

การประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
สำหรับการควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ

APPLICATION OF COEFFICIENT DIAGRAM METHOD FOR
MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM

อภิสิทธิ์ ตันตระวรศิลป์
APICIT TANTAWORRASILP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-324-951-6

สำนักหอสมุดกลาง - พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์
สำหรับการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ

APPLICATION OF COEFFICIENT DIAGRAM METHOD FOR
MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM



อภิสิทธิ์ ตันตระวรศิลป์

APICIT TANTAWORRASILP

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 49410
วัน, เดือน, ปี..... 20 ก.พ. 2547

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

ISBN 974-324-951-6

**APPLICATION OF COEFFICIENT DIAGRAM METHOD FOR
MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM**

APICIT TANTAWORRASILP

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2004

ISBN 974-324-951-6

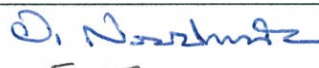
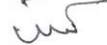



COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ
ชื่อนักศึกษา นายอภิสิทธิ์ ต้นตระกูลศิลป์
รหัสประจำตัว 44611600
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จنگกล งามวิวิทย์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร. โยธิน	เปรมปราณีรัชต์	
ผศ.ดร.พัลลภ	เหล่าเจริญ	
รศ.ประสิทธิ์	จุลเสวีวงศ์	
รศ.ดร.กิตติ	ศิรเศรษฐ	
รศ.ดร.จنگกล	งามวิวิทย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 ธันวาคม 2546 เวลา 10.30- 12.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)



รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๘.....เดือน.....มกราคม.....พ.ศ. ๒๕๔๗...

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการควบคุมหลายตัวแปรของระบบคอนเหนือศีรษะ
นักศึกษา	นายอภิสิทธิ์ ดันตระวรศิลป์
รหัสประจำตัว	44611600
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร.จنگกล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบคอนเหนือศีรษะด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครน การแกว่งของภาระ และความยาวของเชือกสลิงในเวลาเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ตัวควบคุมพีดีสำหรับควบคุมการแกว่งของภาระ และตัวควบคุมพีไอสำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระ โดยตัวควบคุมทั้ง 3 นี้จะถูกออกแบบแยกอิสระซึ่งกันและกัน จากผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครน ลดมุมแกว่งของภาระและควบคุมความยาวของเชือกสลิงได้ตามที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ เมื่อมวลของภาระเปลี่ยน ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดผลกระทบของสิ่งรบกวน รวมทั้งตำแหน่งของรถเครนและความยาวของเชือกสลิงยังติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงได้

Thesis Title	Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane System
Student	Mr. Apicit Tantaworrasilp
Student ID.	44611600
Degree	Master of Engineering
Programme	Control Engineering
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit

ABSTRACT

This thesis presents controllers design scheme by coefficient diagram method for an overhead crane system. The controllers of the overhead crane system consist of PID PD and PI controllers, which are used to control the position of trolley, load-swing angle and rope length respectively. Three controllers are designed independently and then operated simultaneously to control the system. The experimental results show that the trolley position, load-swing angle reduction and the rope length can be controlled as designed. Moreover, when the mass of load is changed, the controllers can control the system efficiently and reduce the effect of disturbance. The trolley position and the rope length can also track the changed reference input.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จกกล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ โนริยุกิ โคมิเนะ (Assoc. Prof. Noriyuki Komine) จาก มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ที่ได้ให้คำแนะนำและปรึกษาปัญหาต่างๆ ให้แก่ผู้เขียนเสมอมา

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ถาวร เบญจนาสุทธี ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแก่ผู้เขียนเสมอมา ทำให้ผู้เขียนเข้าใจปัญหานั้นๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดอน อิศรารท ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) และ Japan International Cooperation Agency (JICA) ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่รักและเคารพ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา จนสามารถนำสิ่งต่างๆที่ได้รับมานั้นจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อภิสิทธิ์ ดันตระวรศิลป์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ระบบเครน.....	4
2.1 ชนิดของเครน.....	4
2.1.1 เครนชนิดแกนตริ.....	4
2.1.2 เครนชนิดโรตารี.....	4
2.1.3 เครนชนิดบูมส์.....	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ.....	7
บทที่ 3 วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (CDM).....	15
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ CDM.....	15
3.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....	16
3.3 พหุนามคุณลักษณะ.....	17
3.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM.....	18
3.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM.....	19
3.6 เงื่อนไขการเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ.....	20
3.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM และการสร้างตัวควบคุม.....	23
4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ.....	23
4.2 การออกแบบตัวควบคุม.....	24
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธี CDM สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน.....	24
4.2.2 การออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CDM สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ.....	26
4.2.3 การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง.....	28
4.3 การสร้างตัวควบคุม.....	29
4.3.1 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	29
4.3.2 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	31
4.3.2.1 ฟรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน.....	31
4.3.2.2 ตัวควบคุม PID.....	32
4.3.3 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระ จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	33
4.3.3.1 ตัวควบคุม PD.....	34
4.3.4 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	34
4.3.4.1 ฟรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง.....	34
4.3.4.2 ตัวควบคุม PI.....	35
บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม.....	36
5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ.....	36
5.2 การควบคุมระบบครนเหนือศีรษะ.....	37
5.3 พารามิเตอร์ของระบบครนเหนือศีรษะ.....	38
5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และ PI สำหรับระบบครนเหนือศีรษะ.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.5 ผลการจำลอง.....	41
5.5.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....	41
5.5.2 ผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล.....	43
5.5.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....	46
5.5.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน.....	48
5.5.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง.....	50
5.6 ผลการทดลอง.....	52
5.6.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....	52
5.6.2 ผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล.....	54
5.6.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....	56
5.6.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน.....	58
5.6.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง.....	60
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	66
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	91
ภาคผนวก ง การทดลองเพิ่มเติม.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม.....	41
5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....	41
5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และสมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลอง.....	45
5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และสมรรถนะของระบบที่ได้จากการทดลอง.....	55
ง.1 ผลการทดลองที่ 1.....	102
ง.2 ผลการทดลองที่ 2.....	102

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องชนิดแกนตรี.....	5
2.2 เครื่องชนิดโรตารี.....	5
2.3 เครื่องชนิดบูมส์.....	6
2.4 แบบจำลองของระบบเครนเหนือศีรษะ.....	7
2.5 ผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตคงที่.....	13
3.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO.....	16
3.2 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่างๆ.....	20
3.3 แผนผังก่าสัมประสิทธิ์.....	22
3.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เสถียรภาพ และค่าคงตัวเวลาสมมูล	22
4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ.....	23
4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนตามรูปแบบของ CDM.....	24
4.3 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	24
4.4 โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระตามรูปแบบของ CDM.....	26
4.5 โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระ.....	26
4.6 โครงสร้างของระบบควบคุมการการค้ำเชิงเอียงสลิ้งตามรูปแบบของ CDM.....	28
4.7 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชิงเอียงสลิ้ง.....	28
4.8 ขอบเขตเสถียรภาพในการอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอย.....	31
4.9 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	31
4.10 โครงสร้างของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระ.....	33
4.11 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชิงเอียงสลิ้ง.....	34
5.1 โครงสร้างของระบบเครนเหนือศีรษะ.....	37
5.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ.....	37
5.3 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	38
5.4 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการค้ำเชิงเอียงสลิ้ง.....	39
5.5 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....	42
5.6 สัญญาณควบคุม.....	43
5.7 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมูล.....	44
5.8 สัญญาณควบคุม.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	46
5.10 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....	47
5.11 สัญญาณควบคุม.....	48
5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ.....	49
5.13 สัญญาณควบคุม.....	49
5.14 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง.....	50
5.15 สัญญาณควบคุม.....	51
5.16 ภาพถ่ายระบบเครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ.....	52
5.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....	53
5.18 สัญญาณควบคุม.....	54
5.19 ผลการทดลองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมูล.....	55
5.20 สัญญาณควบคุม.....	56
5.21 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....	57
5.22 สัญญาณควบคุม.....	58
5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ.....	59
5.24 สัญญาณควบคุม.....	59
5.25 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง.....	60
5.26 สัญญาณควบคุม.....	61
ก.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM.....	67
ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตฐาน 16 กับสัญญาณ PWM.....	68
ก.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรนับจำนวนพัลส์.....	68
ก.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิทช์.....	69
ก.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด.....	69
ก.6 รายละเอียดของวงจรนับจำนวนพัลส์ภายใน ISA การ์ด.....	70
ก.7 ภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E.....	71
ก.8 ภาพถ่ายการ์ดแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก.....	72
ก.9 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.10 ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเข็น.....	73
ก.11 สัญญาณ PWM ของวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิง.....	73
ก.12 ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิง.....	74
ก.13 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์ต่อการหมุนเอน โคคเคอร์ 1 รอบ.....	74
ก.14 การติดตั้งเอน โคคเคอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเข็น.....	75
ก.15 การติดตั้งเอน โคคเคอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ.....	75
ก.16 การติดตั้งเอน โคคเคอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง.....	76
ก.17 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเข็น.....	77
ก.18 ภาพถ่ายภาระที่ใช้ในการทดลอง.....	77
ก.19 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการดึงภาระ.....	78
ง.1 ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเข็น.....	100
ง.2 ความเร็วที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง.....	101

คำย่อและสัญลักษณ์

- a_i หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ
- $A_c(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุม
- $A_{cx}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $A_{c\theta}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมการแกว่งของเกาะ
- $A_{cl}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง
- $A_p(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของกระบวนการ
- $A_{px}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $A_{p\theta}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของระบบการแกว่งของเกาะ
- $A_{pl}(s)$ หมายถึง ตัวส่วนพหุนามของระบบการดึงเชือกสลิง
- b_m หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- b_l หมายถึง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการดึงเชือกสลิง
- $B_a(s)$ หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม
- $B_{ax}(s)$ หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $B_{a\theta}(s)$ หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมการแกว่งของเกาะ
- $B_{al}(s)$ หมายถึง พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง
- $B_c(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุม
- $B_{cx}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $B_{c\theta}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมการแกว่งของเกาะ
- $B_{cl}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง
- $B_p(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของกระบวนการ
- $B_{px}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $B_{p\theta}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการแกว่งของเกาะ
- $B_{pl}(s)$ หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการดึงเชือกสลิง
- $C(s)$ หมายถึง เอาต์พุต
- $D(s)$ หมายถึง สัญญาณรบกวน
- D_i หมายถึง สัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $e_x(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถยนต์
- $e_\theta(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมการแกว่งของเกาะ
- $e_l(s)$ หมายถึง ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

F_x	หมายถึง แรงที่ทำให้รถเคลื่อนที่
F_y	หมายถึง แรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง
g	หมายถึง ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก
$G_c(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม
$G_{cx}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ
$G_{c\theta}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมการแกว่งของภาระ
$G_{cl}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง
$G_p(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ
$G_{px}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถ
$G_{p\theta}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ
$G_{pl}(s)$	หมายถึง ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการดึงเชือกสลิง
\bar{i}	หมายถึง เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วย
K_e	หมายถึง พลังงานจลน์
K_c	หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุม
K_{cx}	หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ
$K_{c\theta}$	หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมการแกว่งของภาระ
K_{cl}	หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง
K_m	หมายถึง ค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถ
K_{ml}	หมายถึง ค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการดึงเชือกสลิง
K_l	หมายถึง ค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง
K_r	หมายถึง ค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถ
l	หมายถึง ความยาวเชือกสลิง
l_{ref}	หมายถึง ความยาวอ้างอิงของเชือกสลิง
L	หมายถึง ตัวกระทำลากรางจ์
m	หมายถึง มวลของภาระ
M	หมายถึง มวลของรถ
$P(s)$	หมายถึง พหุนามคุณลักษณะ
P_c	หมายถึง พลังงานศักย์
P_o	หมายถึง เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกิน

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

q	หมายถึง พิกัดใดๆ
Q	หมายถึง แรงทั่วไปที่กระทำกับระบบ
r_0	หมายถึง การเคลื่อนที่ของรถเข็นจากจุดเริ่มต้น
r_m	หมายถึง การเคลื่อนที่ของภาระจากจุดเริ่มต้น
$R(s)$	หมายถึง อินพุต
t_r	หมายถึง ช่วงเวลาขึ้น
t_s	หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่
T	หมายถึง เวลาชักตัวอย่าง
T_{ss}	หมายถึง ช่วงเวลาคงตัวของมอเตอร์
T_d	หมายถึง เวลาอนุพันธ์ของตัวควบคุม
T_{dx}	หมายถึง เวลาอนุพันธ์ของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น
$T_{d\theta}$	หมายถึง เวลาอนุพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งของภาระ
T_i	หมายถึง เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุม
T_{il}	หมายถึง เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง
T_{ix}	หมายถึง เวลาอินทิกรัลของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น
T_l	หมายถึง แรงบิดมอเตอร์ของระบบการดึงเชือกสลิง
T_m	หมายถึง แรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น
u_{PD}	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม PD
u_{PI}	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม PI
u_{PID}	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม PID
$U(s)$	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม
V_i	หมายถึง สัญญาณควบคุมของระบบการดึงเชือกสลิง
x	หมายถึง ตำแหน่งของรถเข็น
x_m	หมายถึง ตำแหน่งของภาระ
x_{ref}	หมายถึง ตำแหน่งอ้างอิงของรถเข็น
x_{ss}	หมายถึง ตำแหน่งของรถเข็นที่สภาวะคงตัว
y_m	หมายถึง ความสูงของภาระ
θ	หมายถึง มุมแกว่งของภาระ
θ_{ref}	หมายถึง มุมแกว่งอ้างอิงของภาระ

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

τ	หมายถึง ค่าคงตัวเวลาสมมูล
\mathcal{Y}_i	หมายถึง ค่าตรวจนับเสถียรภาพ
\mathcal{Y}_i^*	หมายถึง ค่าจำกัดเสถียรภาพ
σ	หมายถึง จำนวนจริง
ω	หมายถึง จำนวนจินตภาพ
ζ	หมายถึง อัตราส่วนการหน่วง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในงานอุตสาหกรรมที่มีการเคลื่อนย้ายสินค้าที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก สินค้านั้นจะถูกเคลื่อนย้ายด้วยระบบเครนเหนือศีรษะ ซึ่งในการควบคุมการเคลื่อนย้ายสินค้านั้นจะต้องมีความรวดเร็ว ปลอดภัยและไม่มีการแกว่ง ข้อสำคัญในการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อคือ ข้อแรกเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ข้อที่สองเป็นการควบคุมการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถเครนเคลื่อนที่ และข้อสุดท้ายคือการควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ในการยกสินค้าเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง ซึ่งหากไม่มีการควบคุมระบบให้บรรลุข้อสำคัญทั้ง 3 ข้อแล้ว นอกจากจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ยังอาจทำให้เกิดอันตรายในการขนถ่ายสินค้า และสินค้าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ การลดการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถเครนเคลื่อนที่และการควบคุมความยาวของเชือกสลิง จึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจและน่าศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำเสนอหลักการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy controller) [1] ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive controller) [2] และตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาท (Neural network controller) [3] ซึ่งวิธีการควบคุมแบบต่างๆ ที่กล่าวถึงนี้มีวิธีการออกแบบที่ค่อนข้างซับซ้อนและค่อนข้างยากที่จะนำไปใช้ควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะในงานอุตสาหกรรม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอหลักการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) [4] ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการออกแบบตัวควบคุม

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เป็นการออกแบบจากพหุนามคุณลักษณะ (characteristic polynomial) ของระบบวงรอบปิด (closed-loop system) ซึ่งกำหนดสมรรถนะได้จากค่าเสถียรภาพ (stability index: γ_i) อันเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบควบคุม และกำหนดจากค่าคงตัวเวลาสมมูล (equivalent time constant: τ) อันเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ระบบเครนเหนือศีรษะเป็นระบบที่มีการเชื่อมร่วม (coupling) กันหลายตัวแปรและเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงประมาณระบบเครนเหนือศีรษะให้เป็นระบบเชิงเส้นย่อยๆ 3 ระบบคือ ระบบที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของรถเครน ระบบที่เกี่ยวกับมุมแกว่งของภาระ และระบบที่เกี่ยวกับความยาวเชือกสลิง จากนั้นจึงออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบย่อยเหล่านี้ด้วย

วิธี CDM โดยออกแบบตัวควบคุม PID (Proportional Integral Derivative) สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น ตัวควบคุม PD (Proportional Derivative) สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ และตัวควบคุม PI (Proportional Integral) สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง ซึ่งตัวควบคุมทั้ง 3 จะถูกออกแบบแยกอิสระจากกัน แล้วจึงนำมาควบคุมระบบรถเข็นอิสระในเวลาเดียวกัน

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาการควบคุมระบบรถเข็นอิสระเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบรถเข็นอิสระและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อให้เกิดความเข้าใจโครงสร้างและการทำงานต่างๆของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ

2. ศึกษาและทำความเข้าใจนิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับวิธี CDM ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ

3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจะช่วยในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เช่น โปรแกรมแมตแล็บ (Matlab) และโปรแกรมแมตเทอเมติกา (Mathematica) เป็นต้น รวมถึงการสร้างตัวควบคุมจากโปรแกรมภาษาซี (C language) เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของระบบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายระบบรถเข็นชนิดต่างๆ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถเข็นอิสระ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของลากรองจ์ (Lagrange equation of motion) และส่วนที่สองอธิบายการหาพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็นและระบบการดึงเชือกสลิงที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วยบล็อกไดอะแกรมมาตรฐานของวิธี CDM โครงสร้างของระบบควบคุม ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับวิธี CDM และแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

บทที่ 4 อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM สำหรับระบบครนเหนือศีรษะซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถครน ตัวควบคุม PD สำหรับควบคุมการแกว่งของภาระ และตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิง ซึ่งจะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมทั้งสามโดยการกำหนดค่าครรชนเสถียรภาพ ค่าคงตัวเวลาสมมูล การกำหนดพรีฟิลเตอร์ของระบบ เส้นโค้งปฏิกิริยาของกระบวนการ และการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบจริง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรมแมตเทอเมติก้าช่วยในการออกแบบตัวควบคุม และโปรแกรมสำเร็จรูปบอร์แลนด์ซีพลัสพลัสเวอร์ชัน 5.02 (borland C++ version 5.02) ช่วยในการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบในห้องปฏิบัติการ จากนั้นจะอธิบายการสร้างตัวควบคุม โดยแปลงตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อนำไปควบคุมระบบครนเหนือศีรษะจริงในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5 นำเสนอการจำลองและการทดลองควบคุมระบบครนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบได้ในบทที่ 4 โดยอันดับแรกจะจำลองการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปแมตเล็บเวอร์ชัน 5.3 จากนั้น จึงนำตัวควบคุมที่ได้ไปควบคุมระบบจริง โดยจะนำเสนอผลการจำลองและผลการทดลองต่างๆ รวมถึงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบครนเหนือศีรษะด้วยวิธี CDM เพื่อให้การควบคุมระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

และในส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกแสดงถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แนวคิดการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ใช้ในการทดลอง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ระบบเครน

ระบบเครนเป็นระบบที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการขนย้ายวัตถุที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งระบบเครนจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพื่อใช้ยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงการนำระบบเครนมาใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกในงานก่อสร้างที่มีความสูงและต้องใช้ความระมัดระวังมาก นอกจากนี้ระบบเครนถูกนำมาใช้บนเรือเดินทะเลและในท่าเทียบเรือ เพื่อช่วยประหยัดเวลาค่าใช้จ่ายในการขนถ่ายวัตถุหรือสินค้าต่างๆ ในการควบคุมการทำงานของระบบเครนที่ผ่านมานั้นจะควบคุมการทำงานด้วยมือ (manual operation) แต่ในปัจจุบันระบบเครนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความเร็วสูงซึ่งยากที่จะควบคุมการทำงานด้วยมือ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการค้นคว้าหาวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ในการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะเพื่อให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2.1 ชนิดของเครน

เครนถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะการเคลื่อนที่และโครงสร้างทางพลวัต (dynamic) ดังนี้

2.1.1 เครนชนิดแกนตรี (gantry crane)

โครงสร้างของเครนชนิดแกนตรีแสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยส่วนของตัวรถเครน โดยจะเคลื่อนที่บนแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาซึ่งจะมีความแข็งแรงมาก ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนจะอธิบายได้ด้วยแบบจำลองหนึ่งระดับขั้นความเสรี (one-degree-of-freedom model) ซึ่งแกนเหล็กนี้บางครั้งจะมีลักษณะเป็นรางรถไฟขนานกันและติดตั้งอยู่ที่สูงด้วยลักษณะนี้เองบางครั้งจึงถูกเรียกว่า เครนชนิดบริดจ์ (bridge crane) หรือเครนเหนือศีรษะ (overhead crane) การเคลื่อนที่ของรถเครนจะเคลื่อนที่ในแนวนอน 2 ทิศทาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในโรงงาน อุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนต่ำและสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆ

2.1.2 เครนชนิดโรตารี (rotary crane)

โครงสร้างของเครนชนิดโรตารีแสดงดังรูปที่ 2.2 จะประกอบด้วยแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาสามารถหมุนรอบในแนวนอนได้ และจะมีรถเครนใช้สำหรับยกภาระ (load) โดยจะเคลื่อนที่อยู่บนแกนเหล็กยาว จากลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนและการหมุนของแกนเหล็กทำให้เครนชนิดนี้สามารถเคลื่อนย้ายภาระได้ทุกจุดในแนวนอนภายในขอบเขตของเครน ซึ่งในการยกภาระหรือวัตถุต่างๆ ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสายเคเบิลที่ติดตั้งอยู่บริเวณแขนหรือฐานของเครน โดยจะเชื่อมต่อกับรถเครนเพื่อใช้ในการดึง



รูปที่ 2.1 เครนชนิดแกนตริ



รูปที่ 2.2 เครนชนิดโรตารี

2.1.3 เครนชนิดบูมส์ (booms crane)

โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์แสดงดังรูปที่ 2.3 เครนชนิดนี้นิยมใช้บนเรือเดินทะเลและท่าเรือ โดยทั่วไปเครนชนิดบูมส์จะประกอบด้วยส่วนฐานที่สามารถหมุนได้ซึ่งยึดติดอยู่กับบูมส์ การเคลื่อนย้ายภาระสามารถทำได้โดยแขวนไว้ที่ส่วนปลายของบูมส์ซึ่งจะถูกดึงด้วยสายเคเบิล โดยมีลูกรอกช่วยในการดึงและเก็บสายเคเบิล และส่วนฐานของเครนชนิดนี้สามารถหมุนรอบและเคลื่อนที่ในแนวนอนได้ทุกจุดภายในเรือ โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์เหมาะสำหรับการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก ในขณะที่เครนชนิดแกนตริและเครนชนิดโรตารีเหมาะสำหรับการยกภาระที่มีรูปทรงลักษณะต่างๆ ดังนั้น เมื่อต้องการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก เครนชนิดบูมส์จะมีความแข็งแรงมากกว่าเครนชนิดแกนตริและเครนชนิดโรตารี



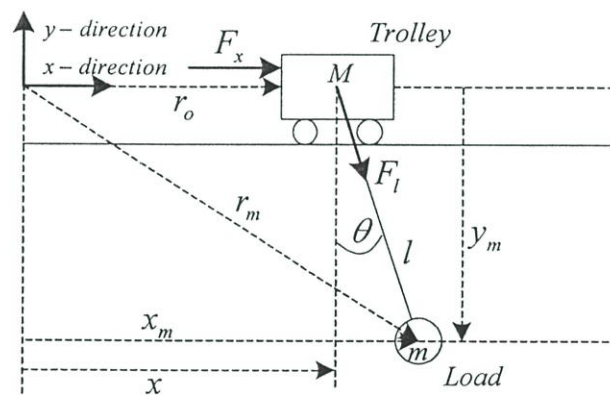
รูปที่ 2.3 เคนชนิดบูมส์

จากเคนชนิดต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้น ปัญหาสำคัญของระบบเคนคือ เคนมีขนาดใหญ่และสูง ดังนั้น ในการเคลื่อนย้ายภาระหรือสินค้าจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก การเคลื่อนที่ของรถเคนที่ใช้ดึงภาระจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมแกว่งของภาระคือ หากรถเคนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะทำให้เวลาในการเคลื่อนย้ายภาระน้อย แต่ภาระจะแกว่งมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ควบคุมเคนและภาระได้ ในทำนองเดียวกัน หากรถเคนเคลื่อนที่ช้าจะทำให้ภาระแกว่งน้อยทำให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัยมากขึ้น แต่จะใช้ระยะเวลาซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆ สูงขึ้นด้วย ดังนั้น ข้อสำคัญในการเคลื่อนย้ายภาระโดยใช้ระบบเคนจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อคือ ข้อแรก การควบคุมตำแหน่งของรถเคนเพื่อเคลื่อนย้ายภาระจะต้องมีความแม่นยำและใช้ระยะเวลาให้น้อยที่สุด ข้อที่สองจะต้องลดการแกว่งของภาระที่เกิดขึ้นขณะที่รถเคนเคลื่อนที่ และข้อสุดท้ายการ ควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระจะต้องมีความแม่นยำและรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายกับสิ่งกีดขวางต่างๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ควบคุมเคน ภาระ และอุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ในโรงงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมระบบเคนเหนือศีรษะ โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเคน การแกว่งของภาระ และความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระในเวลาเดียวกัน เพื่อให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัย ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น จำเป็นต้องทราบโครงสร้างหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุมก่อน ดังนั้น หัวข้อต่อไปจะอธิบายการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเคนเหนือศีรษะ

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือศีรษะ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือศีรษะ จะใช้วิธีการของลากรางจ์ (Lagrange) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความซับซ้อนแบบจำลองของระบบครนเหนือศีรษะประกอบด้วยรถครนและภาระ โดยรถครนสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางในแนวนอน ซึ่งจะเคลื่อนอยู่บนรางเหล็กที่วางขนานกัน และภาระที่ถูกแขวนด้วยเชือกสลิงจะถูกดึงขึ้นและลงเพื่อไม่ให้ชนสิ่งกีดขวาง แบบจำลองของระบบครนเหนือศีรษะแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบครนเหนือศีรษะ

- เมื่อ r_0 คือ การเคลื่อนที่ของรถครนจากจุดเริ่มต้น (เมตร)
 r_m คือ การเคลื่อนที่ของภาระจากจุดเริ่มต้น (เมตร)
 x_m คือ ตำแหน่งของภาระ (เมตร)
 y_m คือ ความสูงของภาระ (เมตร)
 x คือ ตำแหน่งของรถครน (เมตร)
 θ คือ มุมแกว่งของภาระ (เรเดียน)
 l คือ ความยาวเชือกสลิง (เมตร)
 M คือ มวลของรถครน (กิโลกรัม)
 m คือ มวลของภาระ (กิโลกรัม)
 F_x คือ แรงที่ใช้ทำให้รถครนเคลื่อนที่ (นิวตัน)
 F_y คือ แรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง (นิวตัน)

จากรูปที่ 2.4 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถครนมีพิกัดดังนี้

$$r_0 = x\bar{i} + y\bar{j} \quad (2.1)$$

โดยที่ \bar{i} คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน x และ \bar{j} คือ เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน y แต่เนื่องจากรถเคลื่อนที่เฉพาะแนวแกน x เพียงแกนเดียว ดังนั้นจะได้

$$r_0 = x\bar{i} \quad (2.2)$$

และ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของภาระ จะมีการเคลื่อนที่ตามพิกัดวงกลม (circular coordinate) แสดงดังสมการ

$$r_m = x_m\bar{i} + y_m\bar{j} \quad (2.3)$$

โดยที่ $x_m = x + l \sin \theta$ และ $y_m = -l \cos \theta$

การหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบครนเหนือสี่ระยะโดยวิธีของลากรางจ์ จะเป็นการพิจารณาพลังงานจลน์ (kinetic energy : K_c) และพลังงานศักย์ (potential energy : P_c) ของระบบ ดังนั้น สมการพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบครนเหนือสี่ระยะแสดงได้ดังนี้

$$K_c = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) \quad (2.4)$$

และ

$$P_c = -mgl \cos \theta \quad (2.5)$$

โดยที่ \dot{x} คือ ความเร็วทางแนวแกน x ของรถครน

\dot{x}_m คือ ความเร็วทางแนวแกน x ของภาระ

\dot{y}_m คือ ความเร็วทางแนวแกน y ของภาระ

เมื่อได้สมการพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบแล้ว ต่อไปหาสมการลากรางจ์ (Lagrangian: L) จาก

$$L = K_c - P_c \quad (2.6)$$

เมื่อแทนสมการพลังงานจลน์ K_c จากสมการที่ (2.4) และพลังงานศักย์ P_c จากสมการที่ (2.5) ลงในสมการที่ (2.6) จะได้

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + mgl \cos \theta \quad (2.7)$$

โดยที่ $\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 = \dot{x}^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l \cos \theta + 2\dot{x}\dot{l} \sin \theta + \dot{\theta}^2 l^2 + \dot{l}^2$ ดังนั้น จะได้สมการลากรางจ์ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{l}^2 + \dot{\theta}^2 l^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l \cos \theta + 2\dot{x}\dot{l} \sin \theta) + mgl \cos \theta \quad (2.8)$$

สมการการเคลื่อนที่ของออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange equation of motion) แสดงได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (2.9)$$

โดยที่ Q คือแรงทั่วไปที่กระทำกับระบบ ซึ่งสมการนี้จะนำมาใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะ

เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของออยเลอร์-ลากรางจ์จะมีความสัมพันธ์กับพิกัดทั่วไป (generalized coordinates) โดยที่ $q = [x, \theta, l]^T$ ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของรถครน สมการการแกว่งของภาวะ และสมการการดึงเชือกสลิง จึงแสดงได้ตามลำดับดังนี้

$$\text{สมการการเคลื่อนที่ของรถครน } x: \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_x - b_m \dot{x}$$

$$F_x - b_m \dot{x} = (M + m) \ddot{x} + ml (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + m \ddot{l} \sin \theta + 2ml \dot{\theta} \cos \theta \quad (2.10)$$

$$\text{สมการการแกว่งของภาวะ } \theta: \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

$$0 = l \ddot{\theta} + 2\dot{\theta} \dot{l} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta \quad (2.11)$$

$$\text{สมการการดึงของเชือกสลิง } l: \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \frac{\partial L}{\partial l} = F_l - b_l \dot{l}$$

$$F_l - b_l \dot{l} = m \ddot{l} + m \ddot{x} \sin \theta - ml \dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \quad (2.12)$$

โดยที่ $b_m \dot{x}$ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และ $b_l \dot{l}$ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการดึงเชือกสลิง จากการทดลองพบว่า ค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้า (electrical time constant) ของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบเครนเหนือศีรษะมีค่าน้อยกว่าค่าคงตัวเวลาเชิงกล (mechanical time constant) ของระบบกลไกอยู่มาก ดังนั้น จึงไม่นำค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในระบบการเคลื่อนที่มาพิจารณาเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ

จากสมการการเคลื่อนที่ของรถเครน (2.10) F_x คือแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถเครน และมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$F_x = K_m T_m \cong K_r D_i \quad (2.13)$$

โดยที่ K_m คือค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน T_m คือแรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (นิวตัน-เมตร) D_i (duty cycle) คือค่าอินพุตที่ป้อนให้แก่วงจรขับกระแสเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์โดยจะมีค่าตั้งแต่ 0 – ±100 เปอร์เซ็นต์ (แรงบิดของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ D_i คือ ถ้า D_i มีค่าเท่ากับ 100 % จะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด และถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นบวกจะทำให้รถเครนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นลบจะทำให้รถเครนเคลื่อนที่ไปข้างหลัง) และ K_r คือค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของมอเตอร์ K_m และอัตราการส่งกำลังของสายพานของระบบขับเคลื่อนรถเครน และเมื่อแทนค่า F_x จากสมการที่ (2.13) ลงในสมการที่ (2.10) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเครนดังนี้

$$K_r D_i - b_m \dot{x} = (M + m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + m\ddot{l} \sin \theta + 2ml\dot{\theta} \cos \theta \quad (2.14)$$

