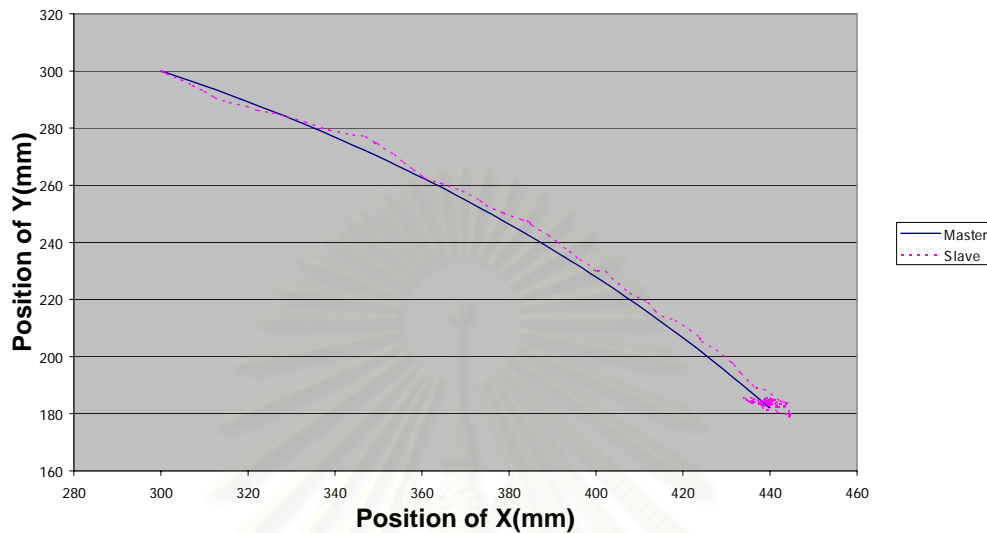


รูปที่ 5.34 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น

รูปที่ 5.33 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลา ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที โดยใช้ตัวแปรคลื่น ซึ่งเส้นทึบแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ จากรูปที่ 5.34 ค่าความผิดพลาดของข้อต่อที่ 2 ขณะวินาทีที่ 10 ถึงวินาทีที่ 12 เกิดจากการที่หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไปก่อน จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตาม ดังนั้นตำแหน่งมุมของหุ่นมาสเตอร์จึงมากกว่ามุมของหุ่นสเลฟ ทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นบวกซึ่งที่วินาทีที่ 12 จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 30 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ขณะวินาทีที่ 30 ถึงวินาทีที่ 32 หุ่นมาสเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ค่าเดิมกลับมาที่จุดเริ่มต้น จากนั้นหุ่นสเลฟจึงเคลื่อนที่ตามกลับมายังจุดเริ่มต้น ทำให้ความผิดพลาดเป็นลบซึ่งที่วินาทีที่ 32 จะเกิดค่าovershootขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากค่าเวลาหน่วง แล้วค่าความผิดพลาดจะค่อยๆลดลงเข้าใกล้ศูนย์ จากนั้นหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่จนกระทั่งถึงวินาทีที่ 50 หุ่นสเลฟจึงหยุดเคลื่อนที่เช่นกัน ทำให้ค่าความผิดพลาดคงที่ ซึ่งจากรูปที่ 5.34 ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของข้อต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 0 องศา ถึง 22 องศา ตั้งแต่วินาทีที่ 10 ถึง วินาทีที่ 35 เท่ากับ 0.8 องศาหรือเท่ากับ 0.014 เรเดียนและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 0.8 องศาหรือเท่ากับ 0.013 เรเดียน