สำหรับ F_l ในสมการการดึงเชือกสลิง (2.12) คือแรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิงและมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการ

$$F_l = K_{ml} T_l \cong K_l V_i \quad (2.15)$$

โดยที่ K_{ml} คือค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการดึงเชือกสลิง T_l คือค่าแรงบิดมอเตอร์ของระบบการดึงเชือกสลิง V_i คือแรงดันอินพุตที่ป้อนให้แก่วงจรขับกระแสเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ในการดึงเชือกสลิงโดยจะมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง -24 โวลต์ ถึง +24 โวลต์ และ K_l คือค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของมอเตอร์ K_{ml} และอัตราการทดของเกียร์ของระบบการดึงเชือกสลิง และเมื่อแทนค่า F_l จากสมการ (2.15) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้สมการการดึงเชือกสลิงใหม่ดังนี้

$$K_l V_i - b_l \dot{l} = m\ddot{l} + m\dot{x} \sin \theta - ml\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \quad (2.16)$$

เมื่อจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ของรถเครน (2.14) สมการการแกว่งของภาระ(2.11) และสมการการดึงเชือกสลิง (2.16) ใหม่จะได้ดังนี้

$$\ddot{x} = \frac{K_r D_i - b_m \dot{x} - ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) - m\ddot{l} \sin \theta - 2ml\dot{\theta} \cos \theta}{M + m} \quad (2.17)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-\ddot{x} \cos \theta - 2\dot{\theta}\dot{l} - g \sin \theta}{l} \quad (2.18)$$

$$\ddot{l} = \frac{K_L V_i - b_L \dot{l} - m\ddot{x} \sin \theta + ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta}{m} \quad (2.19)$$

หลังจากได้สมการของ \ddot{x} , $\ddot{\theta}$ และ \ddot{l} แล้ว จึงหาฟังก์ชันของ $f(\ddot{x})$ โดยแทนค่า $\ddot{\theta}$ จากสมการที่ (2.18) และแทนค่า \ddot{l} จากสมการที่ (2.19) ลงในสมการที่ (2.17) จะได้

$$f(\ddot{x}) = \frac{[K_r D_i - b_m \dot{x} - K_L V_i \sin \theta + b_L \dot{l} \sin \theta]}{M} \quad (2.20)$$

ต่อไปหาฟังก์ชัน $f(\ddot{\theta})$ โดยแทนค่า \ddot{x} จากสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.18) จะได้

$$f(\ddot{\theta}) = \frac{-2\dot{\theta}\dot{l} - g \sin \theta}{l} - \frac{(K_r D_i - b_m \dot{x} - K_L V_i \sin \theta + b_L \dot{l} \sin \theta)}{Ml} \cos \theta \quad (2.21)$$

และหาฟังก์ชัน $f(\ddot{l})$ โดยแทนค่า \ddot{x} จากสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.19) จะได้

$$f(\ddot{l}) = \frac{K_L V_i - b_L \dot{l} + ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta}{m} - \frac{(K_r D_i - b_m \dot{x} - K_L V_i \sin \theta + b_L \dot{l} \sin \theta)}{M} \sin \theta \quad (2.22)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2.20) สมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22) มาทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นด้วยวิธีลียาปูนอฟ (Lyapunov's linearization method) [5] โดยใช้สมการ

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{(x=0, u=0)} x + \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{(x=0, u=0)} u + f_{h.o.t.}(x, u) \quad (2.23)$$

เมื่อ $f_{h.o.t.}$ แทนด้วยเทอมของ x และ u ที่อันดับสูงกว่า ดังนั้น สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของรถเข็นโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{x})$ สมการการแกว่งของภาระโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{\theta})$ และสมการการคืบของเชือกสลิงโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{l})$ โดยพิจารณาเมื่อระบบเข็นหรือสรีระอยู่ในสถานะสมดุล (equilibrium point) ดังนี้

$$\ddot{x} = \left(\frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial l} l \right) \Big|_{(\theta=0, l=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial V_i} V_i \right) \Big|_{(\theta=0)} \quad (2.24)$$

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \dot{\theta}} \dot{\theta} + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial l} l \right) \Big|_{(\theta=0, \dot{\theta}=0, l=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial V_i} V_i \right) \Big|_{(\theta=0)} \quad (2.25)$$

$$\ddot{l} = \left(\frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \dot{\theta}} \dot{\theta} + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial l} l \right) \Big|_{(\theta=0, \dot{\theta}=0, l=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial V_i} V_i \right) \Big|_{(\theta=0)} \quad (2.26)$$

และเมื่อแก้สมการแล้วก็จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเข็น สมการการแกว่งของภาระ และสมการการคืบเชือกสลิงที่เป็นสมการเชิงเส้น (linear equation) ตามลำดับดังนี้

$$\text{สมการการเคลื่อนที่ของรถเข็น} \quad \ddot{x} = \frac{-b_m}{M} \dot{x} + \frac{K_r}{M} D_i \quad (2.27)$$

$$\text{สมการการแกว่งของภาระ} \quad \ddot{\theta} = \frac{b_m}{Ml} \dot{x} - \frac{g}{l} \theta - \frac{K_r}{Ml} D_i \quad (2.28)$$

$$\text{สมการการคืบเชือกสลิง} \quad \ddot{l} = -\frac{b_l}{m} \dot{l} + \frac{K_l}{m} V_i \quad (2.29)$$

และเมื่อแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.27) (2.28) และ (2.29) แล้วจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเข็นหรือสรีระออกมา ซึ่งในการแปลงลาปลาซสำหรับสมการการแกว่งของภาระนั้น จะพิจารณาให้ความยาวเชือก l ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงกับการแกว่งของภาระมีความยาวคงที่ เนื่องจากหากระบบใดมีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงตามเวลามากกว่าหนึ่งตัวอยู่ในเทอมเดียวกันจะไม่สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบนั้นได้ จากเงื่อนไขนี้ เมื่อแปลงลาปลาซแล้วจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ

ระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (อินพุต คือ $D_i(s)$ และเอาต์พุตคือ $x(s)$) ฟังก์ชันถ่ายโอนของการแกว่งของภาระ (อินพุต คือ $D_i(s)$ และ เอาต์พุต คือ $\theta(s)$) และฟังก์ชันถ่ายโอนของการดึงเชือกสลิง (อินพุต คือ $V_i(s)$ และเอาต์พุต คือ $I(s)$) ดังนี้

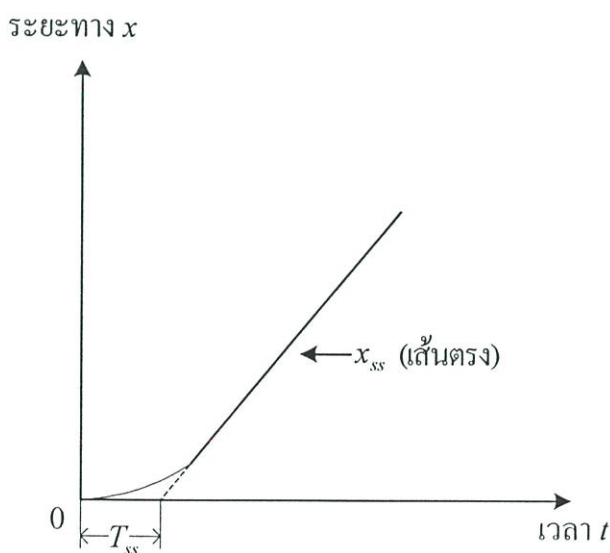
$$G_{px}(s) = \frac{x(s)}{D_i(s)} = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)} \quad (2.30)$$

$$G_{p\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{D_i(s)} = -\frac{K_r s}{Mls^3 + b_m ls^2 + Mgs + b_m g} \quad (2.31)$$

$$G_{pi}(s) = \frac{I(s)}{V_i(s)} = \frac{K_l}{s(ms + b_l)} \quad (2.32)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเครนเหนือศีรษะดังสมการที่ (2.30) (2.31) และ (2.32) จะมีค่า K_r , b_m , K_l และ b_l เป็นพารามิเตอร์ของระบบที่ยังไม่ทราบค่า ซึ่งสามารถหาได้จากผลการทดลองระบบวงเปิด (open-loop system) ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบการดึงเชือกสลิง

การทดสอบระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_r และ b_m ทำได้โดยป้อนสัญญาณอินพุต D_i ที่เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งให้กับวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนรถเครน ซึ่งจะได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 2.5 จากนั้นหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของผลตอบสนองระบบวงเปิด (รูปที่ 2.5) กับฟังก์ชันถ่ายโอนการเคลื่อนที่ของรถเครนในสมการที่ (2.30)



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตคงที่

เมื่อกำหนดให้ $D_i(s)$ ในสมการที่ (2.30) เป็นอินพุตแบบขั้น (step input) และมีขนาดเท่ากับ D_i จะได้

$$x(s) = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)} \cdot \frac{1}{s} D_i \quad (2.33)$$

หลังจากนั้นกระจาย $x(s)$ เป็น

$$x(s) = \frac{K_r D_i}{b_m} \cdot \left[\frac{1}{s^2} - T_{ss} \frac{1}{s} + \frac{T_{ss}^2}{T_{ss}s + 1} \right] \quad (2.34)$$

แล้วจึงแปลงลาปลาซกลับจะได้

$$x(t) = \frac{K_r D_i}{b_m} \cdot \left[t - T_{ss} + T_{ss} e^{-t/T_{ss}} \right], \quad t \geq 0 \quad (2.35)$$

โดยที่ $T_{ss} = \frac{M}{b_m}$ คือช่วงเวลาคงตัวของมอเตอร์ จากสมการที่ (2.35) เมื่อ t เข้าใกล้ค่าอนันต์จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเครน x_{ss} ที่สถานะอยู่ตัว (steady state) ดังนี้

$$x_{ss} = \frac{K_r D_i}{b_m} \cdot [t - T_{ss}] \quad (2.36)$$

จะสังเกตได้จากสมการข้างต้นนี้ว่าเป็นสมการเส้นตรง โดยเส้นกราฟแสดงคุณสมบัติแสดงดังเส้นประในรูปที่ 2.5 และจากสมการที่ (2.34) เมื่อทราบค่าของ T_{ss} และค่าของ M ก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ b_m ได้ และจากสมการที่ (2.36) เมื่อทราบค่าของ b_m ค่าอินพุต D_i และค่าความชันของเส้นประแล้ว จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ K_r ได้ ในทำนองเดียวกัน การหาค่าพารามิเตอร์ K_f และ b_f ของระบบการดึงเชือกสลิงนั้น สามารถหาได้จากการทดสอบระบบวงเปิดของการดึงเชือกสลิง โดยป้อนแรงดันอินพุต V_i คงที่ที่ค่าหนึ่งให้กับวงจรขับเคลื่อนเพื่อขับมอเตอร์ที่ใช้ในการดึงภาระ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองคล้ายกับรูปที่ 2.5 ดังนั้น ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ K_f และ b_f จึงเหมือนกับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น

บทที่ 3

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

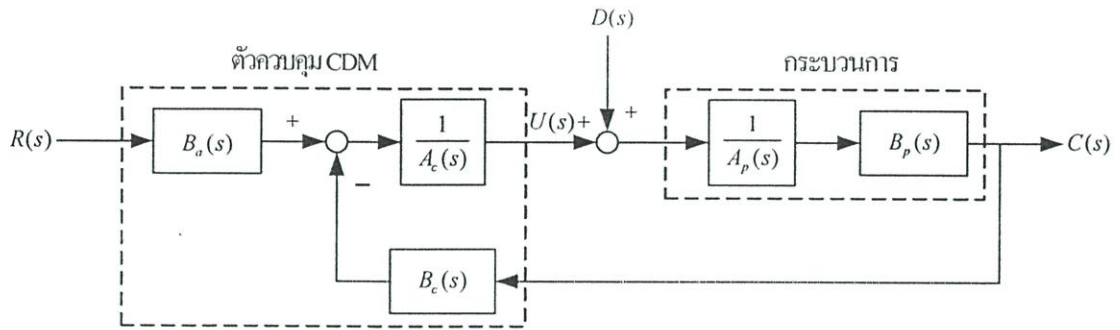
ปัญหาทั่วไปในการออกแบบระบบควบคุมคือการเลือกใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบควบคุมเพื่อให้ระบบนั้นมีสมรรถนะตามต้องการ ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งออกเป็น 3 ทฤษฎีหลักๆ คือ ทฤษฎีการควบคุมตามแบบฉบับ (classical control theory) ทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control theory) และทฤษฎีควบคุมโดยอาศัยพหุนาม (polynomial) หรือบางครั้งเรียกว่าทฤษฎีพีชคณิต ตัวอย่างวิธีการควบคุมตามแบบฉบับ เช่น วิธีการตอบสนองทางความถี่ (frequency response method) และวิธี โลกัศของรากล (root-locus method) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นเครื่องมือที่ง่ายในการออกแบบระบบควบคุม แต่จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นเมื่อ โพลและซีโรของระบบเกิดการหักล้างกัน ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุม (uncontrollable) และไม่สามารถสังเกต (unobservable) พฤติการณ์ของระบบได้ สำหรับตัวอย่างทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการวางโพล (pole-placement) และวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (optimal control) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของปริภูมิสเตต (state-space) รูปแบบปริภูมิสเตตนี้ จะมีความแม่นยำและเหมาะสมในการคำนวณด้วยเครื่องคำนวณ วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์หรือ CDM เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมแบบพีชคณิต ซึ่งระบบจะถูกแทนด้วยพหุนาม โดยพิจารณาตัวเศษและตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนแยกออกจากกัน ดังนั้น จะได้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเมื่อโพลและซีโรเกิดการหักล้างกัน

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวิธี CDM

ศาสตราจารย์ฮุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ด้วยการใช้อนุกรมค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram) เป็นเครื่องมือเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุม การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะใช้หลักการทางพีชคณิตโดยที่

- (1) ระบบจะถูกแทนด้วยสมการพหุนาม
- (2) สามารถออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมได้พร้อมกัน
- (3) มีการนำแผนผังค่าสัมประสิทธิ์มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
- (4) ทฤษฎีเสถียรภาพของ CDM จะอยู่บนเงื่อนไขความพอเพียงของลีพาตอฟ (Lipatov's sufficient condition for stability)
- (5) ดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM จะถูกคัดแปลงมาจากรูปแบบมาตรฐานของ

3.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน



รูปที่ 3.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO

โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO (Single-Input-Single-Output) แสดงได้ ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมและกระบวนการ โดยที่ $A_p(s)$ และ $B_p(s)$ คือพหุนามของกระบวนการและมีรูปแบบแสดงในสมการที่ (3.1) และ (3.2) ดังนี้

$$A_p(s) = p_k s^k + p_{k-1} s^{k-1} + \dots + p_0 \quad (3.1)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0 \quad (3.2)$$

และ $A_c(s)$, $B_c(s)$ และ $B_a(s)$ ซึ่งก็คือพหุนามของตัวควบคุม CDM จะมีรูปแบบดังนี้

$$A_c(s) = l_\lambda s^\lambda + l_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + l_0 \quad (3.3)$$

$$B_c(s) = k_\lambda s^\lambda + k_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + k_0 \quad (3.4)$$

$$B_a(s) = p_\lambda s^\lambda + p_{\lambda-1} s^{\lambda-1} + \dots + p_0 \quad (3.5)$$

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ สำหรับ $B_a(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) ถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) แต่ช่วงเวลาที่ขึ้น (rise time) จะมาก และถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $B_c(s)$ จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน และช่วงเวลาที่ขึ้นจะน้อยลง เนื่องจากระบบควบคุมนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2 ตัว ดังนั้น จึงถูกเรียกว่าระบบควบคุมแบบสองระดับขั้นเสรี (two-degree-of-freedom: 2DOF) โดยโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ 2DOF นั้น เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ

จะทำให้ระบบควบคุมสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนดและสามารถกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบได้

3.3 พหุนามคุณลักษณะ

พหุนามคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐานดังรูปที่ 3.1 โดยไม่มีพีฟีลเตอร์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.6)

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (3.6)$$

โดยที่ a_0, a_1, \dots, a_n คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ยังไม่รู้ค่า และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนี้จะถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM จะเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมทั้งระบบ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จะประกอบด้วยค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพหุนามคุณลักษณะ ส่วนค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* จะเป็นตัวบอกความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i โดยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* แสดงได้ดังสมการที่ (3.7) (3.8) และ (3.9) ดังนี้

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \quad (3.7)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.8)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i+1}} + \frac{1}{\gamma_{i-1}}; \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (3.9)$$

โดยที่ $i=1, \dots, n-1$ จากความสัมพันธ์ของค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ในสมการที่ (3.7) และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ในสมการที่ (3.8) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_i แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
a_i &= a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \cdots \gamma_2^{i-2} \gamma_1^{i-1}} \\
&= a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{(\gamma_{i-j})^j}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

เมื่อแทนค่าแต่ละตัวของสัมประสิทธิ์ a_i ลงในสมการที่ (3.6) จะได้พหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ที่แสดงอยู่ในเทอมของ a_0 , τ และ γ_i ดังนี้

$$P(s) = a_0 \left[\left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}^j} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \tag{3.11}$$

ซึ่งสมการ $P(s)$ นี้จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ต่อไป

3.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกออกแบบโดยวิธี CDM นั้น จะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลิฟาทอฟ โดยลิฟาทอฟกล่าวว่าวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบต่างๆ เช่น วิธีของเรทท์-เฮอรวิทซ์ (Routh-Hurwitz) นั้น เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 หรืออันดับ 4 แต่ไม่เพียงพอต่อการนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับสูงๆ ลิฟาทอฟได้เสนอว่า ระบบอันดับที่ n ที่มีจำนวนพารามิเตอร์ n ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง (exact stability region) สามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มี n มิติ แต่ขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (sufficient stability region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง ดังนั้นระบบใดๆ อาจมีเสถียรภาพแม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่พอเพียงจะไม่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า เงื่อนไขเสถียรภาพของลิฟาทอฟเป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับความพอเพียง

จากวิธีตรวจสอบเสถียรภาพของเรทท์-เฮอรวิทซ์ เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 แสดงดังนี้

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \tag{3.12}$$

ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในเทอมของครรชนีเสถียรภาพคือ

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \tag{3.13}$$

และเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 4 แสดงดังนี้

$$a_2 > (a_1/a_3)a_4 + (a_3/a_1)a_0 \quad (3.14)$$

$$\gamma_2\gamma_3 > 1 \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.9) (3.13) และ (3.15) สามารถสรุปเงื่อนไขเสถียรภาพสำหรับระบบอันดับ 3 และ 4 ได้ดังนี้

$$\gamma_i > \gamma_i^* \text{ สำหรับทุกๆค่าของ } i = 2 \sim n-2 \quad (3.16)$$

สำหรับระบบอันดับ 5 และอันดับที่สูงขึ้นไป ลีพาทอฟได้เสนอเงื่อนไขพอเพียงสำหรับความมีเสถียรภาพและความไม่มีเสถียรภาพของระบบไว้หลายรูปแบบ โดยทฤษฎีที่เหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วย CDM แสดงดังต่อไปนี้

เงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความมีเสถียรภาพของระบบคือ

$$a_i > 1.12 \left[\frac{a_{i-1}}{a_{i+1}} a_{i+2} + \frac{a_{i+1}}{a_{i-1}} a_{i-2} \right] \quad (3.17)$$

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^* \text{ สำหรับทุกๆค่าของ } i = 2 \sim n-2 \quad (3.18)$$

และเงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพของระบบคือ

$$a_{i+1}a_i \leq a_{i+2}a_{i-1} \quad (3.19)$$

$$\gamma_{i+1}\gamma_i \leq 1, \text{ สำหรับบางค่าของ } i = 1 \sim n-2 \quad (3.20)$$

3.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM

Kessler ได้กำหนดค่าדרรชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกๆค่ามีค่าเท่ากับ 2 เพื่อลดการออกสซิลเลท และค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยรูปแบบ ITAE (Integral Time Absolute Error) ต่อมา Manabe พบว่าการกำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_1 มีค่าเท่ากับ 2.5 จะทำให้ผลตอบสนองชั่วครู่ดีขึ้น กล่าวคือผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน และมีช่วงเวลาดำเนินลดลง ดังนั้นค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i มาตรฐานของ CDM คือ

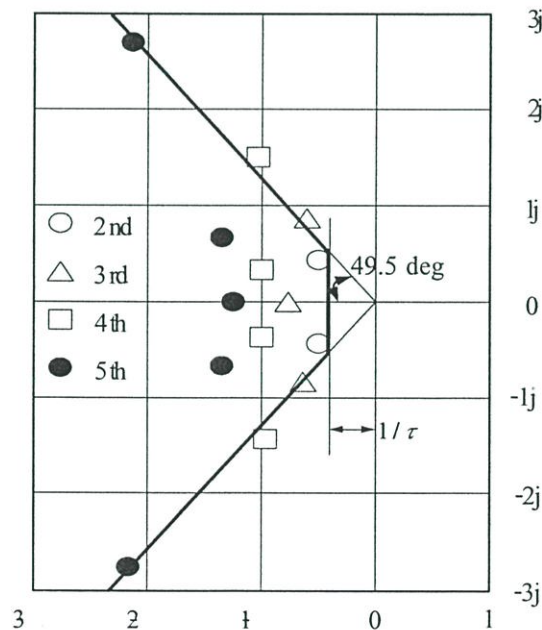
$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (3.21)$$

และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาเข้าที่ (settling time: t_s) ดังนี้

$$t_s = 2.5\tau \sim 3\tau \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.11) จะเห็นว่าพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ จะประกอบด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าครรรชนีเสถียรภาพ γ_i ดังนั้น รูปร่างของผลตอบสนองของระบบจะถูกกำหนดด้วยค่าครรรชนีเสถียรภาพ γ_i และความเร็วของผลตอบสนองจะถูกกำหนดด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งคุณสมบัติของรูปแบบมาตรฐานของ CDM สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) สำหรับระบบแบบชนิด 1 (type 1) จะไม่มีค่าพุ่งเกินและระบบแบบชนิด 2 (type 2) จะมีค่าพุ่งเกินประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์
- (2) การกำหนดช่วงเวลาที่ขึ้นของผลตอบสนองของระบบ สามารถออกแบบได้จากการกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล τ
- (3) รูปร่างของผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM จะไม่ขึ้นอยู่กับอันดับของระบบ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าการกำหนดค่าครรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ
- (4) ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่ำจะเรียงกันเป็นเส้นตรง และตำแหน่งโพลของระบบอันดับสูงจะอยู่ภายใน 49.5 องศา จากแกนจริงด้านลบ (negative real axis) โดยมีอัตราส่วนการหน่วง (damping ratio) ζ มากกว่า 0.65 แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่างๆ

3.6 เงื่อนไขการเลือกค่าครรรชนีเสถียรภาพ

โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่าครรรชนีเสถียรภาพมาตรฐานจะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามต้องการ อย่างไรก็ตาม

ก็ตามค่าครรชนีเสถียรภาพนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการ แต่ในการปรับเปลี่ยนจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad (3.23)$$

ในกรณีที่เลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ให้มีค่ามากก็เพื่อให้ระบบควบคุมมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ และจากเงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟกล่าวไว้ว่า ระบบจะมีเสถียรภาพถ้าครรชนีเสถียรภาพทุกตัวมีค่ามากกว่า 1.5 ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ไว้ในงานวิจัยของลีพาทอฟ [6] และถ้าครรชนีเสถียรภาพมีค่ามากกว่า 4 ทุกตัวจะทำให้รากของระบบเป็นจำนวนจริงลบทั้งหมด ดังนั้นโดยปกติจะเลือกค่า γ_i อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 4

3.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะเป็นตัวบอกเสถียรภาพ เวลาของผลตอบสนองและความคงทนของระบบ ในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะแสดงเป็นกราฟล็อกการิทึม โดยแกนตั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ a_i ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ส่วนแกนนอนแสดงอันดับ i ของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัว ซึ่งความโค้งของเส้นกราฟจะบอกความมีเสถียรภาพ และความลาดเอียงของเส้นโค้งจะบอกความเร็วของผลตอบสนอง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นโค้งเนื่องจากพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงจะเป็นตัวบอกความคงทนของระบบ

ในการพล็อตแผนผังค่าสัมประสิทธิ์นั้น จะขอยกตัวอย่างเพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้นดังต่อไปนี้ ถ้ากำหนดให้พหุนามคุณลักษณะของระบบควบคุมวงปิดคือ

$$P(s) = 0.25s^5 + s^4 + 2s^3 + 2s^2 + s + 0.2 \quad (3.24)$$

แล้ว จะเขียนสัมประสิทธิ์ a_i ของพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ได้ดังนี้

$$a_i = [0.25 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 0.2] \quad (3.25)$$

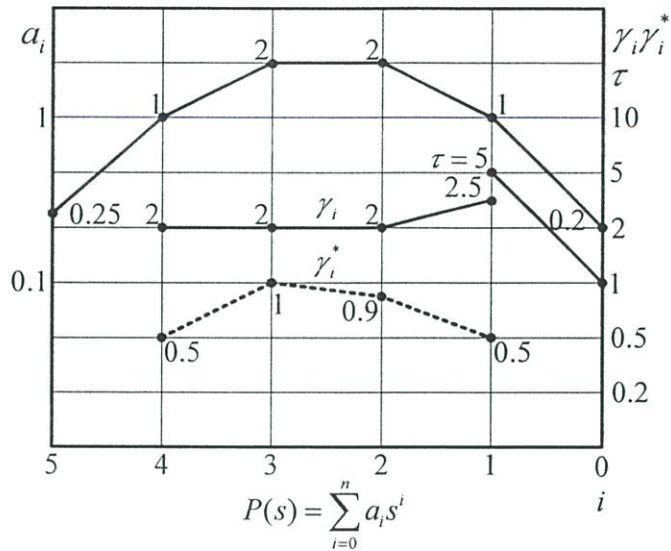
สำหรับค่าพารามิเตอร์ของ CDM แสดงได้ดังนี้

$$\gamma_i = [2 \ 2 \ 2 \ 2.5] \quad (3.26)$$

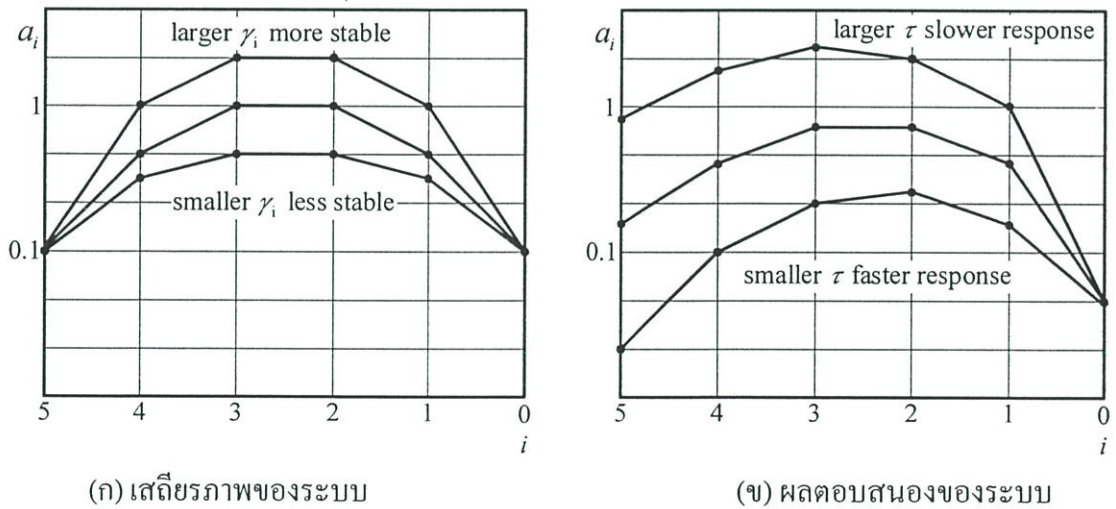
$$\tau = 5 \quad (3.27)$$

$$\gamma_i^* = [0.5 \ 1 \ 0.9 \ 0.5] \quad (3.28)$$

ดังนั้น แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a_i ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์



รูปที่ 3.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

จากรูปที่ 3.4 (ก) แสดงให้เห็นว่าถ้าเส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a_i มีความโค้งมากจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยจะสอดคล้องกับค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่มีค่ามาก ในทางกลับกันถ้าเส้นโค้ง a_i มีความโค้งน้อยจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพน้อยลง โดยสอดคล้องกับค่า γ_i ที่มีค่าน้อย และจากรูปที่ 3.4 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปลายเส้นโค้ง a_i เบี่ยงไปทางซ้ายมากขึ้นค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีค่าน้อยลงและผลตอบสนองจะเร็วขึ้น

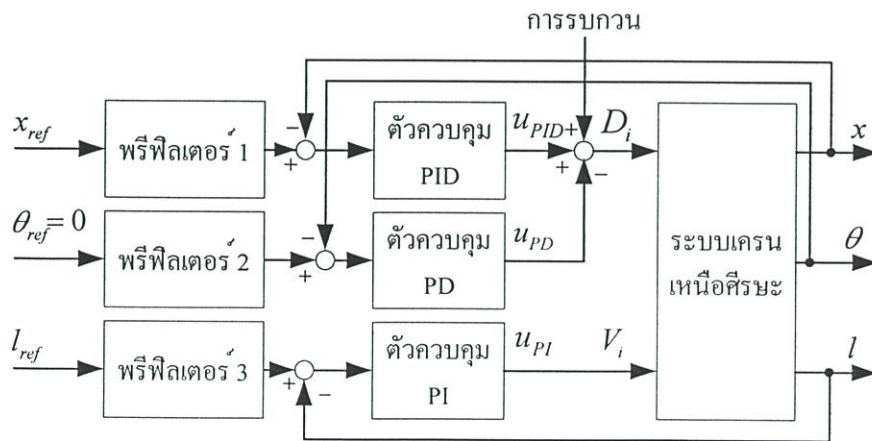
บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM และการสร้างตัวควบคุม

ในบทนี้จะอธิบายโครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปร และการออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมการทำงานของระบบครนเหนือศีรษะ โดยตัวควบคุมที่นำมาใช้จะประกอบด้วยตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถครนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระให้น้อยลงในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายภาระ และตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิงเพื่อไม่ให้ภาระชนกับสิ่งกีดขวาง โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุม PID เพื่อควบคุมตำแหน่งของรถครน ส่วนถัดไปจะแสดงการออกแบบตัวควบคุม PD เพื่อลดมุมแกว่งของภาระ และส่วนสุดท้ายจะแสดงการออกแบบตัวควบคุม PI เพื่อควบคุมความยาวของเชือกสลิง และในแต่ละส่วนก็จะอธิบายการกำหนดค่าพารามิเตอร์เสถียรภาพ การกำหนดพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม พร้อมทั้งอธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จากนั้นจะอธิบายการสร้างตัวควบคุมเพื่อนำตัวควบคุมที่ออกแบบได้นั้น มาควบคุมระบบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง หลังจากนั้นจึงนำตัวควบคุมที่ถูกแปลงเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องนี้มาเขียนโปรแกรมเพื่อที่จะควบคุมระบบครนเหนือศีรษะให้เป็นไปตามต้องการ

4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ



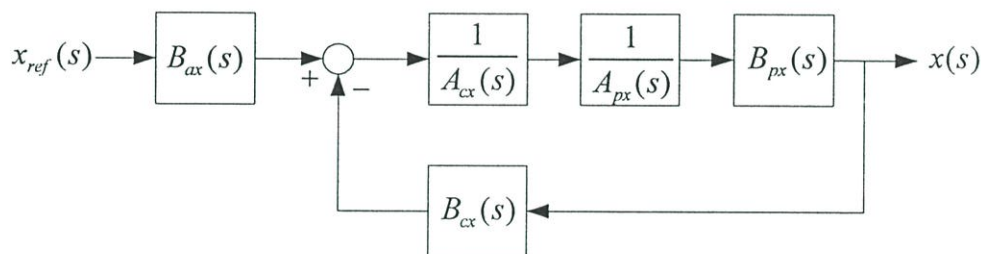
รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ

โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบแบริ่งแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งตัวควบคุมทั้งสามจะถูกออกแบบแยกอิสระจากกัน ดังนั้น ตัวควบคุม PID จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถแบริ่ง (2.30) ตัวควบคุม PD จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ (2.31) และตัวควบคุม PI จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการตั้งเชิงเอียง (2.32) สำหรับขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมทั้งสามด้วยวิธี CDM จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