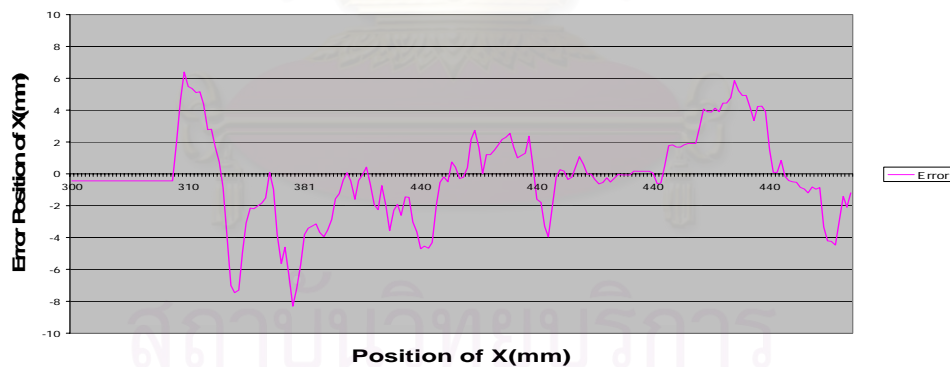
ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที ซึ่งทำการควบคุมตำแหน่งที่ปลายของแขนกลให้เคลื่อนที่ในระนาบ XY จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

Position (X,Y) of Master-Slave by using Wave Transform



รูปที่ 5.35 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นจากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

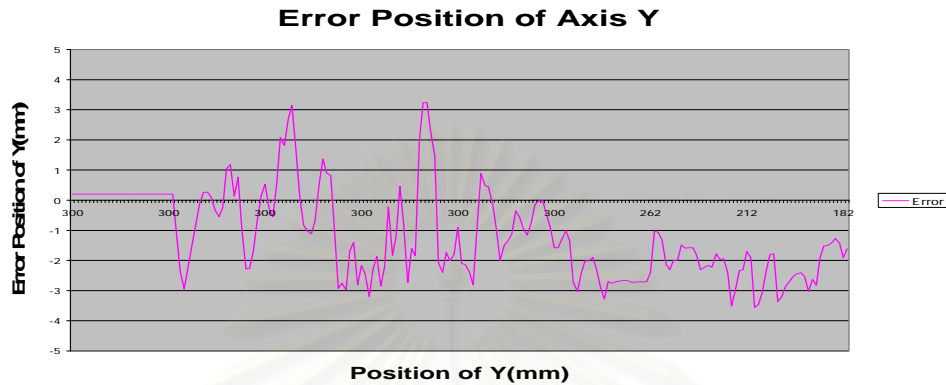
Error Position of Axis X



รูปที่ 5.36 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นจากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

รูปที่ 5.35 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บ่งแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ ซึ่งพบว่าหุ่นสเลฟจะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์เมื่อหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่หุ่นสเลฟจะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งหุ่นมาสเตอร์ รูปที่ 5.36 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึง

ตำแหน่ง (440,182) มีค่าเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร



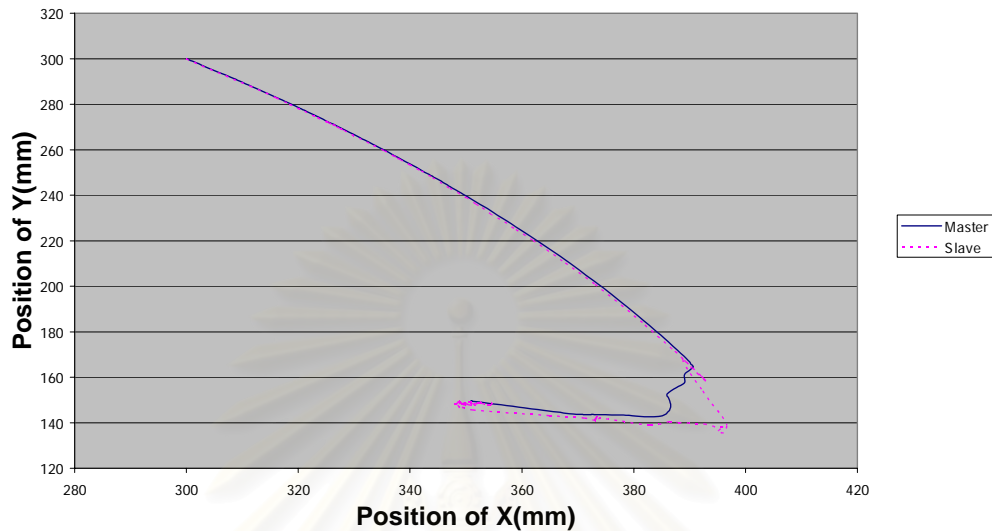
รูปที่ 5.37 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182)