4.2 การออกแบบตัวควบคุม

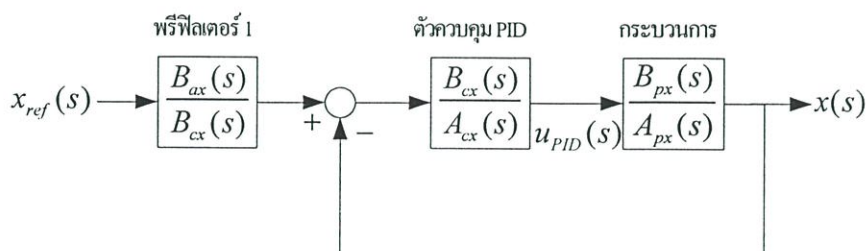
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุม PID ด้วยวิธี CDM สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถแบริ่ง

รูปที่ 4.2 เป็นโครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบริ่งที่ใช้ตัวควบคุม PID ที่แสดงตามรูปแบบของ CDM



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบริ่งตามรูปแบบของ CDM

เมื่อแปลงโครงสร้างของรูปที่ 4.2 ให้อยู่ในรูปแบบเอกภาพป้อนกลับ (unity feedback) จะได้โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบริ่งดังแสดงในรูปที่ 4.3 และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID จะแสดงได้ดังสมการที่ (4.1)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบริ่ง

$$G_{cx}(s) = \frac{B_{cx}(s)}{A_{cx}(s)} = K_{cx} \left(1 + \frac{1}{T_{ix}s} + K_{dx}s \right) \quad (4.1)$$

โดยที่ K_{cx} คือ อัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) T_{ix} คือ เวลาอินทิกรัล (integral time) และ T_{dx} คือ เวลาอนุพันธ์ (derivative time) เมื่อจัด $G_{cx}(s)$ ให้อยู่ในรูปสมการพหุนามเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะได้

$$B_{cx}(s) = k_{dx}s^2 + k_{px}s + k_{ix} \quad (4.2)$$

$$A_{cx}(s) = s$$

โดยที่ $k_{dx} = K_{cx}T_{dx}$, $k_{px} = K_{cx}$ และ $k_{ix} = K_{cx}/T_{ix}$ และในส่วนของกระบวนการซึ่งก็คือระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (สมการที่ (2.30)) แทนด้วย $G_{px}(s) = \frac{B_{px}(s)}{A_{px}(s)} = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)}$ จะมีสมการพหุนามคือ

$$B_{px}(s) = K_r \quad (4.3)$$

$$A_{px}(s) = Ms^2 + b_ms$$

เมื่อได้สมการพหุนามของตัวควบคุมในสมการที่ (4.2) และสมการพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนในสมการที่ (4.3) ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{dx} k_{px} และ k_{ix} ด้วยวิธี CDM ได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

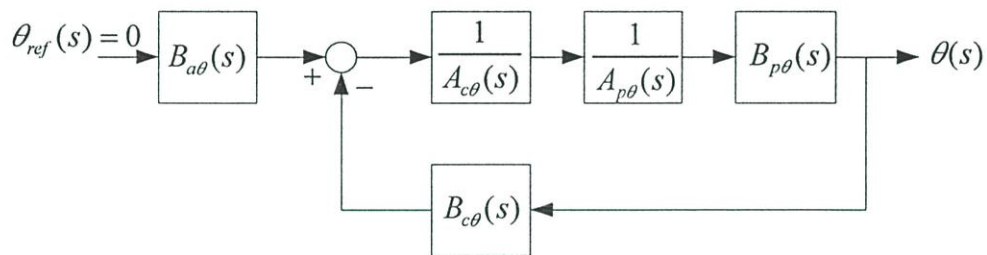
- 1) กำหนดช่วงเวลาเข้าที่ t_s และค่าדרรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่เหมาะสมกับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน ซึ่งช่วงเวลาเข้าที่นี้มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังสมการที่ (3.22) และในการกำหนดค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i จะสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ γ_i^* ดังสมการที่ (3.23)
- 2) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดจากสมการที่ (3.6) โดยแทนค่า $B_{px}(s)$ $A_{px}(s)$ $B_{cx}(s)$ และ $A_{cx}(s)$ ที่แสดงไว้ในสมการที่ (4.2) และ (4.3) ซึ่งสมการพหุนามคุณลักษณะนี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าแล้ว และพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{dx} k_{px} และ k_{ix} ที่ต้องการหาค่า
- 3) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของวิธี CDM (สมการที่ (3.11)) ที่อยู่ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ α_0 ค่าดรรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งได้จากการกำหนดค่าในขั้นตอนที่ 1) จากนั้นเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะที่ได้นี้กับสมการพหุนาม

คุณลักษณะที่ได้ในขั้นตอนที่ 2) แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{dx} k_{px} และ k_{ix} ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ดังนั้น เมื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{dx} k_{px} และ k_{ix} ด้วยวิธี CDM ได้แล้ว ก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ K_{cx} T_{ix} และ T_{dx} ของตัวควบคุม PID ได้

- 4) กำหนดให้ $B_{cx}(s)$ ซึ่งเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถคร่อมมีค่าเท่ากับ k_{ix}

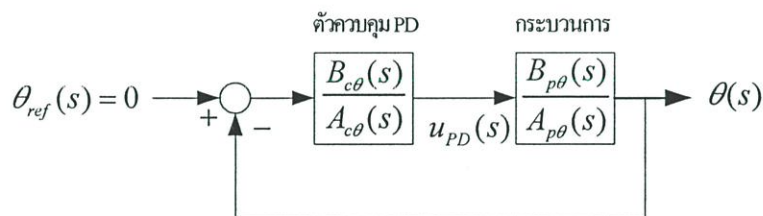
4.2.2 การออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CDM สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ

โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระตามรูปแบบของ CDM แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระตามรูปแบบของ CDM

โดยที่ตัวควบคุมของระบบนี้คือ PD จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่ามุมอ้างอิง θ_{ref} มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งทำให้ส่วนของพรีฟิลเตอร์ในระบบนี้มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย ดังนั้น เขียนโครงสร้างระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระให้อยู่ในรูปของเอกภาพป้อนกลับได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระ

สำหรับตัวควบคุม PD ของระบบควบคุมมุมแกว่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังสมการที่ (4.4)

$$G_{co}(s) = \frac{B_{co}(s)}{A_{co}(s)} = K_{co}(1 + K_{d\theta}s) \quad (4.4)$$

โดยที่ $K_{c\theta}$ คือ อัตราขยายสัดส่วน และ $T_{d\theta}$ คือ เวลาอนุพันธ์ จากนั้นจัด $G_{c\theta}(s)$ ให้อยู่ในรูปแบบสมการพหุนามเพื่อให้สอดคล้องกับสมการที่ (3.3) และ (3.4) จะได้

$$B_{c\theta}(s) = k_{d\theta}s + k_{p\theta} \quad (4.5)$$

$$A_{c\theta}(s) = 1$$

โดยที่ $k_{d\theta} = K_{c\theta}T_{d\theta}$ และ $k_{p\theta} = K_{c\theta}$ และกระบวนการในรูปที่ 4.5 คือระบบการแกว่งของภาระ

$$G_{p\theta}(s) = \frac{B_{p\theta}(s)}{A_{p\theta}(s)} = -\frac{K_r s}{Mls^3 + b_m ls^2 + Mgs + b_m g} \quad \text{ซึ่งมีสมการพหุนามคือ}$$

$$B_{p\theta}(s) = -K_r s \quad (4.6)$$

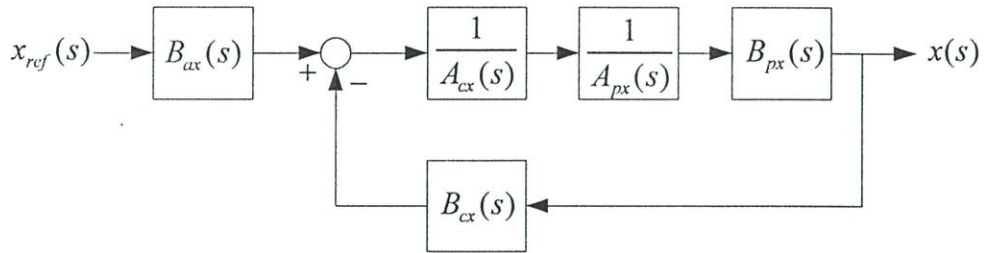
$$A_{p\theta}(s) = Mls^3 + b_m ls^2 + Mgs + b_m g$$

เมื่อได้สมการพหุนามของตัวควบคุมดังสมการที่ (4.5) และสมการพหุนามของระบบการแกว่งของภาระในสมการที่ (4.6) แล้ว ก็หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $k_{d\theta}$ และ $k_{p\theta}$ ด้วยวิธี CDM ได้ ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CDM ของระบบการแกว่งของภาระนี้ไม่สามารถกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ได้ (เนื่องจากจะทำให้การแก้สมการเพื่อหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนั้นไม่เป็นจริง) ดังนั้น ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CDM จึงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่เหมาะสมกับระบบการเคลื่อนที่ของรถเกรน ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ γ_i^* ดังสมการที่ (3.23)
- 2) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดจากสมการที่ (3.6) โดยแทนค่า $B_{p\theta}(s)$ $A_{p\theta}(s)$ $B_{c\theta}(s)$ และ $A_{c\theta}(s)$ ที่แสดงในสมการที่ (4.5) และ (4.6) สมการพหุนามคุณลักษณะนี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าแล้ว และพารามิเตอร์ของตัวควบคุม $k_{d\theta}$ และ $k_{p\theta}$ ที่ต้องการหาค่า
- 3) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของวิธี CDM ที่อยู่ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ a_0 ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ซึ่งได้จากการกำหนดในขั้นตอนที่ 1) หลังจากเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะทั้งสองแล้วแก้สมการ จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม $k_{d\theta}$ $k_{p\theta}$ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ออกมา โดยค่าพารามิเตอร์ $k_{d\theta}$ และ $k_{p\theta}$ จะมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ $K_{c\theta}$ และ $T_{d\theta}$ ของตัวควบคุม PD ดังนั้น เมื่อหาค่าของ $k_{d\theta}$ และ $k_{p\theta}$ ได้แล้ว จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PD ได้

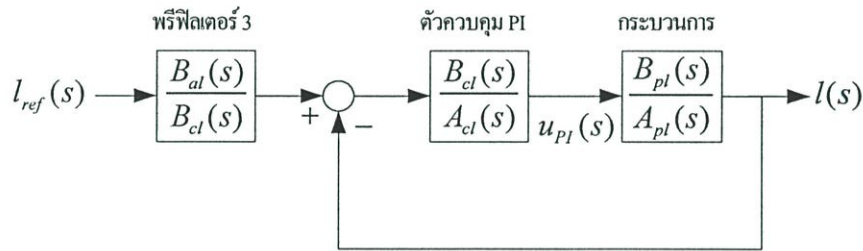
4.2.3 การออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง

ในทำนองเดียวกันกับการออกแบบตัวควบคุม PID และ PD โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงตามรูปแบบของ CDM สามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงตามรูปแบบของ CDM

เมื่อแปลงระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่แสดงดังรูปที่ 4.6 ให้อยู่ในรูปของเอกภาพป้อนกลับจะได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

เนื่องจากตัวควบคุมของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเป็นตัวควบคุม PI ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมนี้จึงแสดงได้ดังนี้

$$G_{cl}(s) = \frac{B_{cl}(s)}{A_{cl}(s)} = K_{cl} \left(1 + \frac{1}{T_{il}s} \right) \quad (4.7)$$

โดยที่ K_{cl} คือ อัตราขยายสัดส่วน และ T_{il} คือ เวลาอินทิกรัล และรูปแบบสมการพหุนามของ $G_{cl}(s)$ ที่สอดคล้องกับสมการที่ (3.3) และ (3.4) คือ

$$B_{cl}(s) = k_{pl}s + k_{il} \quad (4.8)$$

$$A_{cl}(s) = s$$

โดยที่ $k_{pl} = K_{cl}$ และ $k_{il} = K_{cl}/T_{il}$ สำหรับกระบวนการในรูปที่ 4.7 คือระบบการคั้งเชิงซ้อนซึ่งแทนด้วย $G_{pl}(s) = \frac{B_{pl}(s)}{A_{pl}(s)} = \frac{K_l}{s(ms + b_l)}$ จะมีสมการพหุนามคือ

$$B_{pl}(s) = K_l \quad (4.9)$$

$$A_{pl}(s) = ms^2 + b_l s$$

จากสมการพหุนามของตัวควบคุมในสมการที่ (4.8) และพหุนามของระบบการคั้งเชิงซ้อนในสมการที่ (4.9) จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{pl} และ k_{il} ได้ด้วยวิธี CDM ซึ่งในกรณีของการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM ของระบบการคั้งเชิงซ้อนนี้จะเหมือนกับการออกแบบตัวควบคุม PD ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4 ดังนั้น ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม PI ด้วยวิธี CDM มีดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i ที่เหมาะสมกับระบบการคั้งเชิงซ้อน ซึ่งในการกำหนดค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i จะสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ γ_i^* ดังสมการที่ (3.23)
- 2) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดจากสมการที่ (3.6) โดยแทนค่า $B_{pl}(s)$ $A_{pl}(s)$ $B_{cl}(s)$ และ $A_{cl}(s)$ สมการพหุนามคุณลักษณะนี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าแล้ว และพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{pl} และ k_{il} ที่ต้องการหาค่า
- 3) หาสมการพหุนามคุณลักษณะของวิธี CDM ที่อยู่ในเทอมของค่าสัมประสิทธิ์ a_0 ค่าดัชนีเสถียรภาพ γ_i ซึ่งได้จากการกำหนดในขั้นตอนที่ 1) จากนั้นเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะทั้งสอง แล้วแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม k_{px} k_{ix} และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ออกมา ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ K_{cl} และ T_{il} ของตัวควบคุม PI ก็สามารถหาได้จากค่าพารามิเตอร์ k_{px} และ k_{ix}
- 4) กำหนดให้ $B_{cl}(s)$ ซึ่งเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบการคั้งเชิงซ้อนมีค่าเท่ากับ k_{il}

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรมแมตเทอเมติกช่วยในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และ PI ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยรายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

4.3 การสร้างตัวควบคุม

4.3.1 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องสามารถทำได้หลายวิธี [7] คือ

1. การอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอย (backward difference)
2. การอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างก้าวหน้า (forward difference)

3. การอินทิเกรตโดยวิธีหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูหรือวิธีไบลิเนียร์ (trapezoidal integration or bilinear transformation)
4. การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของตัวควบคุม (impulse-invariance)
5. การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณระดับของตัวควบคุม (step-invariance)
6. การเปรียบเทียบตำแหน่งโพลและซีโรของตัวควบคุม (matched pole-zero mapping)

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอยมาใช้ในการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกและง่าย โดยสมการที่ใช้ในการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังสมการที่ (4.10) [7]

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (4.10)$$

โดยที่ T คือ คาบเวลาการซัดตัวอย่าง (sampling time) มีหน่วยเป็นวินาที

การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องให้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยวิธีอินทิเกรตหาผลต่างถดถอย สามารถพิจารณาเสถียรภาพของตัวควบคุมได้จากสมการที่ (4.10) ร่วมกับขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน s ของฟังก์ชันการแปลงลาปลาซโดยค่าจริงของตัวแปร s มีค่าน้อยกว่า 0 ดังนี้

$$\operatorname{Re}(s) < 0$$

$$\operatorname{Re}\left(\frac{z-1}{Tz}\right) < 0$$

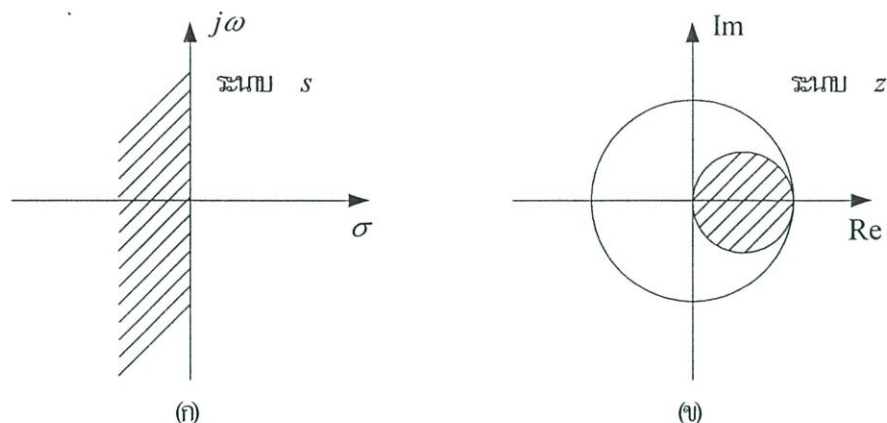
เนื่องจากคาบเวลาการซัดตัวอย่าง $T > 0$ เสมอ และตัวแปรเชิงซ้อน z ประกอบด้วยค่าจริง σ และค่าจินตภาพ ω ($z = \sigma + j\omega$) ดังนั้นจะได้

$$\operatorname{Re}\left(\frac{\sigma + j\omega - 1}{\sigma + j\omega}\right) < 0$$

$$\left(\sigma - \frac{1}{2}\right)^2 + \omega^2 < \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

ซึ่งขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน z คือพื้นที่ภายในวงกลมรัศมี $\frac{1}{2}$ จุดศูนย์กลางตำแหน่ง

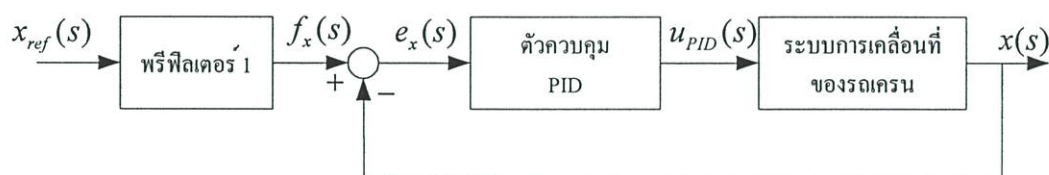
$\left(\frac{1}{2}, \right)$ ของระนาบ z ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยจะเห็นว่า การอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอย สามารถแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่มีเสถียรภาพ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมชนิดดิจิทัลที่มีเสถียรภาพได้เสมอ แต่คุณสมบัติการตอบสนองชั่วขณะและคุณสมบัติการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมจะแตกต่างกัน



รูปที่ 4.8 ขอบเขตเสถียรภาพในการอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอย

4.3.2 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนดังรูปที่ 4.9 จะประกอบด้วย ฟรีฟีลเตอร์ 1 และตัวควบคุม PID ซึ่งในการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน

4.3.2.1 ฟรีฟีลเตอร์ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน

เนื่องจากฟรีฟีลเตอร์ 1 ในรูปที่ 4.3 คือ $B_{ax}(s)/B_{cx}(s)$ ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของฟรีฟีลเตอร์ 1 ในรูปที่ 4.9 จึงเขียนได้ดังนี้

$$\frac{f_x(s)}{x_{ref}(s)} = \frac{\frac{k_{ix}}{s}}{k_{px} + \frac{k_{ix}}{s} + k_{dx}s} \quad (4.11)$$

เมื่อแทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.11) จะได้

$$\frac{f_x(z)}{x_{ref}(z)} = \frac{\frac{k_{ix}T}{1-z^{-1}}}{k_{px} + \frac{k_{ix}T}{1-z^{-1}} + k_{dx}\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)} \quad (4.12)$$

คูณ $1-z^{-1}$ ทั้งเศษและส่วนของสมการที่ (4.12) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{f_x(z)}{x_{ref}(z)} &= \frac{k_{ix}T}{k_{px}(1-z^{-1}) + k_{ix}T + \frac{k_{dx}}{T}(1-z^{-1})^2} \\ k_{ix}Tx_{ref}(z) &= \left[k_{px}(1-z^{-1}) + k_{ix}T + \frac{k_{dx}}{T}(1-2z^{-1} + z^{-2}) \right] f_x(z) \\ f_x(z) &= \frac{k_{ix}Tx_{ref}(z) + \left(k_{px} + \frac{2k_{dx}}{T} \right) f_x(z)z^{-1} - \frac{k_{dx}}{T} f_x(z)z^{-2}}{\left(k_{px} + k_{ix}T + \frac{k_{dx}}{T} \right)} \end{aligned}$$

เมื่อแปลงแซคกลับจะได้สมการเอาต์พุตของพีฟิลเตอร์ 1 ดังนี้

$$f_x(nT) = \frac{k_{ix}Tx_{ref}(nT) + \left(k_{px} + \frac{2k_{dx}}{T} \right) f_x(nT-T) - \frac{k_{dx}}{T} f_x(nT-2T)}{\left(k_{px} + k_{ix}T + \frac{k_{dx}}{T} \right)} \quad (4.13)$$

4.3.2.2 ตัวควบคุม PID

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID คือ

$$\frac{u_{PID}(s)}{e_x(s)} = k_{px} + \frac{k_{ix}}{s} + k_{dx}s \quad (4.14)$$

แทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.14) จะได้

$$\frac{u_{PID}(z)}{e_x(z)} = K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d \left(\frac{1-z^{-1}}{T} \right) \quad (4.15)$$

และเมื่อสมการ (4.15) ถูกคูณด้วย $\frac{1-z^{-1}}{T}$ ทั้งสองข้างจะได้

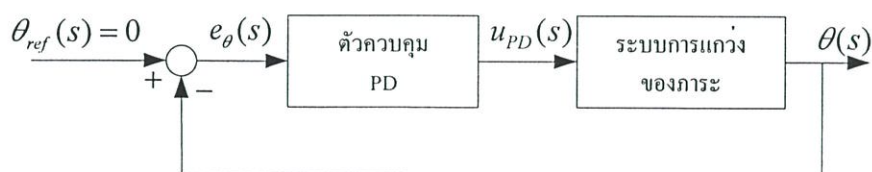
$$\begin{aligned} \left(\frac{1-z^{-1}}{T} \right) \frac{u_{PID}(z)}{e_x(z)} &= \frac{k_{px}T(1-z^{-1}) + k_{ix}T^2 + k_{dx}(1-2z^{-1} + z^{-2})}{T^2} \\ (1-z^{-1})u_{PID}(z) &= \left(\frac{k_{px}T(1-z^{-1}) + k_{ix}T^2 + k_{dx}(1-2z^{-1} + z^{-2})}{T} \right) e_x(z) \\ u_{PID}(z) &= k_{px}(e_x(z) - e_x(z)z^{-1}) + k_{ix}Te_x(z) \\ &\quad + \frac{k_{dx}}{T}(e_x(z) - 2e_x(z)z^{-1} + e_x(z)z^{-2}) + u_{PID}(z)z^{-1} \end{aligned}$$

เมื่อแปลงแซคกลับจะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PID ดังนี้

$$\begin{aligned} u_{PID}(nT) &= k_{px}(e_x(nT) - e_x(nT - T)) + k_{ix}Te_x(nT) \\ &\quad + \frac{k_{dx}}{T}(e_x(nT) - 2e_x(nT - T) + e_x(nT - 2T)) + u_{PID}(nT - T) \end{aligned} \quad (4.16)$$

4.3.3 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระจากระบบเวลาต่อเนื่อง เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

โครงสร้างของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระแสดงดังรูปที่ 4.10 จะไม่มีส่วนของฟรียูฟิลเตอร์เนื่องจากมุมอ้างอิง θ_{ref} นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ในการแปลงระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องจึงแปลงเฉพาะฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PD เท่านั้น



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระ

4.3.3.1 ตัวควบคุม PD

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PD แสดงดังสมการที่ (4.17)

$$\frac{u_{PD}(s)}{e_\theta(s)} = k_{p\theta} + k_{d\theta}s \quad (4.17)$$

หลังจากแทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.17) แล้วจะได้

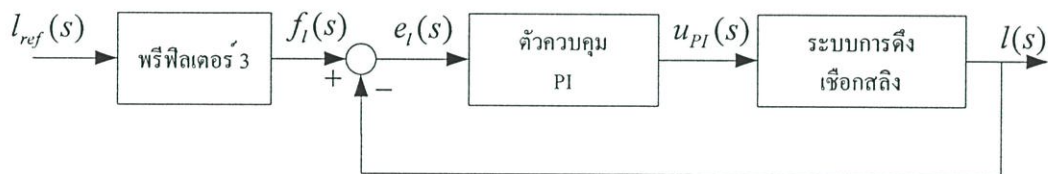
$$u_{PD}(z) = k_{p\theta}e_\theta(z) + \frac{k_{d\theta}}{T}(e_\theta(z) - e_\theta(z)z^{-1})$$

และเมื่อแปลงแซคกลับจะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PD ดังนี้

$$u_{PD}(nT) = k_{p\theta}e_\theta(nT) + \frac{k_{d\theta}}{T}(e_\theta(nT) - e_\theta(nT - T)) \quad (4.18)$$

4.3.4 การแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากโครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงดังรูปที่ 4.11 จะประกอบด้วย ฟรีฟิลเตอร์ 3 และตัวควบคุม PI ดังนั้น ในการแปลงฟังก์ชันถ่ายโอนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องจึงแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 4.11 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

4.3.4.1 ฟรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

ฟรีฟิลเตอร์ 3 ในรูปที่ 4.7 คือ $B_{cl}(s)/B_{pl}(s)$ และจากรูปที่ 4.11 จะได้

$$\frac{f_l(s)}{L_{ref}(s)} = \frac{\frac{k_{il}}{s}}{k_{pl} + \frac{k_{il}}{s}} \quad (4.19)$$

แทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.19) แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้เอาต์พุตของพีฟิลเตอร์ 3

$$f_l(z) = \frac{k_{il}Tl_{ref}(z) + k_{pl}f_l(z)z^{-1}}{k_{pl} + k_{il}T}$$

และเมื่อแปลงแซคกลับจะได้เอาต์พุตของพีฟิลเตอร์ 3 ดังนี้

$$f_l(nT) = \frac{k_{il}Tl_{ref}(nT) + k_{pl}f_l(nT-T)}{k_{pl} + k_{il}T} \quad (4.20)$$

4.3.4.2 ตัวควบคุมพีไอ

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PI แสดงดังสมการที่ (4.21)

$$\frac{u_{PI}(s)}{e_l(s)} = k_{pl} + \frac{k_{il}}{s} \quad (4.21)$$

แทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.21) พร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$u_{PI}(z) = k_{pl}(e_l(z) - e_l(z)z^{-1}) + k_{il}Te_l(z) + u_{PI}(z)z^{-1}$$

และเมื่อแปลงแซคกลับจะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PI ดังนี้

$$u_{PI}(nT) = k_{pl}(e_l(nT) - e_l(nT-T)) + k_{il}Te_l(nT) + u_{PI}(nT-T) \quad (4.22)$$

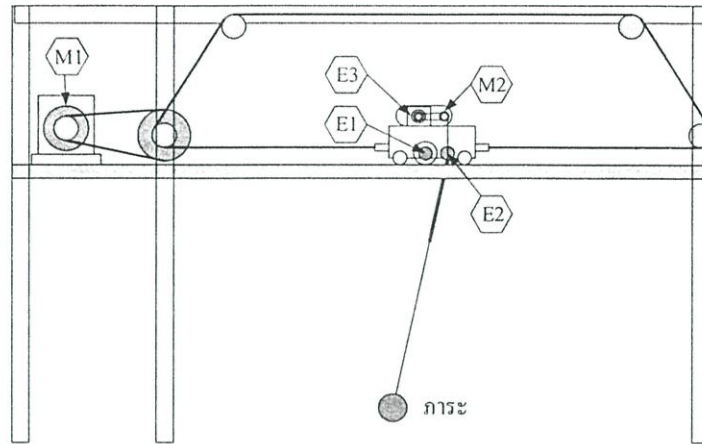
บทที่ 5

การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะ รวมทั้งการหาพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถครนและระบบการดึงเชือกสลิงจากผลตอบสนองระบบวงเปิด เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบครนเหนือศีรษะด้วยวิธี CDM หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพโดยการจำลองการควบคุมระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Matlab) ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทดสอบผลตอบสนองของระบบวงปิด เมื่อกำหนดอินพุตของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเป็นแบบขั้น ขั้นตอนที่สองศึกษาความสัมพันธ์ของการออกแบบตัวควบคุมด้วยการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ว่ามีผลอย่างไรกับผลตอบสนองของระบบ ขั้นตอนที่สามทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์(ภาระ)ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ขั้นตอนที่สี่ทดสอบการกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนในระบบ และขั้นตอนสุดท้าย ทดสอบการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมการดึงเชือกสลิงที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งหลังจากที่ศึกษาผลการจำลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะนำตัวควบคุมที่ออกแบบมาควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

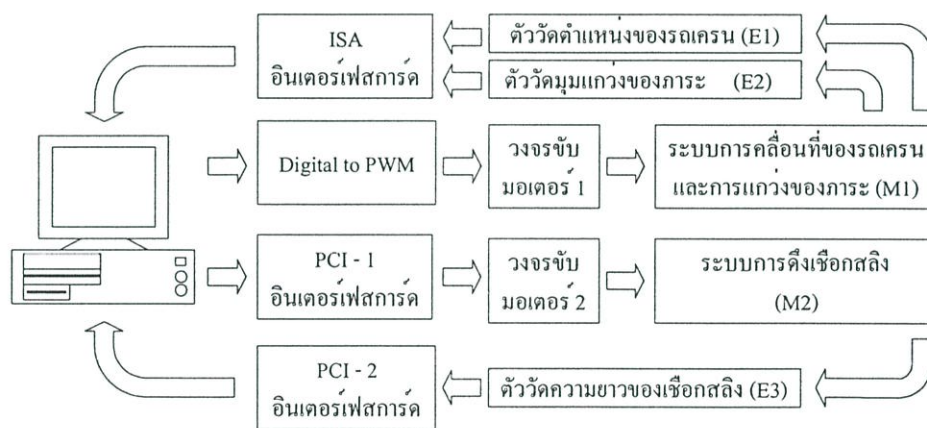
5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ

โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยระบบส่งกำลัง ซึ่งใช้ดีซีมอเตอร์สองตัว โดยมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง (M1) ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับพูลเลย์ (pulley) และสายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์พร้อมทั้งเพิ่มแรงบิดให้กับชุดส่งกำลังเพื่อให้รถครนเคลื่อนที่ และมอเตอร์ตัวที่สอง (M2) ทำหน้าที่ดึงภาระขึ้นและลงโดยมีชุดส่งกำลังคือชุดเกียร์บ็อกซ์ (gear box) ที่ติดอยู่ส่วนปลายของมอเตอร์ ในส่วนของตัวตรวจวัดจะประกอบด้วยเอนโคเดอร์ (encoder) ทั้งหมด 3 ตัว โดยเอนโคเดอร์ตัวที่หนึ่ง (E1) จะใช้วัดตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครน เอนโคเดอร์ตัวที่สอง (E2) ใช้วัดมุมแกว่งของภาระและเอนโคเดอร์ตัวที่สาม (E3) ใช้วัดความยาวของเชือกสลิง และในส่วนของมวลของภาระที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 3 ขนาดคือขนาด 1 กิโลกรัม 3 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัม โดยรายละเอียดของอุปกรณ์และการติดตั้งแสดงในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

5.2 การควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ



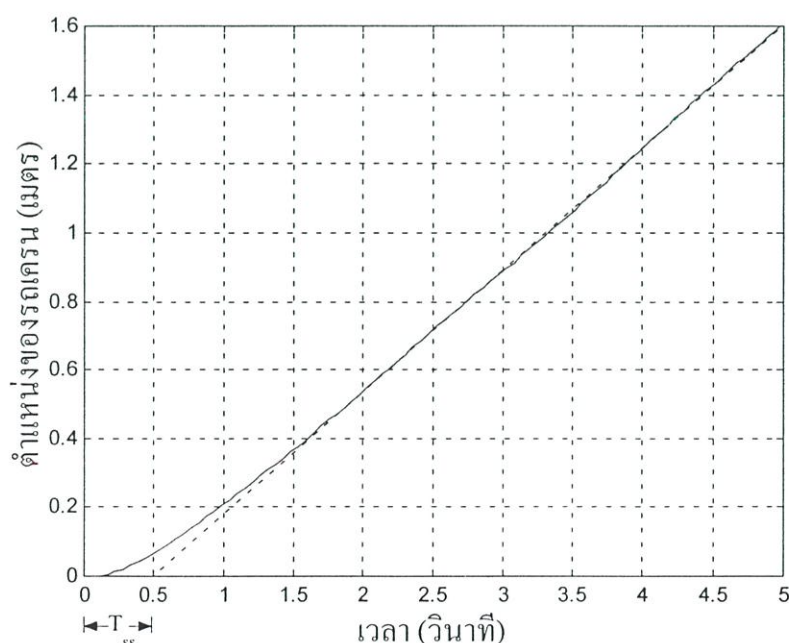
รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบ ส่วนที่สองคืออุปกรณ์เชื่อมต่อ ซึ่งประกอบด้วย ISA อินเทอร์เน็ตการ์ดทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากเอนโคเดอร์ E1 (สำหรับวัดระยะทางของรถครน) และ เอนโคเดอร์ E2 (สำหรับวัดการแกว่งของมม) แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป ในส่วนของการ์ดเชื่อมต่อแบบ PCI หรือ PCI อินเทอร์เน็ตการ์ดจะมีสองการ์ดด้วยกัน การ์ดแรก PCI-1 ทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากเอนโคเดอร์ E3 (สำหรับวัดความยาวเชือกสลิง) แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป และการ์ดที่สอง PCI-2 ทำหน้าที่รับข้อมูลดิจิทัลจากบัสข้อมูลของ

คอมพิวเตอร์แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งสัญญาณอนาล็อกนี้ให้แก่วงจรขับกระแสของมอเตอร์ M2 (สำหรับระบบการดึงเชือกสลิง) และในส่วนของวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกจะทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลจากพอร์ตขนาน (parallel port) ของคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณ PWM นี้ให้กับวงจรขับกระแสของมอเตอร์ M1 (สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน) และส่วนสุดท้ายคือส่วนของวงจรขับกระแสของมอเตอร์ ซึ่งจะมีอยู่ด้วยกันสองวงจร โดยวงจรที่หนึ่งจะรับสัญญาณพัลส์จากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดมากขึ้นเพื่อส่งสัญญาณไปให้แก่วงจรขับกระแสสำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะทำหน้าที่รับแรงดันจากการ์ดอินเตอร์เฟซ PCI-1 จากนั้นจะแปลงขนาดของแรงดันให้เป็นสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ M2 ในการดึงเชือกสลิง รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก. และ โปรแกรมภาษาซีที่ใช้สร้างตัวควบคุม PID PD และ PI แสดงในภาคผนวก ข.