รูปที่ 5.37 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (440,182) มีค่าเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร

ระบบควบคุมแบบมีเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที ซึ่งทำการควบคุมตำแหน่งโดยให้ผู้ควบคุมจับที่ปลายของแขนกล แล้วให้เคลื่อนที่ในระนาบ XY จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150)

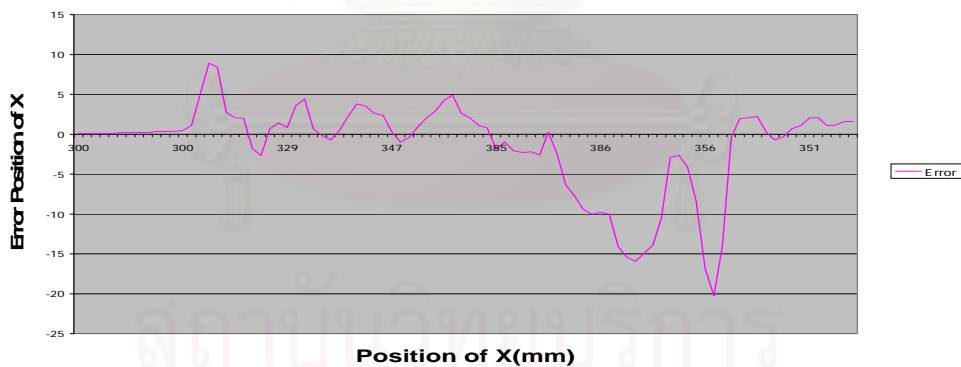
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Position (X,Y) of Master-Slave by using Wave Transform



รูปที่ 5.38 หุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ เคลื่อนที่ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นจากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150)

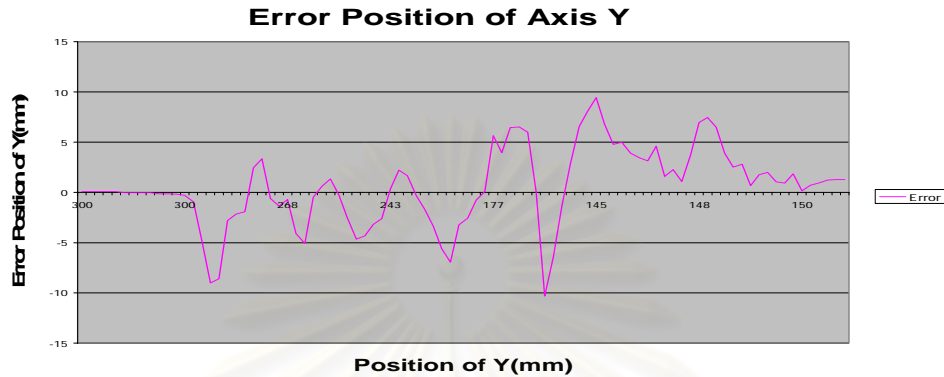
Error Position of Axis X



รูปที่ 5.39 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นจากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150)

รูปที่ 5.38 แสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟโดยเส้นที่บแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และเส้นปะแทนการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟ ซึ่งพบว่าหุ่นสเลฟจะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์เมื่อหุ่นมาสเตอร์หยุดเคลื่อนที่หุ่นสเลฟจะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งหุ่นมาสเตอร์ รูปที่ 5.39 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน X ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน X จากตำแหน่ง (300,300) ถึง

ตำแหน่ง (351,150) มีค่าเท่ากับ 5.9 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.40 ค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ในระบบที่มีตัวหน่วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่น จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150)

รูปที่ 5.40 แสดงค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ของหุ่นสเลฟกับตำแหน่งตามแนวแกน Y ของหุ่นมาสเตอร์ ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยขณะเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y จากตำแหน่ง (300,300) ถึงตำแหน่ง (351,150) มีค่าเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.1 มิลลิเมตร