5.3 พารามิเตอร์ของระบบครนเหนือศีรษะ

การหาพารามิเตอร์ K_r และ b_m ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและพารามิเตอร์ K_f และ b_f ของระบบการดึงเชือกสลิงจะใช้วิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 เมื่อทดลองป้อนสัญญาณอินพุต D_i ที่มีค่าคงที่หลายค่าให้กับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนแล้ว พบว่าค่าของสัญญาณอินพุต D_i ที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทำงานของระบบจริงมีค่าเท่ากับ 7% และผลตอบสนองของระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ 5.3



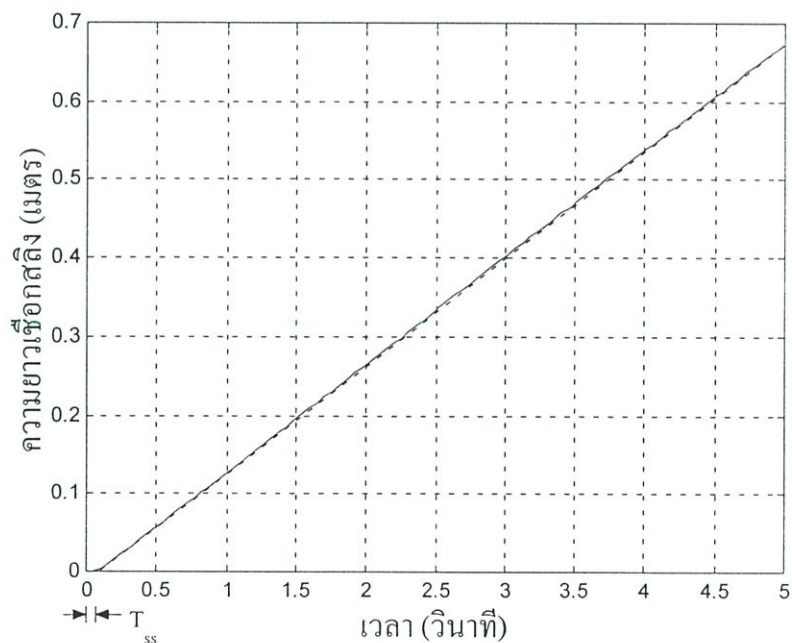
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน

จากผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนจะเห็นว่าเส้นผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัว (steady-state) จะมีความชันเท่ากับ 0.3592 และเมื่อลากเส้นตรงจากสภาวะอยู่ตัว (แสดงดังเส้นประในรูปที่ 5.3) มาตัดกับแกนเวลาซึ่งจะได้ช่วงเวลา T_{ss} เท่ากับ 0.5 วินาที เมื่อแก้สมการตามขั้นตอนในบทที่ 2 แล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ K_r เท่ากับ 0.6281 นิวตันและ b_m เท่ากับ 12.24 นิวตัน-วินาทีต่อเมตร โดยที่มวลของรถเครน M เท่ากับ 6.12 กิโลกรัม ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนคือ

$$G_{px}(s) = \frac{x(s)}{D_i(s)} = \frac{0.1026}{s(s+2)} \quad (5.1)$$

โดยที่อินพุตของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนคือ $D_i(s)$ และเอาต์พุตคือตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน $x(s)$

ในทำนองเดียวกัน เมื่อป้อนแรงดันอินพุต V_i ที่มีค่าคงที่หลายค่าให้กับระบบการดึงเชือกสลิง พบว่าค่าแรงดันอินพุต V_i ที่มีขนาด +20 โวลต์ (+V ดึงภาระขึ้น และ -V ปล่อยภาระลง) เป็นแรงดันเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับการนำไปควบคุมระบบวงปิดจริง โดยมีผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการดึงเชือกสลิงแสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการดึงเชือกสลึง

จากผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการดึงเชือกสลึงจะเห็นว่า เส้นผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวจะมีความชันเท่ากับ 0.1368 และเมื่อลากเส้นตรงจากสภาวะอยู่ตัวมาตัดกับแกนเวลา จะได้ช่วงของเวลา T_{ss} เท่ากับ 0.1 วินาที หลังจากแก้สมการแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ K_r เท่ากับ

0.0684 นิวตันต่อโวลต์ และ b_l เท่ากับ 10 นิวตัน-วินาทีต่อเมตร โดยที่มวลของภาระ m เท่ากับ 1 กิโลกรัม ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการดึงเชือกคือ

$$G_{pl}(s) = \frac{I(s)}{V_i(s)} = -\frac{0.06838}{s(s+10)} \quad (5.2)$$

โดยที่อินพุตของระบบการดึงเชือกสลิงคือ $V_i(s)$ และเอาต์พุตคือความยาวของเชือกสลิง $I(s)$ และเมื่อทราบพารามิเตอร์ K_r , b_m , K_l และ b_l แล้ว จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ ดังนี้

$$G_{p\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{D_i(s)} = -\frac{0.1026 s}{s^3 + 2 s^2 + 9.81 s + 19.62} \quad (5.3)$$

โดยที่อินพุตของระบบการแกว่งของภาระคือ $D_i(s)$ และเอาต์พุตคือมุมแกว่งของภาระ $\theta(s)$ และความยาวเชือก l คือ 1 เมตร

จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และระบบการแกว่งของภาระจะมีอินพุตเดียวกัน เนื่องจากทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันคือเมื่อรถเครนเคลื่อนที่จะทำให้ภาระเกิดการแกว่งขึ้น โดยหารถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากมุมแกว่งของภาระจะมาก ในทำนองเดียวกันหารถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วน้อยมุมแกว่งของภาระจะน้อยตามไปด้วย

5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และ PI สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ

การออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน โดยกำหนดให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 4$ และ $\gamma_2 = 4$ และค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 4$ วินาทีเมื่อกำหนดให้ช่วงเวลาเข้าที่ $t_s = 12$ วินาที ($\tau = t_s / 3$) ส่วนถัดมาคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ โดยกำหนดให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = 2$ ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุม PD นั้นจะเลือกออกแบบที่ความยาวเชือก l เท่ากับ 1 เมตร และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิง โดยกำหนดให้ครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 4$ และ $\gamma_2 = 2$ พารามิเตอร์ของระบบเครนเหนือศีรษะที่ใช้ในการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบและที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 5.1 จากขั้นตอนการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่ได้อธิบายในบทที่ 4 จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และ PI แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

มวลของรถครน M	6.12 kg
มวลของภาระ m	1 kg
ความยาวเชือกสลิง l	1 m
แรงโน้มถ่วงโลก g	9.81 m/sec ²
ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน K_r	0.6281
ค่าคงที่แรงของระบบการดึงเชือกสลิง K_l	0.0684
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน b_m	12.24 N sec/m
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการดึงเชือกสลิง b_l	10 N sec/m

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม

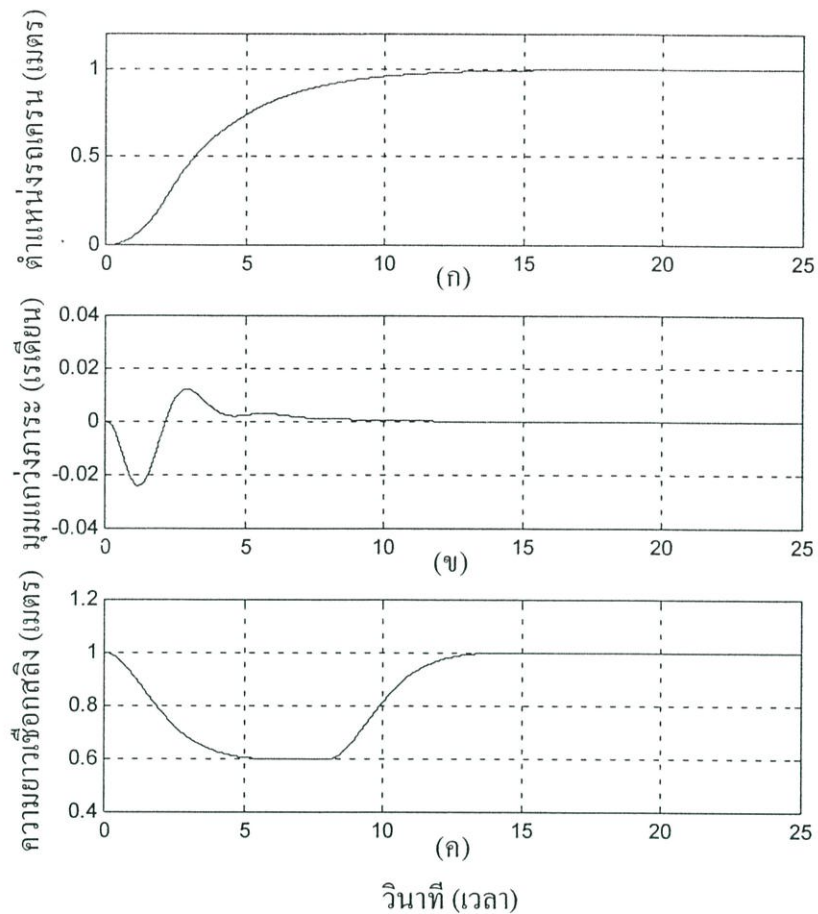
ตัวควบคุม	γ_1	γ_2	τ (sec)	K_c	T_i (sec)	T_d (sec)
PID	4.0	4.0	4.00	38.986	4.000	0.50
PD	2.5	2.0	0.86	68.731	-	0.54
PI	2.8	7.3	2.04	200.33	2.044	-

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิงจะมีค่า K_c และ K_i ($K_i = K_c / T_i$) มาก เนื่องจากการควบคุมการดึงเชือกสลิงได้ใช้มอเตอร์ซึ่งมีเกียร์บ็อกซ์ช่วยในการลดรอบความเร็วมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดเพื่อใช้ในการดึงภาระที่มีมวลมาก จึงทำให้ระบบมีผลตอบสนองช้า ดังนั้น จึงออกแบบให้ K_c และ K_i มีค่ามากเพื่อทำให้ระบบมีผลตอบสนองเร็ว

5.5 ผลการจำลอง

5.5.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

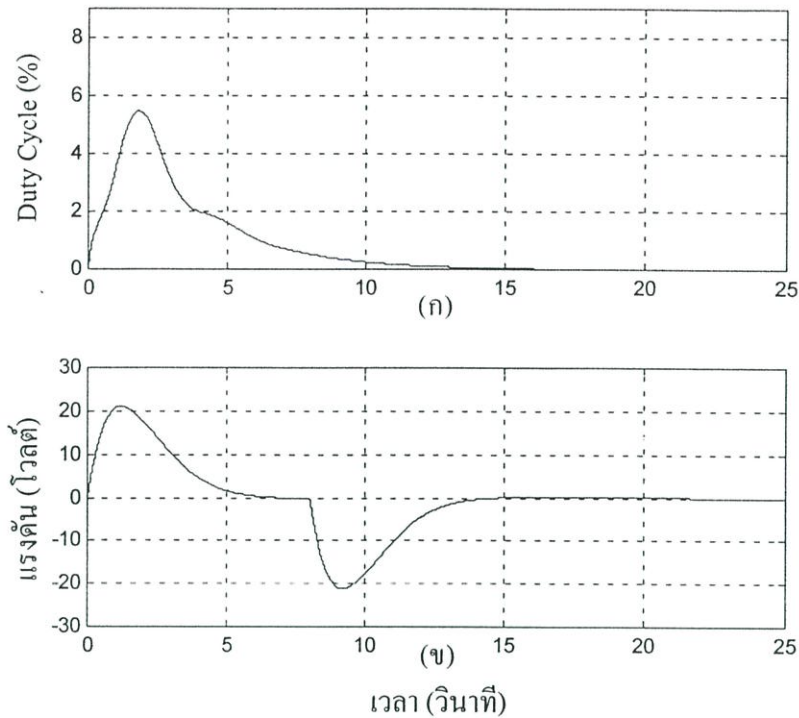
การจำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นเป็นไปตามต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมนี้ไปทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ การจำลองจะกำหนดให้รถครนเคลื่อนที่ไปตำแหน่ง 1 เมตร พร้อมกับควบคุมมุมแกว่งของภาระให้อยู่ภายในขอบเขต ± 0.03 เรเดียน และหยุดแกว่งที่มุม 0 เรเดียน ในขณะเดียวกันก็ควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 1 เมตรไปที่ความยาว 0.6 เมตร แล้วกลับมาที่ความยาว 1 เมตรในขณะที่รถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.5 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.6



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

จากรูปที่ 5.5 (ก) พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) มีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 12 วินาที ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งและควบคุมมุมของภาระให้อยู่ในขอบเขต ± 0.03 เรเดียนได้ และหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วเมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตร โดยมีผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.5 (ข) และในส่วนของ การควบคุมความยาวเชือกสลิงเพื่อยกภาระให้พ้นสิ่งกีดขวางพบว่า ตัวควบคุม PI สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และมีผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.5 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) ความยาวเชือกสลิง

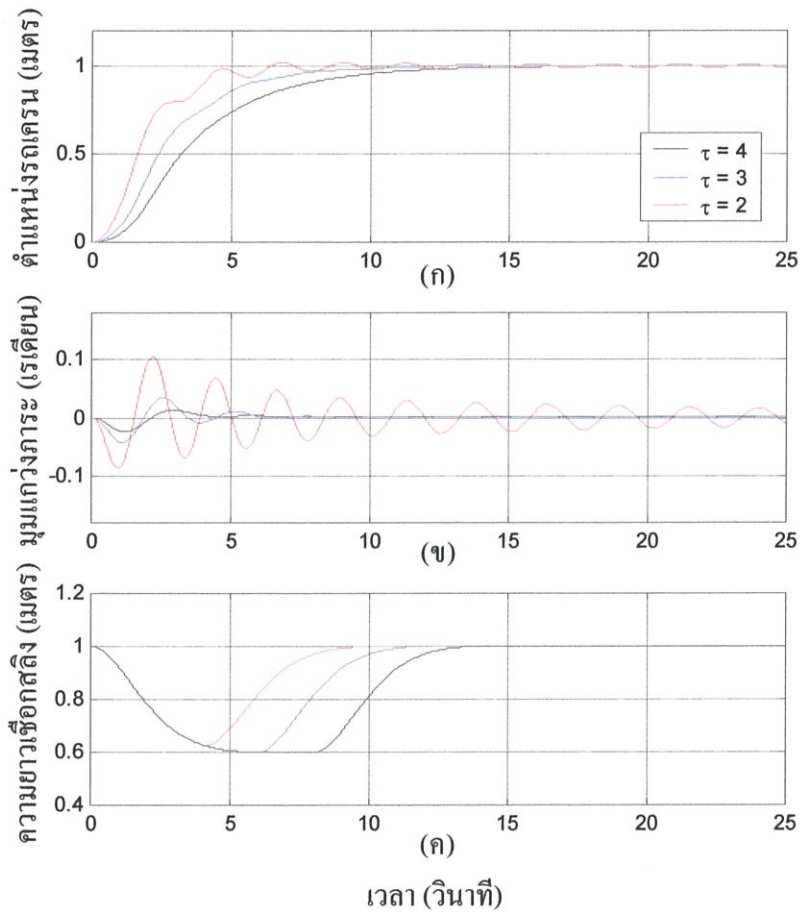
รูปที่ 5.6 สัญญาณควบคุม

5.5.2 ผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ได้กล่าวไว้ว่า หากต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด สามารถทำได้โดยปรับค่าคงตัวเวลาสมมูลซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วของระบบควบคุม โดยหากค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่าน้อย ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะเร็ว ในทางกลับกัน หากค่าคงตัวเวลาสมมูลมีค่ามาก ผลตอบสนองจะช้า ดังนั้น จึงศึกษาผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูลที่มีต่อระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนสามารถกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูลได้ ในที่นี้ได้กำหนดให้ค่าคงตัวเวลาสมมูลที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมคือ 4 วินาที 3 วินาที และ 2 วินาที โดยคงค่าพารามิเตอร์เสถียรภาพ γ_1 และ γ_2 ไว้ ผลการจำลองระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมโดยใช้เงื่อนไขในการจำลองตามหัวข้อย่อยที่ 5.5.1 แสดงดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.7 พบว่า ตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่มีค่าน้อย จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนเร็ว แต่จะมีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ก) อย่างไรก็ตาม มุมแกว่งของภาระจะมีขนาดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.7 (ข) และในส่วนของควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงในรูปที่ 5.7 (ค) นั้น เมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau =$ 2 วินาที เชือกสลิงจะมีความยาวไม่ถึง 0.6 เมตร เนื่องจากรถเครนได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตรก่อนที่

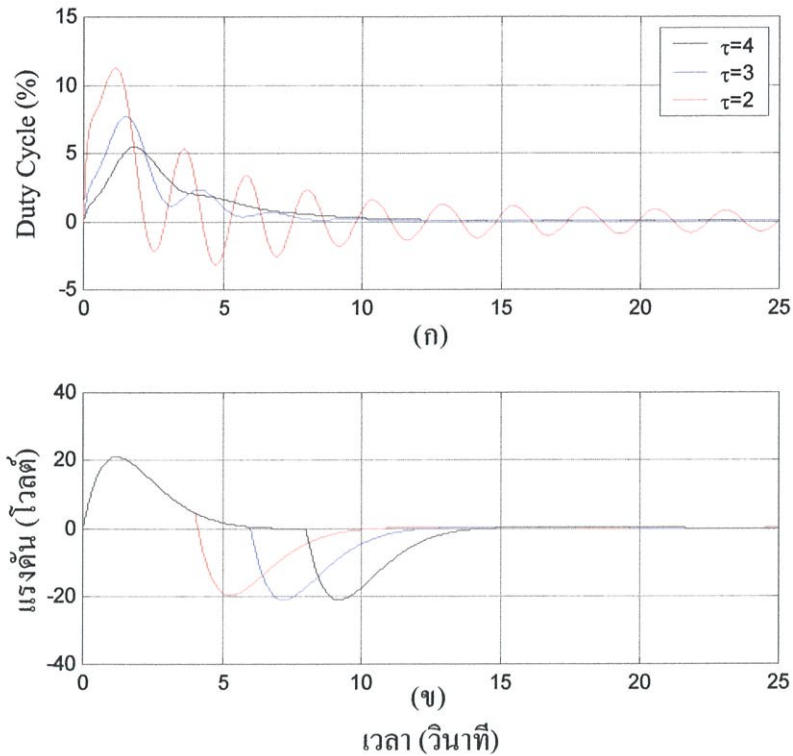
เชือกสลิงจะถูกดึงขึ้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ใช้จำลองและสมรรถนะของระบบควบคุม การเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงในตารางที่ 5.3



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาชนะ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมูล

จากรูปที่ 5.8 (ก) จะเห็นว่าที่ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ น้อย สัญญาณควบคุม D_i จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม PID พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากช่วงเวลาเข้าที่ t_s ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าคงตัวเวลาสมมูล และในทางกลับกัน หากกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูลมาก สัญญาณควบคุมจะมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากระบบควบคุมต้องการความเร็วของผลตอบสนองที่ช้าลง และรูปที่ 5.8 (ข) แสดงถึงสัญญาณควบคุมของการดึงเชือกสลิงที่มีลักษณะคล้ายกัน



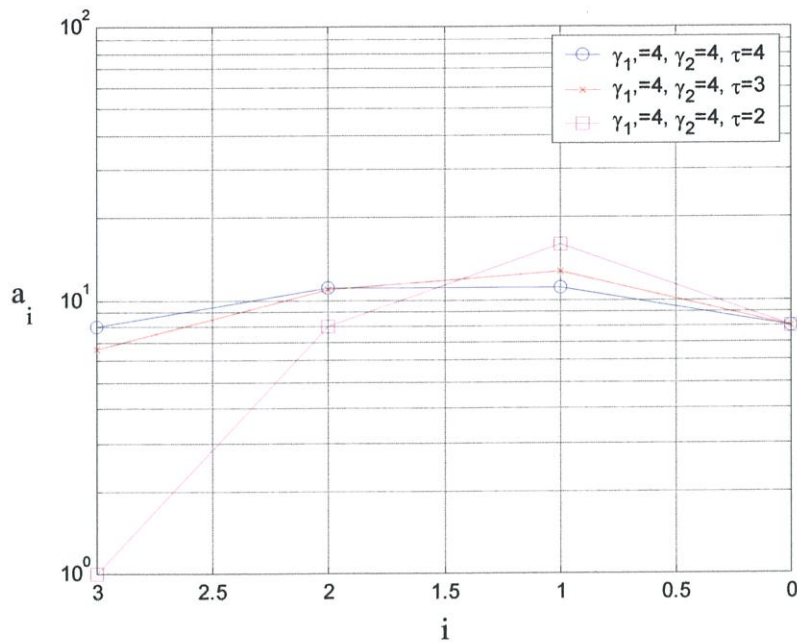
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข)การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.8 สัญญาณควบคุม

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้จากการจำลอง

τ	K_c	T_i (sec)	T_d (sec)	t_r (sec)	t_s (sec)	P_0 (%)
4	38.986	4	0.500	6.21	12.0	0.00
3	69.309	3	0.469	4.55	9.00	0.00
2	155.95	2	0.375	6.40	8.17	1.02

เมื่อนำสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ $P(s)$ ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมูล τ มาพล็อตลงในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์แสดงดังรูปที่ 5.9 จะเห็นว่าเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau=4$ วินาที (สี่เหลี่ยม) ปลายเส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a_i จะเบี่ยงทางด้านซ้ายมากทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็ว และเมื่อค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau=3$ วินาที (กากบาท) และ $\tau=4$ วินาที (วงกลม) ปลายเส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a_i จะเบี่ยงด้านซ้ายน้อยลงทำให้ผลตอบสนองของระบบช้าลงตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธี CDM [4]

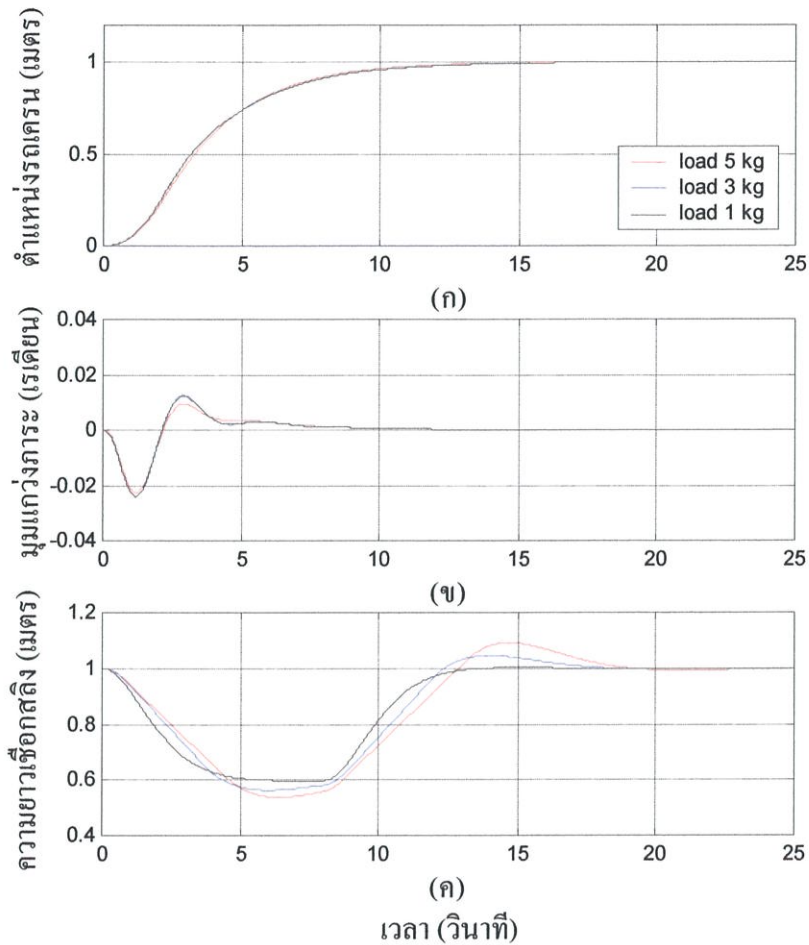


รูปที่ 5.9 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน

5.5.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

ในหัวข้อย่อยนี้จะนำตัวควบคุม PID PD และ PI ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CDM ในหัวข้อที่ 5.4 มาจำลองการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ เมื่อมวลของภาระเปลี่ยนแปลง เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม และศึกษาว่ามีผลกระทบอย่างไรกับผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการจำลองจะใช้ภาระที่มีมวลเท่ากับ 1 กิโลกรัม 3 กิโลกรัมและ 5 กิโลกรัม ผลตอบสนองและสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ

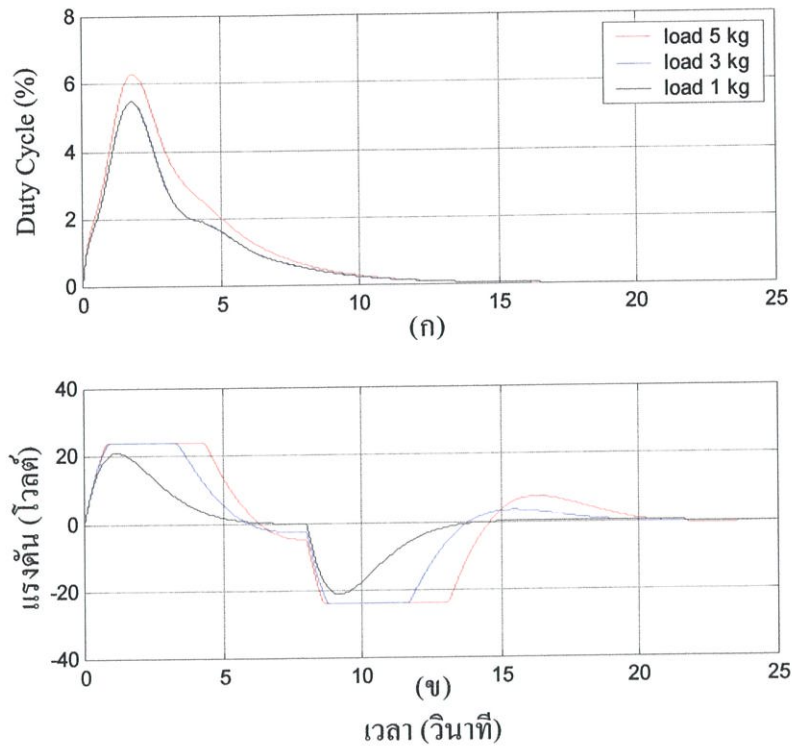
จากรูปที่ 5.10 พบว่าระบบควบคุมยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ถึงแม้มวลของภาระจะมีน้ำหนักมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.10 (ก) และสามารถลดขนาดของมุมที่แกว่งและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงผลตอบสนองดังรูปที่ 5.10 (ข) ในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้นจะมีผลกระทบโดยตรงต่อมวลของภาระที่เปลี่ยน จากรูปที่ 5.10 (ค) พบว่าผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกินเมื่อมวลของภาระหนัก 3 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม ทั้งนี้เนื่องมาจากตัวอินทิกรัลของตัวควบคุม PI เกิดการสะสมค่าผิดพลาดมากๆ ทำให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากตามไปด้วย แต่ตัวควบคุม PI นี้ก็ยังสามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงได้ตามต้องการ



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

จากสัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนในรูปที่ 5.11 (ก) จะเห็นว่ามีความมากเมื่อภาระมีน้ำหนักมาก ในทำนองเดียวกัน สัญญาณควบคุมของการดึงเชือกสลิงจะมีความมากเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีแรงดึงที่มอเตอร์มากเมื่อภาระมีน้ำหนักมาก ดังนั้น เมื่อตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุมการดึงเชือกสลิงแล้วจึงไม่สามารถดึงภาระขึ้นได้ตามความเร็วที่ต้องการ ทำให้ตัวควบคุมเพิ่มขนาดของสัญญาณมากขึ้นจนทำให้สัญญาณควบคุมเกิดการอิ่มตัว (saturate) แสดงดังรูปที่ 5.11 (ข)



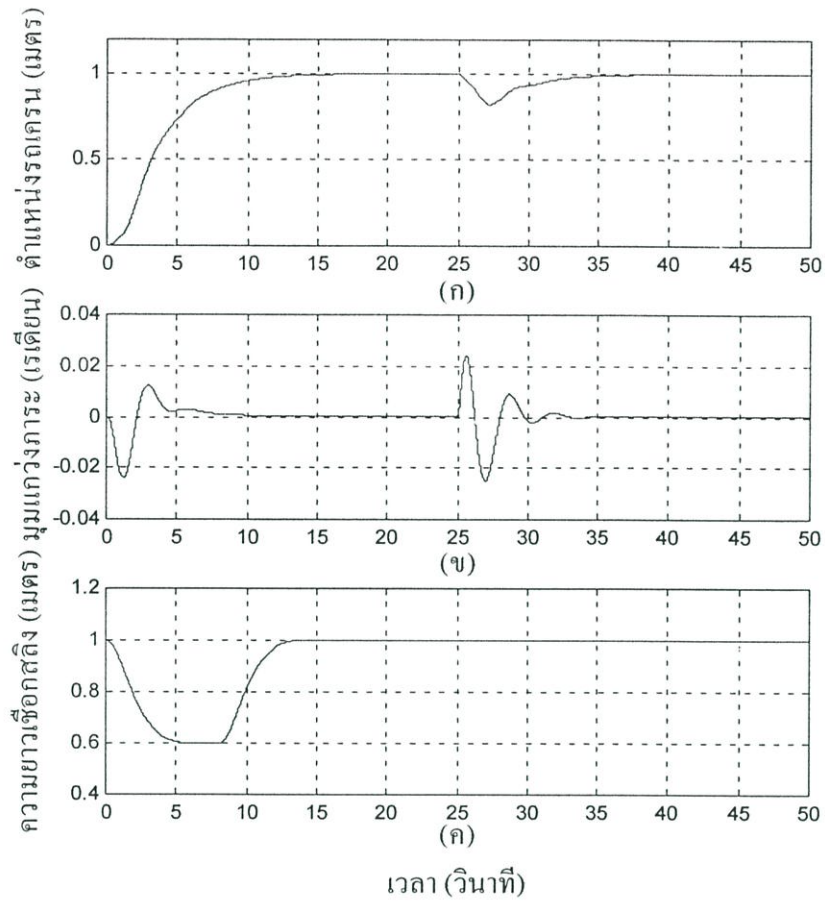
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.11 สัญญาณควบคุม

5.5.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน

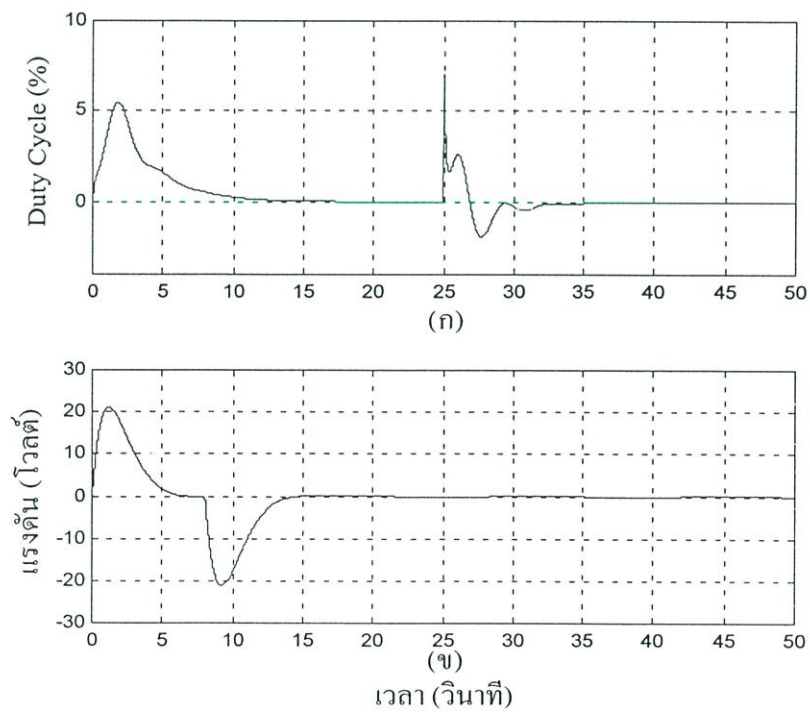
การจำลองการกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบควบคุม ทำได้โดยป้อนสัญญาณอินพุต D_i แบบขั้นขนาด 7% เข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (รูปที่ 4.1) ที่เวลา 25 วินาที โดยตัวควบคุม PID ควบคุมรถเครนที่ตำแหน่ง 1 เมตร ตัวควบคุม PD ลดขนาดของมุมแกว่งของภาระและควบคุมให้อยู่ในขอบเขต ± 0.03 เรเดียน และตัวควบคุม PI ควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 1 เมตร ดึงภาระที่หนัก 1 กิโลกรัมขึ้นไปที 0.5 เมตร และปล่อยลงมาที่ 1 เมตรเมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสามจะใช้ค่าที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 5.4 ผลตอบสนองของระบบแสดงดังรูปที่ 5.12 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.13

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.12 (ก) พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงในรูปที่ 5.12 (ข) และผลกระทบของสิ่งรบกวนจะไม่มีผลกระทบต่อการดึงเชือกสลิงแสดงในรูปที่ 5.12 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

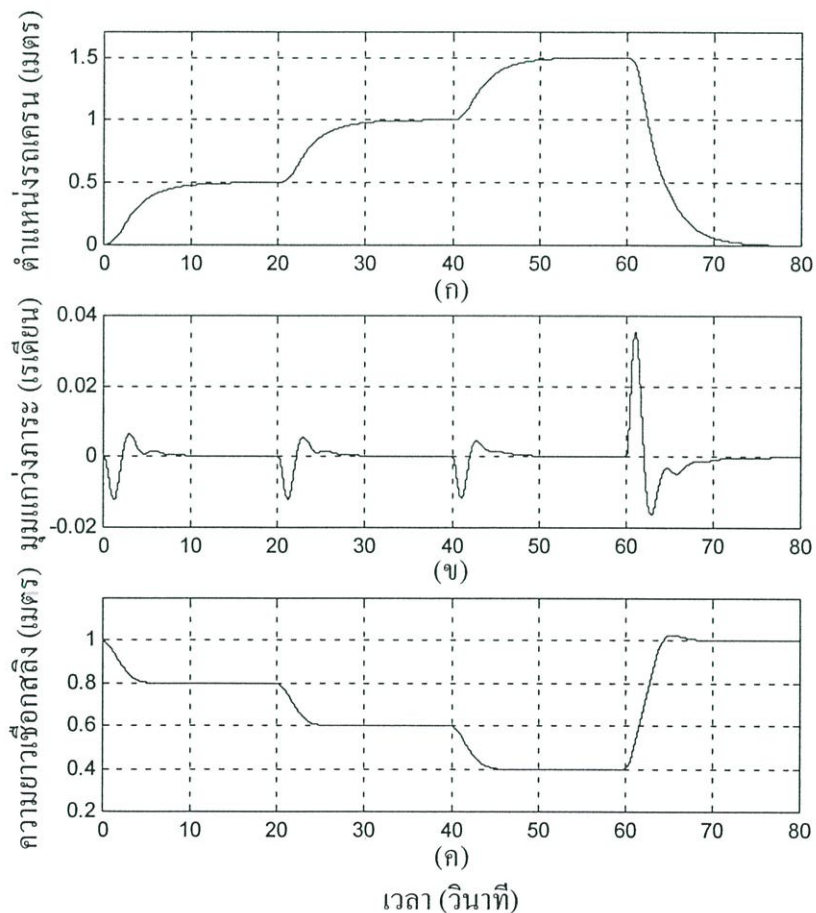


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุม

5.5.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง

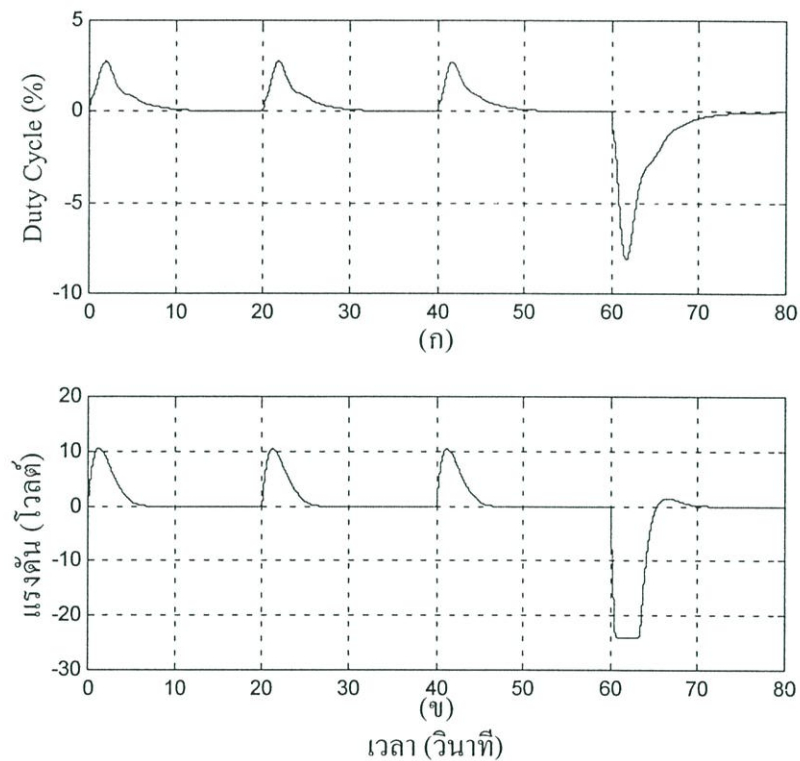
สมรรถนะในการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม จะทดสอบได้โดยกำหนดสัญญาณอ้างอิงให้กับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง ดังนี้ กำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.5 เมตร 1 เมตร 1.5 เมตร และกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น พร้อมทั้งกำหนดความยาวเชือกสลิงจาก 1 เมตร เป็น 0.8 เมตร 0.6 เมตร 0.4 เมตร และกลับมายังความยาว 1 เมตร โดยแต่ละช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจะเป็น 20 วินาที ในการจำลองนี้ สัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนจะป้อนเข้าทาง x_{ref} และสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจะป้อนเข้าทาง l_{ref} ของระบบควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะที่แสดงในรูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.14 และสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.15 ตามลำดับ



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มูมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 (ก) พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมรถเครนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน ส่วนตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระและควบคุมให้ภาระหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงแล้วแสดงในรูปที่ 5.14 (ข) และตัวควบคุม PI สามารถควบคุมเชือกสลิงให้มีความยาวตามที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง แต่จะสังเกตว่าในช่วงเวลา 60 ถึง 70 วินาทีที่เกิดค่าพุ่งเกินขึ้นเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 5.14 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.15 สัญญาณควบคุม

5.6 ผลการทดลอง

หลังจากได้จำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุม PID PD และ PI ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM แล้ว อันดับต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวมาควบคุมระบบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยตัวควบคุม PID PD และ PI จะถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซีโดยใช้ค่าเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05 วินาที ภาพถ่ายระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 5.16



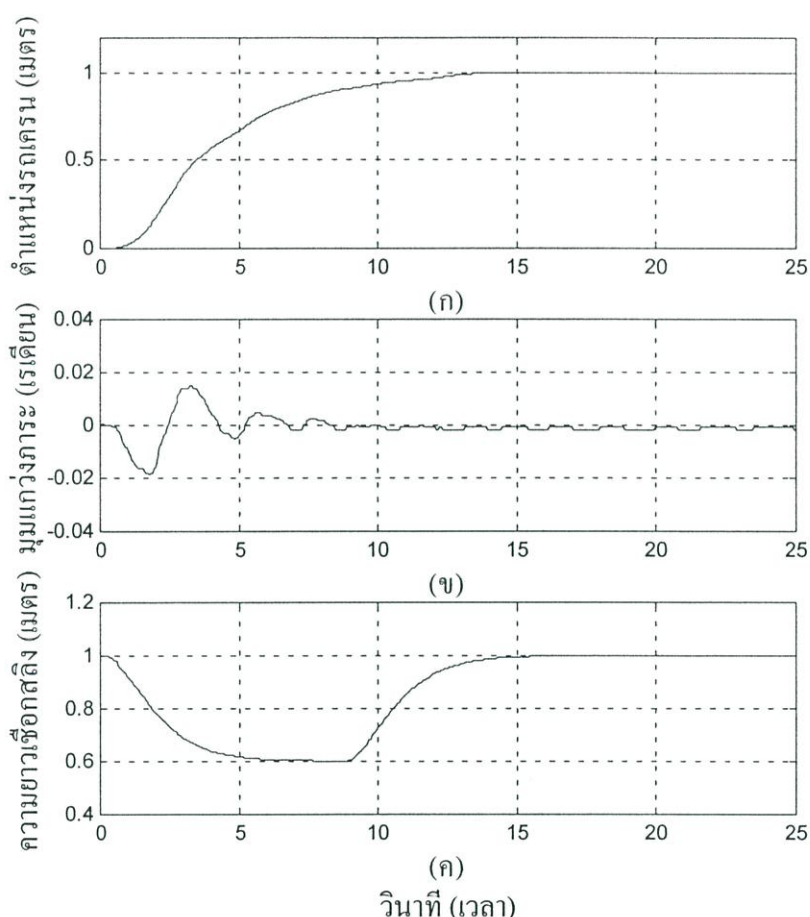
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองควบคุมระบบครนเหนือศีรษะจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบการทดลองเดียวกันกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการจำลองไว้ข้างต้น

5.6.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นแสดงดังรูปที่ 5.17 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.18 จากรูปที่ 5.17 พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้รถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว โดยมีช่วงเวลาเข้าที่ เท่ากับ 12.4 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.17 (ก) ในขณะเดียวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระให้อยู่ภายในขอบเขต ± 0.03 เรเดียนได้ แต่จะมีการแกว่งเล็กน้อยหลังจากรถครนเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายแล้ว ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.17 (ข) จะเห็นว่ามุมแกว่งของภาระจะไม่แกว่งอยู่รอบ 0 เรเดียน เนื่องจากแกนทอง

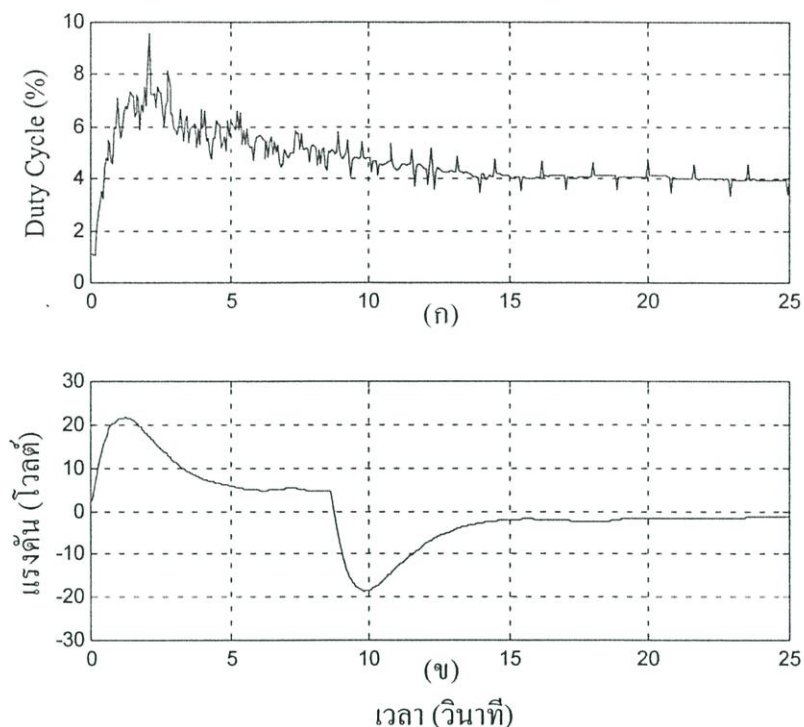
เหลืองที่ใช้เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างเอนโคเดอร์กับท่อเหล็กสำหรับวัดมุมที่แกว่งมีความหนืดอันเกิดจากลูกปืนที่ใช้ในการหมุน ดังนั้น เมื่อมุมแกว่งของภาระมีขนาดน้อยจึงไม่ทำให้แกนของเหลืองที่ติดอยู่กับเอนโคเดอร์เคลื่อนที่มายังตำแหน่ง 0 เรเดียนได้ ส่วนตัวควบคุม PI สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เป็นที่ออกแบบไว้โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวดังแสดงในรูปที่ 5.17 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

เนื่องจากรถเครนจะเคลื่อนที่ได้เมื่อสัญญาณควบคุมมีค่าตั้งแต่ 4 % ขึ้นไป ดังนั้น เมื่อรถเครนได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว จะพบว่าสัญญาณควบคุม D_i ใต้อยู่ที่ระดับ 3.5 % ถึง 4.5 % ดังแสดงในรูปที่ 5.18 (ก) ในทำนองเดียวกันสัญญาณควบคุม(แรงดัน)ที่สามารถดึงภาระที่มีมวลเท่ากับ 1 กิโลกรัมได้คือแรงดัน 5 โวลต์ขึ้นไปแสดงดังรูปที่ 5.18 (ข)



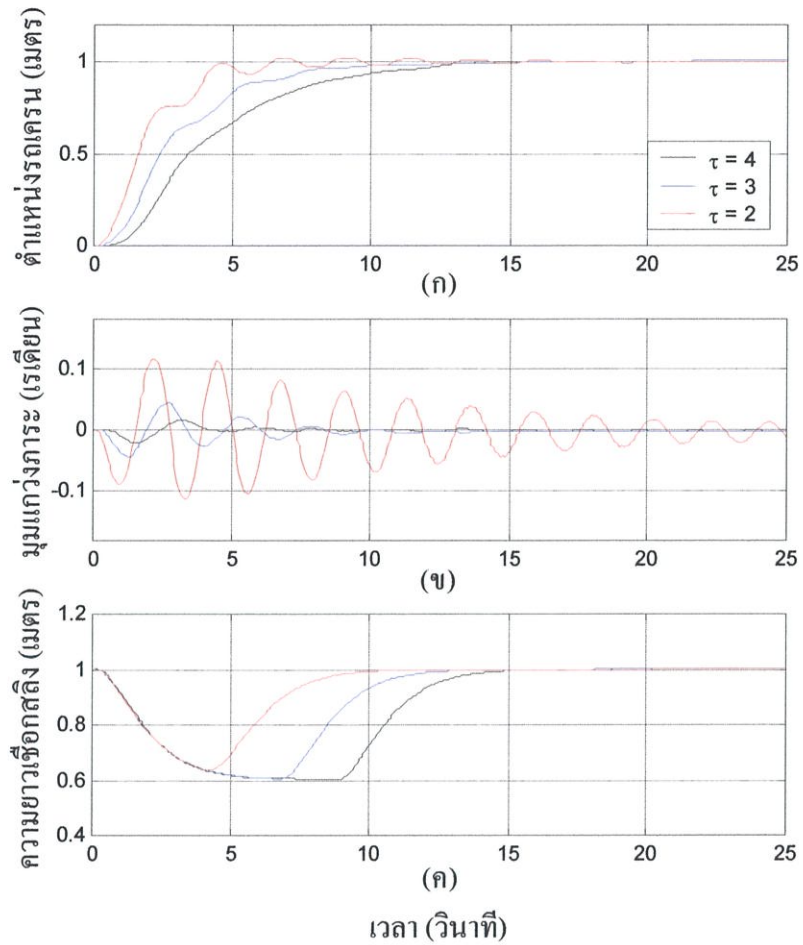
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.18 สัญญาณควบคุม

5.6.2 ผลกระทบของการปรับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

ผลการทดลองการนำตัวควบคุม PID ที่ออกแบบจากค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่มีค่าต่างกัน แสดงดังรูปที่ 5.19 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.20

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.19 พบว่า ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนจะคล้ายกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์คือ เมื่อควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ที่น้อยกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้นแต่จะมีค่าพุ่งเกินเล็กน้อยแสดงดังรูปที่ 5.19 (ก) และมุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.19 (ข) ในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงพบว่า เมื่อควบคุมระบบการดึงเชือกสลิงด้วยตัวควบคุม PID ที่ออกแบบด้วยค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 2$ วินาทีแล้ว ความยาวเชือกจะมีความยาวไม่ถึง 0.6 เมตรตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากรถเครนได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตรก่อนที่เชือกจะถูกดึงขึ้น สำหรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังตารางที่ 5.4

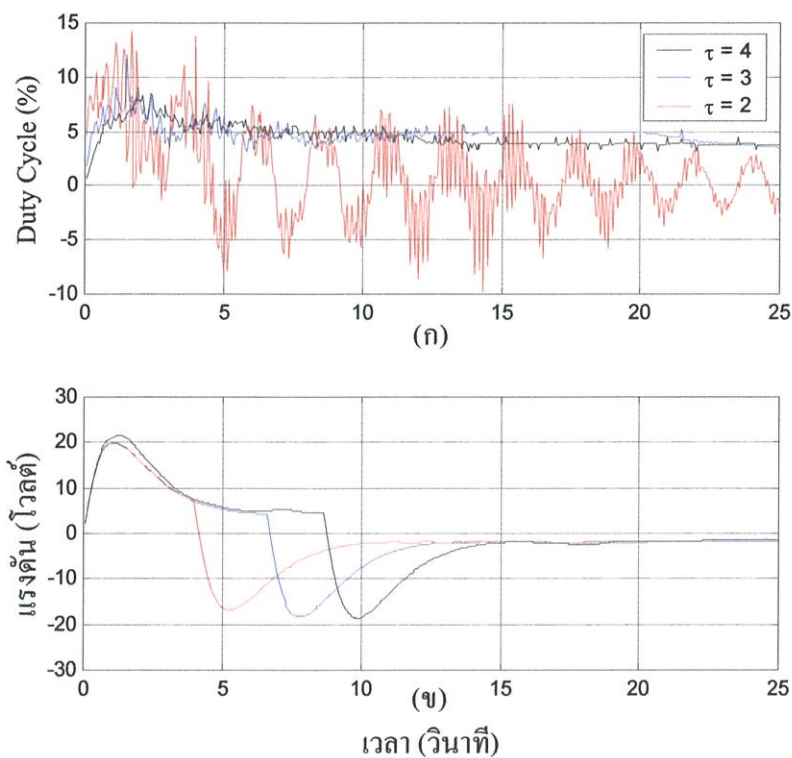


(ก) ตำแหน่งของรถเครน ข) มุมแกว่งของภาระ ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.19 ผลการทดลองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมูล

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID และสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้จากการทดลอง

τ	K_c	T_i (sec)	T_d (sec)	t_r (sec)	t_s (sec)	P_0 (%)
4	38.986	4	0.500	6.91	12.45	0.00
3	69.309	3	0.469	5.37	9.80	0.00
2	155.95	2	0.375	6.38	9.25	1.02



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข)การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.20 สัญญาณควบคุม

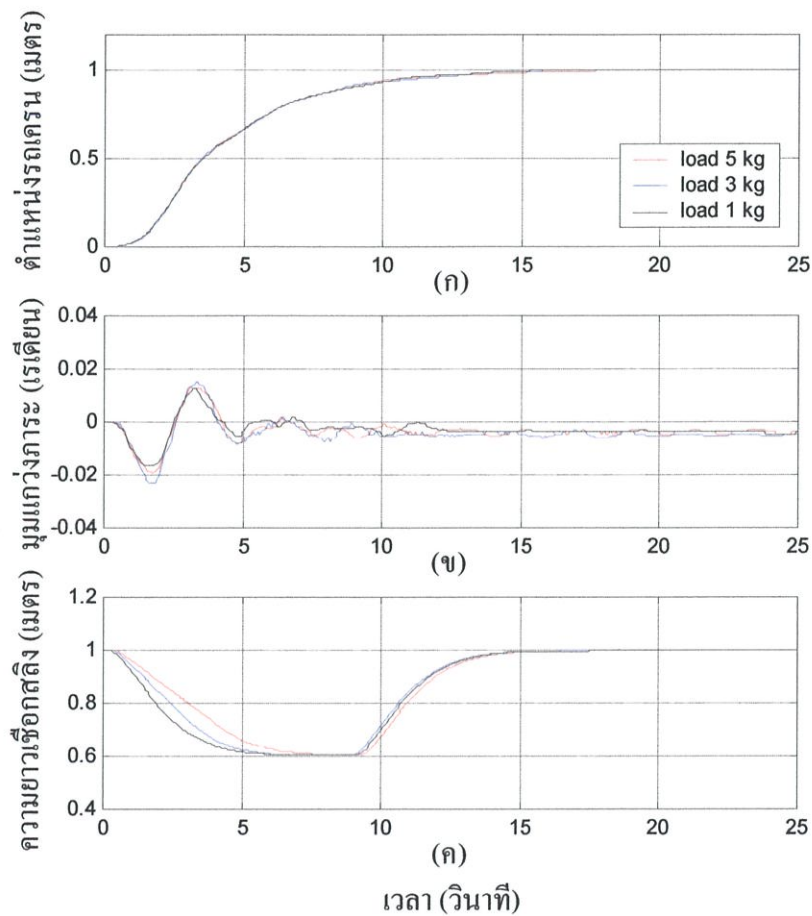
5.6.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

นำตัวควบคุม PID PD และ PI ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CDM ไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.4 มาทดลองควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ โดยเปลี่ยนแปลงมวลของภาระเป็น 1 กิโลกรัม 3 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.21 และสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.22 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.21 พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนให้มีเสถียรภาพ ถึงแม้มวลของภาระจะมีน้ำหนักมากขึ้น โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวแสดงดังรูปที่ 5.21 (ก) และในขณะเดียวกันตัวควบคุม PD ก็ยังสามารถลดมุมแกว่งของภาระให้อยู่ในขอบเขต ± 0.03 เรเดียนได้แสดงดังรูปที่ 5.21 (ข) ในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้นพบว่า ตัวควบคุม PI สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงตามที่ได้ออกแบบไว้

การควบคุมระบบการดึงเชือกสลิงให้มีผลตอบสนองเร็วตามที่ต้องการ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญ 2 อย่างคือ มวลของภาระและขนาดของสัญญาณควบคุม หากภาระหนักมาก ขนาดของสัญญาณควบคุมที่ใช้จะมากตามไปด้วย แต่ถ้าสัญญาณควบคุมมีขนาดที่จำกัดและมีขนาดไม่มากพอที่จะดึงเชือกสลิงให้มีผลตอบสนองเร็วแล้ว จะทำให้ผลตอบสนองของระบบช้ากว่าที่ออกแบบ

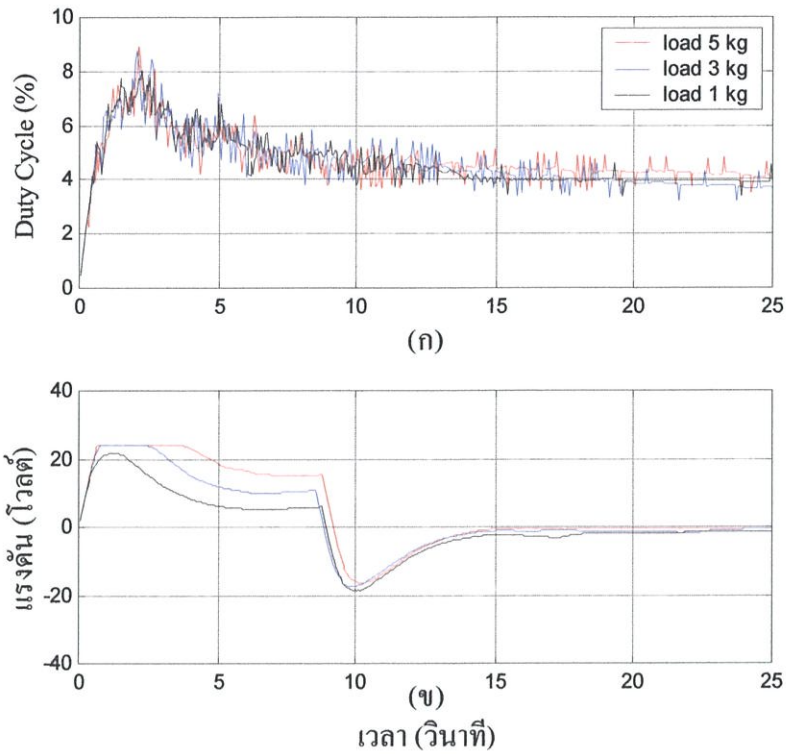
ไว้ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 5.22 (ก)ว่า เมื่อภาระหนัก 3 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม จะมีช่วงเวลาเข้าที่มากกว่าภาระที่หนัก 1 กิโลกรัม



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

จากสัญญาณควบคุมในรูปที่ 5.22 (ก) พบว่าการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระที่ใช้ในการทดลองแทบจะไม่มีผลต่อสัญญาณควบคุมของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนเลย เนื่องจากระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนมีระบบการตรอบของมอเตอร์และระบบส่งกำลังที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพสูง จากรูปที่ 5.22 (ข) พบว่าสัญญาณควบคุมที่ใช้ในการดึงเชือกสลิงจะอึดตัวเมื่อภาระหนัก 3 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม เนื่องจากจะมีแรงดึงที่มอเตอร์มาก ดังนั้น เมื่อตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุมการดึงเชือกสลิงแล้ว แต่ไม่สามารถดึงขึ้นได้ตามความเร็วที่ต้องการ จึงเป็นสาเหตุทำให้ตัวควบคุมเพิ่มขนาดของสัญญาณมากขึ้นจนเกิดการอึดตัว



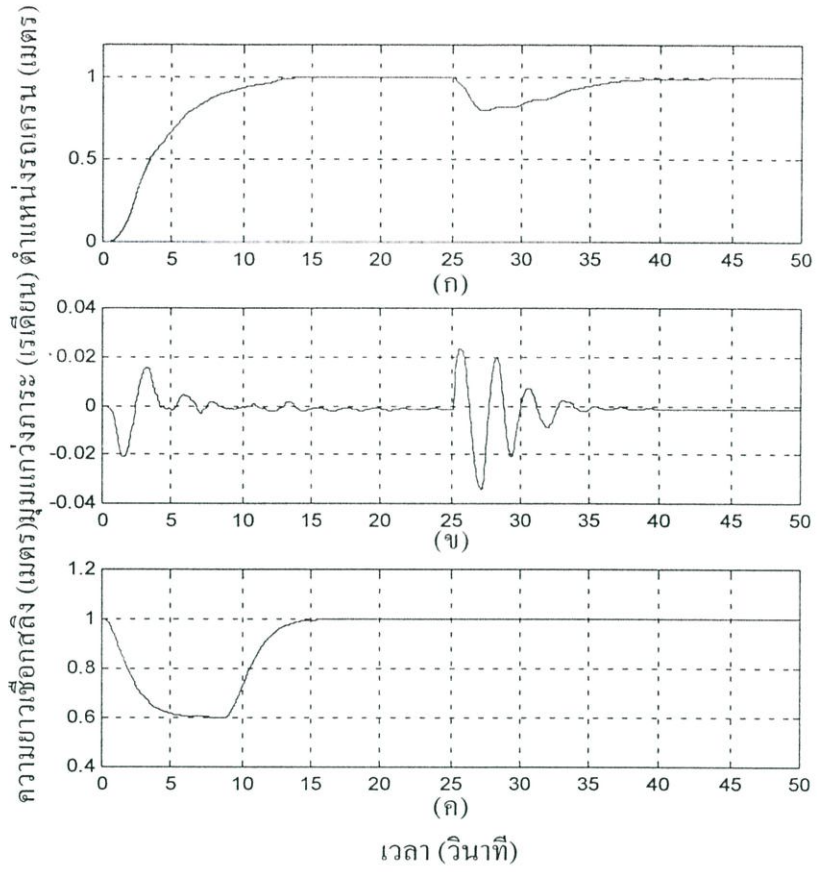
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.22 สัญญาณควบคุม

5.6.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน

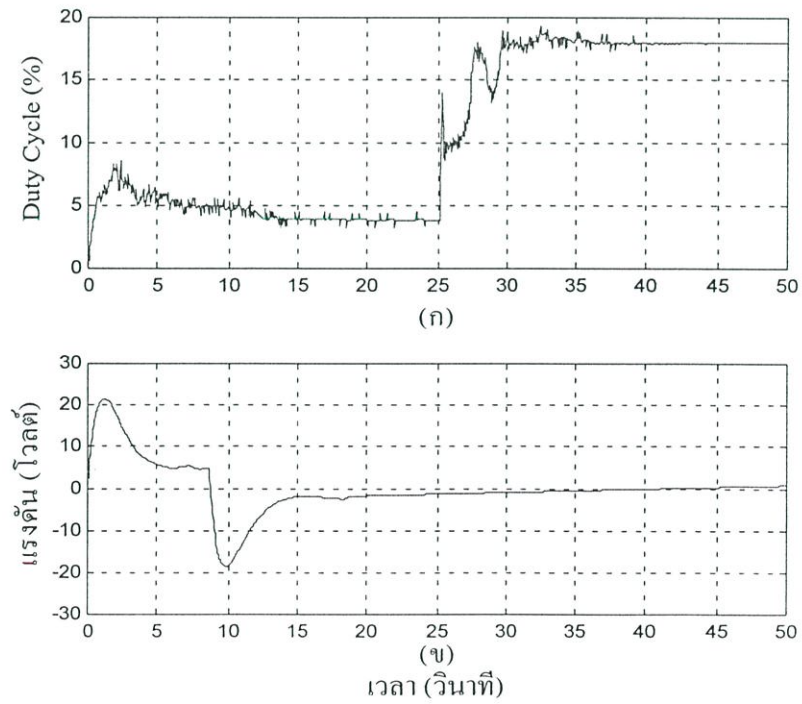
ในการทดลองการกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบควบคุม ได้ป้อนสัญญาณอินพุตแบบขั้นขนาด $D_i = 7\%$ เข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนที่เวลา 25 วินาที โดยมีขั้นตอนการทดลองรวมถึงการใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และ PI เช่นเดียวกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.5.4 ผลตอบสนองของระบบแสดงดังรูปที่ 5.23 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.24 ตามลำดับ

จากผลการทดลองรูปที่ 5.23 (ก) พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าฟุงเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่ตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ข)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