5.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟนั้น มีเป้าหมายเพื่อควบคุมหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากผลการทดลองควบคุมระบบโดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ เมื่อระบบไม่มีตัวหน่วงเวลาจะสามารถทำการควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการทดลองมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมแบบการเคลื่อนที่มุมของหุ่นสเลฟเท่ากับมุมของหุ่นมาสเตอร์ มีค่าน้อยกว่า 0.1 องศาหรือน้อยกว่า 0.002 เรเดียน และการควบคุมแบบเคลื่อนที่ตามตำแหน่ง (X,Y) ของหุ่น สเลฟให้เท่ากับตำแหน่งของหุ่น มาสเตอร์ซึ่งผลการทดลองพบว่า มีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน X น้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตรและมีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน Y น้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร จากนั้นเมื่อทำการทดลองระบบที่มีตัวหน่วงเวลาพบว่าระบบจะไม่มีเสถียรภาพ

เมื่อนำวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ แล้วทำการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ ซึ่งระหว่างการส่งสัญญาณไปกลับมีค่าเวลาหน่วงระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที ผลการทดลองแบ่งเป็นการควบคุมทีละข้อต่อการ

ควบคุมข้อต่อทั้งสองข้อต่อพร้อมกัน จากผลการทดลองพบว่าเมื่อควบคุมทั้งสองข้อต่อพร้อมกันจะทำให้ค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ 1 กับข้อต่อที่ 2 เกิดการรบกวนกันเอง โดยที่ข้อต่อที่ 1 มีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.6 องศาหรือน้อยกว่า 0.010 เรเดียนและข้อต่อที่ 2 มีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.8 องศาหรือน้อยกว่า 0.013 เรเดียน ส่วนการควบคุมแบบเคลื่อนที่ตามตำแหน่ง (X,Y) ของหุ่นสเลฟให้เท่ากับตำแหน่งของหุ่นมาสเตอร์ จากผลการทดลองพบว่ามีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน X น้อยกว่า 1.9 มิลลิเมตรและมีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวในแนวแกน Y น้อยกว่า 1.7 มิลลิเมตร

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อนำวิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์มาใช้ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นแล้วทำการควบคุมระบบที่มีตัวหน่วงเวลาไม่คงที่ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาที จะช่วยให้สามารถควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวของระบบควบคุมที่มีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาทีโดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นนี้ จะมียค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยและค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวของระบบที่ไม่มีเวลาหน่วง

ในการควบคุมระบบที่มีค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 320 มิลลิวินาทีถึง 400 มิลลิวินาทีโดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นถึงแม้จะควบคุมให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ แต่จากผลการทดลองพบว่า การเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟจะเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ช้ากว่าระบบควบคุมที่ไม่มีค่าเวลาหน่วงเนื่องจากผลของค่าเวลาหน่วง ซึ่งทำให้ผู้บังคับมีความรู้สึกแตกต่างกับการบังคับระบบที่ไม่มีค่าเวลาหน่วงที่มีการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟพร้อมกันกับการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์ ดังนั้นถ้าค่าเวลาหน่วงมีค่ามากขึ้นหุ่นสเลฟจะมีการเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ช้าลงกว่าระบบที่มีค่าเวลาหน่วงน้อย

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ในการทดลองควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟนั้นมีเป้าหมายเพื่อให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการทดลองควบคุมระบบเสมือน(Simulation System) พบว่าเมื่อระบบควบคุมไม่มีเวลาหน่วงใช้วิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อมีเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 400 มิลลิวินาทีถึง 1000 มิลลิวินาทีในการส่งสัญญาณควบคุมไปกลับ พบว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟมีการแกว่งมากและมีค่าOvershootสูงขึ้นมากเมื่อเทียบกับระบบควบคุมที่ไม่มีค่าเวลาหน่วง ซึ่งทำให้ระบบควบคุมไม่มีเสถียรภาพ จากนั้นเมื่อนำวิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์มาใช้ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น พบว่าหุ่นมาสเตอร์และหุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามคำสั่งอ้างอิงช้าลง แต่มีหุ่นสเลฟยังคงสามารถเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขณะที่หุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟเคลื่อนที่พบว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟเทียบกับหุ่นมาสเตอร์จะมีค่าค่อยๆลดลงจนเป็นศูนย์ จากนั้นเพิ่มตัวทำนายค่าให้กับระบบควบคุมพบว่าเมื่อนำวิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์มาใช้ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นและตัวทำนายค่าจะทำให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ดีขึ้น โดยดูได้จากค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟเทียบกับหุ่นมาสเตอร์มีค่าลดลงเป็นศูนย์เร็วขึ้น

ในการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟจริงซึ่งเป้าหมายเพื่อให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน พบว่าระบบควบคุมแบบไม่มีเวลาหน่วงใช้วิธีควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์สามารถควบคุมให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่การควบคุมมุมการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟทั้งสองข้อต่อมีความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.1 องศาและการควบคุมตำแหน่ง (X,Y) มีค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X ทั้งสองข้อต่อน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร และมีค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y ทั้งสองข้อต่อน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร แต่เมื่อทดลองใส่ค่าเวลาหน่วงไม่คงที่ระหว่าง 10 มิลลิวินาทีถึง 40 มิลลิวินาทีให้กับระบบควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์พบว่าไม่สามารถควบคุมให้หุ่นสเลฟเคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้ นั่นคือระบบไม่มีเสถียรภาพ จากนั้นทดลองใช้วิธีการควบคุมแบบสัดส่วนและแบบอนุพันธ์ร่วมกับการแปลงเป็นตัวแปรคลื่น พบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของ

หุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟได้ โดยที่การควบคุมมุมการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 1 มีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.6 องศาและการเคลื่อนที่ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟข้อต่อที่ 2 มีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัวน้อยกว่า 0.8 องศา ส่วนการควบคุมตำแหน่ง (X,Y) พบมีค่าความผิดพลาดตามแนวแกน X น้อยกว่า 1.9 มิลลิเมตร และมีค่าความผิดพลาดตามแนวแกน Y น้อยกว่า 1.7 มิลลิเมตร ดังนั้นแสดงว่าวิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นสามารถช่วยให้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นสเลฟให้เคลื่อนที่ตามหุ่นมาสเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามถึงแม้ในการควบคุมโดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นจะมีความสะดวกเนื่องจากผู้ควบคุมสามารถส่งสัญญาณในรูปของตัวแปรคลื่นจากหุ่นมาสเตอร์ไปยังหุ่นสเลฟโดยไม่ต้องหาค่าของตัวห้วงเวลาที่เกิดขึ้นและค่าสัญญาณที่เกิดการหน่วงอยู่สายสื่อสาร แต่ยังคงรักษาเสถียรภาพของระบบควบคุมไว้ได้ โดยใช้หลักการพิจารณาข้อมูลที่ส่งผ่านสายสัญญาณในรูปของพลังงานซึ่งทำให้พลังงานที่ส่งจากหุ่นมาสเตอร์มีค่ามากกว่าพลังงานที่ส่งจากหุ่นสเลฟกลับมา จากนั้นค่าความแตกต่างของพลังงานที่ส่งให้หุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟจะค่อยลดลงจนเป็นศูนย์ แต่ปัจจัยสำคัญในควบคุมด้วยวิธีนี้คือต้องหาค่าเมตริกซ์การแปลงที่เหมาะสมกับระบบควบคุมให้ได้

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะเพื่อช่วยให้ศึกษาควบคุมระบบที่มีเวลาหน่วงไม่คงที่โดยใช้วิธีการแปลงเป็นตัวแปรคลื่นได้ง่ายขึ้น ซึ่งจากการศึกษาการควบคุมระบบที่มีตัวห้วงเวลาโดยใช้ตัวแปรคลื่นมีปัจจัยสำคัญอยู่ที่การหาค่าเมตริกซ์ซึ่งนำมาใช้ในการแปลงสัญญาณให้เป็นตัวแปรคลื่น ซึ่งแต่ละระบบจะมีค่าเมตริกซ์ที่เหมาะสมแตกต่างกันไป ดังนั้นควรเริ่มศึกษาวิธีการหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นจากระบบเสมือน (Simulation System) ในคอมพิวเตอร์ก่อน เพื่อช่วยให้มีความเข้าใจและความชำนาญในการหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นมากขึ้น จากนั้นค่อยทำการควบคุมหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟจริง โดยเริ่มควบคุมจากข้อต่อเดียวก่อน

ข้อเสนอแนะในการหาค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่น ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของเมตริกซ์การแปลงการเป็นตัวแปรคลื่น A_w, B_w, C_w และ D_w สำหรับระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 คือ

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{1}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } W_1, W_2 \text{ เป็นค่าคงที่}$$

ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นตามเงื่อนไขคือ $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ

$I = 2A_w B_w$ แต่การกำหนดเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นให้ตรงตามเงื่อนไขสามารถกำหนดรูปแบบอื่นได้ เช่น

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{2 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{2}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{2}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } W_1, W_2 \text{ เป็น}$$

ค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นตามเงื่อนไขคือ $A_w = C_w$, $B_w = D_w$

และ $I = 2A_w B_w$ หรือกำหนดให้เมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นคือ

$$A_w = C_w = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{k \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{W_2}{k \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ และ } B_w = D_w = \begin{bmatrix} \frac{k}{W_1 \times \sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{k}{W_2 \times \sqrt{2}} \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } k \text{ คือค่าคงที่}$$

ใดๆและค่า W_1, W_2 เป็นค่าคงที่ซึ่งใช้ในการปรับค่าเมตริกซ์การแปลงเป็นตัวแปรคลื่นตามเงื่อนไขคือ $A_w = C_w$, $B_w = D_w$ และ $I = 2A_w B_w$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] T.-J. Tarn and K.Brady. A framework for the control of time-delayed telerobotic systems. in Proc. IFAC Robot Control. Nantes, France, 1997.
- [2] K.Brady and T.-J. Tarn. Internet-based remote teleoperation. in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Leuven, Belgium (May 1998).
- [3] K.Brady. Time- delayed control of telerobotic manipulators. Ph.D. dissertation, Dept. Syst. Sci. Math.,Univ. Washington, Seattle,1997.
- [4] R.Oboe and P. Fiorini. A design and control environment for internet-based telerobotics. Int. J. Robot. Res., (Apr.1998).
- [5] G.Niemeyer and J.-J.E.Slotine. Stable adaptive teleoperation. IEEE Trans. Automat. Contr., vol.36, Jan.1991.
- [6] G.Niemeyer. Using wave variables in time delayed force reflecting teleoperation. Doctoral Dissertation, Dept. Aeronautics Astronautics, Mass.Inst. Technol., Cambridge, 1996.
- [7] G.Niemeyer and J.-J. E. Slotine. Designing force reflecting teleoperators with large time delays to appear as virtual tools. in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Albuquerque, NM, Apr.1997.
- [8] Saghir Munir and Wayne J. Book. Internet-Based Teleoperation Using Wave Variables with Prediction. IEEE/ASME Transactions on Mechanics(June 2002).
- [9] Saghir Munir and Wayne J. Book. Wave-Base Teleoperation with Prediction. Proc. of the American Control Conference Arlington, VA June 25-27, 2001.
- [10] Katsuhiko Ogata. Modern Control Engineering. Third Edition. USA:Prentice Hall,1997.
- [11] Craig J. J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Second Edition. USA: Addison-Wesley Publishing, 1989.
- [12] Gene F.Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems. Fourth Edition. USA Prentice Hall, 2002.
- [13] R.J.Anderson and M.W. Spong. Bilateral control of teleoperators with time delay. IEEE Trans. Automat. Contr. (May 1989).
- [14] Using wave variables for system analysis and robot control, in IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Albuquerque, NM, (Apr.1997).