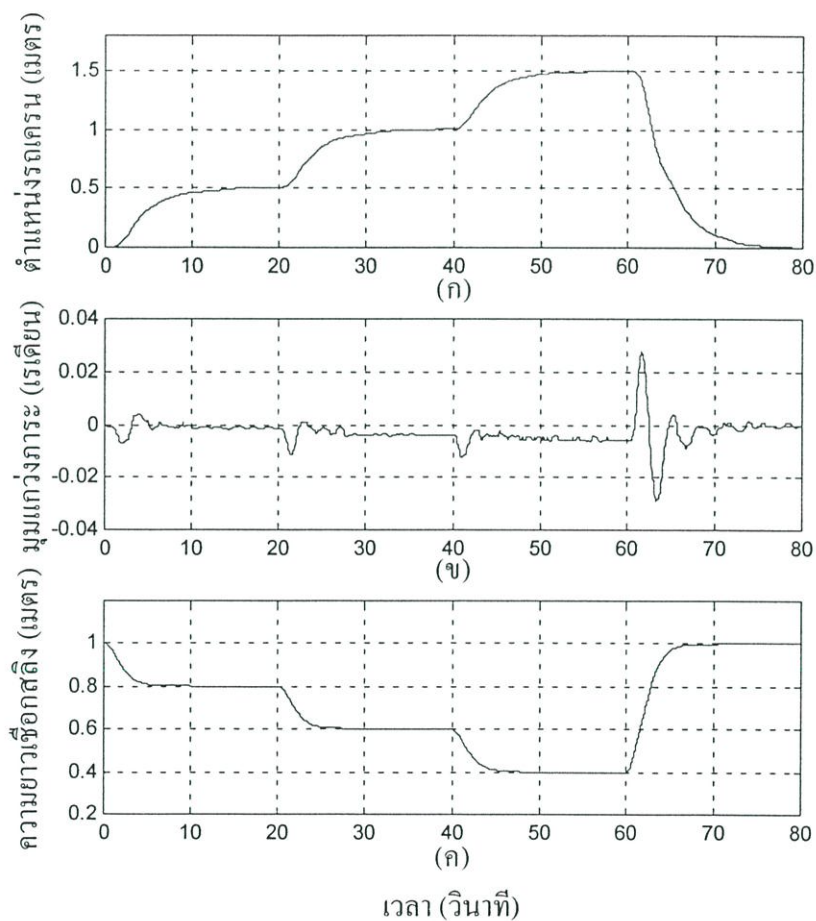


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) การดึงเชือกสลิง

รูปที่ 5.24 สัญญาณควบคุม

5.6.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง

การทดลองการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิง จะกำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.5 เมตร 1 เมตร 1.5 เมตร และกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น พร้อมทั้งกำหนดความยาวเชือกสลิงจาก 1 เมตร เป็น 0.8 เมตร 0.6 เมตร 0.4 เมตร และกลับมาที่ความยาว 1 เมตร โดยแต่ละช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจะเป็น 20 วินาที ซึ่งสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจะป้อนเข้าทาง x_{ref} และทาง l_{ref} ของระบบควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะที่แสดงในรูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมและสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.25 และรูปที่ 5.26 ตามลำดับ

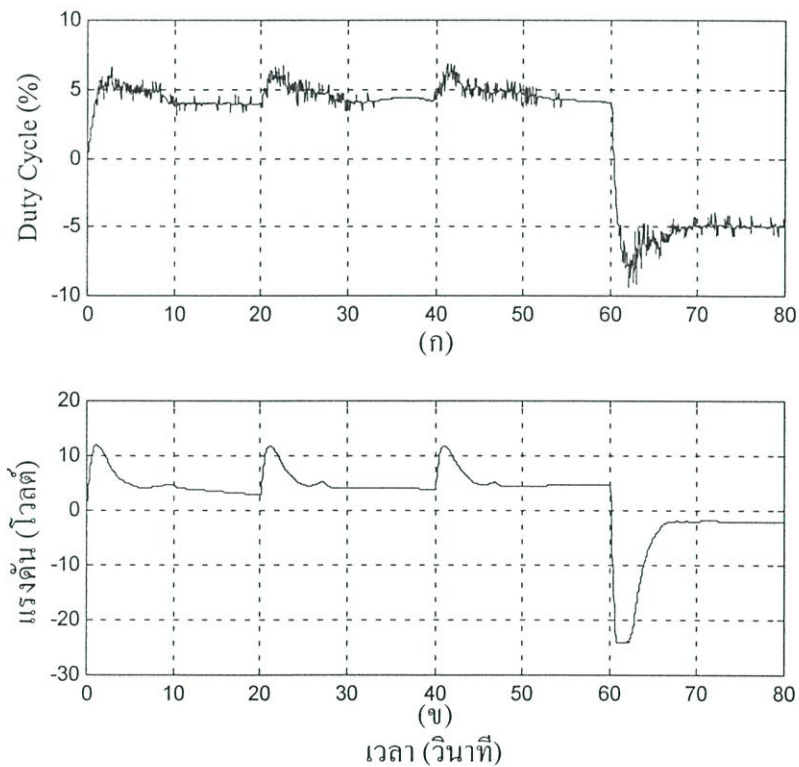


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.25 (ก) พบว่าตัวควบคุม PID สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ติดตามตำแหน่งอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะ

อยู่ตัว ในขณะที่ตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาระและควบคุมมุมให้หยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากรถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงแล้วแสดงในรูปที่ 5.25 (ข) แต่จะเห็นว่ามุมแกว่งของภาระจะไม่แกว่งอยู่รอบ 0 เรเดียน เนื่องจากแกนทองเหลืองที่ใช้เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างเอนโคเดอร์กับท่อเหล็กสำหรับวัดมุมที่แกว่งมีความหนืดอันเกิดจากลูกปืนที่ใช้ในการหมุน ด้วยเหตุนี้ เมื่อมุมแกว่งของภาระมีขนาดน้อยจึงไม่ทำให้แกนทองเหลืองที่ติดอยู่กับเอนโคเดอร์เคลื่อนที่มายังตำแหน่ง 0 เรเดียนได้ จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวขึ้น ($\theta \neq 0 \text{ rad}$) ดังนั้น เมื่อรถเคลื่อนที่จาก 0 เมตรมาที่ตำแหน่ง 1 เมตรจะทำให้เกิดค่าผิดพลาดของมุมขึ้นค่าหนึ่งและเมื่อเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง 1 เมตรก็จะทำให้เกิดค่าผิดพลาดของมุมเพิ่มขึ้นไปอีก นั่นก็คือค่าผิดพลาดจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และตัวควบคุม PI สามารถควบคุมเชิงอก สลิ่งให้มีความยาวตามที่กำหนดได้อย่างถูกต้องโดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวแสดงดังรูปที่ 5.25 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถ (ข) การดึงเชือกสลิ่ง

รูปที่ 5.26 สัญญาณควบคุม

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM สำหรับระบบครนเหนือสี่ระยะ ซึ่งใช้ตัวควบคุม PID สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน ตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ และตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระ ในการออกแบบตัวควบคุมโดยวิธี CDM จะต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะก่อน และได้ใช้วิธีการของลากรางจ์เป็นวิธีในการหาแบบจำลองของระบบโดยพิจารณาพลังงานศักย์และพลังงานจลน์รวมของระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะที่ได้นี้เป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ประกอบด้วยตัวแปรของตำแหน่งรถครน มุมแกว่งของภาระและความยาวของเชือกสลิงที่มีความเกี่ยวเนื่องกันในระบบ ดังนั้น จึงได้ใช้วิธีลีนออฟแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้นเพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม PID PD และ PI โดยแยกอิสระจากกันด้วยวิธี CDM จากนั้นได้นำตัวควบคุมทั้งสามมาควบคุมระบบครนเหนือสี่ระยะ ในเวลาเดียวกัน

การจำลองและการทดลองได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบผลตอบแทนของระบบวงปิดเมื่อกำหนดคิพุดของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเป็นแบบขั้น ส่วนที่สองเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของการออกแบบตัวควบคุมด้วยการปรับค่าคงตัวเวลาสมมุติว่ามีผลอย่างไรกับผลตอบแทนของระบบ ส่วนที่สามทดสอบความสามารถของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของระบบ(มวลของภาระ)เกิดการเปลี่ยนแปลง ส่วนที่สี่ทดสอบการกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบ และส่วนสุดท้ายทดสอบการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนและระบบควบคุมการดึงเชือกสลิงที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการจำลองและผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุม PID และ PI สามารถควบคุมตำแหน่งของรถครนและควบคุมความยาวของเชือกสลิงได้ โดยผลตอบแทนไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว รวมทั้งมีช่วงเวลาเข้าที่น้อยตามที่ได้ออกแบบไว้ ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว เมื่อมวลของภาระเกิดการเปลี่ยนแปลงพบว่า ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดผลกระทบของสิ่งรบกวน รวมทั้งตำแหน่งของรถครนและความยาวของเชือกสลิงยังติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงได้ และในการทดลองการควบคุมตำแหน่งของรถครนโดยออกแบบตัวควบคุมที่ได้จากการเปลี่ยนค่าคงตัวเวลาสมมุติ

พบว่าค่าคงตัวเวลาสมมูลที่มีค่าน้อยจะให้ผลตอบสนองของระบบเร็ว แต่การแกว่งของมุมจะมากขึ้นตามไปด้วย

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ในการวัดการแกว่งของมุมจะประกอบด้วยแท่งทองเหลืองซึ่งยึดติดด้วยเบร็ง โดยมีท่ออลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ต่ออยู่ตรงกลางของท่อทองเหลืองเพื่อให้เชือกสลิงสอดผ่าน เมื่อการแกว่งจะทำให้ท่ออลูมิเนียมแกว่งตามและจะทำให้แท่งทองเหลืองซึ่งติดอยู่กับเอนโคคเตอร์แกว่งตามไป ซึ่งเบร็งที่ใช้ยึดแกนทองเหลืองจะมีความหนืดของลูกปืนภายในเบร็งเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อมุมแกว่งของภาระมีขนาดน้อยจึงไม่ทำให้แกนทองเหลืองที่ติดอยู่กับเอนโคคเตอร์เคลื่อนที่มายังตำแหน่ง 0 เรเดียนได้ (ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมแกว่งภาระแสดงดังภาคผนวก ก. รูปที่ ก.14) ซึ่งแนวทางการแก้ไขคือ ลดขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้เช่น ขนาดของแกนทองเหลือง และขนาดของเบร็งซึ่งจะทำให้ความหนืดลดลงได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

สำหรับข้อเสนอแนะในการพัฒนาเพื่อให้การควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการสะดวกมากขึ้น คือ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส (Dos) ทำให้การใช้งานไม่สะดวกเท่าที่ควร ดังนั้น จึงขอแนะนำให้พัฒนาโปรแกรมให้ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ เพื่อให้สะดวกในการทดลองมากขึ้น และเนื่องจากตัวควบคุมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของระบบครนเหนือศีรษะ ดังนั้น การออกแบบตัวควบคุมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

บรรณานุกรม

- [1] Yuzo Suzuki, Shin-Ichi Yamada and Hideji Fufikawa, "Anti-Swing Control of the Container Crane by Fuzzy Control," Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation, Vol. 1, pp. 230 - 235, 1993
- [2] Hans Butler, ger Honderd and Job Van Amerongen, "Model Reference Adaptive Control of a Gantry Crane Scale Model," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 11, Issue: 1, pp.57 - 62, 1991
- [3] S.U. Choi, J.H. Kim, J.W. Lee, Y.J. Lee and K.S. Lee, "A Study on Gantry Crane Control using Neural Network Two Degree of PID Controller, " IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, pp. 1896 -1900, 2001
- [4] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method" in the 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Seoul, 1998
- [5] Jean - Jacques E. Slotine, Weiping Li, **Applied Nonlinear Control:** Prentice - Hall International, 1991
- [6] A.Lipatov and N.Sokolov. "Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems." Automat. Remote Cont., pp. 1285 - 1291,1997
- [7] วิพันธ์ ปรีชาพานิช, การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาติสครีต. ครั้งที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

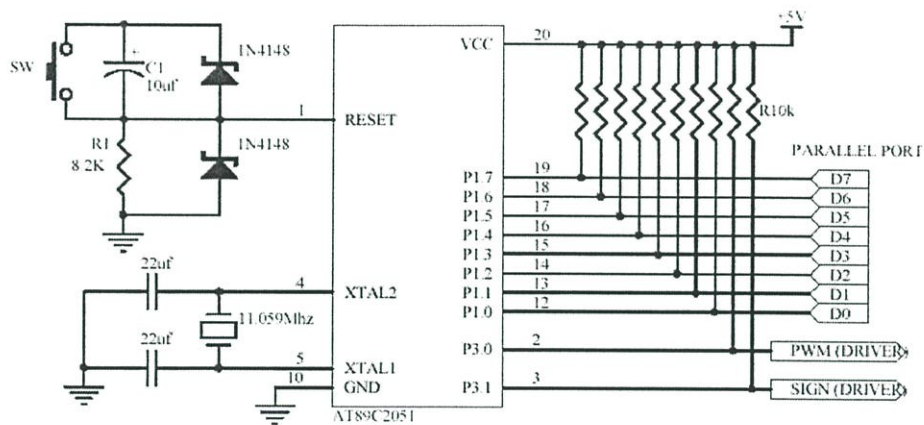
รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบเครื่องหนือีระยะด้วยโปรแกรมภาษาซี (C language) ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการควบคุม

ก.2 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณพัลส์วิดมอดูเลชัน (Digital to PWM)

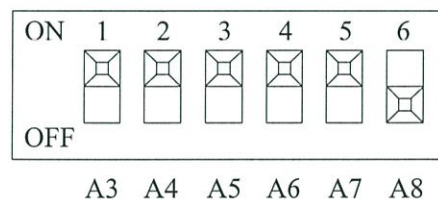
วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM เป็นวงจรเชื่อมต่อกะหว่างคอมพิวเตอร์และวงจรมอเตอร์ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ฐาน 16 ที่ส่งมาจากพอร์ตขนาน (parallel port) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ให้เป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณให้วงจรมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน โดยรายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ ก.1



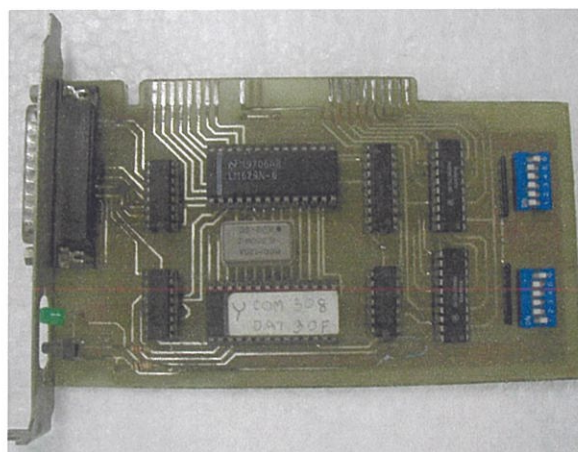
รูปที่ ก.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM

จากรูปที่ ก.1 ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051 ซึ่งจะถูกรโปรแกรมให้ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข.) ซึ่งข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ฐาน 16 นี้จะเข้ามาทางพอร์ต P1.0-P1.7 โดยพอร์ต P1.0-p1.6 จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการปรับความกว้างของพัลส์โดยถ้าข้อมูลเป็นค่า 00H จะทำให้รถเครนหยุดเคลื่อนที่ และถ้าข้อมูลเป็น 7FH จะทำให้รถเครนเคลื่อนที่เร็วที่สุด ส่วนพอร์ต P1.7 จะเป็นข้อมูลที่ใช้บอกทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยถ้าพอร์ต P1.7 มีสถานะเป็น “1” (4.5 โวลท์) มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาทำให้รถเครนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถ้าพอร์ต P1.7 มีสถานะเป็น “0” (0 โวลท์) มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาทำให้รถเครนเคลื่อนที่กลับหลัง โดยข้อมูลขนาด 8 บิต ฐาน 16 และความกว้างของพัลส์แสดงรายละเอียดดังรูปที่ ก.2 โดยความถี่ของสัญญาณ PWM คือ 3.2 กิโลเฮิรซ์

จากรูปที่ ก.3 หลักการทำงานของวงจรถือ ไอซี 74LS688 จะตีโคดตำแหน่งจากบัสตำแหน่ง (address bus) A0-A9 โดยกำหนดตำแหน่งได้จากการปิด-เปิดของคิปสวิตช์ ซึ่งถ้าเปิดสวิตช์จะมีสถานะเป็น “0” และถ้าปิดสวิตช์จะมีสถานะเป็น “1” ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการกำหนดบัสตำแหน่ง 300H (11 0000 0XXX B) ในการติดต่อกับการ์ด หรือ A9=1, A8=1, A7=0, A6=0, A5=0, A4=0, A3=0 ส่วน A2, A1 และ A0 จะมีค่าเป็นอะไรก็ได้ ดังนั้นจะกำหนดคิปสวิตช์ได้ดังรูปที่ ก.4 ซึ่ง A9 จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 1 โดยในการทดลองได้กำหนดแอดเดรสให้กับ 74LS688-X คือ 300H และ 74LS688-Y คือ 308H ดังนั้นหากไอซี 74LS688-X ตีโคดตำแหน่งได้ตรงกับที่กำหนดแล้ว ไอซี 74LS688-X จะส่งสัญญาณ CS-X ไปที่ขา CS (chip select) ของไอซี LM629-X และเมื่อได้รับสัญญาณจากบิตตำแหน่ง A0 ที่ขา PS แล้ว ไอซี LM629-X จะทำงานโดยรับสัญญาณจากเอนโคเดอร์ที่วัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเข็นที่ขา A และ B โดยสัญญาณที่รับจะมีสองเส้นมีลักษณะสัญญาณเป็นพัลส์ โดยแต่ละเส้นจะมีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา จากนั้น LM629-X จะทำการนับจำนวนพัลส์ที่รับเข้ามาแล้วส่งข้อมูลขนาด 8 บิต เข้าสู่บัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป และในกรณีที่ต้องการอ่านค่าของเอนโคเดอร์ที่วัดการแกว่งของมุมก็จะมีหลักการเดียวกันดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยภาพถ่ายของ ISA การ์ดแสดงดังรูปที่ ก.5 และรายละเอียดของวงจรรับจำนวนพัลส์แสดงดังรูปที่ ก.6 ส่วนตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.9



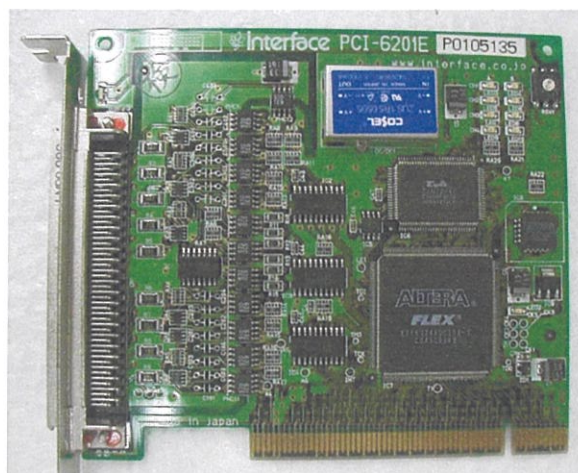
รูปที่ ก.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิตช์



รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด

ก.3.2 การ์ดนับจำนวนพัลส์สำหรับวัดความยาวเชือกสลิง

การ์ดนับจำนวนพัลส์จากเอนโคเดอร์สำหรับวัดความยาวเชือกสลิงจะมีลักษณะเป็น PCI การ์ดเบอร์ PCI-6201E ซึ่งเป็นการ์ดสำเร็จรูปที่ โดยภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E แสดงดังรูปที่ ก.7 และการตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.7 ภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E

ก.4 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

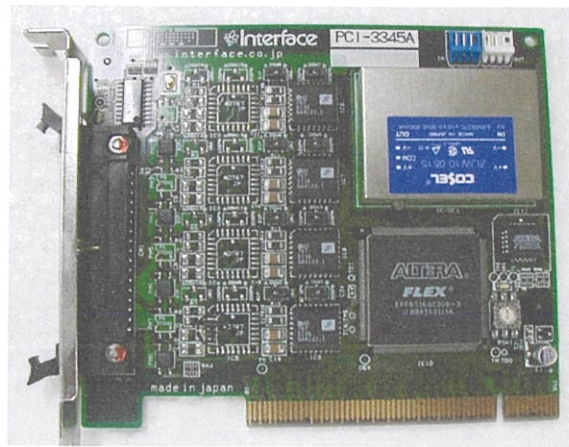
วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จะมีลักษณะเป็น PCI การ์ดเบอร์ PCI-3345A ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับวงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ดึงเชือกสลิง โดยตัวการ์ดจะรับข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิตจากคอมพิวเตอร์และจะแปลงข้อมูลนี้เป็นสัญญาณอนาล็อกอยู่ในรูปที่ของแรงดันไฟฟ้ามีขนาด -10 โวลต์ ถึง $+10$ โวลต์ (สามารถปรับแต่งได้จากตัวการ์ด) เพื่อส่งแรงดันนี้เข้าสู่วงจรขับกระแสของมอเตอร์ที่ใช้ดึงเชือกสลิง โดยขนาดของแรงดันไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามค่าข้อมูลดิจิทัลที่ส่งมาให้แสดงความสัมพันธ์ดังนี้

ถ้าส่งค่า FFFH เข้าการ์ดจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดสูงสุดคือ 10 โวลต์

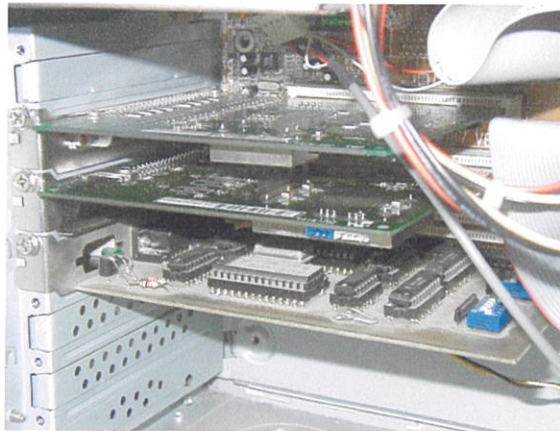
ถ้าส่งค่า 7FFH เข้าการ์ดจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดคือ 0 โวลต์

ถ้าส่งค่า 0H จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดต่ำสุดคือ -10 โวลต์

เนื่องจากการ์ด PCI-3345A มีขนาด 12 บิต จึงมีความละเอียด 4095 ค่าจากย่านความกว้างของแรงดันเอาต์พุตทั้งหมด ในที่นี้ต้องการส่งค่าแรงดันออกไปควบคุมอยู่ในช่วง ± 10 โวลต์ ดังนั้นจะได้ความละเอียดของแรงดันเอาต์พุตต่อข้อมูลดิจิทัลเท่ากับ $20/4095 = 0.004$ โวลต์ ต่อข้อมูลดิจิทัล 1 ค่า ภาพถ่ายแสดงการ์ดแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกแสดงดังรูปที่ ก.8 และตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.9



รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายการ์ดแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก



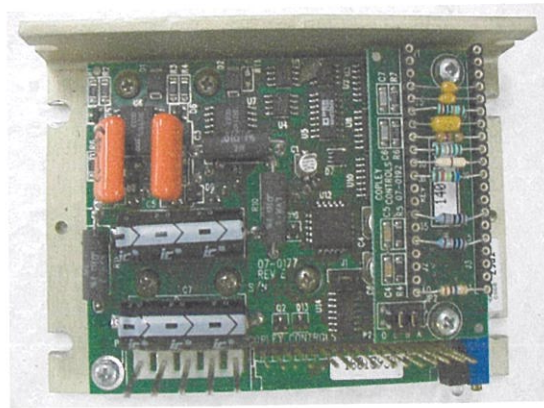
รูปที่ ก.9 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ

ก.5 วงจรขับกระแสของมอเตอร์ (current driver motor)

วงจรขับกระแสของมอเตอร์เป็นวงจรที่สำคัญวงหนึ่ง ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการทดลองจะประกอบด้วยวงจรขับกระแสของมอเตอร์ 2 วงจรด้วยกันคือ

ก.5.1 วงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน

วงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนจะใช้วงจรสำเร็จรูปของบริษัท Copley Controls Corp. รุ่น 412 โดยมีคุณสมบัติคือ ให้แรงดันเอาต์พุตขนาด 24 - 90 โวลต์ กระแสเอาต์พุตสูงสุด 20 แอมป์. สัญญาณ PWM มีความถี่ 3 กิโลเฮิรซ์ ป้องกันการลัดวงจรทางเอาต์พุตและมีระบบตัดการทำงานของวงจรเมื่ออุณหภูมิของวงจรร้อนเกิน 70 องศาเซลเซียส โดยวงจรขับกระแสของมอเตอร์นี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM และสัญญาณตำแหน่งจากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM จากนั้นจะขยายสัญญาณและส่งสัญญาณนี้ไปขับมอเตอร์ ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ ก.10

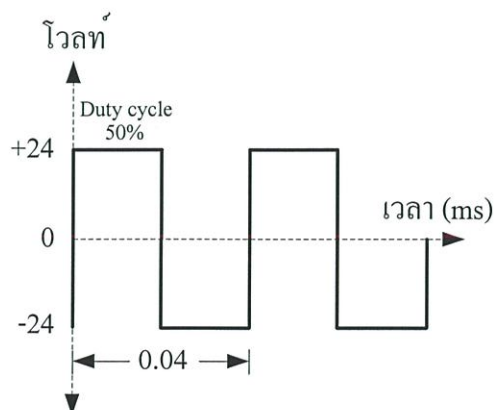


รูปที่ ก.10 ภาพถ่ายวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเข็น

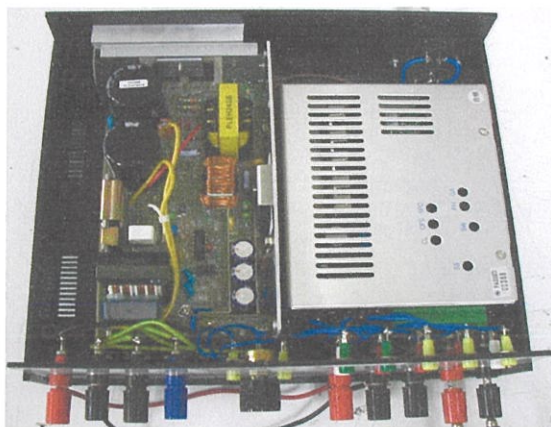
ก.5.2 วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิง

วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิงจะทำหน้าที่รับแรงดันจากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะแปลงแรงดันให้เป็นสัญญาณ PWM เพื่อใช้ขับมอเตอร์ โดยสัญญาณ PWM จะมีขนาด ± 24 โวลต์และมีความถี่ของสัญญาณ 25 กิโลเฮิรซ์ ซึ่งการปรับความกว้างของพัลส์ duty cycle จะขึ้นอยู่กับแรงดันอินพุตที่รับมาจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอินพุตและ duty cycle จะเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

- แรงดันอินพุตเท่ากับ +10 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 100% มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด
- แรงดันอินพุตเท่ากับ 0 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 50% มอเตอร์จะหยุดหมุน
- แรงดันอินพุตเท่ากับ -10 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 0% มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด โดยลักษณะของสัญญาณ PWM แสดงดังรูปที่ ก.11 และภาพถ่ายของวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิงแสดงดังรูปที่ ก.12



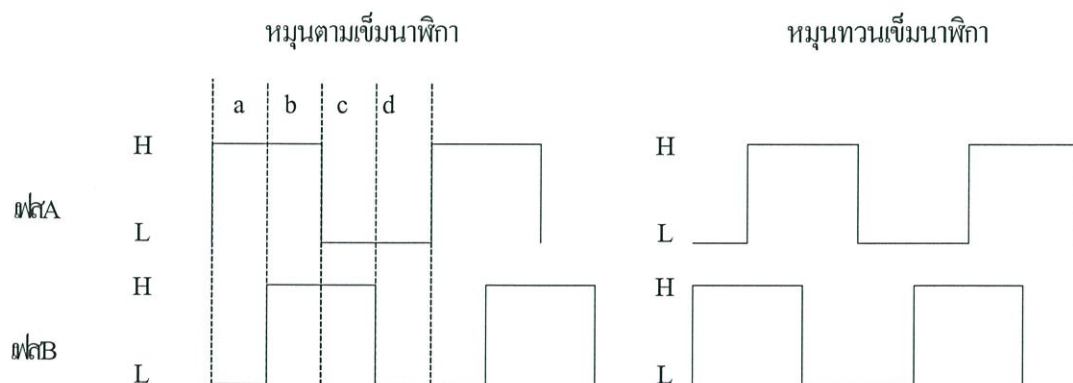
รูปที่ ก.11 สัญญาณ PWM ของวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิง



รูปที่ ก.12 ภาพถ่ายวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชือกสลิง

ก.6 เอนโคเดอร์

เอนโคเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ เนื่องจากสัญญาณที่ป้อนกลับที่ส่งมาจากเอนโคเดرنั้น สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ หรือสามารถบอกสถานะของระบบนั้นได้ว่าเป็นอย่างไร โดยนำสัญญาณป้อนกลับที่ได้นี้มาคำนวณ เพื่อหาสัญญาณควบคุมให้กับระบบนั้นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเอนโคเดอร์ที่ใช้ในระบบเครื่องจะเป็นแบบโรตารีเอนโคเดอร์มีความละเอียด 2000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ (360 องศา) แต่เนื่องจากเมื่อเอนโคเดอร์หมุนจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้นที่ขา A และ B ซึ่งต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา โดยทั้งสองสัญญาณนี้จะถูกขยายสัญญาณและส่งเข้าสู่วงจรนับ ซึ่งวงจรมันจะทำการแบ่งสัญญาณพัลส์ทั้งสองออกเป็น 4 ส่วนแสดงดังรูปที่ ก.13 ดังนั้นจะทำให้ความละเอียดของสัญญาณพัลส์



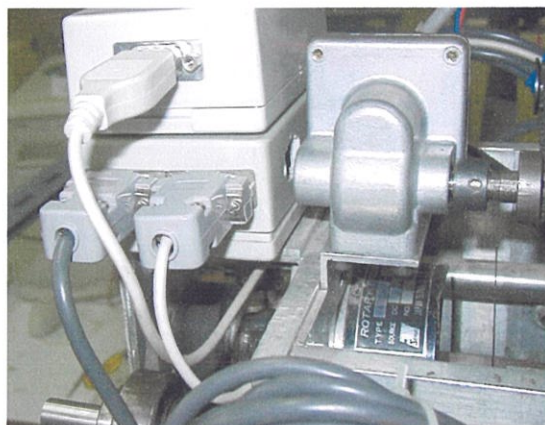
(a,b,c,d) คือ (2000,4000,6000,8000) พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ

รูปที่ ก.13 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์ต่อการหมุนเอนโคเดอร์ 1 รอบ

เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า นั่นคือ 8000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ดังนั้นความละเอียดของมุมที่วัดได้คือ $360/8000 = 0.045$ องศาต่อสัญญาณ 1 พัลส์ โดยเอนโคเดอร์ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ตัวคือ

ก.6.1 เอนโคเดอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน

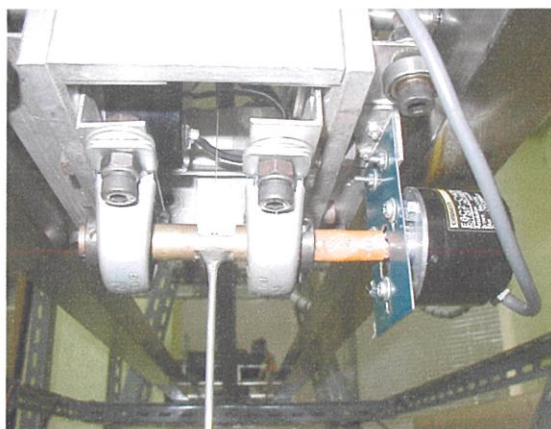
เอนโคเดอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของรถเครน โดยจะต่ออยู่กับล้อข้างซึ่งเชื่อมต่อ (coupling) ด้วยวัสดุที่ทำจากกาวแท่ง ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.14 การติดตั้งเอนโคเดอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน

ก.6.2 เอนโคเดอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ

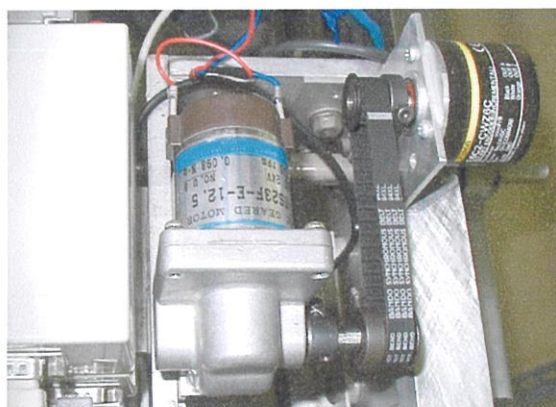
เอนโคเดอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณด้านใต้รถเครน โดยจะต่ออยู่กับแท่งทองเหลือง โดยตรงกลางของแท่งทองเหลืองนี้ จะต่ออยู่กับท่อนสแตนเลสเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ยาว 37 เซนติเมตร เพื่อให้เชือกสลิงสอดผ่านได้ เหตุที่ทำเช่นนี้เนื่องจากเวลาเชือกแกว่งจะทำให้แท่งสแตนเลสแกว่งตามและทำให้แท่งทองเหลืองแกว่งตามไปด้วย และแท่งทองเหลืองนี้จะเชื่อมต่อกับเอนโคเดอร์ด้วยวัสดุที่ทำจากกาวแท่ง ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.15



รูปที่ ก.15 การติดตั้งเอนโคเดอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ

ก.6.3 เอนโคเดอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง

เอนโคเดอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของรถเครน โดยจะต่ออยู่กับมอเตอร์ที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง โดยตัวเอนโคเดอร์จะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ด้วยพูลเลย์และสายพานชนิดฟันเลื่อย ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.16



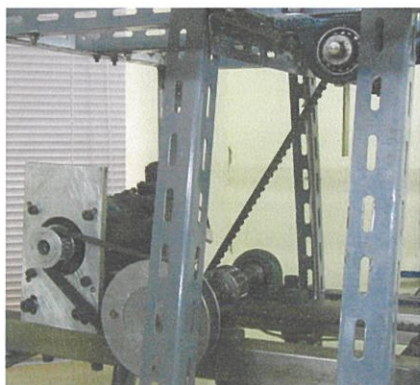
รูปที่ ก.16 การติดตั้งเอนโคเดอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง

ก.7 ระบบส่งกำลัง

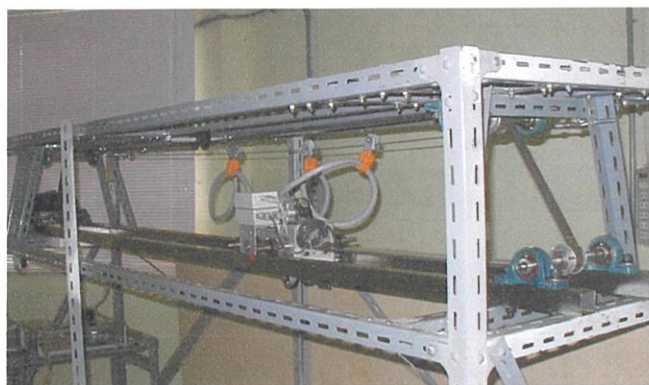
ระบบส่งกำลังเป็นระบบที่ทำให้รถเครนและภาระเกิดการเคลื่อนที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก.7.1 ระบบส่งกำลังของรถเครน

ระบบส่งกำลังของรถเครนจะประกอบด้วยคีมอเตอร์ขนาด 500 วัตต์ 70 โวลท์เป็นตัวส่งกำลัง และมีชุดทดรอบเพื่อลดความเร็วของมอเตอร์แต่เพิ่มแรงบิดให้มากขึ้น โดยชุดทดรอบจะประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) และไทม์มิ่งพูลเลย์ (timing pulley) ซึ่งไทม์มิ่งพูลเลย์ที่ใช้จะมีสองตัว โดยตัวแรกจะยึดติดกับปลายของมอเตอร์ส่วนอีกตัวจะยึดติดกับแกนหมุนของชุดส่งกำลัง โดยไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวแรกจะมีขนาดเป็น $\frac{1}{3}$ ของไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวที่สองเนื่องจากต้องการลดความเร็วของมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ขึ้นเป็น 3 เท่า การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์นี้สามารถลดแบ็คเลกซ์ที่เกิดขึ้นในระบบทดรอบที่ใช้เฟืองเกียร์ได้ ส่วนชุดส่งกำลังนี้ก็จะประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์เช่นกัน ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งกำลังไปให้กับรถเครนเพื่อให้รถเครนสามารถเคลื่อนได้ การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งในการส่งกำลังเนื่องจากสามารถลดสลลิปที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังได้ดีกว่าการใช้สายพานธรรมดา โดยระบบส่งกำลังของรถเครนแสดงดังรูปที่ ก.17



(ก)



(ข)

ชุดทดรอบมอเตอร์ (ข) ระบบส่งกำลังของรถเครน

รูปที่ ก.17 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเครน

ก.7.2 ระบบส่งกำลังของภาวะ

ระบบส่งกำลังของภาวะจะประกอบด้วยดีซีมอเตอร์ซึ่งจะมีเกียร์บล็อกต่อยู่ด้านปลายของมอเตอร์เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดให้มากขึ้น ทำให้สามารถยกภาวะที่มีน้ำหนักมาก ขึ้นและลงได้ ระบบการส่งกำลังของภาวะแสดงดังรูปที่ ก.16

ก.8 ภาวะ

ภาวะที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำจากเหล็กตันแข็งมีมวล 1 กิโลกรัม 3 กิโลกรัม และ 5 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ ก.18



รูปที่ ก.18 ภาพถ่ายภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ก.9 เชือกสลิง

เชือกสลิงที่ใช้ในการดิ่งภาวะมีลักษณะเป็นเส้นเอ็นไหมีสลิงอยู่ภายใน สามารถรับน้ำหนักได้ 10 กิโลกรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.42 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ ก.19



รูปที่ ก.19 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการดิ่งภาวะ

ภาคผนวก ข.

**โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
และการทดลอง**

ข.1 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนหนือสี่ระะ
(โปรแกรมเมตเด้าบ)

```
format short;
```

```
M=6.12; y1=1.433; y0=0.535; x1=4.5; x0=2; a=(y1-y0)/(x1-x0); T=0.5; bm=M/T ; D=7;
kr=(a*bm)/D; g=9.81; T1=0.1; m=5; L=1; bl=m/T1; y11=0.673; y00=0.126; x11=5; x00=1;
v=20; a1=(y11-y00)/(x11-x00); k1=(a1*bl)/v;
```

```
A= [ 0 1 0 0 0 0 ;
      0 -bm/M 0 0 0 0 ;
      0 0 0 1 0 0 ;
      0 bm/(M*L) -g/L 0 0 0 ;
      0 0 0 0 0 1 ;
      0 0 0 0 0 -bl/m ];
```

```
B= [ 0 0;
      kr/M 0;
      0 0;
      -kr/(L*M) 0;
      0 0;
      0 kl/m];
```

```
C= [ 1 0 0 0 0 0 ;
      0 0 1 0 0 0 ;
      0 0 0 0 1 0 ];
```

```
D= [ 0 0 ;
      0 0 ;
      0 0 ];
```

```
states={'distance' 'distance_dot' 'theta' 'theta_dot' 'length' 'length_dot' };
```

```
inputs={'u_distance' 'u_length'};
```

```
outputs={'out_distance' 'out_theta' 'out_length' };
```

```
sys_mimo=ss(A,B,C,D,'statename',states,...
```

```
          'inputname',inputs,...
```

```
          'outputname',outputs);
```

```
tf(sys_mimo)
```

ข.2 โปรแกรมหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID PD และPI ด้วยวิธี CDM (โปรแกรมเมตเซอเมติก)

ข.2.1 ตัวควบคุม PID

$$g1 = 4;$$

$$g2 = 4;$$

$$t = 4;$$

$$Bc = kp s + ki + kd s^2;$$

$$Ac = s;$$

$$Bp = 0.1026;$$

$$Ap = s^2 + 2 s;$$

$$v = \text{Collect} [Ap * Ac + Bp * Bc , s];$$

$$y = \text{CoefficientList} [v , s];$$

$$\text{eqns} = \{ (y[[1]] * t^3) / (g2 * g1^2) == y[[4]], (y[[1]] * t^2) / g1 == y[[3]],$$

$$(y[[2]] / (y[[1]])) == t \};$$

$$\text{solve} [\text{eqns} , \{ kp , ki , kd \}]$$

ข.2.2 ตัวควบคุม PD

$$g1 = 2.5;$$

$$g2 = 2.5;$$

$$Bc = kp + kd s;$$

$$Ac = 1;$$

$$Bp = 0.1029;$$

$$Ap = s^3 + 2s^2 + 9.81 s + 19.62;$$

$$v = \text{Collect} [Ap * Ac + Bp * Bc , s];$$

$$y = \text{CoefficientList} [v , s];$$

$$\text{eqns} = \{ (y[[1]] * t^3) / (g2 * g1^2) == y[[4]], (y[[1]] * t^2) / g1 == y[[3]],$$

$$(y[[2]] / (y[[1]])) == t \};$$

$$\text{solve} [\text{eqns} , \{ kp , kd , t \}]$$

ข.2.3 ตัวควบคุม PI

$$g1 = 2.8;$$

$$g2 = 7.3;$$

$$Bc = kp s + ki;$$

$$Ac = s;$$

$$Bp = 0.06838;$$

$$Ap = s^2 + 10 s;$$

$$v = \text{Collect} [Ap * Ac + Bp * Bc , s];$$

$$y = \text{CoefficientList} [v , s];$$

$$\text{eqns} = \{ (y[[1]] * t^3) / (g2 * g1^2) == y[[4]], (y[[1]] * t^2) / g1 == y[[3]],$$

$$(y[[2]] / (y[[1]])) == t \};$$

$$\text{solve} [\text{eqns} , \{ kp , ki , t \}]$$

ข.3 โปรแกรมแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM

(โปรแกรมภาษา Assembly ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C2051)

```

                org 0000h
start:          mov a,p1                ; from port printer (0x378)
                clr p3.0
                cjne a,#00h,start
main:           mov a,p1
                mov r0,a
                cjne a,#00h,stop_1      ; stop if a = 00
                clr p3.0
                ljmp main
stop_1:         cjne a,#80h,next_1
                clr p3.0
                ljmp main
next_1:         mov a,r0
                anl a,#80h
                cjne a,#00h,chk_dir
                mov a,r0
                cjne a,#7fh,next_lp1
                setb p3.0
                ljmp main
next_lp1:       clr p3.1
                mov a,r0                ; backward direction
loop_dir:       mov r3,a
                cjne a,#7eh,lp1
                mov r3,#7eh
                mov r4,#02h
                lcall pwm_out
                ljmp main
lp1:            mov a,#7fh
                subb a,r3

```

```

        mov r4,a
        cjne a,#00h,loop_dir2
        clr p3.0
        ljmp main
loop_dir2:  lcall pwm_out
           ljmp main
chk_dir:   mov a,r0           ;forward direction
           cjne a,#80h,next_lp2
           clr p3.1
           ljmp main
next_lp2:  cjne a,#ffh,next_lp3
           setb p3.0
           ljmp main
next_lp3:  setb p3.1
           mov a,r0
           anl a,#7fh
           ljmp loop_dir
pwm_out:   setb p3.0
delay_on:  djnz r3,delay_on
           clr p3.0
delay_off: djnz r4,delay_off
           ret
pwm_off:   mov r3,#01h
           mov r4,#7fh
           lcall pwm_out
           ret
delay:     mov r6,#ffh
del1:      mov r5,#ffh
del:       djnz r5,del
           djnz r6,del1
           ret
end

```

ข.3 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบทรานเหนื่อที่ระยะ (โปรแกรมภาษาซี)

```

#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <process.h>
#include <math.h>
#include "DA.H"
#include "GETBAR.H"
#include "i2c_x_1.h"
#include "i2c_y_1.h"
#define drive_port 0x378
#define run_dat "D:\\Apicit\\matlab\\length\\final.m"
#define cls(l); { short i; for(i=1; i<25; i++) lineclr(i); }
#define Locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH", (y)+1, (x)+1)
#define lineclr(l) printf("\x1b[s\x1b[%d;1H\x1b[0K\x1b[u", l+1)
#define range DA_10V
PCI_CONFIG PciData; DASMPCHREQ SmplChReq[2];
DABOARDSPEC BoardSpec; HANDLE OpenBoard(void);
void INITIAL_DTOA(void); void CLOSE_DTOA(void);
int main(void){ HANDLE hDevice; unsigned int adr0,adr1,bus_info; unsigned int lByte;
unsigned int mByte; unsigned int hByte; unsigned long dwCounter; int key;
float sam_time = 0.05; float ts = 0.00; float run_time = 0.00; int stop_ang_count = 0;
clock_t start,end; int ret; int hexout=0; float volt=0.00; WORD DaData[1];
float Ki1_length = 0.00; float Kp1_length = 0.00; float Kd1_length = 0.00; float length_ref=0.00;
float length_ft1 = 0.00; float length_ft2 = 0.00;float length_ft3 = 0.00; float length_ft4 = 0.00;
float length_ft = 0.00; float length_ft_old = 1.00;float length_Kp1 = 0.00; float length_Ki1=0.00;

```

```

float length_Kd1=0.00;float con_length=0.00;float con_length_old = 0.00;float length_err = 0.00;
float length_err_old = 0.00;float length_err_old1=0.00;float rope_length=0.00;
float length_ret=0.00;float con_float = 0.00; int con = 0;float con_i = 0; float con_pos = 0;
float con_ang = 0;float vel = 0.00; float pos = 0.00; float pos_err = 0.00; float pos_err_old = 0.00;
float dif_pos_err = 0.00; float dif_pos = 0.00; float pos_ref = 0.00; float pos_old = 0.00;
float con_Kp = 0.00; float con_Ki = 0.00; float con_Kd = 0.00; float pos_ft = 0.00;
float pos_ft1= 0.00; float pos_ft2= 0.00; float pos_ft3= 0.00; float pos_ft4= 0.00;
float pos_ft_old =0.00;float pos_ft_old =0.00;float pos_err_old1 = 0.00;float con_pos_old = 0.00;
float pos_length = 0.00; float ang = 0.00; float ang_err = 0.00;float ang_err_old = 0.00;
float dif_ang_err=0.00;float ang_ref=0.00;float Kp_pos=0;float Ki_pos=0;float Kd_pos = 0;
float Kp_ang = 0; float Kd_ang = 0; FILE *run_fin; clrscr(); run_fin = fopen(run_dat,"wt+");
fprintf(run_fin,"source_matrix = [");
INITIAL_DTOA(); // Set initial value of Digital to Analog PCI Card (PCI-6201E)
hDevice = OpenBoard(); DaGetDeviceInfo(hDevice, &BoardSpec); SmplChReq[0].ulChNo = 1;
SmplChReq[0].ulRange = range; // Initial Encoder PCI Card (PCI-3345A)
PciGetConfigRegEx(1, 0x1147, 6201, 0x1147, 0x0011,&bus_info, &PciData);
adr0=PciData.BaseAddresses[0]&0xffffc;
adr1=PciData.BaseAddresses[1]&0xffffc;
outp(adr0+0x08,0x06); // forward direction
// initial LM629 for read data from encoder (distance and swing angle)
INIT_LM629(); INIT_LM629_y(); SET_PID_FILTER(1, 1, 1, 100);
do // Manual adjust rope length ( <-- for down & --> for up )
{ if(bioskey(1)!=0)
    { key = bioskey(1);
      switch( bioskey(0) )
      { case 0x4b00 :
          { if(volt < 24)
              {volt = volt+1;}
            else
              { volt = 24;} }
          break;
        case 0x4d00 :

```

```

        { if(volt > -24)
            {volt = volt-1;}
        else
            {volt = -24;}    }
    break;
    case 0x5000 :
        { volt=0;} // for load 5kg
        break;
    default : key = 0x011b; }//end switch key
} //end if
hexout=((volt+24)/48)*4095; DaData[0] = hexout;
ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
outp(adr0+0x0c,2);
lByte=inp(adr0+0x00); mByte=inp(adr0+0x00); hByte=inp(adr0+0x00);
dwCounter= lByte+((unsigned long)mByte << 8)+((unsigned long)hByte<<16);
rope_length=(dwCounter*0.000004)+0.26 ; //1 round (8000 pulse) = 3 cm
ang=READ_ANGLE_RADIAL();
    if (rope_length > 5)
        { outp(adr0+0x0d,0x01); }
    else
        { printf(" \nrope_length: %4.4lf\t ",rope_length );
          printf(" volt : %f\t",volt);
          printf(" ang : %f\t",ang); }
    } while( key != 0x011b );
volt=0; hexout=((volt+24)/48)*4095; DaData[0] = hexout;
ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
// Control rope length with PID controller designed by CDM
clrscr(); printf("start value of rope length = %f ", rope_length);
printf("\nfinal value of rope length (0.5-1)m = "); scanf("%f", &length_ref);
length_ret= rope_length; printf("\npress anykey for clear port."); getch(); outp(drive_port,0);
printf("\nEnter distance :"); scanf("%f", &pos_ref); //----- data input -----//
Kp_pos = 38.9864; Ki_pos = 9.75; Kd_pos = 19.5; Kp_ang = -68.7315;

```

```

Kd_ang = -37.0336; Kp1_length = 200; Ki1_length = 98;
printf("\nPress any key to start....."); sound(700); getch(); run_time = 0.00;
start = clock();

do
{
end = clock();
    ts = (end - start) / CLK_TCK ;
    if (ts >= sam_time)
    {
pos_ft1      = (Ki_pos*ts*pos_ref);
pos_ft2      = ((Kp_pos+((2*Kd_pos)/ts))*pos_ft_old);
pos_ft3      = ((Kd_pos/ts)*pos_ft_old1);
pos_ft4      = (Kp_pos+(Kd_pos/ts)+(Ki_pos*ts));
pos_ft       = (pos_ft1 + pos_ft2 - pos_ft3)/pos_ft4;
ang          = READ_ANGLE_RADIAL();
ang_err      = ang_ref - ang;
dif_ang_err  = (ang_err-ang_err_old)/ts;
con_ang      = (Kp_ang*ang_err)+(Kd_ang*dif_ang_err);
pos          = READ_REAL_POS();
pos_err      = (pos_ft - pos);
con_Kp       = (Kp_pos*(pos_err-pos_err_old));
con_Ki       = (Ki_pos*pos_err*ts);
con_Kd       = ((Kd_pos/ts)*(pos_err-(2*pos_err_old)+pos_err_old1));
con_pos      = con_Kp+con_Ki+con_Kd+con_pos_old;
con_float    = con_pos + con_ang;
outp(adr0+0x0c,2);
lByte        = inp(adr0+0x00);
mByte=inp(adr0+0x00);
hByte=inp(adr0+0x00);
dwCounter= lByte+((unsigned long)mByte << 8)+((unsigned long)hByte<<16);
rope_length=(dwCounter*0.000004)+0.26 ; // rope length start at 23 cm.
length_ft1   = (Ki1_length*ts*length_ref); //prefilter
length_ft2   = (Kp1_length*length_ft_old);
length_ft4   = (Kp1_length+(Ki1_length*ts));

```

```

length_ft      = (length_ft1 + length_ft2)/length_ft4;
length_err     = (length_ft - rope_length); //control length
length_Kp1     = (Kp1_length*(length_err-length_err_old));
length_Ki1     = (Ki1_length*length_err*ts);
con_length     = (length_Kp1+length_Ki1+con_length_old);
con            = (int)(con_float);      pos_length     = (pos_ref / 100)*90;
if (pos >= pos_length)
    { length_ref = length_ret;
      } if (con >= 0)
        { if (con >= 100)
          { con=abs((100)+128);
            outp(drive_port,con); }
          else
          { con=abs(con+128);
            outp(drive_port,con); } }
        else
        { if (con <= -100)
          { con=abs(-100);
            outp(drive_port,con); }
          else
          { con=abs(con);
            outp(drive_port,con); }}
    if (con_length > 24)
        { con_length=24;}
    if (con_length < -24)
        { con_length=-24;}

    // send Control signal to Driver motor
    volt= con_length; hexout=((volt+24)/48)*4095; DaData[0] = hexout;
    ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
    printf("time = %4.4f",run_time); printf(" ang = %4.4f",ang);
    printf(" pos = %4.4f",pos); printf(" length = %4.4f",rope_length);
    printf(" con_l = %4.4f",con_length); }run_time = run_time + ts; tart = end;

```

```

pos_ft_old1=pos_ft_old; pos_ft_old = pos_ft;pos_err_old1 = pos_err_old;
pos_err_old = pos_err; ang_err_old = ang_err;
con_pos_old = con_pos; con_length_old= con_length;
length_err_old1 = length_err_old; length_err_old = length_err; length_ft_old=length_ft;
fprintf(run_fin,"\n"); fprintf(run_fin,"%4.4ft",run_time); fprintf(run_fin,"%4.4ft",ang);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",con_ang); fprintf(run_fin,"%4.4ft",pos);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",con_pos); fprintf(run_fin,"%d\t",con);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",con_float); fprintf(run_fin,"%4.4ft",rope_length);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",-volt); }
} while (bioskey(1) == 0);
fprintf(run_fin,"\n ]");
fclose(run_fin);
// clear all data set
hexout=((0+24)/48)*4095;
DaData[0] = hexout; ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
outp(drive_port,0); DaClose(hDevice); CLOSE_DTOA(); return(0);}
// Function void OpenBoard(void)
HANDLE OpenBoard(void)
{ HANDLE hDevice;
hDevice = DaOpen(3345, 0x0001, 0);
return hDevice; }
void CLOSE_DTOA(void)
{ char *pString;
pString = "/R";
spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL);}
void INITIAL_DTOA(void)
{ char *pString;
pString = "/B=1";
spawnl(P_WAIT,"dadrvi.exe",pString,NULL);}

```

ภาคผนวก ค.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

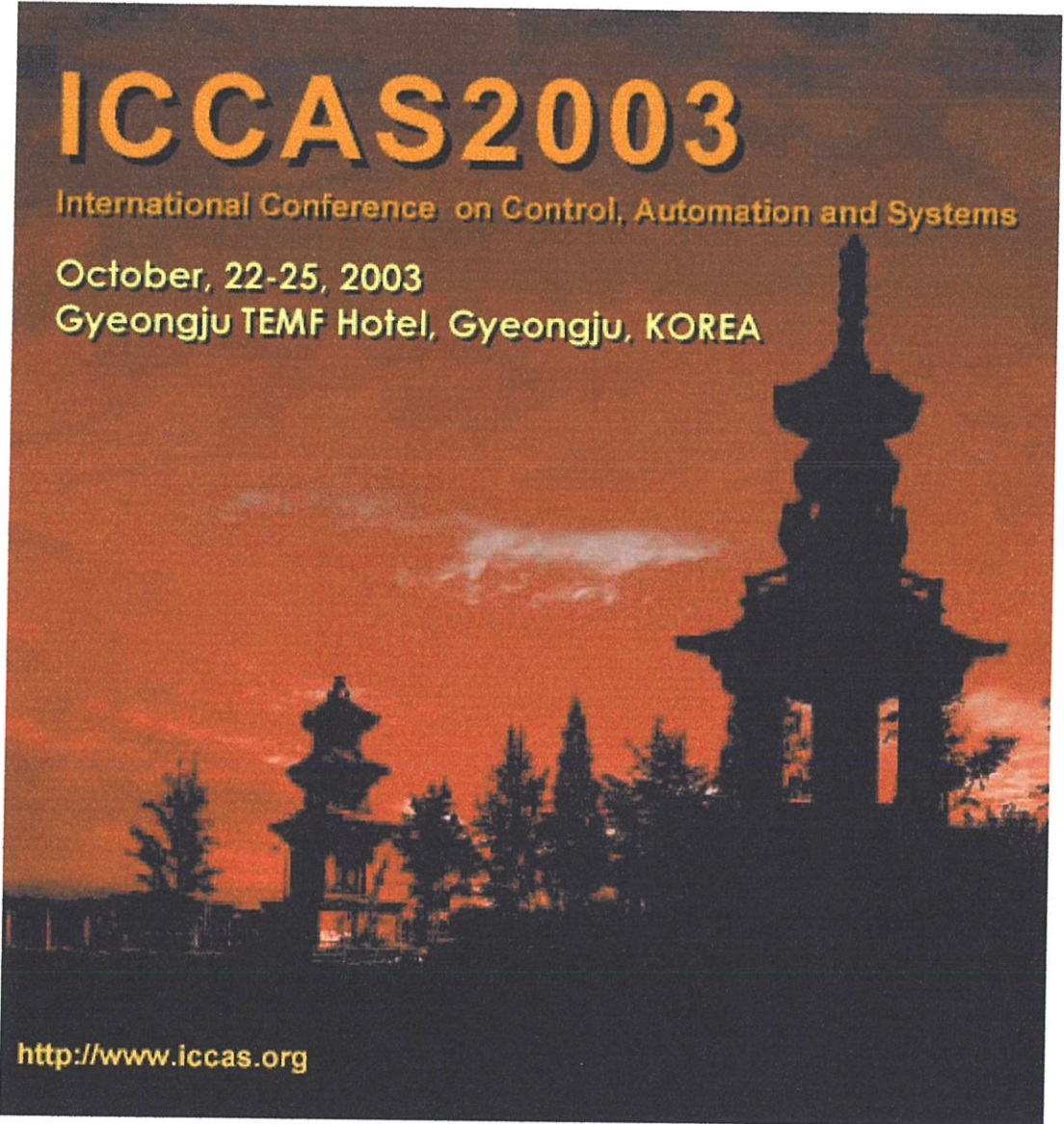
ICCAS2003

International Conference on Control, Automation and Systems

October, 22-25, 2003

Gyeongju TEMF Hotel, Gyeongju, KOREA

<http://www.iccas.org>

The background of the poster features a silhouette of two traditional Korean pagodas (Stupa) against a vibrant orange and red sunset sky. The pagodas are multi-tiered with ornate roofs. The overall mood is serene and traditional.

Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane System

A. Tantaworrasilp*, T. Benjanarasuth*, J. Ngamwiwit*, N. Komine**

*Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

Tel: +662-326-4221, Fax: +662-326-4221, E-mail: knjongko@kmitl.ac.th

**School of Information Technology and Electronics, Tokai University

Hiratsuka-Shi Kanagawa-Ken 259-1292, Japan

Tel +81-463-58-1211, Fax +81-463-50-2240, E-mail: komine@tokai.ac.jp

Abstract. In this paper, the controller design by coefficient diagram method (CDM) for controlling the trolley position, load-swing angle and hoisting rope length of the overhead crane system simultaneously is proposed. The overhead crane system is a MIMO system consisting of two inputs and three outputs. Its mathematical model is nonlinear with coupling characteristics. This nonlinear model can be approximated to obtain a linear model where the first input mainly affects the trolley position and the load-swing angle while the second input mainly affects the hoisting rope length. In order to utilize the CDM concept for assigning the controllers, namely PID, PD and PI controllers separately, the model is approximated to be three transfer functions in accordance with trolley position, the load-swing angle and the hoisting rope length controls respectively. The satisfied performances of the overhead crane system controlled by the these controllers and fast rejection of the disturbance effect occurred at the trolley position are shown by simulation and experimental results.

Keywords: Coefficient diagram method, multivariable control, overhead crane system

1. INTRODUCTION

Overhead crane systems are widely used in industrial applications. It is mainly used for loading and unloading at wharf. The purpose of control is to transport loads rapidly and safely, reduce load-swing angle and hoist the loads to avoid the obstruction. It is known that the trolley position, load-swing angle and hoist motion of overhead crane system must be controlled simultaneously and properly, otherwise the load might be damaged. In recent years, many control schemes have been proposed to control the trolley position and load anti sway of the overhead crane system in order to obtain a good response. Those control schemes are anti-swing control of the container crane by fuzzy control [1], model reference adaptive control of a gantry crane scale model [2] and gantry crane control using neural network two degree of PID controller [3]. However, it is quite complicated to design and implement those controllers to meet the desired performances.

In this paper, the trolley position, load-swing angle and hoisting rope length of the overhead crane system controlled simultaneously by three controllers designed by CDM [4] is proposed. The overhead crane system is a MIMO system and its mathematical model is nonlinear with the coupling characteristics. This nonlinear model can be approximated to be a linear model of trolley position, load-swing angle and hoisting rope length. From the linearized model, it can be noticed that the first input mainly affects the trolley position and the load-swing angle while the second input mainly affects the hoisting rope length. Hence, this model can be approximated to consist of three transfer functions: the transfer function from the input duty cycle D of the trolley motor driver to the trolley position, the transfer function from the same input to the load-swing angle and transfer function from the input voltage V_i of the hoisting motor driver to the rope length. In this work, the controllers, namely PID, PD and PI controllers are employed to control the trolley position, the load-swing angle and the hoisting rope length respectively. These three controllers are designed independently by CDM. The parameters of the PID, PD and PI controllers are designed based on the stability and speed of the closed-loop system. In the CDM, stability and speed are designed from the standard stability index and the equivalent time constant respectively.

The stability index and the equivalent time constant are defined based on the coefficients of the characteristic polynomial of the closed-loop transfer function. These coefficients are related to the controller parameters algebraically in an explicit form. Consequently, the parameters of the PID, PD and PI controller can be obtained.

The simulation and experimental results in controlling the trolley position, load-swing angle and hoisting rope length of the overhead crane system using the proposed controllers whose parameters designed by CDM are shown in this paper. The coefficient diagram of the trolley movement control when the values of the equivalent time constant τ varied for increasing the speed of the trolley motion and the rejection of input disturbance effect are also shown.

2. DYNAMICS MODEL OF OVERHEAD CRANE

The overhead crane system model is shown in Fig. 1, where M is the mass of the trolley, m is the mass of the load, l is the rope length, θ is the swing angle, x is the position of the trolley, and F_x and F_l are respectively the control force of the trolley and the hoisting rope.

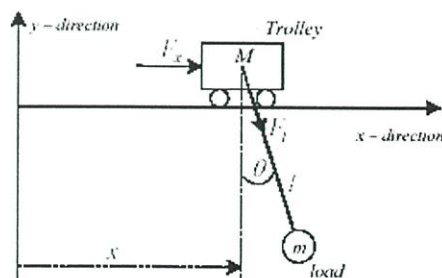


Fig. 1 Model of overhead crane system

In order to obtain the mathematical model of the overhead crane system, the kinetic energy KE and the potential energy PE are found first. The kinetic energy of the trolley and the

load which equals to the kinetic energy of the model is represented by

$$KE = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2\dot{\theta}l\cos\theta + 2\dot{x}\dot{\theta}\sin\theta + \dot{\theta}^2l^2 + \dot{l}^2), \quad (1)$$

And the potential energy measured relative to the starting position of the load is also represented by

$$PE = mgl\cos\theta, \quad (2)$$

where g is the gravitational acceleration. From the Lagrangian, $L = KE - PE$ is obtained as

$$L = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{\theta}^2l^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}\cos\theta + 2\dot{l}\sin\theta) + mgl\cos\theta \quad (3)$$

By using the Euler-Lagrange equations of motion

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q, \quad (4)$$

where Q is generalized force of system. The equations of motion associated with the generalized coordinates $q = [x, \theta, l]^T$ can be derived as

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F_x - b_w\dot{x}, \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}}\right) - \frac{\partial L}{\partial l} = F_l - b_l\dot{l}. \quad (7)$$

where b_w and b_l are the viscous damping coefficient of trolley motion and hoisting rope respectively. Consequently, the equations of motion can be written, respectively, as

$$x \quad F_x - b_w\dot{x} = (M + m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) + m\ddot{l}\sin\theta + 2m\dot{\theta}\dot{l}\cos\theta, \quad (8)$$

$$\theta \quad 0 = l\ddot{\theta} + 2\dot{\theta}\dot{l} + \ddot{x}\cos\theta + g\sin\theta, \quad (9)$$

$$l \quad F_l - b_l\dot{l} = m\ddot{l} + m\dot{x}\sin\theta - m\dot{\theta}^2l - mg\cos\theta \quad (10)$$

Since the electrical time constant of motors is much smaller than the mechanical time constant, then the electrical dynamics is neglected. That is, the control force of the trolley F_x in (8) is approximated to be

$$F_x = K_m T_m \cong K_x D, \quad (11)$$

where K_m and T_m are the trolley motor constant and torque, respectively. D (duty cycle) is the input to current driver of the trolley motor and K_x is a force constant of motion which depends on the trolley motor constant K_m and the power transmission (toothed-belt drive pulley ratio) of the trolley system. The control force of the hoisting F_l in (10) is also approximated to be

$$F_l = K_m T_l \cong K_l V_l, \quad (12)$$

where K_m and T_l are the hoisting motor constant and torque, respectively. V_l is the input voltage to current driver of the hoisting motor and K_l is a force constant of hoist which depends on the hoisting motor constant K_m and the power transmission (gear ratio) of the hoist system. By using Lyapunov's linearization method, the linear equations of motion of (8) to (10) after substituting F_x and F_l can be given by

$$\dot{x} = \frac{b_w}{M}\dot{x} + \frac{K_x}{M}D, \quad (13)$$

$$\dot{\theta} = \frac{b_w}{Ml}\dot{\theta} + \frac{g}{l} + \frac{K_x}{Ml}D, \quad (14)$$

$$\dot{l} = \frac{b_l}{m}\dot{l} + \frac{K_l}{m}V_l. \quad (15)$$

Taking Laplace transformation to (13) - (15), the three transfer functions are obtained as

$$G_{xx}(s) = \frac{x(s)}{D(s)} = \frac{K_x}{s(Ms + b_w)} \quad (16)$$

$$G_{\theta\theta}(s) = \frac{\theta(s)}{D(s)} = -\frac{K_x s}{(Ml s^3 + b_w l s^2 + Mgs + b_w g)} \quad (17)$$

$$G_{ll}(s) = \frac{l(s)}{V_l(s)} = \frac{K_l}{s(ms + b_l)}. \quad (18)$$

These transfer functions are employed to design the controllers for the overhead crane system by CDM. Note that the values of K_x , K_l , b_w and b_l are not known and their values can be found from the experiment.

3. CONCEPT OF CDM

In this section, the concept of CDM used to design the parameters of a controllers so that the step response of the control system satisfies stability, fast response and robustness requirements is described [4].

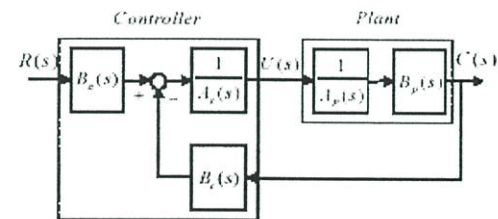


Fig. 2 Standard block diagram for CDM.

From the standard block diagram for CDM illustrated in Fig. 2, the transfer function of the plant in the polynomial form in each block is

$$A_p(s) = p_n s^n + p_{n-1} s^{n-1} + \dots + p_0, \quad (19)$$

$$B_p(s) = q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \dots + q_0, \quad (20)$$

and the controller polynomials are

$$A_c(s) = i_n s^n + i_{n-1} s^{n-1} + \dots + i_0, \quad (21)$$

$$B_f(s) = k_r s^r + k_{r-1} s^{r-1} + \dots + k_0. \quad (22)$$

$$B_p(s) = k_d \quad (23)$$

where $\lambda < k$ and $m < k$. $B_p(s)$ is called as a pre-filter and must be assigned to be k_d so that the step response with zero steady-state error is obtained. The characteristic polynomial of the closed-loop system is then given as

$$\begin{aligned} P(s) &= A_c(s)A_p(s) + B_c(s)B_p(s) \\ &= a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ &= \sum_{i=0}^n a_i s^i \end{aligned} \quad (24)$$

where a_0, a_1, \dots, a_n are the coefficients of the characteristic polynomial. The stability index γ_i , the equivalent time constant τ and stability limit γ_i^* are defined as follows

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}} \quad (25)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (26)$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}}, \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (27)$$

where $i = 1, \dots, n-1$. In order to meet the specifications,

$$\tau_s = 2.5 - 3\tau \quad (28)$$

and

$$\gamma_i > 1.5\gamma_i^* \quad (29)$$

are chosen. In general, the equivalent time constant τ can be obtained from $\tau = \tau_s / 2.5$ according to (28) and the standard stability index γ_i is recommended as

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5. \quad (30)$$

The standard values stated in (30) can be used to design the controller if the following condition is satisfied

$$p_k / p_{k-1} > \tau / (\gamma_{n-1} \gamma_{n-2} \dots \gamma_1) \quad (31)$$

where p_k and p_{k-1} are the coefficients of the the plant at k^{th} and $(k-1)^{\text{th}}$. If the above condition is not satisfied, γ_{n-1} is first increased and then γ_{n-2} and so on, until (31) is satisfied. From (25)-(27), the coefficient a_i can be written by

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\gamma_{i-1} \gamma_{i-2} \dots \gamma_1} = a_0 \tau^i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \quad (32)$$

Then the characteristic polynomial used to design the parameters of a controller is expressed as

$$P(s) = a_0 \left[\prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{s}{\gamma_i \tau} \right) \right] + \tau s + 1 \quad (33)$$

By equating the characteristic polynomial (24) with a controller included to the characteristic polynomial (33), the parameters of the controller can be assigned.

4. CONTROLLER DESIGN

The controller design by CDM for the overhead crane system is described in this section. The controllers, namely PID, PD and PI controllers are designed independently and employed to control the trolley position, the load-swing angle and the hoisting rope length simultaneously. The block diagram of the multivariable control system is shown in Fig. 3

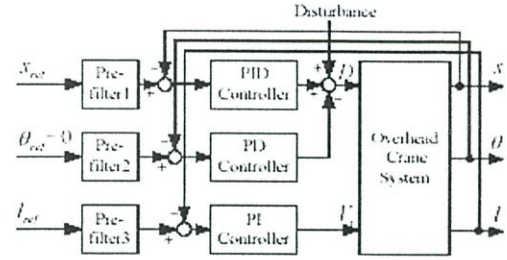


Fig. 3 The structure of multivariable control system

4.1 PID controller design

The polynomial forms of the conventional PID controller for trolley motion control of (16) which has the standard transfer function

$$G_{c1}(s) = K_{c1} \left(1 + \frac{1}{T_{i1}s} + T_{d1}s \right) \quad (34)$$

can be expressed as

$$B_{c1}(s) = k_d s^2 + k_p s + k_u$$

and

$$A_{c1}(s) = s,$$

where $k_d = K_{c1} T_{d1}$, $k_p = K_{c1}$ and $k_u = K_{c1} / T_{i1}$, and where K_{c1} is the proportional gain, T_{i1} is the integral time and T_{d1} is the derivative time. The values of k_d , k_p and k_u are then designed by the following procedures

- 1) Define the stability index γ_1 , γ_2 and the equivalent time constant τ
- 2) Derive the characteristic polynomial (24), which includes the PID controller parameters, and equate its polynomial to the characteristic polynomial obtained from (33). Then the values of k_d , k_p and k_u are obtained.
- 3) Set the pre-filter $B_{p1}(s) = k_u$

4.2 PD controller design

The standard transfer function of the conventional PD controller for controlling the swing angle of the load (17) is given by

$$G_{c2}(s) = K_{c2} (1 + T_{d2}s) \quad (35)$$

and its polynomial forms are

$$B_{c2}(s) = k_{d2}s + k_{p2}$$

and

$$A_{c2}(s) = 1.$$

where $k_{pv} = K_{pv}$ and $k_{dv} = K_{dv}T_{dv}$, and where K_{pv} is the proportional gain and T_{dv} is the derivative time. In this case, the equivalent time constant τ cannot be achieved by specifying the settling time t_s . Therefore, the values of k_{pv} and k_{dv} are designed by the following procedures.

- 1) Define the equivalent time constant τ as a variable after choosing the proper values of the stability index γ_2 and γ_1 .
- 2) Derive the characteristic polynomial (24), which includes PD controller parameters, and equate its polynomial to the characteristic polynomial obtained from (33). Thus the values of k_{pv} , k_{dv} and τ are obtained.
- 3) Set the pre-filter $B_{pv}(s) = k_{pv}$.

4.3 PI controller design

The standard transfer function of the conventional PI controller for hoisting rope length control of (18)

$$G_{ci}(s) = K_{ci} \left(1 + \frac{1}{T_{ci}s} \right) \quad (36)$$

can be rewritten in the polynomial forms as

$$B_{ci}(s) = k_{pi}s + k_{di}$$

and

$$A_{ci}(s) = s$$

where $k_{pi} = K_{ci}$ and $k_{di} = K_{ci}T_{ci}$, and where K_{ci} is the proportional gain and T_{ci} is the integral time. As the equivalent time constant τ cannot be achieved by specifying the settling time t_s , the values of k_{pi} and k_{di} are therefore designed by the following procedures.

- 1) Define the equivalent time constant τ as a variable after choosing the proper values of the stability index γ_2 and γ_1 .
- 2) Derive the characteristic polynomial (24), which includes PI controller parameters, and equate its polynomial to the characteristic polynomial obtained from (33). Thus the values of k_{pi} , k_{di} and τ are obtained.
- 3) Set the pre-filter $B_{ci}(s) = k_{di}$.

5. SIMULATION RESULTS

The parameters of PID, PD and PI controllers for the overhead crane system are found first. Then, simulations have been carried out with MATLAB for verifying the performance of the proposed multivariable control system. The parameters used in the simulation are shown in Table 1.

The specification for designing the PID controller to control the trolley position is that the settling time t_s of the closed-loop system is 12 seconds. In this simulation, the stability indices $\gamma_1 = 4$ and $\gamma_2 = 4$ are utilized and the equivalent time constant τ is assigned from $t_s/3$. Therefore, the equivalent time constant τ becomes 4 seconds. The values of the standard stability indices $\gamma_2 = 2$ and $\gamma_1 = 2.5$, and $\gamma_2 = 2$ and $\gamma_1 = 4$ are chosen for designing the parameters of the PD and PI controllers, respectively. From the design steps described in section 4, the parameters of PID, PD and PI controllers are summarized in Table 2.

Table 1 Parameters of the overhead crane system

Mass of trolley (M)	6.12 kg
Mass of load (m)	0.3 kg
Rope length (l)	0.9 m
Gravitation acceleration (g)	9.8 m/sec ²
Viscous damping coefficient of motion (b_m)	12.32 N sec/m
Viscous damping coefficient of hoist (b_h)	3 N sec/m
Force constant of motion (K_v)	0.57024
Force constant of hoist (K_f)	2.135

Table 2 Parameters of the controllers

Controller	γ_1	γ_2	τ (sec)	K_c	T_i	T_d
PID	4.0	4.0	4.00	43.21	4.0	0.50
PD	2.5	2.0	0.80	70.10	-	0.56
PI	4.0	2.0	0.83	7.03	0.8	-

The specification for controlling the overhead crane system is that to control the trolley moving from 0 m to 1 m with small load-swing angle while the hoisting rope length moving from initial length of 1 m to 0.5 m and then return back to 1 m again. The simulation results are shown in Fig. 4.

It is seen from Fig. 4(a) and 4(c) that the PID and PI controllers respectively control the trolley position and hoisting rope length as desired. There are no overshoot p_s and steady-state error. It is also seen from Fig. 4(b) that the PD controller can reduce the swing angle of the load and the angle reaches to zero ($\theta = 0$) rapidly.

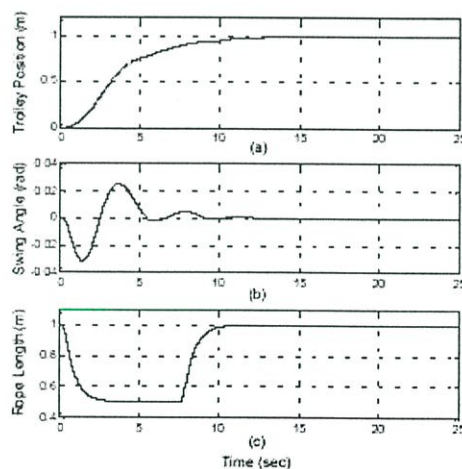


Fig. 4 Simulation results of closed-loop system (load 0.3kg). (a) trolley position, (b) load-swing angle, (c) hoisting rope length.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

The experiments have been performed with a miniature of a overhead crane system shown in Fig. 5 in order to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme. A DC servomotor and a DC geared-motor are used to turn a drive toothed-belt to

move the crane trolley and to lift the load respectively. The load angle is detected by a rotary encoder attached to a small stainless rod. The position of trolley and the rope length are also detected by rotary encoders. The controllers are implemented digitally using C language on PC unit equipped with suitable I/O interface. The trolley has a maximum travel range of 1.7 m and a working length of the rope is 1 m.

The three controllers designed are implemented to control the overhead crane system shown in Fig. 6 by using the same control specifications stated in section 5. The similar results of Fig. 4 can be obtained and are shown in Fig. 6. It is noticed that the small load-swing angle can be achieved by experiment.

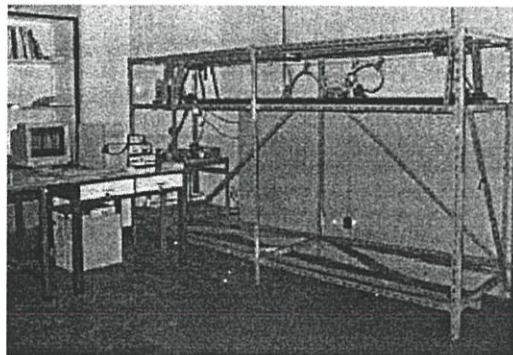


Fig. 5 Structure of overhead crane system.

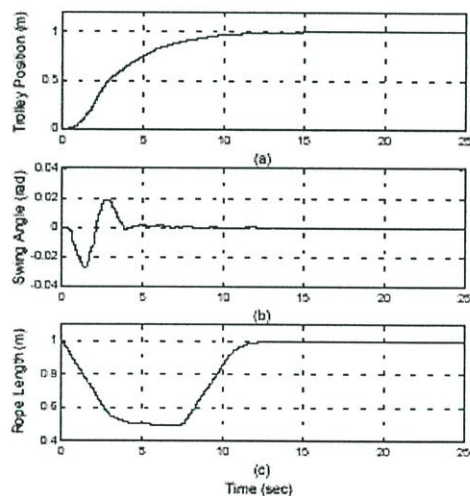


Fig. 6 Experimental results of closed-loop system (load 0.3kg): (a) trolley position, (b) load-swing angle, (c) hoisting rope length.

The speed of trolley movement can be increased by decreasing the equivalent time constant τ from 4 seconds to 3 seconds and to 2 seconds while keeping the previous values of stability indices γ_1 and γ_2 . The experimental results of closed-loop system are shown in Fig. 7.

It is seen from Fig. 7 that smaller value of the equivalent time constant τ is the faster speed of trolley movement becomes as shown in Fig. 7(a). However, it is seen from Fig. 7

(b) that the small overshoot occurs and amplitude of the load-swing angle is larger when the speed of the response increases. The parameters of PID controller and the performance of trolley motion control system according to the variation of τ can be summarized in Table 3.

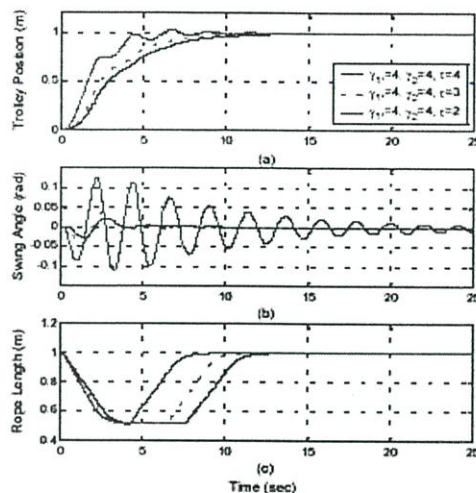


Fig. 7 Experiment results of closed-loop system (load 0.3kg): (a) trolley position, (b) load-swing angle, (c) hoisting rope length.

Table 3 PID controller parameters and system performances.

τ (sec)	K_c	T_i (sec)	T_d (sec)	t_r (sec)	t_s (sec)	P_o (%)
4	43.21	4	0.500	7.04	12.86	0.00
3	76.82	3	0.469	5.33	9.42	0.00
2	172.84	2	0.375	6.58	9.40	1.02

The coefficient diagrams of closed-loop system for trolley movement when the values of the equivalent time constant τ varied are also shown in Fig. 8. When the curve is more left-end down, the system becomes fast response [4] but the amplitude of load-swing angle is increased accordingly.

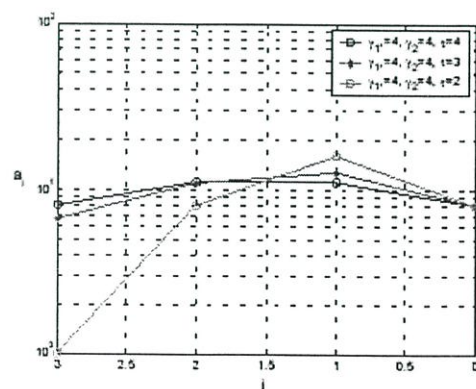


Fig. 8 Coefficient diagram of the trolley movement control

6.1 Effect of load variation

In this subsection, the PID, PD and PI controllers are used to control the overhead crane system when the load is varied without redesigning these controllers. The mass of the load is varied from 0.3 kg to 1 kg. The experimental results of the overhead crane system are shown in Fig. 9. It is seen that the system is still stable. It can also be observed from the Fig. 9(b) that when the mass of the load increased, the oscillation amplitude of load-swing angle is increased.

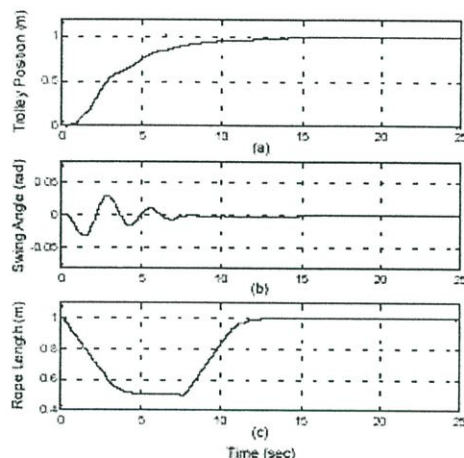


Fig. 9 Experimental results of closed-loop system (load 1kg), (a) trolley position, (b) load-swing angle, (c) hoisting rope length.

6.2 Step input disturbance

In order to demonstrate the effectiveness of the PID, PD and PI controllers, the controllers are implemented to control the overhead crane system without redesign. The step-input disturbance entering to the system at 20 seconds is employed in the experiments. The experimental results are shown in Fig. 10.

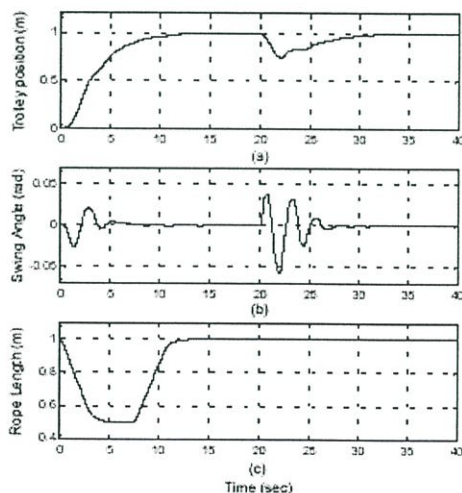


Fig. 10 Experimental results of closed-loop system with step input disturbances, (a) trolley position, (b) load-swing angle, (c) hoisting rope length.

It is seen from Fig. 10(a) and 10(c) that the PID and PI controllers can properly control the overhead crane system without overshoot P_o and steady-state error. The PD controller can suppress the load-swing angle and the effects of step input disturbance can be completely rejected as shown in Fig. 10(a) and 10(b).

7. CONCLUSIONS

The controllers namely PID, PD and PI controllers designed by CDM have been proposed to the multivariable control of the overhead crane system. These controllers have been used to control the trolley position, swing angle of the load and hoisting rope length, respectively. It has been shown that the parameters of the PID, PD and PI controllers can be properly designed. From the simulation and experimental results, the multivariable control of overhead crane system are satisfactory. Furthermore, the disturbance rejection can be achieved. It has also been demonstrated the effectiveness of the three controllers that the controllers can also be applied to control the overhead crane system when the mass of the load is varied without adjusting their controller parameters.

ACKNOWLEDGMENTS

This research work is partially supported by the Japan International Cooperation Agency (JICA).

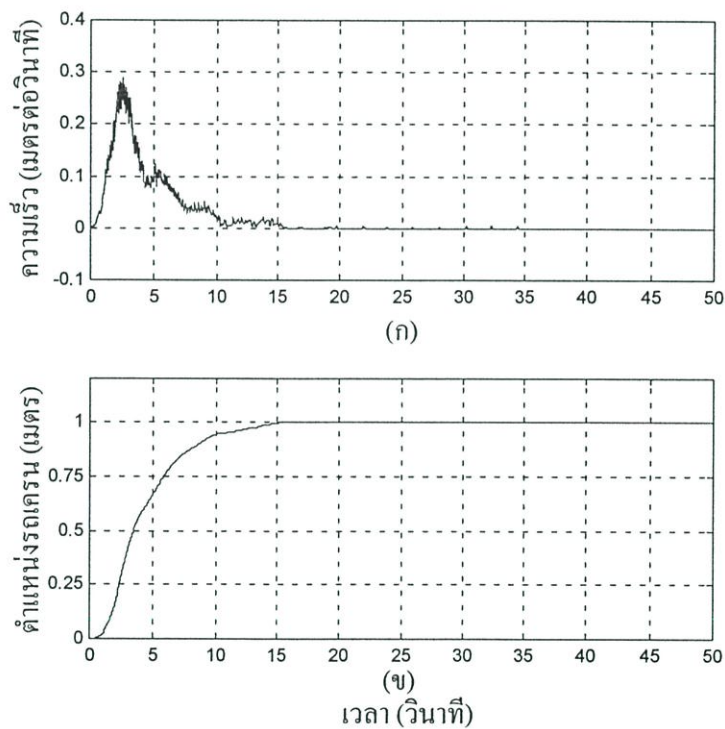
REFERENCES

- [1] Yuzo Suzuki, Shin-ichi Yamada and Hideji Fukikawa, "Anti-Swing Control of the Container Crane by Fuzzy Control," *Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation*, vol. 1, pp. 230-235, 1993.
- [2] Hans Butler, ger Honderd and Job Van Amerongen, "Model reference adaptive control of a gantry crane scale model," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 11, Issue. 1, pp 57-62, 1991.
- [3] S.U. Choi, J.H. Kim, J.W. Lee, Y.J. Lee and K.S. Lee, "A Study on Gantry Crane Control using Neural Network Two Degree of PID Controller," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 1896-1900, 2001.
- [4] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, 1998.

ภาคผนวก ง.
การทดลองเพิ่มเติม

ง.1 ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครนและการดึงเชือกสลิง

การทดลองนี้จะนำตัวควบคุมพีไอดีมาควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน ตัวควบคุมพีดีมาลดมุมแกว่งของภาระและตัวควบคุมพีไอมาควบคุมความยาวของเชือกสลิงในเวลาเดียวกัน โดยกำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตร โดยมีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 12 วินาที ในขณะเดียวกันก็ลดมุมแกว่งของภาระให้อยู่ในขอบเขต ± 0 . เรเดียน พร้อมกับควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 1 เมตร ไปยัง 0.6 เมตรและกลับมาที่ความยาว 1 เมตรอีกครั้งเมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสามจะใช้ในตารางที่ 5.2 แต่เนื่องจากการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครนและการดึงเชือกสลิง ดังนั้น จะแสดงเฉพาะผลการทดลองการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ ง.1 และผลการทดลองการควบคุมความยาวของเชือกสลิงแสดงดังรูปที่ ง.2

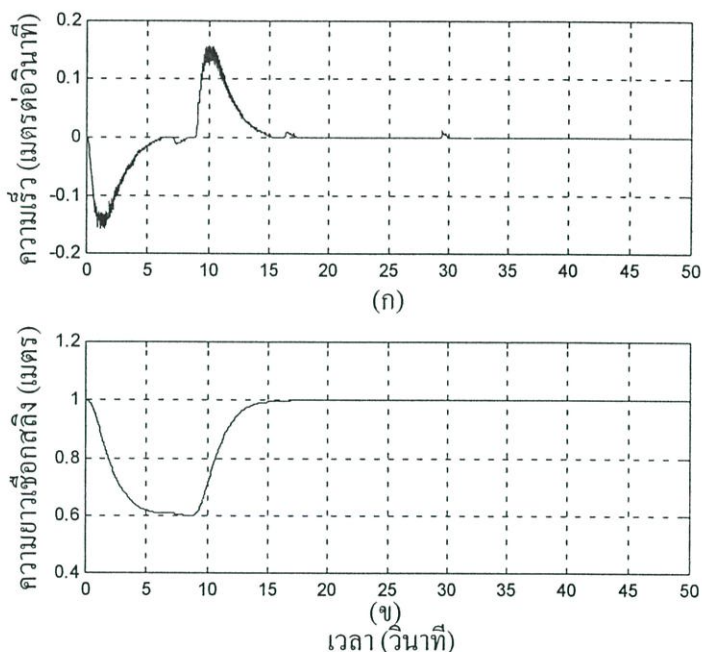


(ก) ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน (ข) ตำแหน่งของรถเครน

รูปที่ ง.1 ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน

เมื่อพิจารณารูปที่ ง.1 (ก) พบว่ารถเครนมีความเร็วเพิ่มมากขึ้นเมื่อตำแหน่งของรถเครนห่างจากตำแหน่งเป้าหมาย(1 เมตร)มาก และเมื่อรถเครนเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมายมากขึ้น ความเร็วของรถเครนก็จะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้วจะทำให้ความเร็วของรถเครนนั่นเป็นศูนย์ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีจะทำการคำนวณสัญญาณควบคุม D_i ที่เหมาะสมเพื่อให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีช่วงเวลาเข้า

ที่ใกล้เคียงกับช่วงเวลาที่กำหนด(12 วินาที) ในขณะที่เดียวกันก็ควบคุมให้ผลตอบสนองของรถครนไม่มีค่าพุ่งเกิน และในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณารูปที่ ง.2 (ก) พบว่าความเร็วที่ใช้ในการดึงเชือกสลิงจะมีความเร็วเพิ่มมากขึ้นเมื่อความยาวของเชือกสลิงห่างจากความยาวเป้าหมาย(0.6 เมตร)มาก และเมื่อเชือกสลิงมีความยาวเข้าใกล้ความยาวเป้าหมายจะทำให้ความเร็วในการดึงเชือกสลิงลดลงจนกระทั่งเชือกสลิงมีความยาวเท่ากับความยาวเป้าหมายซึ่งจะทำให้ความเร็วในการดึงเชือกสลิงนั้นเป็นศูนย์ เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวควบคุมพีไอจะทำการคำนวณสัญญาณควบคุม V_i ที่เหมาะสมเพื่อให้เชือกสลิงมีความยาวตามที่กำหนดไว้โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว



(ก) ความเร็วที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง (ข) ความยาวของเชือกสลิง

รูปที่ ง.2 ความเร็วที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง

ง.2 การทดลองเพื่อหาค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง

ต่อไปจะทำการทดลองหาค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจริงในการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และความยาวของเชือกสลิง โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือตลับเมตร ซึ่งการทดลองมีดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1

ควบคุมตำแหน่งของรถครนจากตำแหน่ง 0 เมตร ไปยังตำแหน่ง 1.5 เมตร แล้ววัดค่าผิดพลาดของระยะทางที่เกิดขึ้น ในขณะที่เดียวกันก็ควบคุมความยาวของเชือกสลิงจากความยาว 1 เมตร

ไปยังความยาว 0.6 เมตรแล้ววัดค่าผิดพลาดของความยาวเชือกสลิงที่เกิดขึ้น โดยจะทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้งเพื่อดูค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ผลการทดลองแสดงดังตาราง ง.1

ตารางที่ ง.1 ผลการทดลองที่ 1

การทดลอง ครั้งที่	ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของรถเครนตำแหน่ง 0 เมตร ไปยัง 1.5 เมตร (มิลลิเมตร)	ค่าผิดพลาดของการควบคุมความยาวเชือกสลิง จากความยาว 1 เมตร ไปยัง 0.6 เมตร (มิลลิเมตร)
	1	1.5
2	2	2
3	3	1.5
4	2.5	1
5	2	1.5
ค่าเฉลี่ย	2.2	1.4

การทดลองที่ 2

การทดลองนี้ จะแบ่งการควบคุมออกเป็น 2 จังหวะคือ จังหวะแรกจะควบคุมตำแหน่งของรถเครนจากตำแหน่ง 0 เมตรไปยังตำแหน่ง 1 เมตร ในขณะที่เดียวกันก็ควบคุมความยาวเชือกสลิงจาก 1 เมตร ไปยัง 0.8 เมตรแล้วบันทึกค่าผิดพลาดของระยะทางและความยาวเชือกสลิงที่เกิดขึ้น และจังหวะที่สองจะควบคุมรถเครนให้เคลื่อนที่ต่อไปยังตำแหน่ง 1.5 เมตร พร้อมกับควบคุมความยาวเชือกสลิงต่อไปที่ความยาว 0.6 เมตรแล้วบันทึกค่าผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวของเชือกสลิงอีกครั้งหนึ่ง ผลการทดลองการควบคุมทั้งสองจังหวะแสดงดังตารางที่ ง.3 โดยจะทำการทดลองซ้ำกัน 5 ครั้งเพื่อดูค่าผิดพลาดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น

ตารางที่ ง.2 ผลการทดลองที่ 2

การ ทดลอง ครั้งที่	ค่าผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของรถเครน (มิลลิเมตร)			ค่าผิดพลาดของความยาวเชือกสลิง (มิลลิเมตร)		
	(0 ถึง 1) เมตร	(1 ถึง 1.5) เมตร	ค่าผิดพลาดรวม	(1 ถึง 0.8) เมตร	(0.8 ถึง 0.6) เมตร	ค่าผิดพลาดรวม
1	1.5	2	3.5	1.5	1	2.5
2	2	1	3	1	1.5	2.5
3	1.5	1	2.5	1	1.5	2.5
4	2.5	1.5	4	1.5	2	3.5
5	2	2	4	1	1	2
ค่าเฉลี่ย	1.9	1.5	3.4	1.2	1.6	2.6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองที่ 1 พบว่า ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครนที่เคลื่อนที่จาก 0 เมตรไปยังตำแหน่ง 1.5 เมตรในการเคลื่อนที่จังหวะเดียวและในการเคลื่อนที่สองจังหวะ (การเคลื่อนที่สองจังหวะ คือจังหวะแรก ควบคุมจากตำแหน่ง 0 เมตร ไปที่ตำแหน่ง 1 เมตร แล้วหยุด จากนั้นจึงควบคุมให้เคลื่อนที่ต่อไปโดยเคลื่อนที่จาก 1 เมตรไปยังตำแหน่ง 1.5 เมตรเป็นจังหวะที่สอง) มีค่าน้อยมากคือ 2.8 มิลลิเมตร หรือ 0.187 เปอร์เซ็นต์ของระยะทางเป้าหมาย (0 เมตร ถึง 1.5 เมตร)

และจากผลการทดลองที่ 2 พบว่า ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของความยาวเชือกสลิงที่ดึงจากความยาว 1 เมตรไปยัง 0.6 เมตรในการดึงเชือกสลิงจังหวะเดียวและในการดึงเชือกสลิงสองจังหวะ (การดึงเชือกสลิงสองจังหวะ คือ จังหวะแรก จะควบคุมจากความยาว 1 เมตรไปที่ 0.8 เมตรแล้วหยุด จากนั้นจึงควบคุมให้ดึงขึ้นต่อไป โดยดึงจากความยาว 0.8 เมตรขึ้นไปยัง 0.6 เมตรเป็นจังหวะที่สอง) มีค่าน้อยคือ 2 มิลลิเมตรหรือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ของความยาวที่ใช้ดึง (1 เมตร ถึง 0.6 เมตร) โดยจะเห็นว่าค่าผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงของการทดลองทั้งสองมีค่าน้อย ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ ดันตรระวรศิลป์ เกิดเมื่อวันที่ 18 สิงหาคม พ.ศ. 2522 ที่ตำบลคอนแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนปรินส์รอยแยลส์วิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) จากวิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 2540 และระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพจังหวัดเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 2542 หลังจากนั้น เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรีที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) และสำเร็จการศึกษาดุษฎีบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ในปี พ.ศ. 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะบัณฑิตวิทยาลัย สจล. ในขณะที่ศึกษาอยู่ ณ สจล. ได้รับการคัดเลือกเป็นนักกีฬาเทนนิสตัวแทนของสถาบันเข้าแข่งขันกีฬามหาวิทยาลัย และได้เข้าร่วมการแข่งขัน Micro Robot Maze Contest ณ เมืองนาโกยา ประเทศญี่ปุ่น