- [15] Toward force-reflecting teleoperation over the internet. in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Belgium, (May 1998).
- [17] Y.Yokokohji, T.Imaida, and T. Yoshikawa, Bilateral teleoperation under time-varying communication delay. in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, (Oct.1999).
- [18] Y.Yokokohji, T.Imaida, and T. Yoshikawa. Bilateral teleoperation with energy balance monitoring under time-varying communication delay. in Proc. IEEE Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (Apr.2000).
- [19] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano. Modeling And Control Of Robot Manipulators.The McGraw-Hill,1996 .
- [20] วินุทธ์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์ (Control of Dynamics Systems). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ของหุ่นมาสเตอร์กับหุ่นสเลฟ

1) การ์ดติดต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์กับหุ่นยนต์มาสเตอร์-สเลฟ

ใช้การ์ด SENSORAY Model 626 ของบริษัท SENSORAY จำนวน 1 การ์ด เพื่อรับส่งสัญญาณเอนโคเดอร์จากหุ่นมาสเตอร์ 2 ตัวและหุ่นสเลฟ 2 ตัว



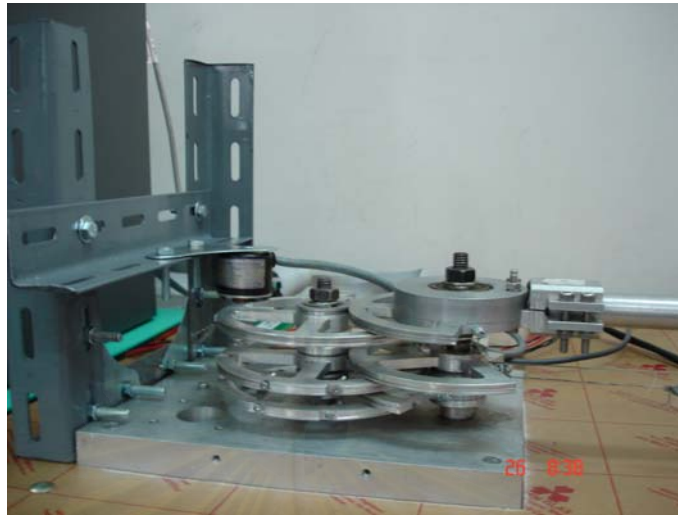
รูปที่ ก.1 การ์ด SENSORAY Model 626

2) เอนโคเดอร์ของหุ่นมาสเตอร์

อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของหุ่นมาสเตอร์มี 2 ตัว โดยที่ข้อต่อที่1เป็นมอเตอร์พร้อมเอนโคเดอร์ Sanyo Denki Model R506-042E และข้อต่อที่2 เป็นเอนโคเดอร์ British Encoder No.750754 จำนวนพัลส์ 2500 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ ก.2 มอเตอร์พร้อมเอนโคเดอร์ Sanyo Denki Model R506-042E



รูปที่ ก.3 เอนโคเดอร์ British Encoder No.750754

3) มอเตอร์กระแสตรงและเอนโคเดอร์ของหุ่นสเลฟ

มอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร(permanent magnet) ของบริษัท Electro-Craft มอเตอร์ Serial No. 0643-33-004 จำนวน 2 ตัว โดยที่ข้อต่อที่1ใช้เอนโคเดอร์SUMTEX จำนวน 2048 พัลส์ต่อรอบและข้อต่อที่2 ใช้เอนโคเดอร์ RENCO จำนวน 1000 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ ก.4 มอเตอร์ Electro-Craftและเอนโคเดอร์ RENCO

4) ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Amplifier)

ชุดขยายกระแสเพื่อใช้ขับมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวของหุ่นสเลฟเป็นแอมพลิไฟเออร์ LA-5600 ของบริษัท Electro Craft



รูปที่ ก.5 ชุดขยายกระแส LA-5600

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธงชัย วินิจการ เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ.2522 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษา ที่โรงเรียนกุศลศึกษาจนสำเร็จชั้นประถมศึกษาปีที่6 จากนั้นเข้าศึกษาชั้นมัธยมต้นที่โรงเรียนสุวรรณารามวิทยาคมจนสำเร็จชั้นมัธยมศึกษาปีที่3 แล้วเข้าศึกษาต่อชั้นมัธยมปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาจนสำเร็จชั้นมัธยมศึกษาปีที่5 แล้วสอบเข้ามหาวิทยาลัยโดยสำเร็จการศึกษานอกโรงเรียนเทียบเท่ากับชั้นมัธยมปีที่6 โดยเข้าศึกษาระดับมหาวิทยาลัยที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจนสำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย