

การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวแบบอนาล็อกสเตตกร่วมกับออปโตเซอร์เวอ์แบบ
อันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ

CDM BASED SERVO STATE FEEDBACK CONTROLLER WITH
MINIMUM-ORDER OBSERVER FOR OVERHEAD CRANE SYSTEM

สันติ สุวรรณ
SANTI SUWAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นโดยผู้ศึกษาเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัย

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตศึกษาระดับ

ศึกษานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

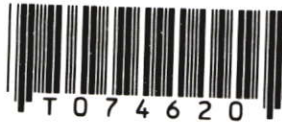
พ.ศ. ๒๕๕๐

KMITL-2007-EN-M-080-004

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบ
อันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ**

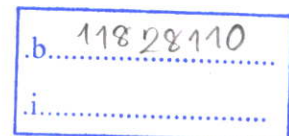
**CDM BASED SERVO STATE FEEDBACK CONTROLLER WITH
MINIMUM-ORDER OBSERVER FOR OVERHEAD CRANE SYSTEM**



สันติ ภูวรรณ

SANTI PUWAN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74620
วัน,เดือน,ปี..... - 8 ต.ค. 2550



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-080-004

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออปเซอร์เวอร์
แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ
CDM Based Servo State Feedback Controller with Minimum-Order Observer
for Overhead Crane System






นักศึกษา นายสันติ ภูวรรณ

รหัสประจำตัว 48060509

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จกกล งามวิวิทย์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	วีรุจา	
รศ.ดร.โยธิน	เปรมปราณีรัชต์	
รศ.สุมาลี	อุณหวนิชย์	
รศ.ประสิทธิ์	จุตเสวีวงศ์	
รศ.ดร.จกกล	งามวิวิทย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 26 กรกฎาคม 2550 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-404)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๒๙.....เดือน.....สิงหาคม.....พ.ศ. ๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครนเหนือสี่ระยะ
นักศึกษา	นาย สันติ ภูวรรณ
รหัสนักศึกษา	48060509
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบควบคุม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. จงกล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสำหรับระบบเครนเหนือสี่ระยะเพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครน และมุมการแกว่งของภาระ โดยค่าของอัตราขยายเซอร์โวป้อนกลับสเตตและอัตราขยายออบเซอร์เวอร์จะคำนวณหาจากแบบจำลองเชิงเส้นของระบบโดยใช้แนวคิดของวิธี CDM จากผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนถึงตำแหน่งเป้าหมายได้โดยมีมุมแกว่งของภาระน้อย

นอกจากนี้ เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยน ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดผลกระทบของสิ่งรบกวน

Thesis Title	CDM Based Servo State Feedback Controller with Minimum-order Observer for Overhead Crane System
Student	Mr. Santi Puwan
Student ID.	48060509
Degree	Master of Engineering
Program	Control Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit

ABSTRACT

This thesis presents the servo state feedback controller with minimum-order observer designed for crane system for controlling the cart position and load swing angle. The servo state feedback gain and observer gain are obtained based on the linearized model of the crane system employing the concept of coefficient diagram method. The experiments show that the proposed controller can control the cart moving to the desired position while the load swing angle can be kept sufficiently small. The crane control system can maintain its efficiency even when the parameter of crane system is varied and reduce the effect of disturbance.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จกมล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความสนใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ถาวร เบญจนราสุทธิ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแก่ผู้เขียนเสมอมา ทำให้ผู้เขียนเข้าใจปัญหานั้นๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ คอน อิศรากร และอาจารย์ สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

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

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ คุณตา คุณยาย ที่รักและเคารพ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาจนสามารถนำสิ่งต่างๆที่ได้รับมานั้นจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สันติ ภูววรรณ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 ระบบเกรน.....	4
2.1 ชนิดของเกรน.....	4
2.1.1 เกรนชนิดแกนตรี	4
2.1.2 เกรนชนิดโรตารี	4
2.1.3 เกรนชนิดนวมส์	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเกรนเหนือศีรษะ	7
บทที่ 3 วิธี CDM.....	10
3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ CDM	10
3.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน.....	11
3.3 พหุนามคุณลักษณะ	12
3.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM.....	13
3.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM	15
3.6 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM.....	16
3.7 แพนฟังก์ค่าสัมประสิทธิ์.....	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM และการสร้างตัวควบคุม	19
4.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ	19
4.2 การออกแบบตัวควบคุม	20
4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต.....	20
4.2.2 การออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด	23
บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม	27
5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ	27
5.2 การควบคุมระบบครนเหนือศีรษะ.....	28
5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับ ต่ำสุดสำหรับระบบครนเหนือศีรษะ	28
5.4 ผลการจำลอง.....	29
5.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น	29
5.4.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ.....	32
5.4.2.1 มวลของภาระเปลี่ยนแปลง	32
5.4.2.2 ความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลง	34
5.5 ผลการทดลอง	36
5.5.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น	36
5.5.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ.....	39
5.5.2.1 มวลของภาระเปลี่ยนแปลง	39
5.5.2.2 ความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลง	41
5.5.3 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....	43
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
6.1 บทสรุป	45
6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา.....	45
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	46
ภาคผนวก.....	47
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	48
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการทดลอง.....	58
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	69
ประวัติผู้เขียน.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ระหว่างสมการสเตคออกเชอร์เวอร์แบบอันดับเต็มและต่ำสุด.....25
5.1	พารามิเตอร์ระบบเครอนเหนือศีรษะที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม.....29
5.2	พารามิเตอร์ของตัวควบคุม.....29

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เกรนชนิดแกนตรี.....5
2.2	เกรนชนิดโรตารี.....5
2.3	เกรนชนิดบูมส์.....6
2.4	แบบจำลองของระบบเกรนเหนือศีรษะ.....7
3.1	โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO.....11
3.2	ตำแหน่งโพลของระบบอันดับต่างๆ.....16
3.3	แผนผังค่าสัมประสิทธิ์.....18
3.4	ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีเสถียรภาพ และค่าคงตัวเวลาสมมูล18
4.1	โครงสร้างของระบบควบคุมเกรนเหนือศีรษะ.....19
4.2	โครงสร้างของระบบควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต.....20
4.3	โครงสร้างของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด.....23
5.1	โครงสร้างของระบบเกรนเหนือศีรษะ.....27
5.2	บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบเกรนเหนือศีรษะ.....28
5.3	ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....30
5.4	สัญญาณควบคุม.....31
5.5	สเตตที่ประมาณค่าได้.....31
5.6	ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....32
5.7	สัญญาณควบคุม.....33
5.8	สเตตที่ประมาณค่าได้.....33
5.9	ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเชือกสลิง.....34
5.10	สัญญาณควบคุม.....35
5.11	สเตตที่ประมาณค่าได้.....35
5.12	ภาพถ่ายระบบเกรนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ.....36
5.13	ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น.....37
5.14	สัญญาณควบคุม.....38
5.15	สเตตที่ประมาณค่าได้.....38
5.16	ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ.....39
5.17	สัญญาณควบคุม.....40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.18 สเตตที่ประมาณค่าได้.....	40
5.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเชือกสลิง.....	41
5.20 สัญญาณควบคุม.....	42
5.21 สเตตที่ประมาณค่าได้.....	42
5.22 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อภาระถูกรบกวน.....	43
5.23 สัญญาณควบคุม.....	44
5.24 สเตตที่ประมาณค่าได้.....	44
ก.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM.....	49
ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตฐาน 16 กับสัญญาณ PWM.....	50
ก.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรนับจำนวนพัลส์.....	50
ก.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิทช์.....	51
ก.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด.....	51
ก.6 รายละเอียดของวงจรนับจำนวนพัลส์ภายใน ISA การ์ด.....	52
ก.7 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ.....	53
ก.8 ภาพถ่ายวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	53
ก.9 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์ต่อการหมุนเอน โคคเตอร์ 1 รอบ.....	54
ก.10 การติดตั้งเอน โคคเตอร์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน.....	55
ก.11 การติดตั้งเอน โคคเตอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ.....	55
ก.12 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเครน.....	56
ก.13 ภาพถ่ายภาระที่ใช้ในการทดลอง.....	57
ก.14 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการดึงภาระ.....	57

คำย่อและสัญลักษณ์

a_i	หมายถึง	ค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ
A	หมายถึง	เมตริกซ์ระบบ
A_s	หมายถึง	เมตริกซ์ระบบของระบบแต่งเสริม
$A_c(s)$	หมายถึง	ตัวส่วนพหุนามของตัวควบคุม
$A_p(s)$	หมายถึง	ตัวส่วนพหุนามของกระบวนการ
b_m	หมายถึง	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการเคลื่อนที่
$B_a(s)$	หมายถึง	พรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม
$B_c(s)$	หมายถึง	ตัวเศษพหุนามของตัวควบคุม
$B_p(s)$	หมายถึง	ตัวเศษพหุนามของกระบวนการ
B	หมายถึง	เมตริกซ์อินพุต
B_s	หมายถึง	เมตริกซ์อินพุตของระบบแต่งเสริม
C	หมายถึง	เมตริกซ์เอาต์พุต
D_i	หมายถึง	สัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน
$e(t)$	หมายถึง	เวกเตอร์ความผิดพลาด
F	หมายถึง	แรงที่ทำให้รถเครนเคลื่อนที่
F	หมายถึง	เมตริกซ์อินพุตของระบบแต่งเสริม
g	หมายถึง	ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก
H	หมายถึง	เมตริกซ์เอาต์พุตของตำแหน่งรถเครน
H_s	หมายถึง	เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบแต่งเสริมตำแหน่งรถเครน
I	หมายถึง	เมตริกซ์เอกลักษณ์
k_i	หมายถึง	ค่าอัตราขยายตัวอินทิเกรเตอร์
K_m	หมายถึง	ค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน
K_r	หมายถึง	ค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน
K	หมายถึง	เมตริกซ์อัตราขยายการป้อนกลับสเตต
K_e	หมายถึง	เมตริกซ์อัตราขยายออปเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด
K_s	หมายถึง	เมตริกซ์อัตราขยายของระบบแต่งเสริม
l	หมายถึง	ความยาวเชือกสลิง
m	หมายถึง	มวลของภาระ

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

M	หมายถึง มวลของรถเครน
\mathbf{M}	หมายถึง เมตริกซ์ความควบคุมได้
$P(s)$	หมายถึง พหุนามคุณลักษณะ
$r(t)$	หมายถึง ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครน
t_s	หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่
T	หมายถึง เวลาชักตัวอย่าง
T_m	หมายถึง แรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน
\mathbf{T}	หมายถึง เมตริกซ์การแปลง
u	หมายถึง สัญญาณควบคุม
x	หมายถึง ตำแหน่งของรถเครน
\dot{x}	หมายถึง ความเร็วของรถเครน
x_m	หมายถึง ตำแหน่งของภาระ
$\mathbf{x}(t)$	หมายถึง สเตตของระบบ
$\mathbf{x}_s(t)$	หมายถึง สเตตของระบบแต่่งเสริม
$\mathbf{x}_a(t)$	หมายถึง สเตตของระบบที่สามารถวัดค่าได้โดยตรง
$\mathbf{x}_b(t)$	หมายถึง สเตตของระบบที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง
$y(t)$	หมายถึง สัญญาณเอาต์พุต
$\bar{y}(t)$	หมายถึง เอาต์พุตตำแหน่งของรถเครน
θ	หมายถึง มุมแกว่งของภาระ
$\dot{\theta}$	หมายถึง ความเร็วเชิงมุมของภาระ
$\xi(t)$	หมายถึง ตัวแปรสเตตค่าผิดพลาดของตำแหน่งรถเครน
τ	หมายถึง ค่าคงตัวเวลาสมมูล
γ_i	หมายถึง ค่าครรชนีเสถียรภาพ
γ_i^*	หมายถึง ค่าจำกัดเสถียรภาพ
ζ	หมายถึง อัตราส่วนการหน่วง
δ_n	หมายถึง สัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิด
α_n	หมายถึง สัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดที่ได้รับการออกแบบแล้ว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ในงานอุตสาหกรรมที่มีการเคลื่อนย้ายสินค้าที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก สินค้านั้นจะถูกเคลื่อนย้ายด้วยระบบเครนเหนือศีรษะ ซึ่งในการควบคุมการเคลื่อนย้ายสินค้านั้นจะต้องมีความรวดเร็ว ปลอดภัยและไม่มีการแกว่ง ข้อสำคัญในการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อคือ ข้อแรกเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความแม่นยำ และข้อที่สองเป็นการควบคุมการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถเครนเคลื่อนที่ ซึ่งหากไม่มีการควบคุมระบบให้บรรลุวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ข้อแล้ว นอกจากจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ยังอาจทำให้เกิดอันตรายในการขนถ่ายสินค้า และสินค้าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนให้นำสินค้าไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และการลดการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถเครนเคลื่อนที่ จึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจและน่าศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำเสนอหลักการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) [1] ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (adaptive controller) [2] และตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาท (neural network controller) [3] ซึ่งวิธีการควบคุมแบบต่างๆ ที่กล่าวถึงนี้มีวิธีการออกแบบที่ค่อนข้างซับซ้อน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอหลักการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต (servo state feedback) ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (minimum order observer) ด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) [4] ซึ่งเป็นวิธีที่ออกแบบไม่ซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการออกแบบตัวควบคุม

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เป็นการออกแบบจากพหุนามคุณลักษณะ (characteristic polynomial) ของระบบวงรอบปิด (closed-loop system) ที่มีพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต้องการออกแบบรวมอยู่ด้วย โดยกำหนดสมรรถนะได้จากค่าเสถียรภาพ (stability index: γ_i) ซึ่งเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบควบคุม และกำหนดจากค่าคงตัวเวลาสมมูล (equivalent time constant: τ) ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม

ระบบเครนเหนือศีรษะเป็นระบบที่มีตัวแปรหลายตัวและเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น [5] โดยทั่วไปของระบบเครนเหนือศีรษะที่อยู่ในรูปของปริภูมิสเตต (state space form) ที่เป็นระบบเชิงเส้นนั้น จะมีตัวแปรสเตตสี่ตัว ($x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}$) โดยมีสองตัวแปร ($\dot{x}, \dot{\theta}$) ที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ซึ่งจะใช้ออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดทำหน้าที่ประมาณ (estimate) ตัวแปรเหล่านี้และใช้ตัว

ควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้สู่ตำแหน่งเป้าหมายโดยไม่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัว (steady-state error) และมีมุมแกว่งของภาระน้อย

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบเครนเหนือศีรษะและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อให้เกิดความเข้าใจโครงสร้างและการทำงานต่างๆของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ

2. ศึกษาและทำความเข้าใจนิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับวิธี CDM ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ

3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจะช่วยในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน คือ โปรแกรมแมตแล็บ (Matlab) และสร้างตัวควบคุมจากโปรแกรมภาษาซี (C language) เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของระบบเครนในห้องปฏิบัติการ

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 วัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายระบบเครนชนิดต่างๆ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM ซึ่งประกอบด้วยบล็อกไดอะแกรมมาตรฐานของวิธี CDM โครงสร้างของระบบควบคุม ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับวิธี CDM และแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

บทที่ 4 อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด ด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะและการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบจริง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรมแมตแล็บช่วยในการออกแบบตัวควบคุม และโปรแกรมสำเร็จรูปบอร์แลนด์ซีพลัสพลัสเวอร์ชัน 5.02 (borland C++ version 5.02) ช่วยในการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5 นำเสนอการจำลองและการทดลองควบคุมระบบครนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 โดยจะนำเสนอผลการจำลองและผลการทดลองต่างๆ รวมถึงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุม

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการจำลอง และผลทดลอง พร้อมกันนั้นยังได้กล่าวถึงปัญหาที่พบในการศึกษาและวิจัยครั้งนี้ และในตอนท้ายยังได้เสนอแนวทางการศึกษาและพัฒนาต่อไปให้กับผู้ที่สนใจศึกษาการควบคุมการทำงานของครน

และในส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวกที่แสดงถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง แนวคิดการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการทดลอง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ระบบเครน

ระบบเครนเป็นระบบที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการขนย้ายวัตถุที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งระบบเครนจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพื่อใช้ยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงการนำระบบเครนมาใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกในงานก่อสร้างที่มีความสูงและต้องใช้เวลาในการทำงานมาก นอกจากนั้นระบบเครนถูกนำมาใช้บนเรือเดินทะเลและในท่าเทียบเรือ เพื่อช่วยประหยัดเวลาค่าใช้จ่ายในการขนถ่ายวัตถุหรือสินค้าต่างๆ ในการควบคุมการทำงานของระบบเครนที่ผ่านมานั้นจะควบคุมการทำงานด้วยมือ (manual operation) แต่ในปัจจุบันระบบเครนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความเร็วสูงซึ่งค่อนข้างยากที่จะควบคุมการทำงานด้วยมือ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการค้นคว้าหาวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ในการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะเพื่อนำสินค้าให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการและเพื่อให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2.1 ชนิดของเครน

ชนิดของเครนถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะการเคลื่อนที่และโครงสร้างทางพลวัต (dynamic) ได้ดังนี้

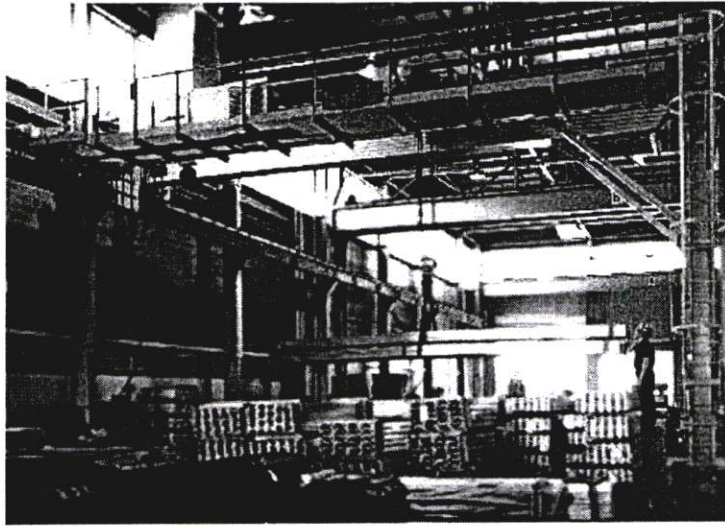
2.1.1 เครนชนิดแกนตริ (gantry crane)

โครงสร้างของเครนชนิดแกนตริที่แสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยส่วนของตัวรถเครน โดยจะเคลื่อนที่บนแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาซึ่งจะมีความแข็งแรงมาก ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนจะอธิบายได้ด้วยแบบจำลองหนึ่งระดับขั้นความเสรี (one-degree-of-freedom model) ซึ่งแกนเหล็กนี้บางครั้งจะมีลักษณะเป็นรางรถไฟขนานกันและติดตั้งอยู่ที่สูงด้วยลักษณะนี้บางครั้งจึงถูกเรียกว่า เครนชนิดบริดจ์ (bridge crane) หรือเครนเหนือศีรษะ (overhead crane) การเคลื่อนที่ของรถเครนจะเคลื่อนที่ในแนวนอน 2 ทิศทาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนต่ำและสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆ

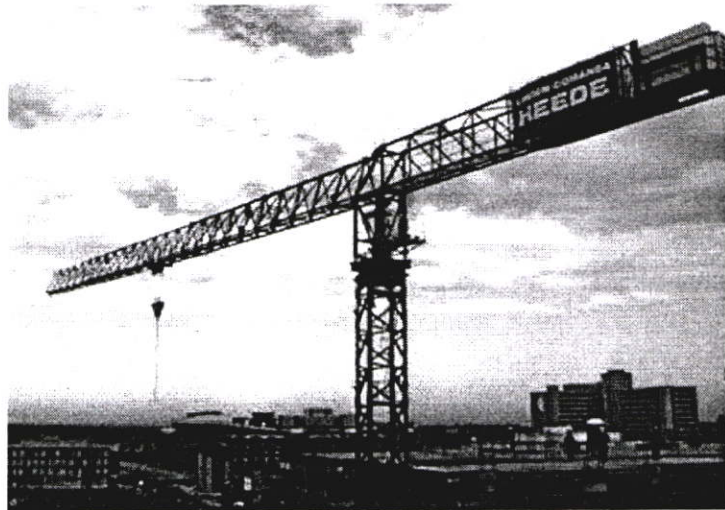
2.1.2 เครนชนิดโรตารี (rotary crane)

โครงสร้างของเครนชนิดโรตารีที่แสดงในรูปที่ 2.2 จะประกอบด้วยแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาสามารถหมุนรอบในแนวนอนได้ และจะมีรถเครนใช้สำหรับยกภาระ (load) โดยจะเคลื่อนที่อยู่บนแกนเหล็กยาว จากลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนและการหมุนของแกนเหล็กทำให้เครนชนิดนี้สามารถเคลื่อนย้ายภาระได้ทุกๆจุดในแนวนอนภายในขอบเขตของ

เครน ซึ่งในการยกภาระหรือวัตถุต่าง ๆ นั้น ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสายเคเบิลที่ติดตั้งอยู่ บริเวณแขนหรือฐานของเครนซึ่งเชื่อมต่อกับรถเครน



รูปที่ 2.1 เครนชนิดแกนต์รี

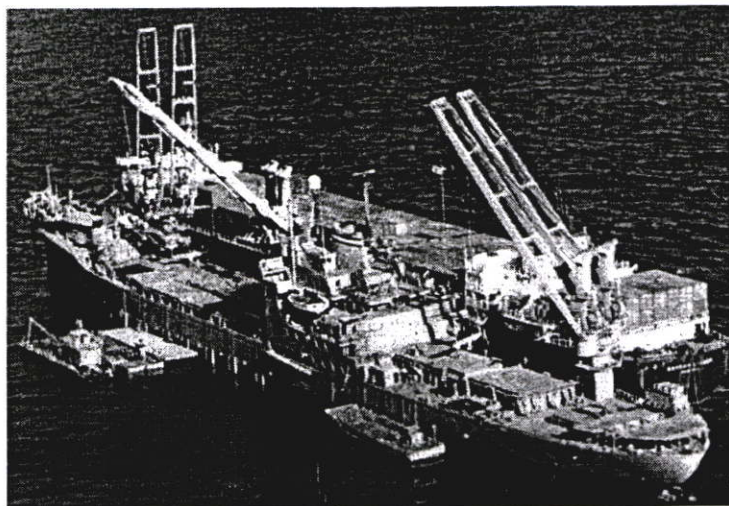


รูปที่ 2.2 เครนชนิดโรตารี

2.1.3 เครนชนิดบูมส์ (booms crane)

เครนชนิดบูมส์ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 นั้นเป็นเครนชนิดที่นิยมใช้บนเรือเดินทะเลและท่าเรือ โดยทั่วไปเครนชนิดบูมส์จะประกอบด้วยส่วนฐานที่สามารถหมุนได้ซึ่งยึดติดอยู่กับบูมส์ การเคลื่อนย้ายภาระสามารถทำได้โดยแขนไว้ที่ส่วนปลายของบูมส์ซึ่งจะถูกค้ำด้วยสายเคเบิล โดยมี ลูกกรอกช่วยในการดึงและเก็บสายเคเบิล และส่วนฐานของเครนชนิดนี้สามารถหมุนรอบและ

เคลื่อนที่ในแนวนอนได้ทุกจุดภายในเรือ โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์เหมาะสำหรับการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก ในขณะที่เครนชนิดแกนตรีและเครนชนิดโรตารีเหมาะสำหรับการยกภาระที่มีรูปทรงลักษณะต่างๆ ดังนั้น เมื่อต้องการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก เครนชนิดบูมส์จะมีความแข็งแรงมากกว่าเครนชนิดแกนตรีและเครนชนิดโรตารี



รูปที่ 2.3 เครนชนิดบูมส์

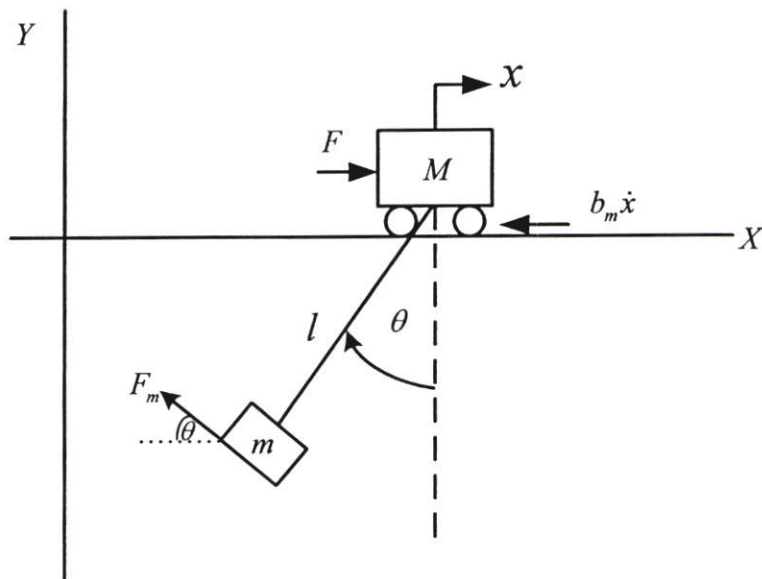
จากเครนทั้ง 3 ชนิด ที่ได้กล่าวมานั้น จะมีปัญหาในเรื่องโครงสร้างของระบบเครนคือ เครนมีขนาดใหญ่และสูง ดังนั้น ในการเคลื่อนย้ายภาระหรือสินค้าจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก การเคลื่อนที่ของรถเครนที่ใช้ดึงภาระจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมแกว่งของภาระดังนี้ หากรถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะทำให้เวลาในการเคลื่อนย้ายภาระน้อย แต่ภาระจะแกว่งมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ควบคุมเครนและภาระได้ ในทำนองเดียวกัน หากรถเครนเคลื่อนที่ช้าจะทำให้ภาระแกว่งน้อยทำให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัยมากขึ้น แต่จะใช้ระยะเวลาซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆ สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น ข้อสำคัญในการเคลื่อนย้ายภาระโดยใช้ระบบเครนจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อคือ ข้อแรก การควบคุมตำแหน่งของรถเครนเพื่อเคลื่อนย้ายภาระนั้นต้องมีความแม่นยำและใช้ระยะเวลาให้น้อยที่สุด และข้อที่สองจะต้องลดการแกว่งของภาระที่เกิดขึ้นขณะที่รถเครนเคลื่อนที่

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM เพื่อควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน และการแกว่งของภาระ เพื่อให้เคลื่อนย้ายภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีมุมแกว่งของภาระน้อยเพื่อให้เกิดความปลอดภัย ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM

นั้น จำเป็นต้องทราบโครงสร้างหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุมก่อน ดังนั้น หัวข้อต่อไปจะอธิบายการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ จะใช้กฎทางฟิสิกส์ ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวกในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบจำลองของระบบครนเหนื่อสี่ระยะที่แสดงดังรูปที่ 2.4 นั้นจะประกอบด้วยรถครนและภาวะ โดยรถครนสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางในแนวนอน ซึ่งจะเคลื่อนอยู่บนรางเหล็กที่วางขนานกัน และภาวะที่ถูกแขวนด้วยเชือกสลิง



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

- โดยที่ x คือ ตำแหน่งของรถครน (เมตร)
 x_m คือ ตำแหน่งของภาวะ (เมตร)
 θ คือ มุมแกว่งของภาวะ (เรเดียน)
 l คือ ความยาวเชือกสลิง (เมตร)
 M คือ มวลของรถครน (กิโลกรัม)
 m คือ มวลของภาวะ (กิโลกรัม)
 F คือ แรงที่ใช้ทำให้รถครนเคลื่อนที่ (นิวตัน)
 b_m คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการเคลื่อนที่

ดังนั้น สมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของตัวรถเรณดังกล่าวในรูปที่ 2.4 แสดงได้ดังสมการที่ (2.1) คือ

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= F - m\ddot{x}_m - b_m\dot{x} \\ x_m &= x - l \sin \theta \end{aligned} \quad (2.1)$$

โดยที่แรง F คือแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถเรณและมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$F = K_m T_m \cong K_r D_i \quad (2.2)$$

โดยที่ K_m คือค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเรณ T_m คือแรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเรณซึ่งมีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร D_i (duty cycle) คือค่าอินพุตที่ป้อนให้แก่วงจรขับกระแส เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์โดยจะมีค่าตั้งแต่ $0 - \pm 100$ เปอร์เซ็นต์ (แรงบิดของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ D_i คือ ถ้า D_i มีค่าเท่ากับ 100 % จะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด และถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นบวกจะทำให้รถเรณเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นลบจะทำให้รถเรณเคลื่อนที่ไปข้างหลัง) และ K_r คือค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเรณซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของมอเตอร์ K_m และอัตราการส่งกำลังของสายพานของระบบขับเคลื่อนรถเรณ และเมื่อแทนค่า F จากสมการที่ (2.2) ลงในสมการที่ (2.1) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเรณ

$$(M + m)\ddot{x} = K_r D_i - b_m\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2.3)$$

และจะได้สมการการแกว่งของภาระของระบบเรณเหนือศีรษะ

$$\begin{aligned} ml\ddot{\theta} &= -mg \sin \theta + F_m \\ F_m &= -m\ddot{x} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.4)$$

ตามลำดับ จากสมการการเคลื่อนที่ของรถเรณ (2.3) และสมการการแกว่งของภาระ (2.4) ที่ได้จัดรูปใหม่แล้วจะได้สมการของการเคลื่อนที่ของระบบเรณดังสมการที่ (2.5)

$$\begin{aligned} (M + m)\ddot{x} &= K_r D_i - b_m\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \\ l\ddot{\theta} &= -g \sin \theta - \ddot{x} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อระบบอยู่ในบริเวณจุดสมดุล $x(t)=0, \theta(t)=0, \dot{x}(t)=0$ และ $\dot{\theta}(t)=0$ จะได้ $\sin\theta \approx 0, \cos\theta \approx 1$ และ $\dot{\theta}^2(t) \approx 0$ ดังนั้นระบบเกรนเหนือศีรษะที่อยู่ในรูปปริภูมิสแตตเชิงเส้นเพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM คือ

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\tag{2.6}$$

โดยที่ $\mathbf{x}(t) = [x(t) \ \theta(t) \ \dot{x}(t) \ \dot{\theta}(t)]^T$ คือ ตัวแปรสแตต $\mathbf{y}(t)$ คือเอาต์พุตซึ่งประกอบด้วยตัวแปรของตำแหน่งรถเกรนและมุมแกว่งของภาระ และ

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{mg}{M} & \frac{-b_m}{M} & 0 \\ 0 & \frac{-(M+m)}{Ml} & \frac{b_m}{Ml} & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_r}{M} & -\frac{K_r}{Ml} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

ระบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเกรนเหนือศีรษะจะเป็นระบบที่มี 4 ตัวแปร ซึ่งเมื่อเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปเพื่อกำจัดค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัวของตำแหน่งรถเกรน จะทำให้เป็นระบบ 5 ตัวแปร สำหรับการออกแบบตัวควบคุมจะกล่าวโดยละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3

วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์

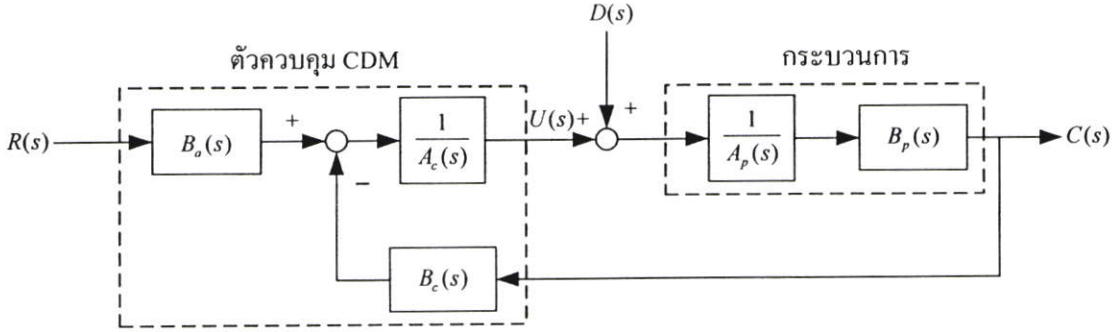
ปัญหาทั่วไปในการออกแบบระบบควบคุมคือการเลือกใช้ตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบควบคุมนั้นๆ เพื่อให้ระบบนั้นมีสมรรถนะตามต้องการ ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมจะแบ่งออกได้เป็น 3 ทฤษฎีหลักๆ คือ ทฤษฎีการควบคุมตามแบบฉบับ (classical control theory) ทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control theory) และทฤษฎีควบคุมโดยใช้พหุนาม (polynomial) หรือบางครั้งเรียกว่า ทฤษฎีพีชคณิต ตัวอย่างวิธีการควบคุมตามแบบฉบับ เช่น วิธีการตอบสนองทางความถี่ (frequency response method) และวิธีทางเดินรากราก (root-locus method) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นเครื่องมือที่ง่ายในการออกแบบระบบควบคุม แต่จะเกิดค่าผิดพลาดขึ้นเมื่อโพลและซีโรของระบบเกิดการหักล้างกัน ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถควบคุม (uncontrollable) และไม่สามารถสังเกต (unobservable) พฤติการณ์ของระบบได้ สำหรับตัวอย่างทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการวางโพล (pole-placement) และวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (optimal control) จะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของปริภูมิสแตต สำหรับวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์หรือ CDM นั้นเป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมเชิงพีชคณิต ซึ่งระบบจะถูกนำเสนอด้วยพหุนาม โดยพิจารณาพหุนามเศษและพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนแยกออกจากกัน ดังนั้น จะได้ผลตอบสนองที่ดีกว่าเมื่อ โพลและซีโรเกิดการหักล้างกัน

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวิธี CDM

ศาสตราจารย์ชุนจิ มานาเบะ (Shunji Manabe) ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ด้วยการใช้แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram) เป็นเครื่องมือเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบควบคุม การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะใช้หลักการทางพีชคณิตโดยที่

- (1) ระบบจะถูกแทนด้วยสมการพหุนาม
- (2) สามารถออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะและตัวควบคุมได้พร้อมกัน
- (3) มีการนำแผนผังค่าสัมประสิทธิ์มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
- (4) ทฤษฎีเสถียรภาพของ CDM จะอยู่บนเงื่อนไขเพียงพอของลีพาทอฟ (Lipatov's sufficient condition for stability)
- (5) ครรชนีเสถียรภาพมาตรฐานของ CDM จะถูกดัดแปลงมาจากรูปแบบมาตรฐานของ Kessler

3.2 โครงสร้าง CDM มาตรฐาน



รูปที่ 3.1 โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO

โครงสร้าง CDM มาตรฐานของระบบ SISO (Single-Input-Single-Output) แสดงได้ดังรูปที่ 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 $B_a(s)$ คือพหุนามของตัวควบคุม CDM ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

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

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

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

โดยที่ $\lambda < k$ และ $m < k$ สำหรับ $B_a(s)$ นั้นเป็นพรีฟิลเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับ k_0 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกิน (overshoot) แต่ช่วงเวลายื่น (rise time) จะมาก และถ้า $B_a(s)$ มีค่าเท่ากับตัวเศษของฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $B_c(s)$ จะทำให้ผลตอบสนองมีค่าพุ่งเกิน และช่วงเวลายื่นจะน้อยลง เนื่องจากระบบควบคุมนี้มีฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2 ตัว

ดังนั้น จึงถูกเรียกว่าระบบควบคุมแบบสองระดับขั้นเสรี (two-degree-of-freedom: 2DOF) โดยโครงสร้างของระบบควบคุมแบบ 2DOF นั้น เมื่อนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ จะทำให้ระบบควบคุมสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่กำหนดและสามารถกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบได้

3.3 พหุนามคุณลักษณะ

พหุนามคุณลักษณะจากโครงสร้างของ CDM มาตรฐานดังรูปที่ 3.1 โดยไม่มีพรีฟิลเตอร์ 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 จะเป็นการออกแบบจากระบบควบคุมทั้งระบบโดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จะประกอบด้วยค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบ ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพหุนามคุณลักษณะ ส่วนค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* จะเป็นตัวบอกความทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i โดยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ และค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* แสดงได้ดังสมการที่ (3.7) (3.8) และ (3.9) ตามลำดับดังนี้

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

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

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

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

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

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

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

ซึ่งสมการ $P(s)$ นี้จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ต่อไป

3.4 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CDM

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกออกแบบโดยวิธี CDM นั้น จะใช้เงื่อนไขเพียงพอสำหรับเสถียรภาพของลิพาทอฟ โดยลิพาทอฟกล่าวว่าวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบเสถียรภาพของระบบต่างๆ เช่น วิธีของเรทท์-เฮอร์วิทซ์ (Routh-Hurwitz) นั้น เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 หรืออันดับ 4 แต่ไม่เพียงพอต่อการนำมาพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับสูงๆ ลิพาทอฟได้เสนอว่า ระบบอันดับ n ที่มีจำนวนพารามิเตอร์ n ตัว ขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง (exact stability region) สามารถอนุมานให้อยู่ในรูปเชิงซ้อนที่มี n มิติ แต่ขอบเขตเสถียรภาพที่พอเพียง (sufficient stability region) จะเป็นส่วนย่อยของขอบเขตเสถียรภาพที่แท้จริง ดังนั้น ระบบใดๆ อาจมีเสถียรภาพแม้ว่าเงื่อนไขเสถียรภาพที่เพียงพอจะไม่น่าพอใจก็ตาม ด้วยเหตุนี้จึงกล่าวได้ว่า เงื่อนไขเสถียรภาพของลิพาทอฟเป็นเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับเพียงพอ

จากวิธีตรวจสอบเสถียรภาพของเรทท์-เฮอร์วิทซ์ เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 3 จะสามารถแสดงดังนี้

$$a_2 a_1 > a_3 a_0 \quad (3.12)$$

และ

$$\gamma_2 \gamma_1 > 1 \quad (3.13)$$

สำหรับเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบอันดับ 4 แสดงได้ดังนี้

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

และ

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

จากสมการที่ (3.9) (3.13) และ (3.15) สามารถสรุปเงื่อนไขในการพิจารณาเสถียรภาพของระบบอันดับ 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

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

และ

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

และเงื่อนไขพอเพียงเพื่อการตรวจสอบความไม่มีเสถียรภาพของระบบคือ

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

และ

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

3.5 รูปแบบมาตรฐานของ CDM

Kessler ได้กำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ทุกๆค่ามีค่าเท่ากับ 2 เพื่อลดการออกสซิลเลท และค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยรูปแบบ ITAE (Integral Time Absolute Error) ต่อมาศาสตราจารย์ซุนจิ มานาเบะพบว่า การกำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_1 ให้มีค่าเท่ากับ 2.5 จะทำให้ผลตอบสนองชั่วครู่ดีขึ้น กล่าวคือ ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและมีช่วงเวลานิ่งลง ดังนั้นค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i มาตรฐานของ CDM คือ

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

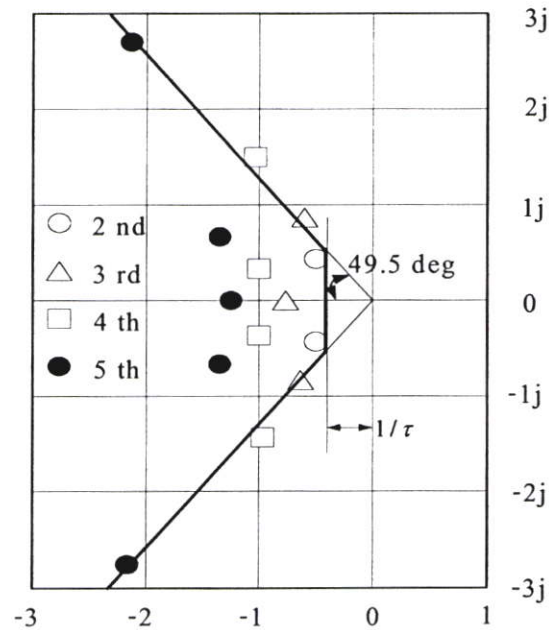
และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time: t_s) ดังนี้

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

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

- (1) สำหรับระบบแบบชนิด 1 (type 1) จะไม่มีค่าพุ่งเกินและระบบแบบชนิด 2 (type 2) จะมีค่าพุ่งเกินประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์
- (2) การกำหนดช่วงเวลานิ่งของผลตอบสนองของระบบ สามารถออกแบบได้จากการกำหนดค่าคงตัวเวลาสมมูล τ
- (3) รูปร่างของผลตอบสนองทางเวลาของระบบควบคุมที่ออกแบบด้วยวิธี CDM จะไม่ขึ้นอยู่กับอันดับของระบบ แต่จะขึ้นอยู่กับค่าครรชนีเสถียรภาพ 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 เงื่อนไขการเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ

โดยทั่วไปแล้วการเลือกค่าครรชนีเสถียรภาพมาตรฐานจะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามต้องการ อย่างไรก็ตาม ค่าครรชนีเสถียรภาพนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนได้เพื่อให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการ แต่ในการปรับเปลี่ยนจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

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

ในกรณีที่เลือกค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ให้มีค่ามากก็เพื่อให้ระบบควบคุมมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ และจากเงื่อนไขเพียงพอสำหรับเสถียรภาพของลีฟาทอฟกล่าวว่า ระบบจะมีเสถียรภาพถ้าครรชนีเสถียรภาพทุกตัวมีค่ามากกว่า 1.5 ซึ่งได้พิสูจน์ไว้ในงานวิจัยของลีฟาทอฟ [6] และถ้าครรชนีเสถียรภาพมีค่ามากกว่า 4 ทุกๆตัวจะทำให้รากของระบบเป็นจำนวนจริงลบทั้งหมด ดังนั้นโดยปกติจะเลือกค่า γ_i อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 4

3.7 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์

แผนผังค่าสัมประสิทธิ์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งจะเป็นตัวแสดงถึงเสถียรภาพ ความเร็วของผลตอบสนองและความคงทนของระบบ ในแผนผังค่าสัมประสิทธิ์จะแสดงเป็นกราฟล็อกการิทึม โดยแกนตั้งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ a_i ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ส่วนแกนนอนแสดงอันดับ i ของค่าสัมประสิทธิ์แต่ละตัว ซึ่งความโค้งของเส้นกราฟจะบอกความมีเสถียรภาพ และความลาดเอียงของเส้นโค้งจะบอกความเร็วของผลตอบสนอง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเส้นโค้งเนื่องจากการามีเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงซึ่งจะเป็นตัวบอกความคงทนของระบบ

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

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

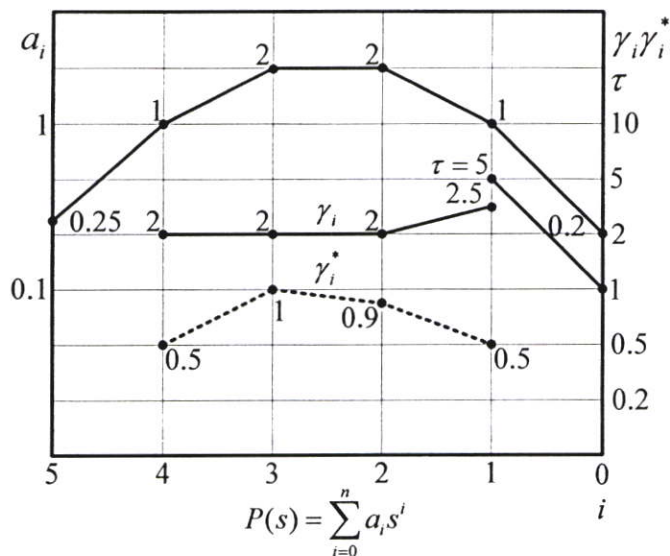
สำหรับค่าพารามิเตอร์ของ CDM แสดงได้ดังนี้

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

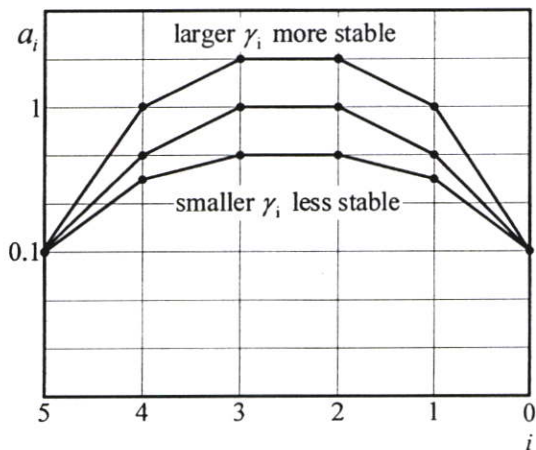
$$\tau = 5 \quad (3.27)$$

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

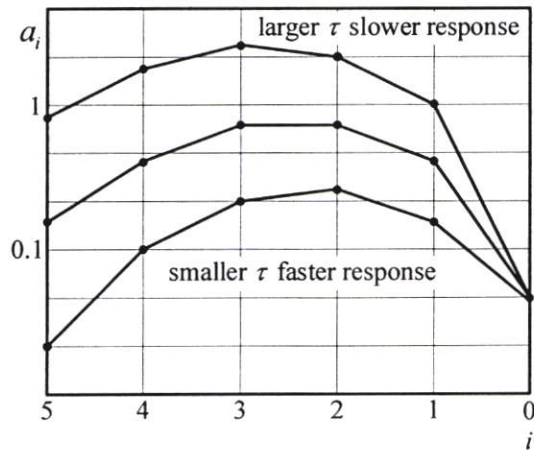
ดังนั้น แผนผังค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์ a_i ค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ค่าจำกัดเสถียรภาพ γ_i^* และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังค่าสัมประสิทธิ์



(ก) เสถียรภาพของระบบ



(ข) ผลตอบสนองของระบบ

รูปที่ 3.4 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i และค่าคงตัวเวลาสมมูล τ

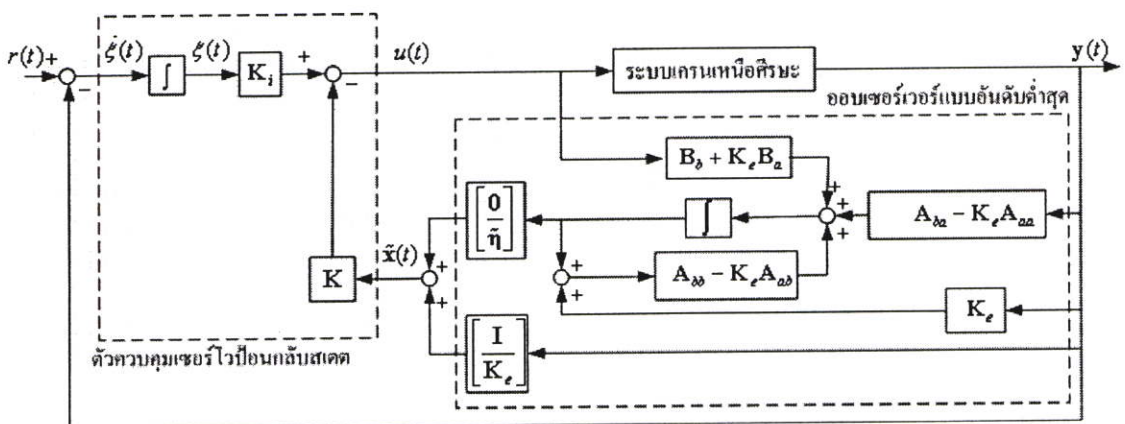
จากรูปที่ 3.4 (ก) แสดงให้เห็นว่า ถ้าเส้นโค้งของสัมประสิทธิ์ a_i มีความโค้งมากจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพมากขึ้น โดยจะสอดคล้องกับค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่มีค่ามาก ในทางกลับกัน ถ้าเส้นโค้ง a_i มีความโค้งน้อยจะทำให้ระบบควบคุมมีเสถียรภาพน้อยลง โดยสอดคล้องกับค่า γ_i ที่มีค่าน้อย และจากรูปที่ 3.4 (ข) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปลายเส้นโค้ง a_i เบี่ยงไปทางซ้ายมากขึ้น ค่าคงตัวเวลาสมมูล τ จะมีค่าน้อยลงและผลตอบสนองของระบบควบคุมจะเร็วขึ้น

บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM และการสร้างตัวควบคุม

ในบทนี้จะอธิบายโครงสร้างการควบคุม และการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดเพื่อควบคุมการทำงานของระบบครนเหนือศีรษะ โดยตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตจะควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการพร้อมทั้งลดมุมแกว่งของภาระให้น้อยลง และออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดจะช่วยประมาณค่าตัวแปรสเตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ซึ่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะถูกออกแบบด้วยวิธี CDM ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมครนเหนือศีรษะ



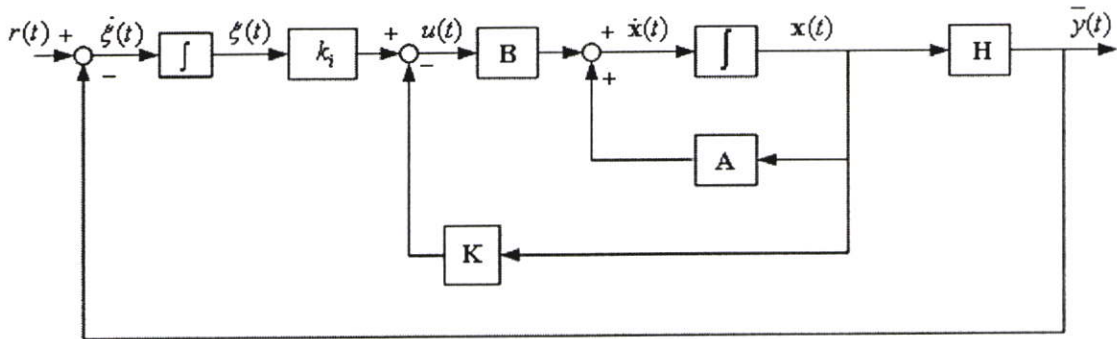
รูปที่ 4.1 โครงสร้างระบบควบคุมครนเหนือศีรษะ

โครงสร้างระบบควบคุมของระบบครนเหนือศีรษะรวมทั้งตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด สำหรับขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต เพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครนและมุมการแกว่งของภาระ และอีกส่วนจะแสดงการออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด เพื่อประมาณค่าตัวแปรสเตตสองตัวที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง (ความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) ซึ่งทฤษฎีการออกแบบสองส่วนสามารถออกแบบได้โดยอิสระจากกัน ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 การออกแบบตัวควบคุม

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต

ในการควบคุมตำแหน่งของรถเครนไปยังตำแหน่งเป้าหมาย จะเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบเพื่อช่วยกำจัดค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของตำแหน่งรถเครน ในกรณีนี้ เมตริกซ์เอาต์พุตของระบบเครนเหนือศีรษะในสมการ (2.6) C จะเปลี่ยนรูปเป็นเมตริกซ์ $H = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ โดยมีโครงสร้างระบบควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงสร้างระบบควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต

กำหนดให้

$$\dot{\xi}(t) = r(t) - \bar{y}(t) \quad (4.1)$$

เมื่อ $\bar{y}(t)$ คือ เอาต์พุตตำแหน่งของรถเครน $r(t)$ คือ ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและ $\xi(t)$ คือ ตัวแปรสเตตค่าผิดพลาดของตำแหน่งรถเครน จากโครงสร้างระบบควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตดังรูปที่ 4.2 จะสามารถเขียนสมการสเตตและสมการเอาต์พุตของระบบแต่งเสริมได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = \mathbf{A}_s \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{B}_s u(t) + \mathbf{F} r(t) \quad (4.2)$$

$$\bar{y}(t) = \mathbf{H}_s \mathbf{x}_s(t) \quad (4.3)$$

โดยที่

$$\mathbf{x}_s(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{H} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{H}_s = [\mathbf{H} \ 0]$$

และสัญญาณควบคุมในสมการ (4.4) ตามโครงสร้างในรูปที่ 4.2 สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) + k_i \xi(t) = -\mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t) \quad (4.4)$$

เมื่อ $\mathbf{K}_s = [\mathbf{K} \quad -k_i]$ โดยที่ $\mathbf{K} = [k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n]$ เป็นเมตริกซ์อัตราขยายป้อนกลับสแตต (state feedback gain matrix) ขนาด 1×4 และ k_i เป็นค่าอัตราขยายตัวอินทิเกรเตอร์ (integral gain)

เมื่อแทนสมการ (4.4) ลงในสมการที่ (4.2) สามารถเขียนสมการสแตตของระบบแต่งเสริมใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = (\mathbf{A}_s - \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s) \mathbf{x}_s(t) + \mathbf{F}r(t) \quad (4.5)$$

จากสมการ(2.6) ถ้าคู่ของเมตริกซ์ \mathbf{A} และ \mathbf{B} ของระบบสามารถควบคุมได้ (controllable) และ

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \\ -\mathbf{H}_s & 0 \end{bmatrix} = n+1 = 5$$

แล้ว จะสามารถออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบป้อนกลับมีเสถียรภาพและสมรรถนะตามต้องการได้ โดยกำหนดค่าเจาะจง (eigenvalue) ของเมตริกซ์ $\mathbf{A}_s - \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s$ ให้มีค่าเป็นลบซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกกำหนดด้วยเมตริกซ์อัตราขยายป้อนกลับสแตต \mathbf{K} และค่าอัตราขยายตัวอินทิเกรเตอร์ k_i ที่ออกแบบด้วยวิธี CDM โดยแปลงระบบแต่งเสริมให้อยู่ในรูปแบบบัญญัติที่สามารถควบคุมได้ (controllable canonical form) โดยใช้การแปลงสแตต $\mathbf{z}(t) = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x}_s(t)$ จะได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{A}_s \mathbf{T} \mathbf{z}(t) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{B}_s u(t) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{F}r(t) \quad (4.6)$$

เมื่อเมตริกซ์การแปลง (transformation matrix) $\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{W}$ โดย \mathbf{M} คือเมตริกซ์ความควบคุมได้ (controllability matrix)

$$\mathbf{M} = [\mathbf{B}_s \quad \mathbf{A}_s \mathbf{B}_s \quad \dots \quad \mathbf{A}_s^n \mathbf{B}_s] \text{ และ } \mathbf{W} = \begin{bmatrix} \delta_0 & \delta_1 & \dots & \delta_n & 1 \\ \delta_1 & \delta_2 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \delta_n & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิดดังสมการคุณลักษณะต่อไปนี้

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A}_s| = s^{n+1} + \delta_n s^n + \dots + \delta_1 s + \delta_0 = 0 \quad (4.7)$$

และจากสัญญาณควบคุมในสมการที่ (4.4) เมื่อแทนตัวแปรแปลงเวกเตอร์สเตต $\mathbf{x}_s(t) = \mathbf{T}\mathbf{z}(t)$ จะได้สัญญาณควบคุมสำหรับตัวแปรสเตต $u(t) = -\mathbf{K}_s \mathbf{T}\mathbf{z}(t)$ และกำหนดให้

$$\mathbf{K}_s \mathbf{T} = [\hat{k}_0 \quad \hat{k}_1 \quad \dots \quad \hat{k}_n] \quad (4.8)$$

จะได้ระบบป้อนกลับของระบบ (4.6) ดังนี้

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = (\mathbf{T}^{-1} \mathbf{A}_s \mathbf{T} - \mathbf{T}^{-1} \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s \mathbf{T}) \mathbf{z}(t) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{F} r(t)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -(\delta_0 + \hat{k}_0) & -(\delta_1 + \hat{k}_1) & -(\delta_2 + \hat{k}_2) & \dots & -(\delta_n + \hat{k}_n) \end{bmatrix} \mathbf{z}(t) + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{F} r(t)$$

ซึ่งมีพหุนามคุณลักษณะดังนี้

$$\begin{aligned} |s\mathbf{I} - \mathbf{T}^{-1} \mathbf{A}_s \mathbf{T} + \mathbf{T}^{-1} \mathbf{B}_s \mathbf{K}_s \mathbf{T}| &= 0 \\ &= s^{n+1} + (\delta_n + \hat{k}_n) s^n + (\delta_{n-1} + \hat{k}_{n-1}) s^{n-1} + \dots + (\delta_0 + \hat{k}_0) \end{aligned} \quad (4.9)$$

เมื่อได้สมการพหุนามคุณลักษณะวงปิดของตัวควบคุมในสมการที่ (4.9) แล้วก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม \mathbf{K}_s ด้วยวิธี CDM ได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดช่วงเวลาเข้าที่ t_s และค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i ที่เหมาะสมกับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน ซึ่งช่วงเวลาเข้าที่นี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังสมการที่ (3.22) และในการกำหนดค่าครรชนีเสถียรภาพ γ_i จะสอดคล้องกับเงื่อนไขเสถียรภาพ γ_i^* ดังสมการที่ (3.23)

แล้วแทนค่าเหล่านั้นลงในสมการ (3.11) จะได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดที่อยู่ในรูป

$$= s^{n+1} + \alpha_n s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \dots + \alpha_1 s + \alpha_0 \quad (4.10)$$

โดยที่ $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดของระบบแต่งเสริมที่ได้รับการออกแบบแล้ว

2) เทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (4.9) กับสมการที่ (4.10) จะได้

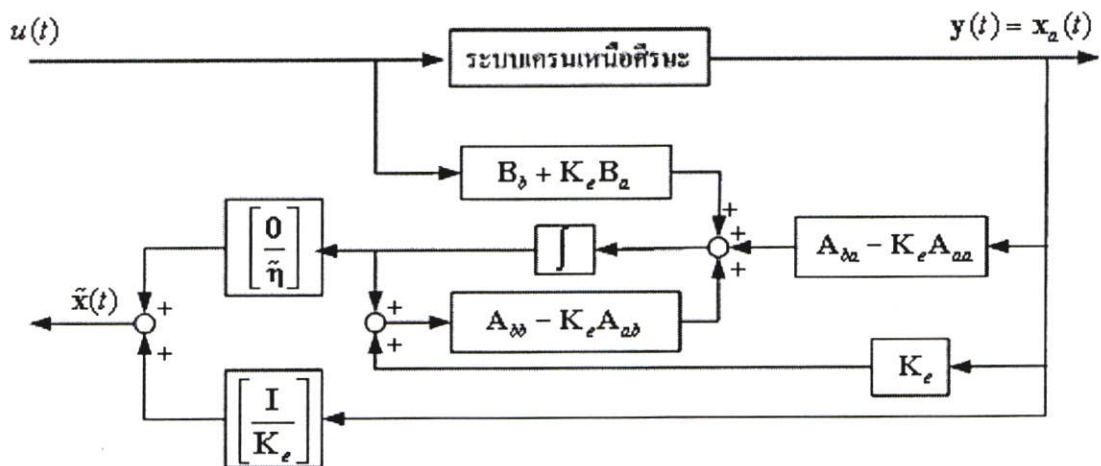
$$\begin{aligned} \delta_0 + \hat{k}_0 &= \alpha_0 \\ \delta_1 + \hat{k}_1 &= \alpha_1 \\ &\vdots \\ \delta_n + \hat{k}_n &= \alpha_n \end{aligned}$$

และแก้สมการหาค่าเมตริกซ์อัตราขยายป้อนกลับเสถียรของระบบแต่งเสริมจะได้

$$\mathbf{K}_s = [\hat{k}_0 \ \hat{k}_1 \ \dots \ \hat{k}_n] \mathbf{T}^{-1} = [\alpha_0 - \delta_0 \ : \ \alpha_1 - \delta_1 \ : \ \dots \ : \ \alpha_n - \delta_n] \mathbf{T}^{-1} \quad (4.11)$$

4.2.2 การออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

ในการประมาณค่าตัวแปรสแตตสองตัวที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง (ความเร็วของรถ เคนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) จะใช้ออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดเข้ามาช่วยในการประมาณค่าสแตตดังกล่าว โดยมีโครงสร้างออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

เมื่อจัดรูปสเตตของระบบครนเหนือศีรษะ [7] ออกเป็นสองส่วนคือ สเตตส่วนที่สามารถวัดได้โดยตรง $\mathbf{x}_a(t)$ และสเตตส่วนที่จะประมาณค่า $\mathbf{x}_b(t)$ จะได้ปริภูมิสเตตใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{aa} & \mathbf{A}_{ab} \\ \dots & \dots \\ \mathbf{A}_{ba} & \mathbf{A}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_a \\ \dots \\ \mathbf{B}_b \end{bmatrix} u(t) \quad (4.12)$$

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{I} : \mathbf{0}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ซึ่งตัวแปรสเตต $\mathbf{x}_a(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{x}_b(t) = \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix}$

และ $\mathbf{A}_{aa} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{ab} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_{ba} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{mg}{M} \\ 0 & \frac{-(M+m)}{Ml} \end{bmatrix}$

$$\mathbf{A}_{bb} = \begin{bmatrix} -\frac{b_m}{M} & 0 \\ \frac{b_m}{M} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{B}_b = \begin{bmatrix} \frac{K_r}{M} \\ -\frac{K_r}{Ml} \end{bmatrix}$$

พิจารณาจากสมการ (4.12) จะได้สมการเอาต์พุตของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (สมการ สเตตส่วนที่สามารถวัดค่าออกมาได้โดยตรง) ดังแสดงด้วยสมการ (4.14) และจะได้สมการสเตตของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (สมการส่วนที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง) ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.15) ตามลำดับดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}}_a(t) - \mathbf{A}_{aa}\mathbf{x}_a(t) - \mathbf{B}_a u(t) = \mathbf{A}_{ab}\mathbf{x}_b(t) \quad (4.14)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_b(t) = \mathbf{A}_{bb}\mathbf{x}_b(t) + \mathbf{A}_{ba}\mathbf{x}_a(t) - \mathbf{B}_b u(t) \quad (4.15)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ของสมการสเตตออบเซิร์ฟเวอร์อันดับแบบเต็มกับสมการสเตตออบเซิร์ฟเวอร์แบบอันดับต่ำสุดดังตารางที่ 4.1 จะได้สมการออบเซิร์ฟเวอร์อันดับต่ำสุดดังนี้

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b(t) = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) \tilde{\mathbf{x}}_b(t) + \mathbf{A}_{ba} \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{B}_b u(t) + \mathbf{K}_e (\dot{\mathbf{x}}_a(t) - \mathbf{A}_{aa} \mathbf{x}_a(t) - \mathbf{B}_a u(t)) \quad (4.16)$$

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ระหว่างสมการสเตตออบเซิร์ฟเวอร์แบบอันดับเต็มและต่ำสุด

ออบเซิร์ฟเวอร์แบบอันดับเต็ม	ออบเซิร์ฟเวอร์แบบอันดับต่ำสุด
$\tilde{\mathbf{x}}(t)$	$\tilde{\mathbf{x}}_b(t)$
\mathbf{A}	\mathbf{A}_{bb}
$\mathbf{B}u(t)$	$\mathbf{A}_{ba} \mathbf{x}_a(t) + \mathbf{B}_b u(t)$
$\mathbf{y}(t)$	$\dot{\mathbf{x}}_a(t) - \mathbf{A}_{aa} \mathbf{x}_a(t) - \mathbf{B}_a u(t)$
\mathbf{C}	\mathbf{A}_{ab}
\mathbf{K}_e (4×2 matrix)	\mathbf{K}_e (2×2 matrix)

จัดรูปสมการ (4.16) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b(t) - \mathbf{K}_e \dot{\mathbf{x}}_a(t) &= (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) \tilde{\mathbf{x}}_b(t) + (\mathbf{A}_{ba} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{aa}) \mathbf{y}(t) + (\mathbf{B}_b - \mathbf{K}_e \mathbf{B}_a) u(t) \\ &= (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) (\tilde{\mathbf{x}}_b(t) - \mathbf{K}_e \mathbf{y}(t)) \\ &\quad + [(\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}) \mathbf{K}_e + \mathbf{A}_{ba} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{aa}] \mathbf{y}(t) \\ &\quad + (\mathbf{B}_b - \mathbf{K}_e \mathbf{B}_a) u(t) \end{aligned} \quad (4.17)$$

กำหนดให้

$$\boldsymbol{\eta}(t) = \mathbf{x}_b(t) - \mathbf{K}_e \mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{x}}_b(t) - \mathbf{K}_e \mathbf{x}_a(t)$$

และ

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}_b(t) - \mathbf{K}_e \mathbf{y}(t) = \tilde{\mathbf{x}}_b(t) - \mathbf{K}_e \mathbf{x}_a(t)$$

จะสามารถจัดรูปใหม่ของสมการ (4.17) ได้เป็น

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}}(t) = \hat{\mathbf{A}} \tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) + \hat{\mathbf{B}} \mathbf{y}(t) + \hat{\mathbf{F}} u(t) \quad (4.18)$$

โดยที่ $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}$, $\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{A} \mathbf{K}_e + \mathbf{A}_{ba} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{aa}$ และ $\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{B}_b - \mathbf{K}_e \mathbf{B}_a$

โดยสามารถคำนวณหา $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ จาก $\boldsymbol{\eta}(t)$ และ $\mathbf{y}(t)$ เพื่อที่นำไปใช้ในระบบป้อนกลับโดยใช้สมการ

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \hat{\mathbf{C}}\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) + \hat{\mathbf{D}}\mathbf{y}(t) \quad (4.19)$$

ซึ่ง

$$\hat{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \dots \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \text{ และ } \hat{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 \\ \dots \\ \mathbf{K}_e \end{bmatrix}$$

อันดับต่อไปจะหาสมการผิดพลาดของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการ (4.14) และ (4.16) ซึ่งจะเขียนใหม่ดังสมการที่ (4.20)

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_b(t) = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab})\tilde{\mathbf{x}}_b(t) + \mathbf{A}_{ba}\mathbf{x}_a(t) + \mathbf{B}_b u(t) + \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab}\mathbf{x}_b(t) \quad (4.20)$$

เมื่อพิจารณาผลต่างระหว่างสมการ (4.15) กับ (4.20) จะได้สมการผิดพลาดของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดดังสมการที่ (4.21)

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = (\mathbf{A}_{bb} - \mathbf{K}_e \mathbf{A}_{ab})\mathbf{e}(t) \quad (4.21)$$

โดยที่ $\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}_b(t) - \tilde{\mathbf{x}}_b(t) = \boldsymbol{\eta}(t) - \tilde{\boldsymbol{\eta}}(t)$ จากสมการ(4.21) พบว่าคู่ของเมตริกซ์ \mathbf{A}_{ab} และ \mathbf{A}_{bb} ของระบบจะสามารถสังเกตได้ (observable) หรือ

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ab} \\ \mathbf{A}_{ab}\mathbf{A}_{bb} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{ab}\mathbf{A}_{bb}^{n-2} \end{bmatrix} = n - 2 = 2$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าเมตริกซ์อัตราขยายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด \mathbf{K}_e ด้วยวิธี CDM ซึ่งมีขั้นตอนเหมือนกับการหาค่าเมตริกซ์อัตราขยายเซอร์โวป้อนกลับสเตต โดยแนะนำให้เลือกค่า r น้อยกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตต ประมาณ 3 เท่าขึ้นไป

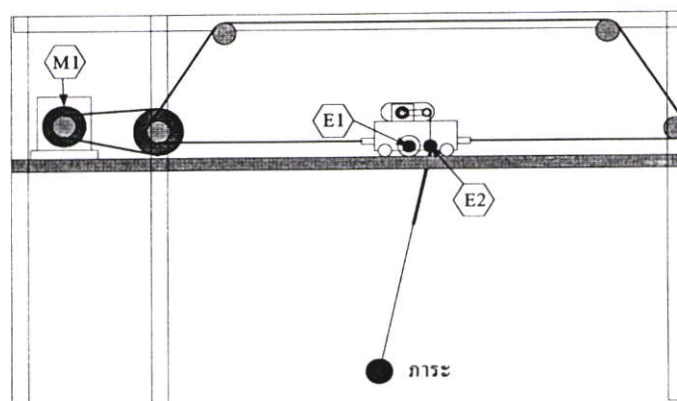
บทที่ 5

การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะ และการหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของระบบครนเหนือศีรษะด้วยวิธี CDM หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แล้วไปทดสอบประสิทธิภาพ โดยจำลองการควบคุมระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แมตแล็บ (Matlab) ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้ ขั้นตอนแรกทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ (ภาวะและความยาวเชือกสลิง) ของระบบเปลี่ยนแปลง หลังจากที่ได้ศึกษาผลการจำลองแล้ว จะนำตัวควบคุมนั้นมาควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แต่จะเพิ่มผลทดสอบการกำจัดผลกระทบที่เกิดจากสิ่งรบกวนที่เข้าไปในระบบ

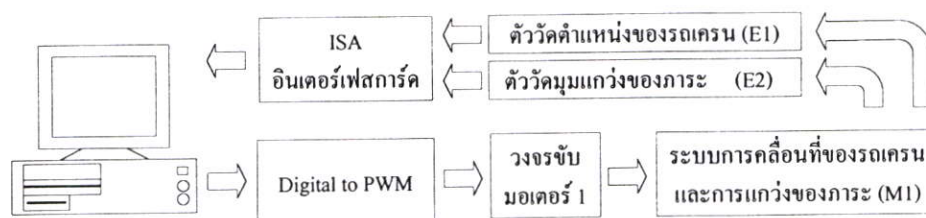
5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ

โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะแสดงดังรูปที่ 5.1 ประกอบด้วยระบบส่งกำลัง ซึ่งใช้ดีซีมอเตอร์ (M1) ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับพูลเลย์ (pulley) และสายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์พร้อมทั้งเพิ่มแรงบิดให้กับชุดส่งกำลังเพื่อให้รถครนเคลื่อนที่ ในส่วนของตัวตรวจวัดจะประกอบด้วยเอนโคเดอร์ (encoder) จำนวน 2 ตัว โดยเอนโคเดอร์ตัวที่หนึ่ง (E1) จะใช้วัดตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครน และเอนโคเดอร์ตัวที่สอง (E2) ใช้วัดมุมแกว่งของภาวะ และในส่วนของมวลของภาวะที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 3 ขนาดคือขนาด 1 กิโลกรัม 2 กิโลกรัมและ 4 กิโลกรัม โดยรายละเอียดของอุปกรณ์และการติดตั้งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ

5.2 การควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะที่แสดงในรูปที่ 5.2 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เชื่อมต่อ และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบ ส่วนที่สองคืออุปกรณ์เชื่อมต่อ ซึ่งประกอบด้วย ISA อินเทอร์เฟซการ์ดทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากเอนโคเดอร์ E1 (สำหรับวัดระยะทางของรตครน) และ เอนโคเดอร์ E2 (สำหรับวัดการแก่งของมม) แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป และในส่วนของวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกจะทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลจากพอร์ตขนาน (parallel port) ของคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณ PWM นี้ให้กับวงจรับกระแสของมอเตอร M1 (สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรตครน) และจะรับสัญญาณพัลส์จากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะขยายสัญญาณให้มีขนาดมากขึ้นเพื่อส่งสัญญาณไปให้แก่ระบบส่งกำลังสำหรับการเคลื่อนที่ของรตครน รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลองรวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก. และโปรแกรมภาษาซีที่ใช้สร้างตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุดแสดงในภาคผนวก ข.

5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุด สำหรับระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

การออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบครนเหนื่อสี่ระยะ จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรตครนและมมการแก่งของภาระ โดยกำหนดให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 3$ $\gamma_2 = 2.5$ และ $\gamma_3 = \gamma_4 = 2$ และค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 3.1$ วินาที ส่วนถัดมาคือการ

ออกแบบพารามิเตอร์ของออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุดสำหรับประมาณค่าตัวแปรสแตต ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรง โดยกำหนดให้ค่าครรชนีเสถียรภาพ $\gamma_1 = 4.5$ และ $\tau = 0.2$ วินาที พารามิเตอร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะที่ใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังตารางที่ 5.1 จากขั้นตอนการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ที่ได้อธิบายในบทที่ 4 จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสแตตและออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุด แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ระบบครนเหนือสี่ระยะที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

มวลของรถครน M	6.12 kg
มวลของภาระ m	1 kg
ความยาวเชือกสลิง l	0.65 m
แรงโน้มถ่วงโลก g	9.81 m/sec ²
ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน K_r	0.6281
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน b_m	12.24 N sec/m

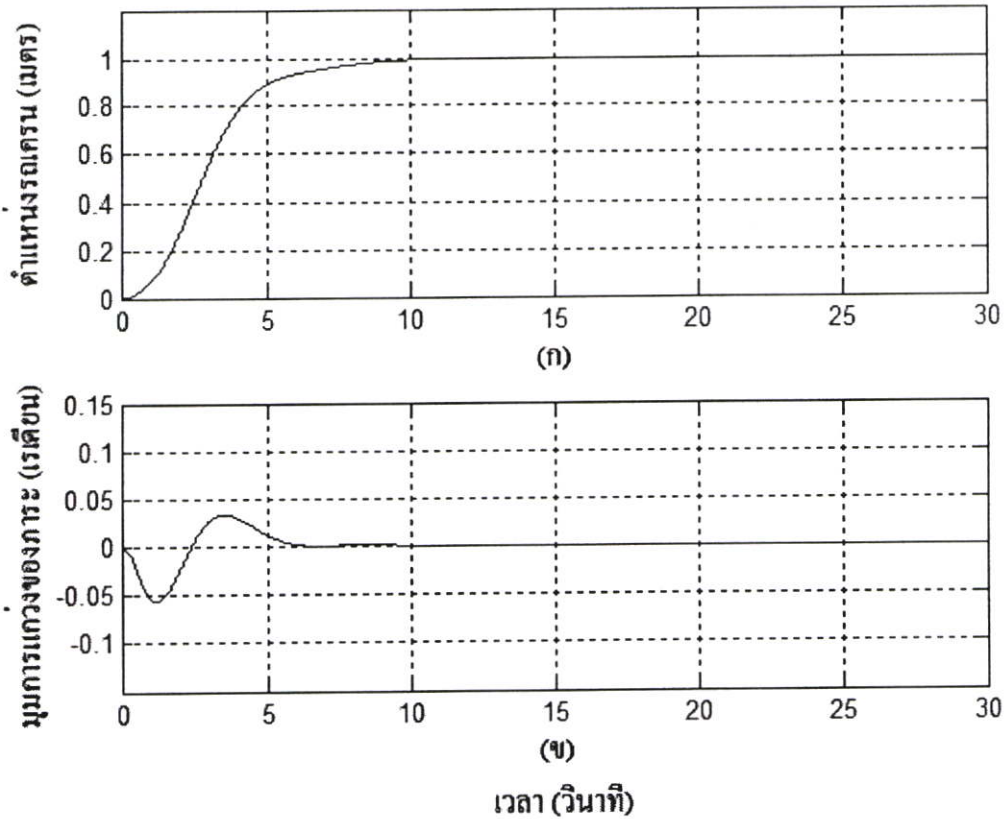
ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม

ตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสแตต	$K_s = [70.78 \quad -139.36 \quad 52.14 \quad -14.73 \quad -22.83]$
ออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุด	$K_e = \begin{bmatrix} 13 & 0 \\ 3.07 & 7.5 \end{bmatrix}$

5.4 ผลการจำลอง

5.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

การจำลองการควบคุมระบบครนเหนือสี่ระยะเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นเป็นไปตามต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมนี้ไปทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ การจำลองจะกำหนดให้รถครนเคลื่อนที่ไปตำแหน่ง 1 เมตร ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.3 สำหรับสัญญาณควบคุมและตัวแปรสแตตที่ประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) แสดงดังรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 ตามลำดับ

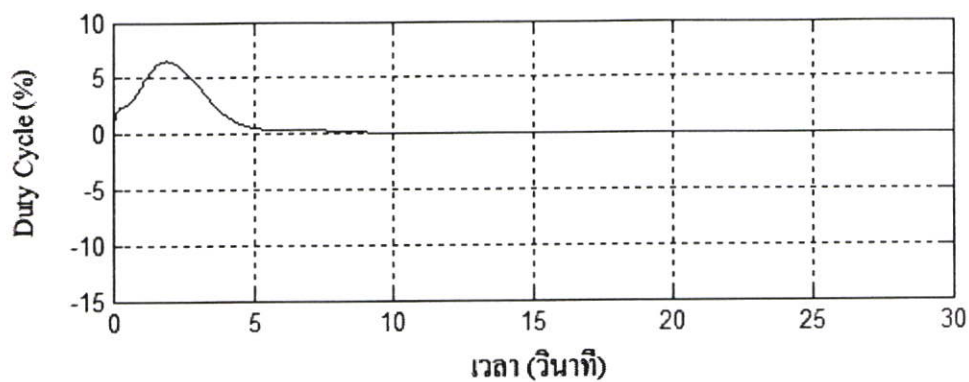


(ก) ตำแหน่งของรถเข็น (ข) มุมแกว่งของภาระ

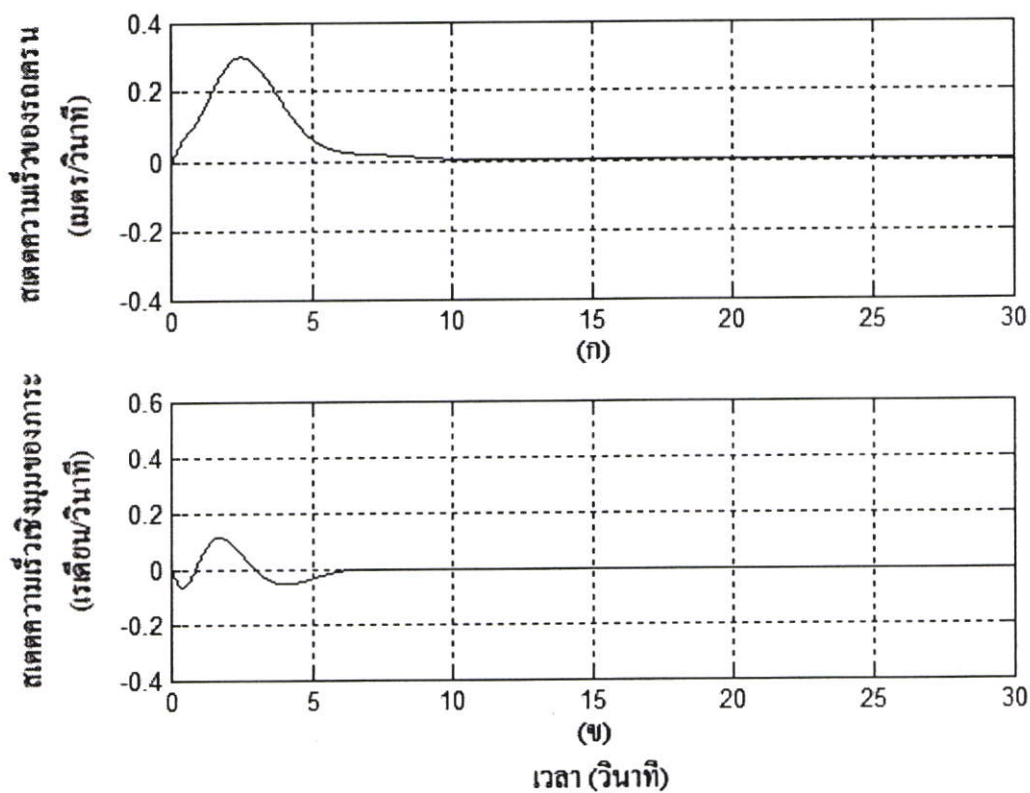
รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

จากรูปที่ 5.3 (ก) พบว่า ตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตสามารถควบคุมให้รถเข็นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) มีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 10 วินาที ในขณะเดียวกัน สามารถลดมุมแกว่งและควบคุมมุมของภาระให้อยู่ในขอบเขต ± 0.057 เรเดียนได้ และหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วเมื่อรถเข็นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตร โดยมีผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.3 (ข)

จากรูปที่ 5.5 พบว่าออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถประมาณค่าตัวแปรสเตตความเร็วของรถเข็นและความเร็วเชิงมุมของภาระได้ในเวลาประมาณ 10 วินาทีและ 7 วินาทีตามลำดับ



รูปที่ 5.4 สัญญาณควบคุม



(ก) มตตความเร็วของรถเครน (ข) มตตความเร็วเชิงมุมของภาวะ

รูปที่ 5.5 มตตที่ประมาณค่าได้

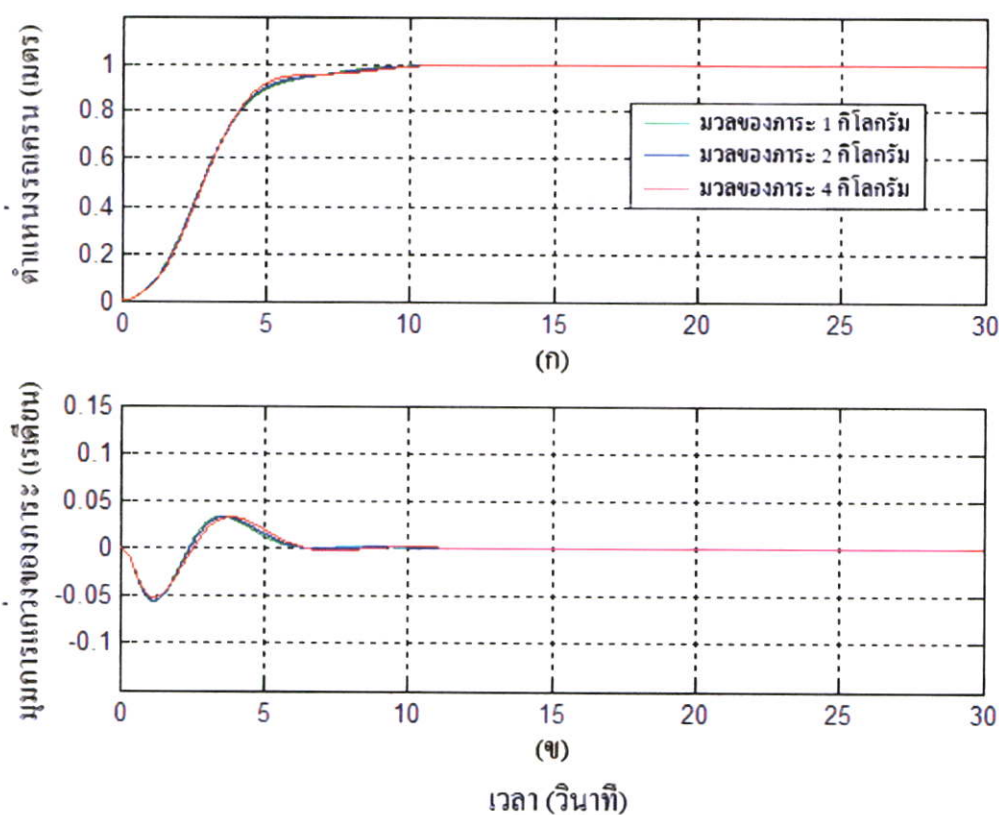
5.4.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ

ในหัวข้อนี้จะนำตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุดที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CDM ไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.3 มาจำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีมวลของภาระเปลี่ยนแปลงและความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลง

5.4.2.1 มวลของภาระเปลี่ยนแปลง

ในการจำลองจะใช้ภาระที่มีมวลเท่ากับ 1 กิโลกรัม 2 กิโลกรัมและ 4 กิโลกรัม โดยที่ความยาวเชือกสลิงมีค่าคงที่คือ 0.65 เมตร ผลตอบสนอง สัญญาณควบคุม และตัวแปรสเตตที่ประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) ของระบบแสดงดังรูปที่ 5.6 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

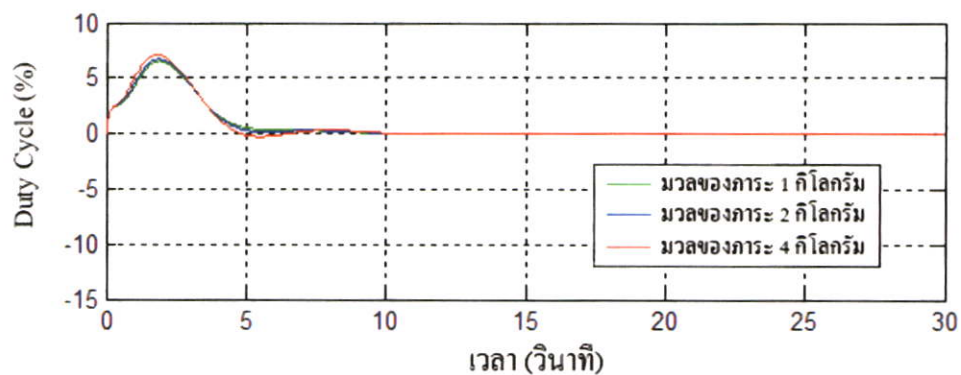
จากรูปที่ 5.6 พบว่าระบบควบคุมยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถครนให้มีผลตอบสนองที่ไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ถึงแม้มวลของภาระจะมีน้ำหนักมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.6 (ก) และสามารถลดขนาดของมุมที่แกว่งและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงผลตอบสนองดังรูปที่ 5.6 (ข)



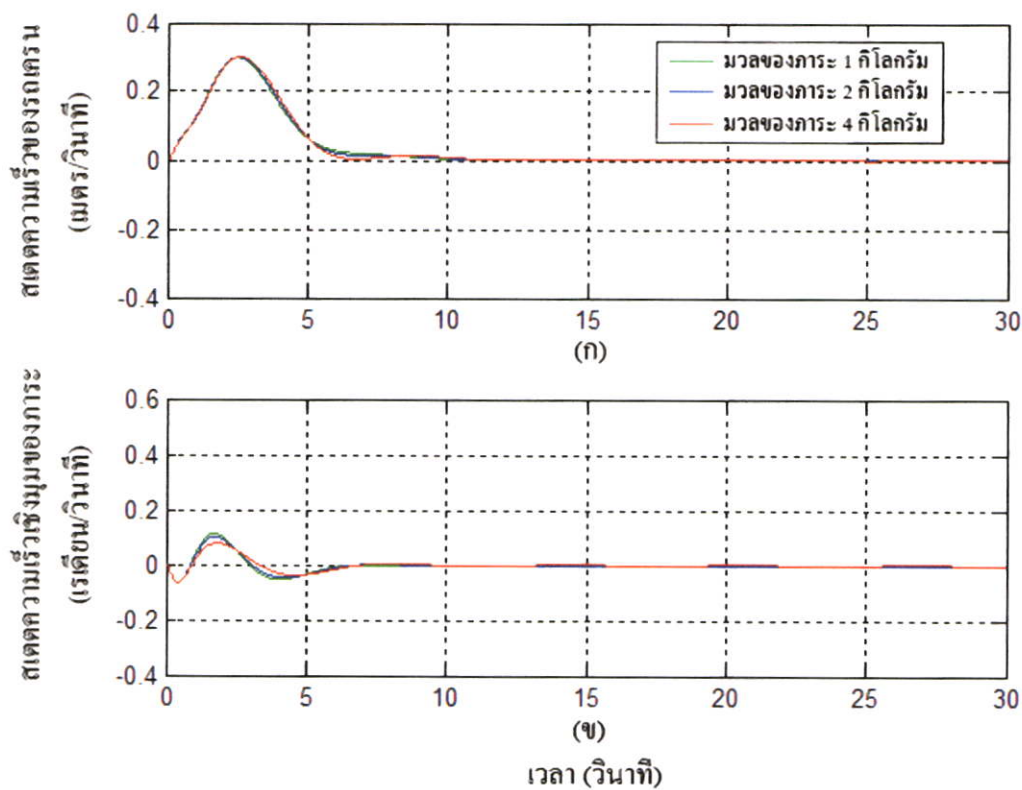
(ก) ตำแหน่งของรถครน (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

สำหรับสัญญาณควบคุมที่แสดงในรูปที่ 5.7 นั้นจะมีค่ามากเมื่อภาระมีน้ำหนักมากขึ้น เนื่องจากมอเตอร์ต้องใช้แรงบิดมากขึ้น



รูปที่ 5.7 สัญญาณควบคุม



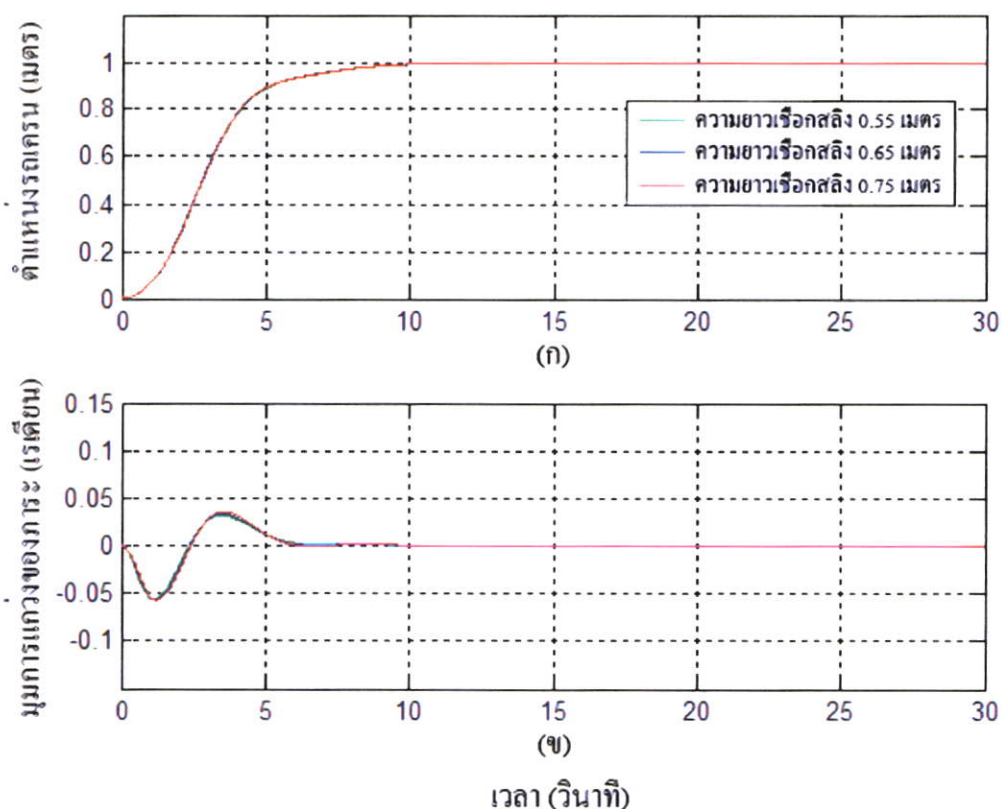
(ก) สเตตความเร็วของรถเครน (ข) สเตตความเร็วเชิงมุมของภาระ

รูปที่ 5.8 สเตตที่ประมาณค่าได้

5.4.2.2 ความยาวเชือกสลึงเปลี่ยนแปลง

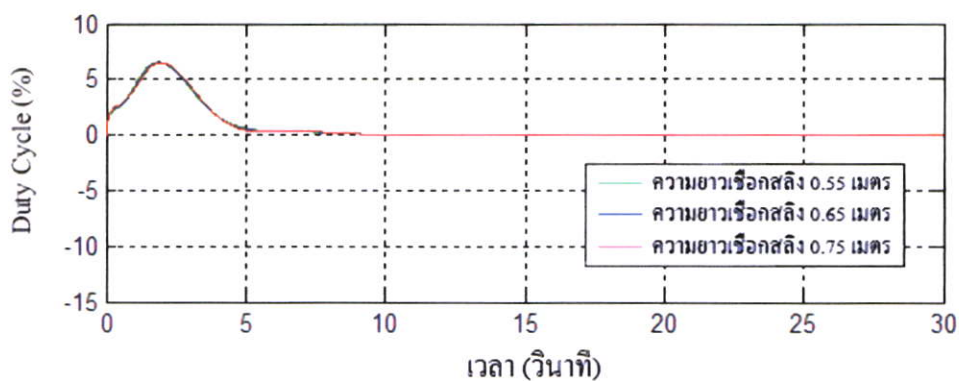
ในการจำลองจะใช้เชือกสลึงที่มีความยาวเท่ากับ 0.55 เมตร 0.65 เมตร และ 0.75 เมตรซึ่งมวลของภาระคงที่ คือ 1 กิโลกรัม ผลตอบสนอง สัญญาณควบคุม และตัวแปรสแตตที่ทำการประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) ของระบบแสดงดังรูปที่ 5.9 5.10 และรูปที่ 5.11 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.9 พบว่า ระบบควบคุมยังคงมีเสถียรภาพอยู่ โดยตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้ผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ถึงแม้ความยาวเชือกสลึงมีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 5.9 (ก) และพบว่ามุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นเล็กน้อยตามความยาวเชือกแสดงผลตอบสนองดังรูปที่ 5.9 (ข)

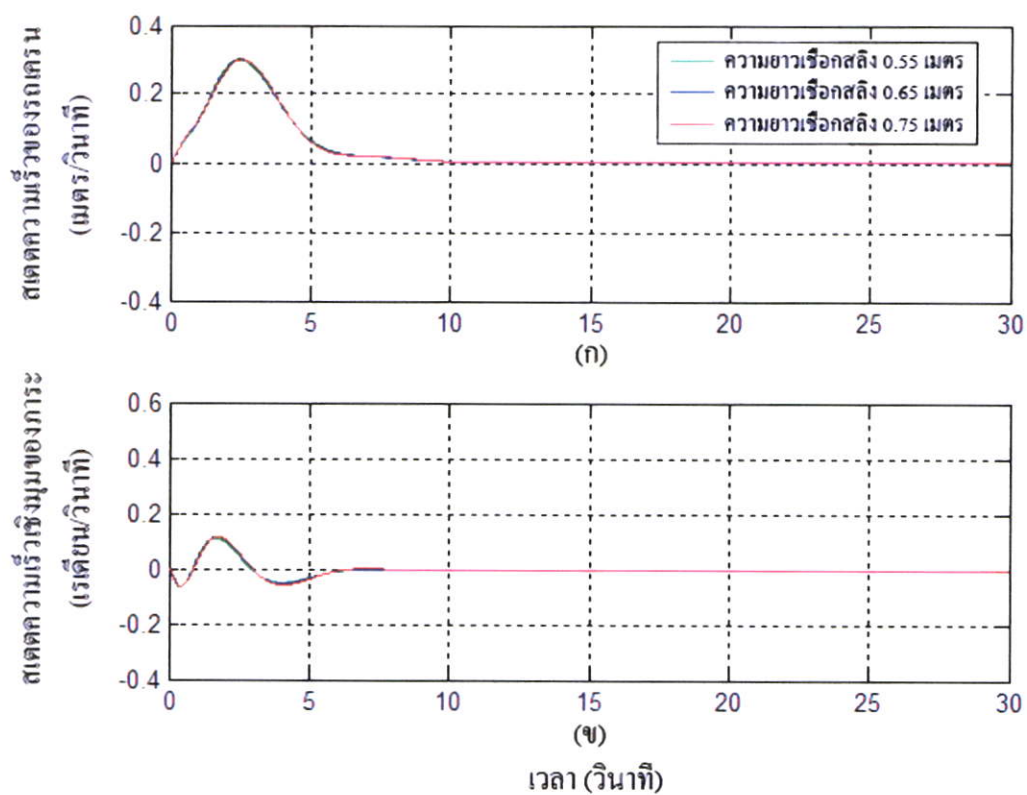


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเชือกสลึง



รูปที่ 5.10 สัญญาณควบคุม

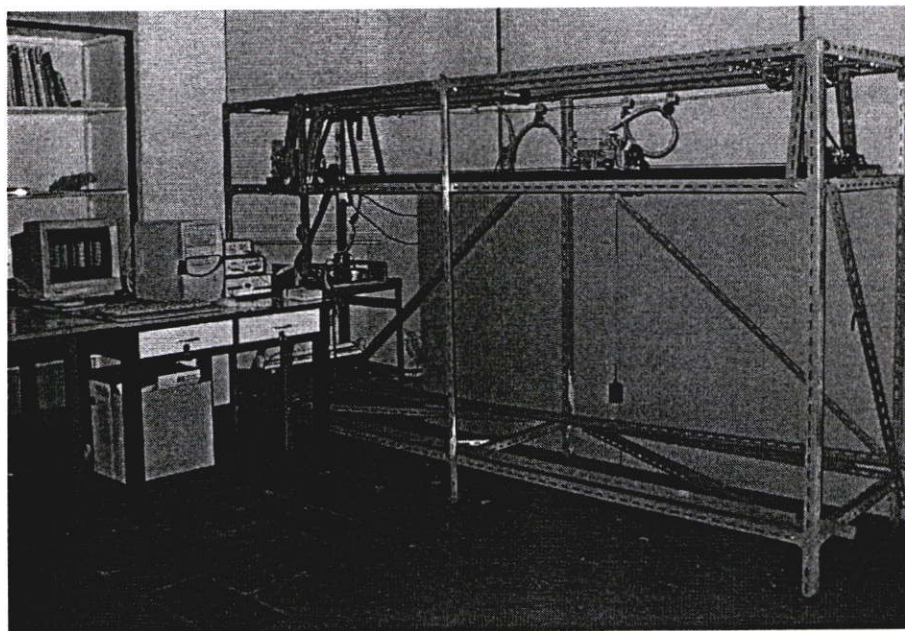


(ก) สเตตความเร่งของรถเครน (ข) สเตตความเร็วเชิงมุมของภาระ

รูปที่ 5.11 สเตตที่ประมาณค่าได้

5.5 ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้จำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับ สเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุดที่ออกแบบด้วยวิธี CDM แล้ว อันดับต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวมาควบคุมระบบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์อันดับต่ำสุดจะถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซีโดยใช้ค่าเวลาชักตัวอย่างเท่ากับ 0.05 วินาที ภาพถ่ายระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 5.12



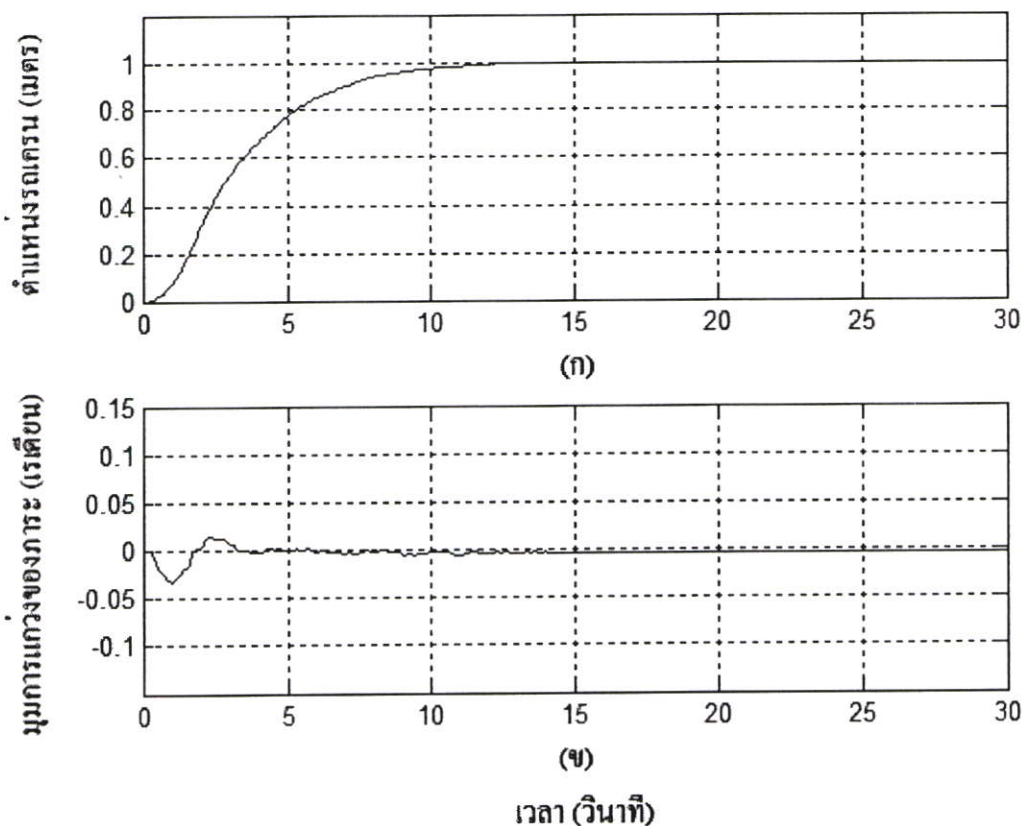
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ

ในการทดลองควบคุมระบบครนเหนือศีรษะจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบการทดลองคล้ายกันกับการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ทำการจำลองไว้ข้างต้นแต่จะเพิ่มการทดลองในการกำจัดสิ่งรบกวน

5.5.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นแสดงดังรูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.14 และตัวแปรสเตตที่ประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) แสดงดังรูปที่ 5.15 จากรูปที่ 5.13 พบว่าตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถควบคุมให้รถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว โดยมีช่วงเวลาเข้าที่ เท่ากับ 12.4 วินาที ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบไว้ ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.13 (ก) ในขณะเดียวกัน

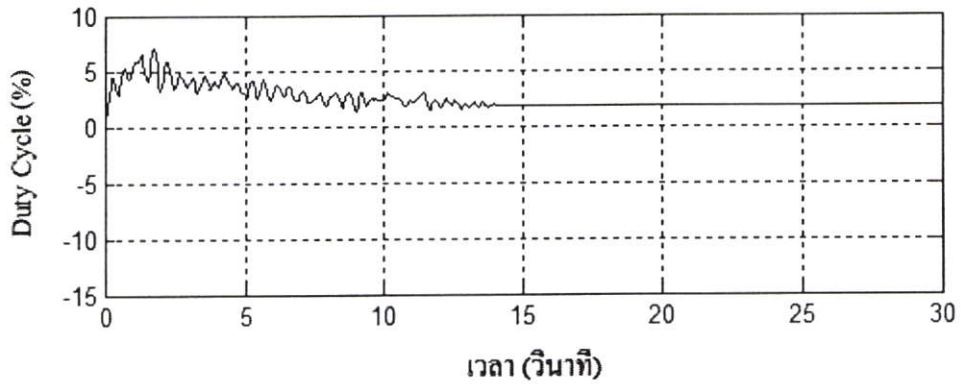
สามารถลดมุมแกว่งของภาระให้อยู่ภายในขอบเขต ± 0.04 เรเดียนได้ แต่จะมีการแกว่งเล็กน้อย หลังจากรถเครนเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายแล้ว ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.13 (ข) จะเห็นว่ามุมแกว่งของภาระจะไม่แกว่งอยู่รอบ 0 เรเดียน เนื่องจากรางรถเครนของชุดทดลองไม่ได้ระนาบ



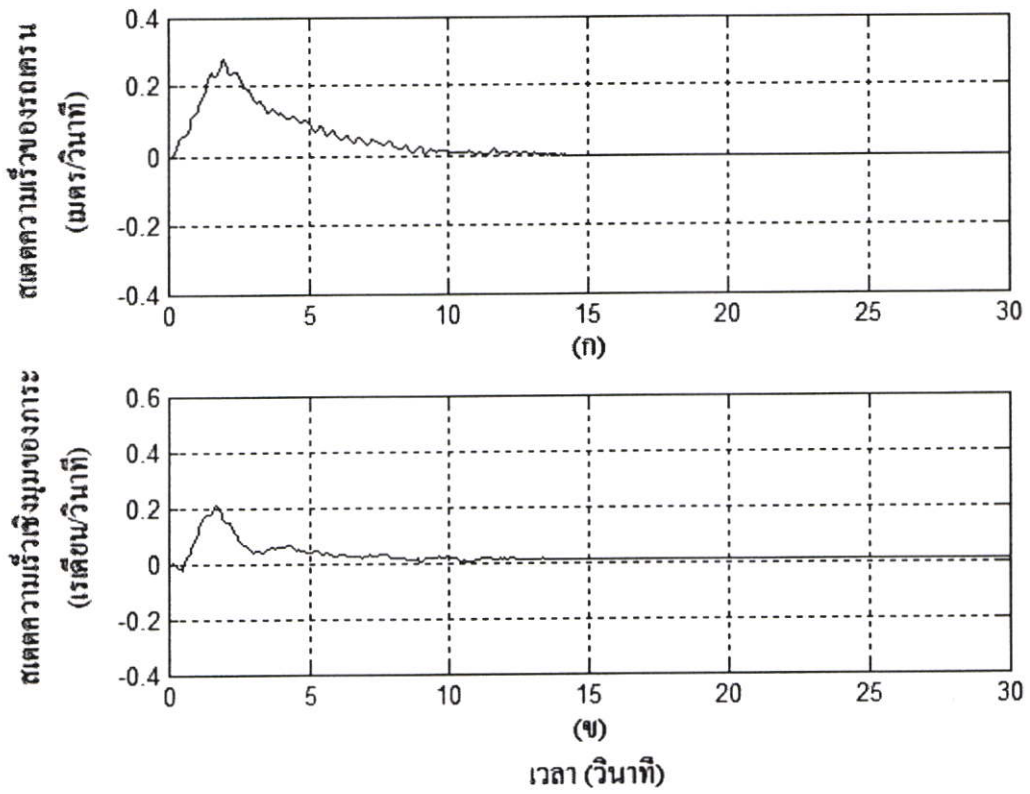
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

จากผลการทดลองเมื่อรถเครนได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว พบว่าสัญญาณควบคุม D , ใต้อยู่ที่ระดับ 2 % แสดงในรูปที่ 5.14 จากรูปที่ 5.15 แสดงสเตรตที่ประมาณค่าได้โดยออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด พบว่าการประมาณค่าสเตรตความเร็วของรถเครนได้ใกล้เคียงกับผลการจำลอง แต่การประมาณค่าสเตรตความเร็วเชิงมุมของภาระมีค่าผิดพลาดเนื่องจากค่าผิดพลาดของมุม ซึ่งเกิดจากรางรถเครนของชุดทดลองไม่ได้ระนาบ



รูปที่ 5.14 สัญญาณควบคุม



(ก) อัตราเร่งของรถ (ข) อัตราเร่งเชิงมุมของกาน้ำ

รูปที่ 5.15 สเตตที่ประมาณค่าได้

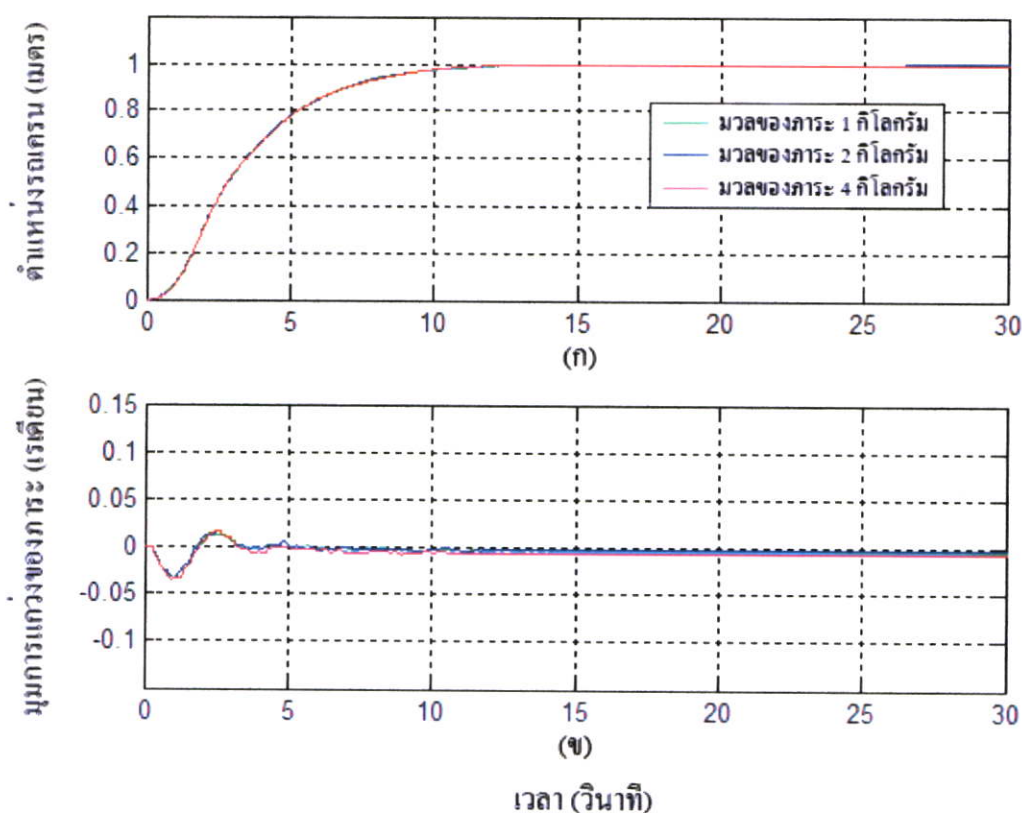
5.5.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีมวลของภาระเปลี่ยนแปลงและกรณีความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลง

5.5.2.1 มวลของภาระเปลี่ยนแปลง

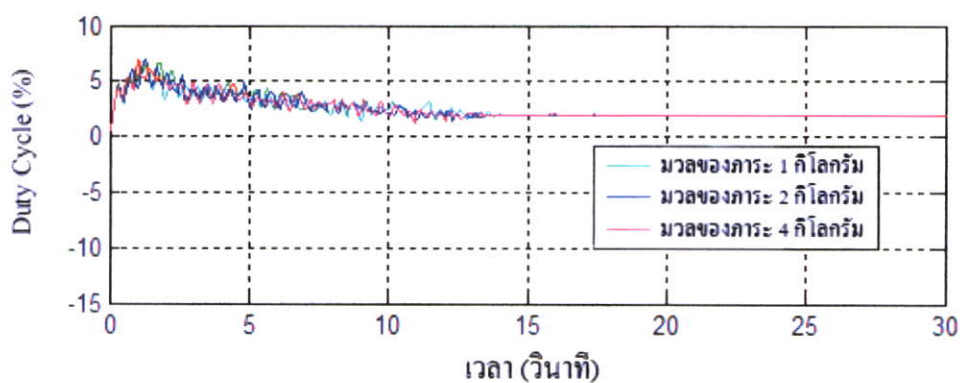
ในการทดลองจะใช้ภาระที่มีมวลเท่ากับ 1 กิโลกรัม 2 กิโลกรัม และ 4 กิโลกรัม โดยคงความยาวเชือกสลิงไว้ที่คือ 0.65 เมตร ผลตอบสนองสัญญาณควบคุมและตัวแปรสถานะที่ประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) ของระบบแสดงดังรูปที่ 5.16 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ

เมื่อมวลของภาระเพิ่มมากขึ้นพบว่าตัวควบคุมยังสามารถควบคุมตำแหน่งของรถครนไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว แสดงดังรูปที่ 5.16 (ก) และพบว่าตัวควบคุมสามารถลดขนาดของมุมที่แกว่งของภาระให้อยู่ในขอบเขต ± 0.04 เรเดียนและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงผลตอบสนองดังรูปที่ 5.16 (ข)

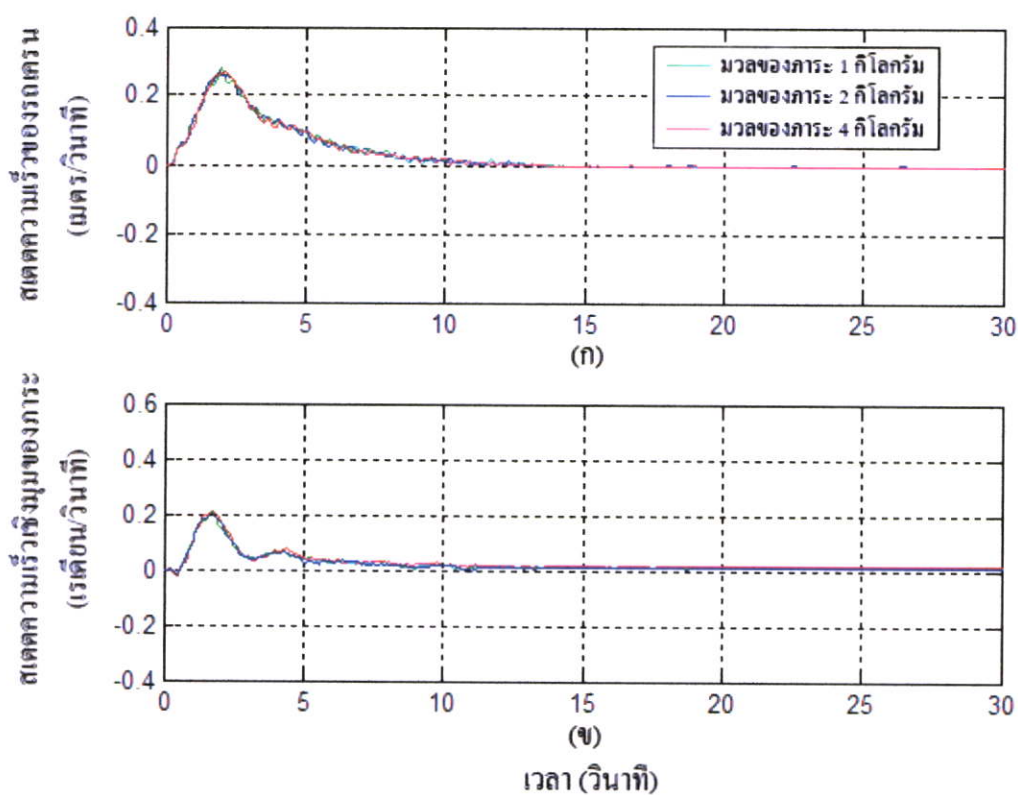


(ก) ตำแหน่งของรถครน (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลภาระ



รูปที่ 5.17 สัญญาณควบคุม

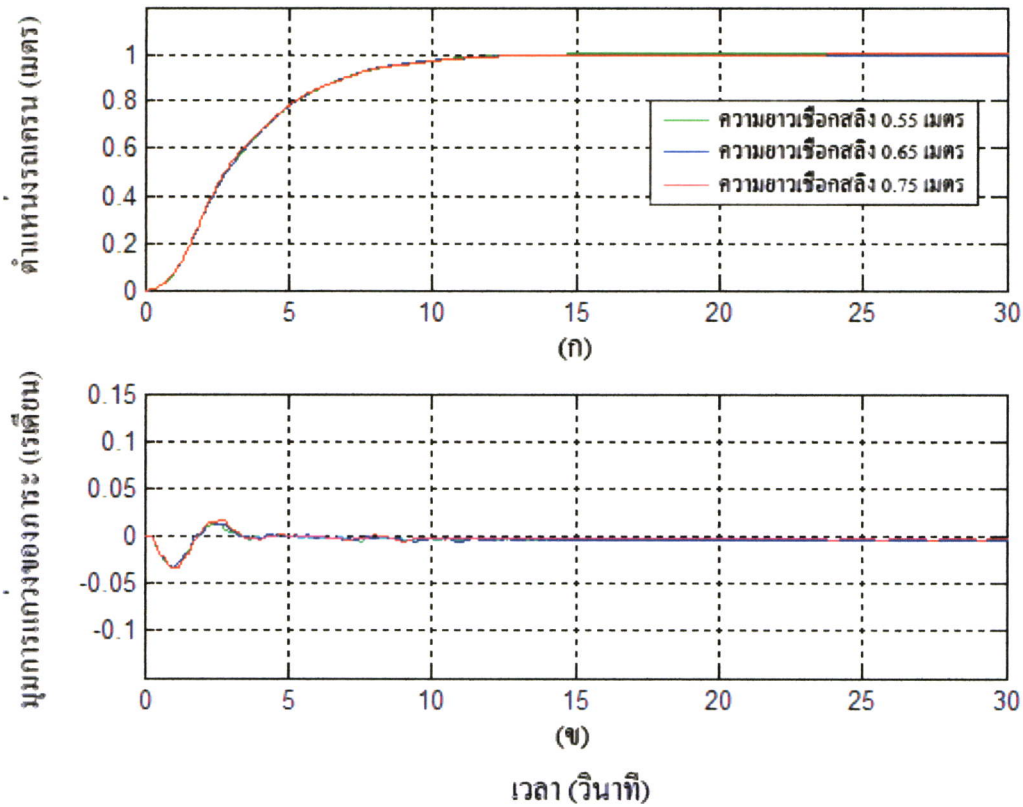


(ก) สเตตความเร็วของรถเครน (ข) สเตตความเร็วเชิงมุมของภาระ

รูปที่ 5.18 สเตตที่ประมาณค่าได้

5.5.2.2 ความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลง

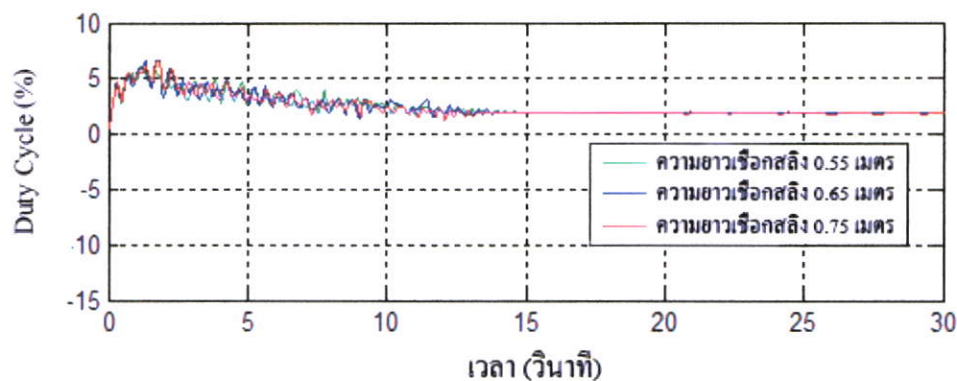
ในการทดลองใช้เชือกสลิงที่มีความยาวเท่ากับ 0.55 เมตร 0.65 เมตร และ 0.75 เมตรซึ่งมวลของภาระที่ค่าคงที่ คือ 1 กิโลกรัม ผลตอบสนอง สัญญาณควบคุมและตัวแปรสแตตที่ประมาณค่าได้ (ความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ) ของระบบแสดงดังรูปที่ 5.19 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ



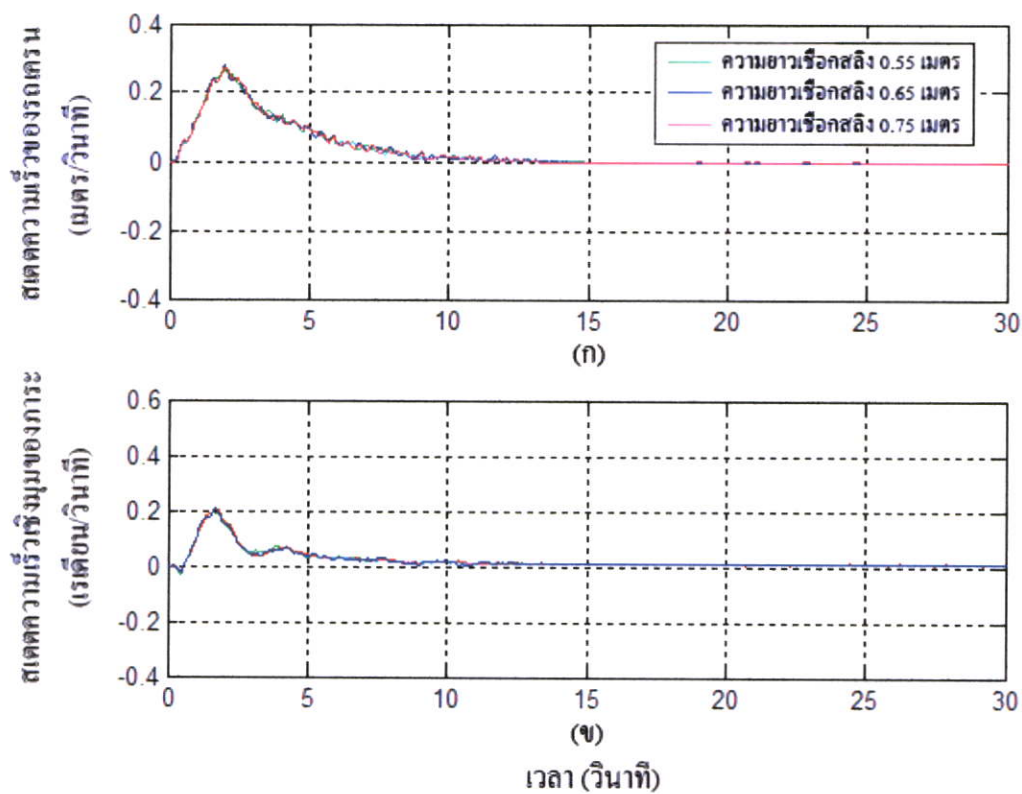
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวเชือกสลิง

ตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครนไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ ถึงแม้ความยาวเชือกสลิงเปลี่ยนแปลงยาวขึ้นหรือสั้นลง แสดงดังรูปที่ 5.19 (ก) ซึ่งพบว่าผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว นอกจากนี้ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมให้มุมแกว่งของภาระ อยู่ในขอบเขต ± 0.04 เรเดียนและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงดังรูปที่ 5.19 (ข)



รูปที่ 5.20 สัญญาณควบคุม



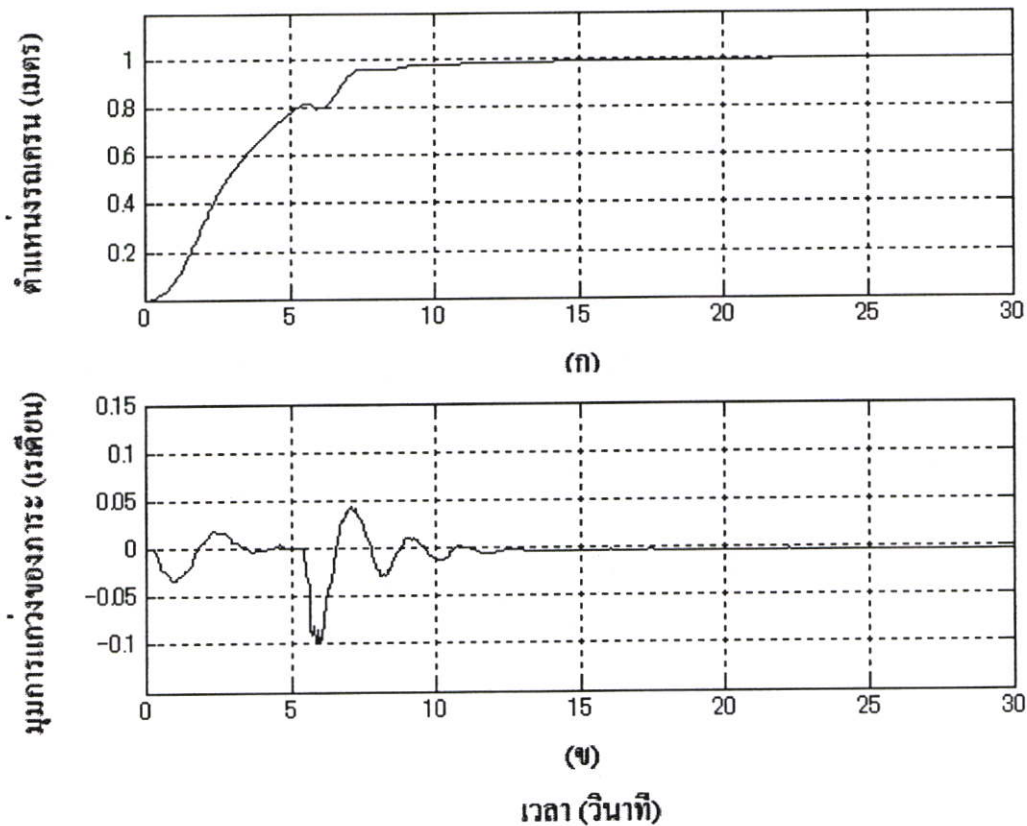
(ก) สเตตความเร็วของรถเครน (ข) สเตตความเร็วเชิงมุมของภาวะ

รูปที่ 5.21 สเตตที่ประมาณค่าได้

5.5.3 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน

การทดลองในหัวข้อนี้จะจำลองสถานการณ์ของการควบคุมระบบรถยนต์ในระหว่างที่รถยนต์ทำงานจริงอาจมีสิ่งกีดขวางที่ชนย้ายหรือเกิดลมพัด ซึ่งเป็นสิ่งรบกวนที่จะทำให้การแกว่งจนอาจเป็นอันตรายหรือสร้างความเสียหายให้กับสิ่งรอบข้างได้

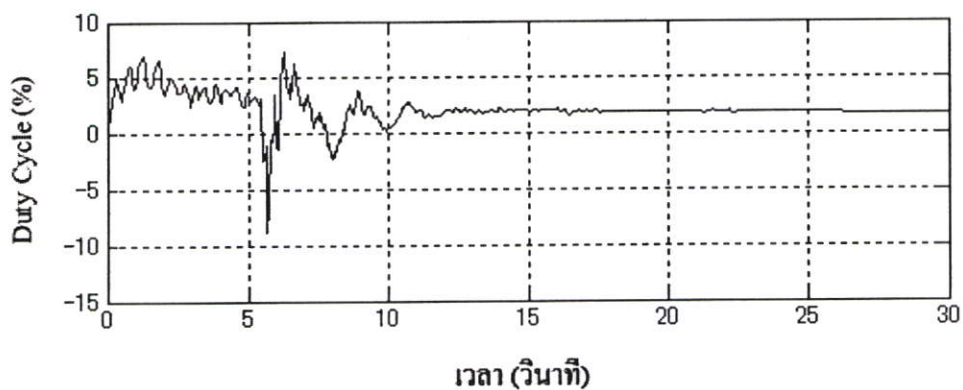
ขั้นตอนในการทดลองจะให้รถยนต์ที่เคลื่อนที่ไปเป็นระยะ 1 เมตร ในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปที่ระยะ 0.8 เมตร ผู้ทำการทดลองใช้สปริงที่ให้แรงผลัดคงที่ ผลักภาระเพื่อรบกวนให้ภาระแกว่ง



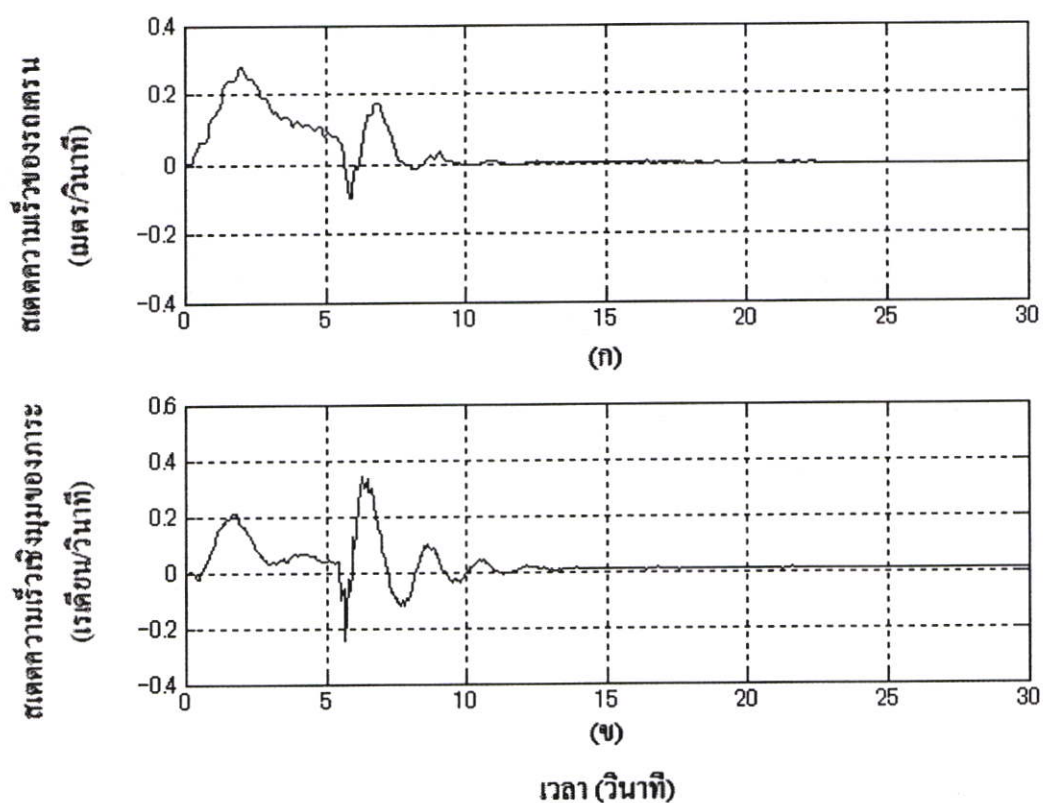
(ก) ตำแหน่งของรถยนต์ (ข) มุมแกว่งของภาระ

รูปที่ 5.22 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อภาระถูกรบกวน

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.22 (ก) พบว่า ตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตคร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันสามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วดังแสดงดังรูปที่ 5.22 (ข) และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 สัญญาณควบคุม



(ก) สดตความเร็วของรถเครน (ข) สดตความเร็วเชิงมุมของภาวะ

รูปที่ 5.24 สดตที่ทำการประมาณค่า

ในส่วนผลการประมาณค่าสดตความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาวะเมื่อมีผลของสิ่งรบกวนเข้าไปในระบบ พบว่าออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดยังสามารถประมาณค่าสดตดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 5. 24

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับ ออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบครนเหนือสี่ระยะ ซึ่งตัวควบคุมเซอร์โว ป้อนกลับสเตตจะทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนพร้อมทั้งลดมุมแกว่งของภาระในเวลา เดียวกันและใช้ออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดเข้ามาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรสเตตสองตัวที่ ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง (ความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ)

การจำลองและการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบ ผลตอบสนองของระบบวงปิดเมื่อกำหนดให้รถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย และทดสอบ ความสามารถของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์ของระบบ (มวลของภาระและความยาวเชือกสลิง) เกิด การเปลี่ยนแปลง และได้เพิ่มการทดสอบการกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนภาระ

จากผลการจำลองและผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตสามารถ ควบคุมตำแหน่งของรถครน โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันตัวและสามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถ ครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงพบว่า ตัว ควบคุมยังสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดผลกระทบของสิ่งรบกวน ได้ และส่วนออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถประมาณค่าสเตตที่ไม่สามารถวัดค่าได้ โดยตรงได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกัน

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ในการวัดมุมการแกว่งของภาระจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากรางรถครนมีการ โค้งงอ โดยแนวทางการแก้ไขปัญหานี้คือ ปรับปรุงโครงสร้างของระบบครนเหนือสี่ระยะและ เปลี่ยนรางรถครนให้แข็งแรงขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

เนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นการศึกษาและออกแบบตัวควบคุมที่หาจากแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจึงเป็นอีกแนวทางที่น่าสนใจ

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] N. Kodani, "*Traveling Crane using H_2 Controller based on Minimum Order Observer*", SICE Annual Conference in Fukui, August 4-6, 2003 Fukui University, Japan
- [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] K. Ogata, Modern Control Engineering, Second Edition, Prentice-Hall international, Inc1990

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

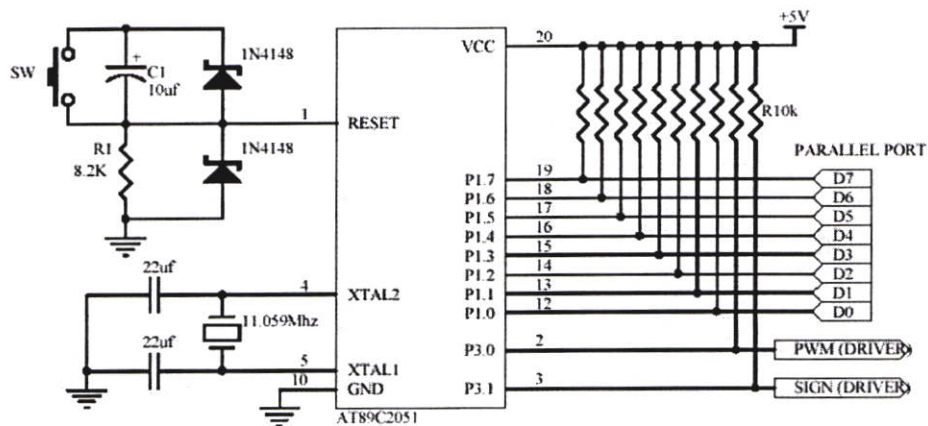
รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบเครื่องหนือีรยะด้วยโปรแกรมภาษาซี (C language) ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ทฤษฎีการควบคุม

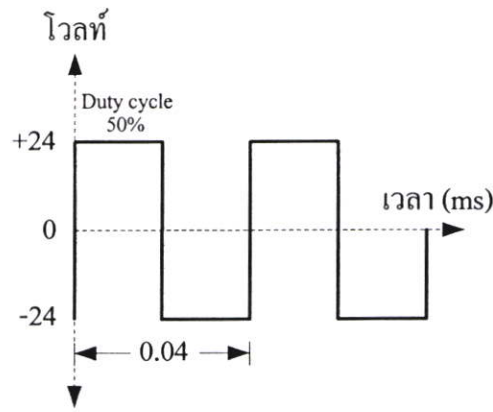
ก.2 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณพัลส์วัดมอดูเลชัน (Digital to PWM)

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



รูปที่ ก.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM

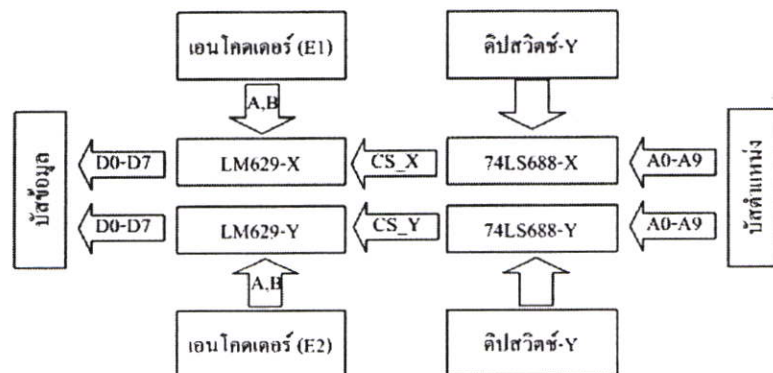
จากรูปที่ ก.1 ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051 ซึ่งจะถูกโปรแกรมให้ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข.) ซึ่งข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ฐาน 16 นี้จะเข้ามาทางพอร์ต P1.0-P1.7 โดยพอร์ต P1.0-p1.6 จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการปรับความกว้างของพัลส์โดยถ้าข้อมูลเป็นค่า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



รูปที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตฐาน 16 กับสัญญาณ PWM

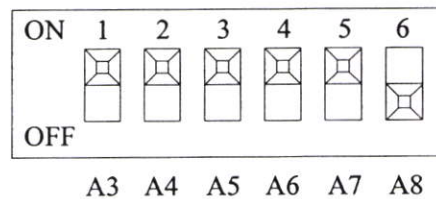
ก.3 วงจรนับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ (counter)

วงจรถับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ เป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ตรวจจับซึ่งในการทดลองใช้เอนโคเดอร์ โดยวงจรจะอยู่บนการ์ดต่อกับบอร์ดของคอมพิวเตอร์ คือ การ์ดนับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครนและมุมแกว่งของภาระ จะมีลักษณะเป็น ISA การ์ด ใช้เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเอนโคเดอร์ที่ใช้วัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครนและวัฏมุมแกว่งของภาระ โดยตัวการ์ดนี้จะประกอบด้วย ไอซี LM629 จำนวนสองตัวโดยตัวหนึ่งทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ที่วัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดอร์ที่วัฏมุมแกว่งของภาระ โดยข้อมูลที่นับได้เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต โดยจะส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป และในวงจรได้เพิ่มไอซี 26LS31 และ 26LS32 ซึ่งเป็นตัวขับและตัวรับในสายส่งสัญญาณของเอนโคเดอร์ เพื่อความชัดเจนและแน่นอนของสัญญาณพัลส์ การรับส่งสัญญาณในการนี้ได้ใช้ไอซี 74LS244 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายในการ์ดได้อย่างถูกต้อง บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรถับจำนวนพัลส์แสดงดังรูปที่ ก.3

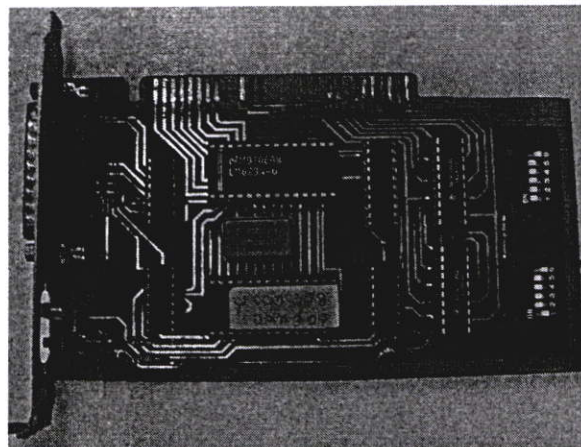


รูปที่ ก.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรถับจำนวนพัลส์

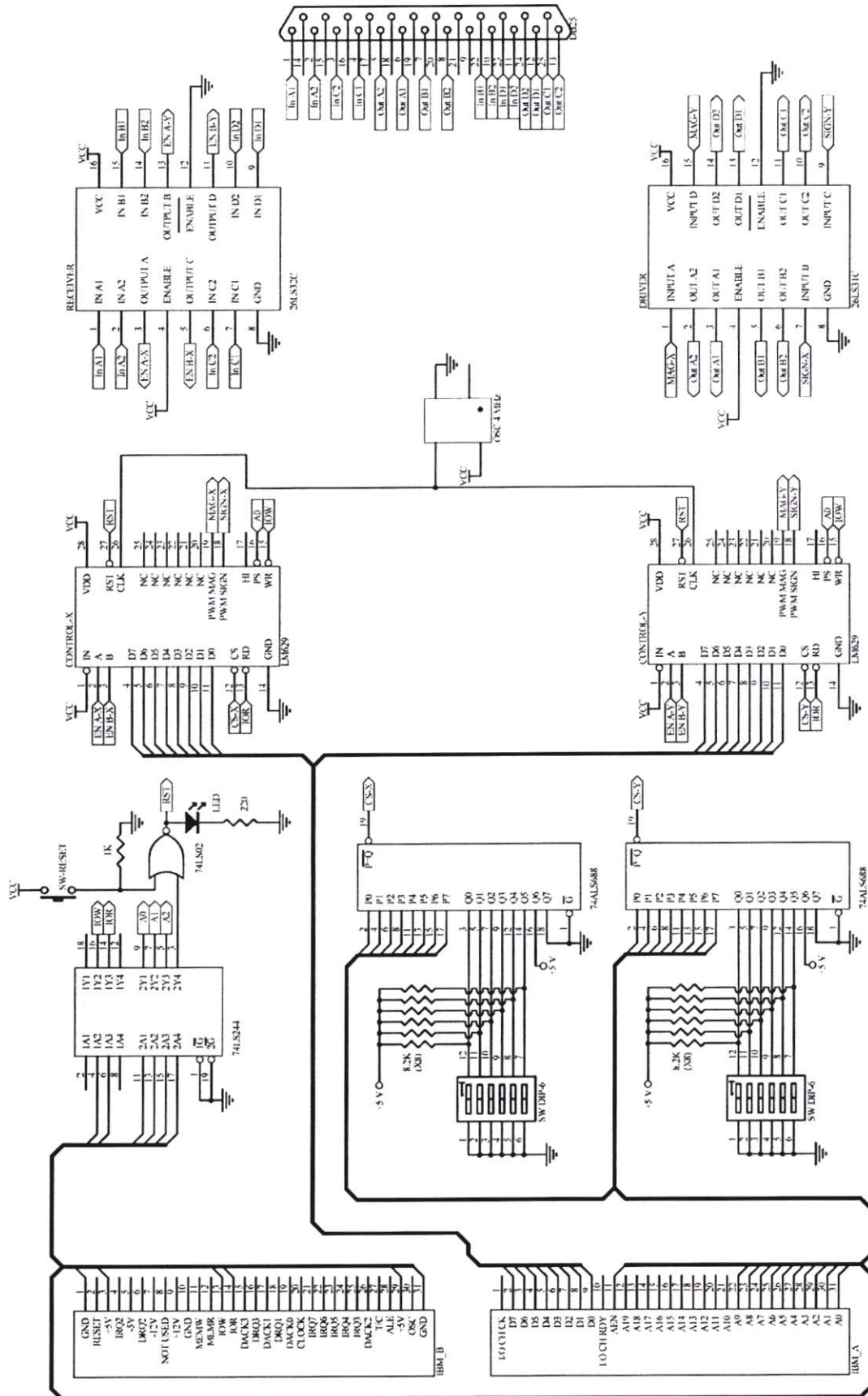
จากรูปที่ ก.3 หลักการทำงานของวงจรถือ ไอซี 74LS688 จะตีโคคตำแหน่งจากบัสตำแหน่ง (address bus) A0-A9 โดยกำหนดตำแหน่งได้จากการปิด-เปิดของคิปสวิตช์ ซึ่งถ้าเปิดสวิตช์จะมีสถานะเป็น “0” และถ้าปิดสวิตช์จะมีสถานะเป็น “1” ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการกำหนดบัสตำแหน่ง 300H (11 0000 0XXX B) ในการติดต่อกับการ์ด หรือ A9=1, 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 ตีโคคตำแหน่งได้ตรงกับที่กำหนดแล้ว ไอซี 74LS688-X จะส่งสัญญาณ CS-X ไปที่ขา CS (chip select) ของไอซี LM629-X และเมื่อได้รับสัญญาณจากบิตตำแหน่ง A0 ที่ขา PS แล้ว ไอซี LM629-X จะทำงานโดยรับสัญญาณจากเอนโคเดอร์ที่วัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเรนที่ขา A และ B โดยสัญญาณที่รับจะมีสองเส้นมีลักษณะสัญญาณเป็นพัลส์ โดยแต่ละเส้นจะมีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา จากนั้น LM629-X จะทำการนับจำนวนพัลส์ที่รับเข้ามาแล้วส่งข้อมูลขนาด 8 บิต เข้าสู่บัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป และในกรณีที่ต้องการอ่านค่าของเอนโคเดอร์ที่วัดการแกว่งของมุมก็จะมีหลักการเดียวกันดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยภาพถ่ายของ ISA การ์ดแสดงดังรูปที่ ก.5 และรายละเอียดของวงจรมับจำนวนพัลส์แสดงดังรูปที่ ก.6 ส่วนตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.7



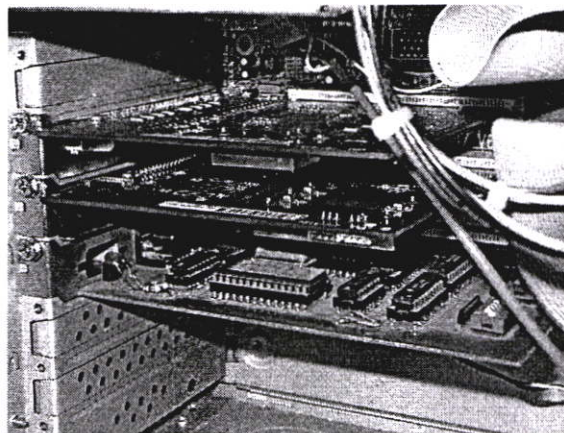
รูปที่ ก.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิตช์



รูปที่ ก.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด



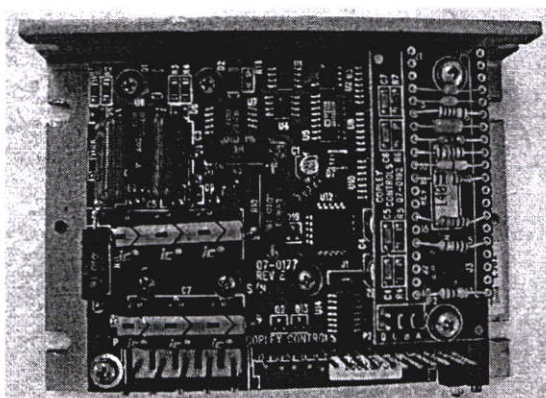
รูปที่ ก.6 รายละเอียดของวงจรมับจำนวนพัลส์ภายใน ISA การ์ด



รูปที่ ก.7 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ

ก.4 วงจรขับกระแสของมอเตอร์ (current driver motor)

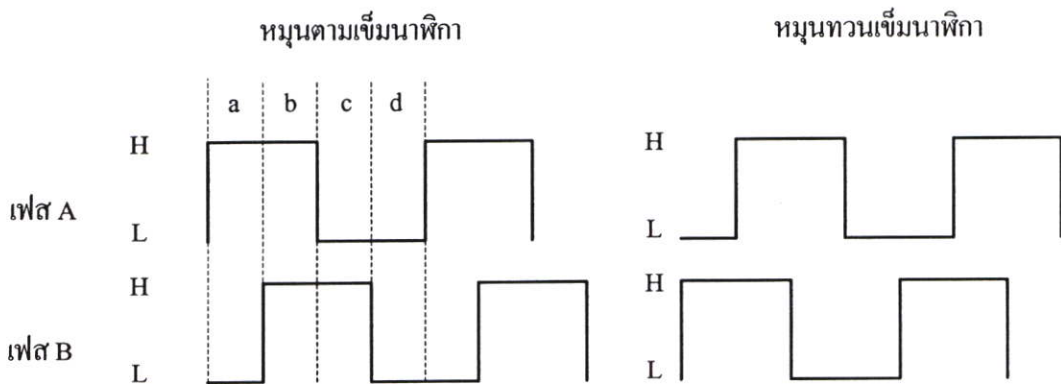
วงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนจะใช้วงจรสำเร็จรูปของบริษัท Copley Controls Corp. รุ่น 412 โดยมีคุณสมบัติคือ ให้แรงดันเอาต์พุตขนาด 24 - 90 โวลต์ กระแสเอาต์พุตสูงสุด 20 แอมป์. สัญญาณ PWM มีความถี่ 3 กิโลเฮิรซ์ ป้องกันการลัดวงจรทางเอาต์พุตและมีระบบตัดการทำงานของวงจรเมื่ออุณหภูมิของวงจรร้อนเกิน 70 องศาเซลเซียส โดยวงจรขับกระแสของมอเตอร์นี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM และสัญญาณตำแหน่งจากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM จากนั้นจะขยายสัญญาณและส่งสัญญาณนี้ไปขับมอเตอร์ ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน

ก.5 เอนโคเดเดอร์

เอนโคเดเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ เนื่องจากสัญญาณที่ป้อนกลับที่ส่งมาจากเอนโคเดเดอร์นั้น สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ หรือสามารถบอกสถานะของระบบนั้นได้ว่าเป็นอย่างไร โดยนำสัญญาณป้อนกลับที่ได้นี้มาคำนวณ เพื่อหาสัญญาณควบคุมให้กับระบบนั้นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเอนโคเดเดอร์ที่ใช้ในระบบเกรน จะเป็นแบบโรตารีเอนโคเดเดอร์มีความละเอียด 2000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ (360 องศา) แต่เนื่องจากเมื่อเอนโคเดเดอร์หมุนจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้นที่ขา A และ B ซึ่งต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา โดยทั้งสองสัญญาณนี้จะถูกขยายสัญญาณและส่งเข้าสู่วงจรมุม ซึ่งวงจรมุมจะทำการแบ่งสัญญาณพัลส์ทั้งสองออกเป็น 4 ส่วนแสดงดังรูปที่ ก.9 ดังนั้นจะทำให้ความละเอียดของสัญญาณพัลส์



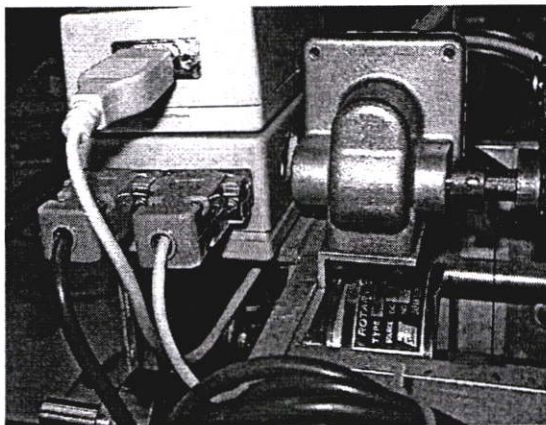
(a,b,c,d) คือ (2000,4000,6000,8000) พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ

รูปที่ ก.9 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์ต่อการหมุนเอนโคเดเดอร์ 1 รอบ

เพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า นั่นคือ 8000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ดังนั้นความละเอียดของมุมที่วัดได้คือ $360/8000 = 0.045$ องศาต่อสัญญาณ 1 พัลส์ โดยเอนโคเดเดอร์ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 2 ตัวคือ

ก.5.1 เอนโคเดอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเข็น

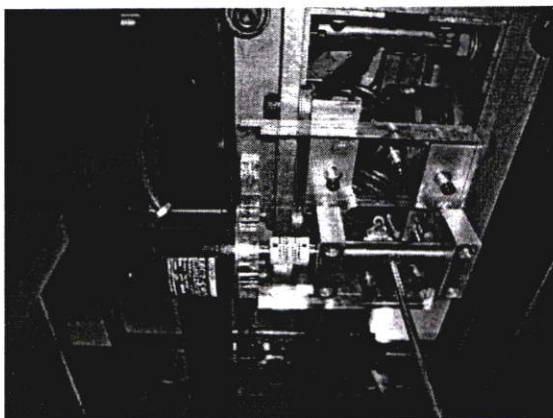
เอนโคเดอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของรถเข็น โดยจะต่อกับล้อข้างซึ่งเชื่อมต่อ (coupling) ด้วยวัสดุที่ทำจากกาวแท่ง ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10 การติดตั้งเอนโคเดอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเข็น

ก.5.2 เอนโคเดอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาวะ

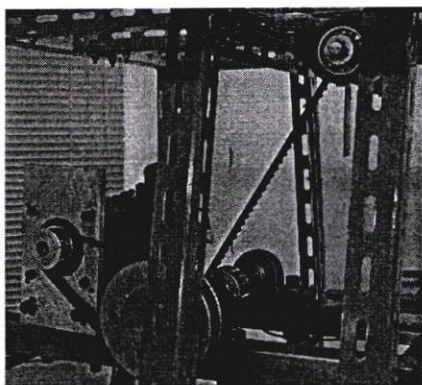
เอนโคเดอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณด้านใต้รถเข็น โดยจะต่อกับแท่งเหล็ก โดยตรงกลางของแท่งเหล็กนี้ จะต่อกับท่อนสแตนเลส เพื่อให้เชือกสลิงสอดผ่านได้ เหตุที่ทำเช่นนี้ เนื่องจากเวลาเชือกแกว่งจะทำให้แท่งสแตนเลสแกว่งตามและทำให้แท่งเหล็กแกว่งตามไปด้วย และแท่งเหล็กนี้จะเชื่อมต่อกับเอนโคเดอร์ด้วยวัสดุที่ทำจากอีพ็อกซี ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ก.11



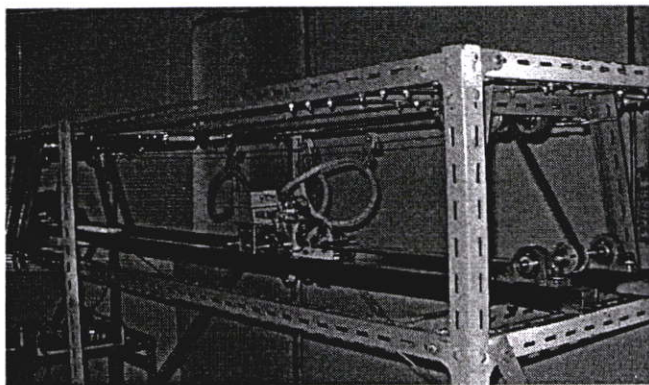
รูปที่ ก.11 การติดตั้งเอนโคเดอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาวะ

ก.6 ระบบส่งกำลังของรถเครน

ระบบส่งกำลังของรถเครนจะประกอบด้วยดีซีมอเตอร์ขนาด 500 วัตต์ 70 โวลต์เป็นตัวส่งกำลัง และมีชุดทดรอบเพื่อลดความเร็วของมอเตอร์แต่เพิ่มแรงบิดให้มากขึ้นโดยชุดทดรอบ จะประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) และไทม์มิ่งพูลเลย์ (timing pulley) ซึ่งไทม์มิ่งพูลเลย์ที่ใช้จะมีสองตัว โดยตัวแรกจะยึดติดกับปลายของมอเตอร์ส่วนอีกตัวจะยึดติดกับแกนหมุนของชุดส่งกำลัง โดยไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวแรกจะมีขนาดเป็น $1/3$ ของไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวที่สองเนื่องจากการลดความเร็วของมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ขึ้นเป็น 3 เท่า การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์นี้สามารถลดแบ็คแลชที่เกิดขึ้นในระบบทดรอบที่ใช้เฟืองเกียร์ได้ ส่วนชุดส่งกำลังนี้ก็ประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์เช่นกัน ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งกำลังไปให้กับรถเครนเพื่อให้รถเครนสามารถเคลื่อนได้ การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งในการส่งกำลัง เนื่องจากสามารถลดสลลิปที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังได้ดีกว่าการใช้สายพานธรรมดา โดยระบบส่งกำลังของรถเครนแสดงดังรูปที่ ก.12



(ก)



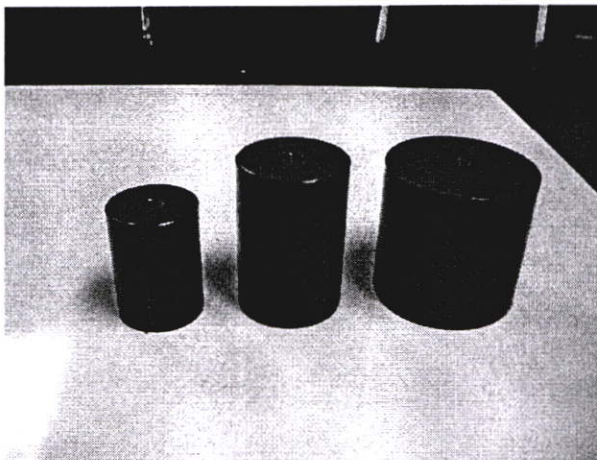
(ข)

(ก) ชุดทดรอบมอเตอร์ (ข) ระบบส่งกำลังของรถเครน

รูปที่ ก.12 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเครน

ก.7 ภาวะ

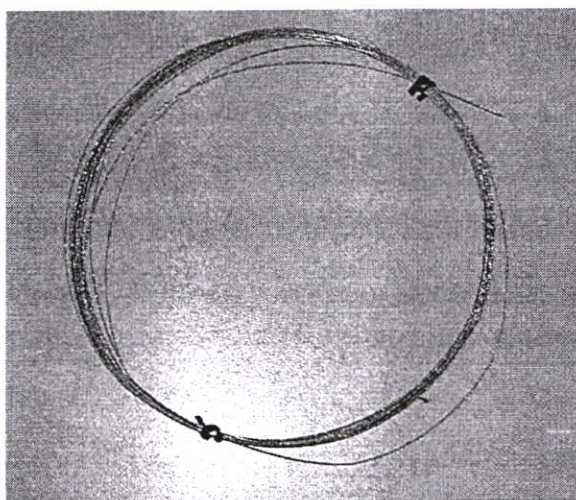
ภาวะที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำจากเหล็กตันแข็งมีมวล 1 กิโลกรัม 2 กิโลกรัม และ 4 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 ภาพถ่ายภาวะที่ใช้ในการทดลอง

ก.8 เชือกสลิง

เชือกสลิงที่ใช้ในการดึงภาวะมีลักษณะเป็นเส้นเอ็นใสมีสลึงอยู่ภายใน สามารถรับน้ำหนักได้ 10 กิโลกรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.42 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.14 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการดึงภาวะ

ภาคผนวก ข.

**โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
และการทดลอง**

ข.1 โปรแกรมหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบ อันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM

(โปรแกรมเมตแล็บ)

```

clear all

clc

M=6.12;

m=1;

l=0.65;

g=9.81;

bm=12.24;

kr=0.6281;

Ts=0.05;

A=[0 0 1 0;0 0 0 1;0 m*g/M -bm/M 0;0 -(M+m)*g/M/l bm/M/l 0]

B=[0;0;kr/M;-kr/M/l];

C=[1 0 0 0];

%desire servo by CDM

Ahat1=[A zeros(4,1);-C 0];

Bhat1=[B;0];

t=3.1;

g1=3; g2=2.5; g3=2; g4=2;%in program 7 march 2007 real proposal

Pcs=[t^5/(g1^4*g2^3*g3^2*g4) t^4/(g1^3*g2^2*g3) t^3/(g1^2*g2) t^2/g1 t 1];

ps=roots(Pcs)

figure(1); hold on; plot(real(ps),imag(ps),'x')

axis equal; axis([-10 0 -5 5]); grid on;

Kservo=place(Ahat1,Bhat1,ps)

%-----

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

```

```
KK=Kservo(1:4);
```

```
Ki=-Kservo(5);
```

```
Aab=A(1:2,3:4);
```

```
Abb=A(3:4,3:4);
```

```
Aaa=A(1:2,1:2);
```

```
Aba=A(3:4,1:2);
```

```
Ba=B(1:2,1);
```

```
Bb=B(3:4,1);
```

```
%minimum-order observer gain;
```

```
t=0.2; g=4.5
```

```
Pc=[t^2/g t 1]
```

```
P=roots(Pc)
```

```
Ke=place(Abb',Aab',P)'
```

```
Ahat=Abb-Ke*Aab
```

```
Bhat=(Ahat*Ke)+Aba-(Ke*Aaa)
```

```
Fhat=Bb-(Ke*Ba)
```

```
AA=Aba-(Ke*Aaa)
```

```
BB=Bb-(Ke*Ba)
```

ข.2 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 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบทรานเหนื่อสี่ระยะ (โปรแกรมภาษาซี)

```

#include <conio.h>
#include <bios.h>
#include <time.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>
// #include <string.h>
#include "i2c_x_1.h"
#include "i2c_y_1.h"
#define drive_port 0x378
#define run_dat "E:\\mm\\cdmob.m"

void main(void)
{
    //--->system variable
        float duty_cycle=0.00;
        float sam_time = 0.05;
        float con_float = 0.00;
        float con = 0;

    float con_i = 0;
    float con_i_old = 0;
    float con1=0;
    float vel = 0.00;
    float pos = 0.00;
    float pos_dot = 0.00;
    float pos_eer = 0.00;
    float pos_eer_old = 0.00;
    float pos_ref = 0.00;
    float pos_old = 0.00;

```

```
float ang = 0.00;
float ang_dot = 0.00;
float ang_old = 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 n3 = 0.00;
float n3_old = 0.00;
float x3 = 0.00;
float x3_old = 0.00;
```

```
float n4 = 0.00;
float n4_old = 0.00;
float x4 = 0.00;
float x4_old = 0.00;
```

```
/*===== */
```

```
float u = 0.00;
float ui = 0.00;
float ui_old = 0.00;
float K1 = 0.00;
float K2 = 0.00;
float K3 = 0.00;
float K4 = 0.00;
float Ki = 0.00;
```

```
/*=====*/
```

```
int stop_ang_count = 0;
clock_t start, end;
float ts = 0.00;
```

```

float run_time = 0.00;

float data_out=0.00;

float duty_ref=0.00;

FILE *run_fin;

clrscr();

run_fin = fopen(run_dat,"wt+");

fprintf(run_fin,"source_matrix = [");

//initial system

INIT_LM629 ();

INIT_LM629_y();

SET_PID_FILTER (1, 1, 1, 100);

printf("\npress anykey for clear port.");

getch();

outp(drive_port,0);

//----- data input -----//

printf("\n Enter distance :");

scanf("%f", &pos_ref);

K1 = 70.7808;

K2 = -139.3571;

K3 = 52.1399;

K4 = -14.7331;

Ki = -22.8325;

printf("\nPress any key to start.....");

sound(700);

getch();

nosound();

run_time = 0.00;

start = clock();

```

```

do
{
end = clock();
ts = (end - start) /CLK_TCK;
if( ts >= sam_time)
{
pos = READ_REAL_POS(); //x1
ang = READ_ANGLE_RADIAL(); //x2
pos_eer = pos_ref - pos;
///////// minimum-order observer////
n3 = (((0.1026*u)+(1.6029*ang)-(195*pos))*sam_time)+n3_old)/(1+(15*sam_time));
n4 = (((-0.1579*u)-(73.8084*ang)-(23.0769*pos))*sam_time)+n4_old)/(1+(7.5*sam_time));
x3 = n3 + (13*pos);
x4 = n4 +(3.0769*pos) + (7.5*ang);

ui = ui_old + (pos_eer_old + pos_eer)*sam_time/2 ;
con = -( K1*pos + K2*ang + K3*x3 +K4*x4) - Ki*ui;
con1=con;
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);
    }

    printf("\n");
    printf("time = %4.4f",run_time);
    printf(" ang = %4.4f",ang);
    printf(" pos = %4.4f",pos);
    printf(" con = %3.2f",con1);
    printf(" i = %4.4f",con_i);
}

run_time = run_time + ts;
start = end;
ui_old = ui;
pos_eer_old = pos_eer;
pos_old = pos;
ang_old = ang;
n3_old = n3;
n4_old = n4;
pos_eer = pos_ref -pos;
fprintf(run_fin,"\n");
fprintf(run_fin,"%4.4f\t",run_time);
fprintf(run_fin,"%4.4f\t",ang);

```

```
        fprintf(run_fin,"%4.4f\t",pos);
        fprintf(run_fin,"%3.2f\t",con1);
        fprintf(run_fin,"%4.4f\t",x3);
        fprintf(run_fin,"%4.4f\t",x4);
    }
} while( bioskey(1) == 0 );

con=0;
outp(drive_port,con);
fprintf(run_fin,"\n ");
fclose(run_fin);
}
```

ภาคผนวก ค.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

ISCIT 2006

October 18-20, 2006

Grand Mercure Fortune Hotel, Bangkok, Thailand

ABSTRACTS

International Symposium on Communications
And Information Technologies 2006



CDM Based Servo State Feedback Controller with Minimum-order Observer for Crane System

Santi Puwan¹, Songmoung Nundrakwang¹, Taworn Benjanarasuth¹,
Jongkol Ngamwiwit¹ and Noriyuki Komine²

¹Faculty of Engineering and Research Center for Communications and Information Technology,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
(Tel: +66-2-326-4221, Fax: +66-2-326-4225, Email: knjongko@kmitl.ac.th)

²Department of Embedded Technology, School of Information Science and Technology,
Tokai University, 1117 Kitakaname, Hiratsuka-Shi, Kanagawa-Ken 259-1292, Japan
(E-mail: komine@tokai.ac.jp)

Abstract— In this paper, the design of servo state feedback controller with minimum-order observer by using the concept of Coefficient Diagram Method (CDM) for crane system is presented. An Integrator is augmented to the system so that the system will exhibit no steady-state error in the response to step input. In order to apply the CDM method, the mathematical model of the crane system must be firstly linearized and converted into controllable canonical form by transformation matrix. Then feedback gain matrix, integral gain and observer gain matrix in sense of CDM can be obtained. The satisfied performances of the crane system controlled by the proposed controller are shown in simulation results.

I. INTRODUCTION

Crane systems are widely used in many industrial applications. For instance, it is mainly used for loading and unloading at wharf. The purpose of controlling the crane system is to transport loads rapidly and safely to the desired position with sufficiently small load-swing angle. In literature, the controllers designed by many methods have been studied for the crane system. The fuzzy logic controller and model reference adaptive based controller including neural network based controller have been reported [1]-[3]. However, it is quite complicated to design those controllers to meet the desired performances.

In this paper, a controller called servo state feedback controller with minimum-order observer designed based on the concept of Coefficient Diagram Method (CDM) for controlling the crane system is presented. As reported by S. Manabe [4], the controller designed by using CDM approach is comparatively less complicated than other design methods while it is still effective. Therefore, the concept of CDM will be applied to assign the feedback gain matrix, integral gain and observer gain matrix of the proposed controller.

The crane system shown in Fig.1 is a single input multiple output (SIMO) system with the external force applied to the cart is the input and two outputs are the position of cart (x) and the load-swing angle (θ). As can be shown later on, the crane system requires four state variables ($x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}$) to

represent its state space model. Since only two state variables are directly appeared in its outputs, the minimum-order observer is implemented to estimate other two unmeasured states ($\dot{x}, \dot{\theta}$).

In order to apply the CDM concept, the mathematical model of the crane system must be linearized and transformed into the controllable canonical form by transformation matrix. Then each element of the servo state feedback gain matrix can be designed by matching the coefficients of close-loop characteristic polynomial of the crane system to the one obtained from the CDM concept.

II. MATHEMATICAL MODEL

The model of the crane system is illustrated in Fig. 1, where x is the cart position, l is the rope length, m is the mass of load, M is the mass of cart, θ is the load-swing angle and u is the external force.

The equation of motion [5] for the cart can be expressed by

$$\begin{aligned} M\ddot{x} &= u - m\ddot{x}_m - b_m\dot{x} \\ \ddot{x}_m &= x - l \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

and the equation of motion relating to the load can be described as

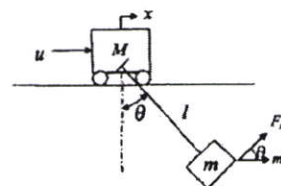


Fig. 1. Crane system.

$$\begin{aligned} ml\ddot{\theta} &= -mg \sin \theta + F_m \\ F_m &= m\ddot{x} \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

From (1) and (2), the equations of motion of a crane system can be obtained as follows

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{x} - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + ml\ddot{\theta} \cos \theta + K_r u - b_m \dot{x} \\ l\ddot{\theta} = \ddot{x} \cos \theta - g \sin \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Linearizing the above equations around the equilibrium point $x=0$, $\theta=0$, $\dot{x}=0$ and $\dot{\theta}=0$, the linear state equation and output equation of the crane system can then be obtained in (4).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= A\mathbf{x}(t) + Bu(t) \\ \mathbf{y}(t) &= C\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

where $\mathbf{x}(t) = [x \ \theta \ \dot{x} \ \dot{\theta}]^T$

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mg}{M} & \frac{-b_m}{M} & 0 \\ 0 & \frac{-g(M+m)}{Ml} & \frac{-b_m}{Ml} & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_r}{M} & \frac{K_r}{Ml} \end{bmatrix}^T, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

III. CDM CONCEPT

In CDM, the controllers are designed based on the stability index γ_i and equivalent time constant τ which are synthesized from the characteristic polynomial of the closed-loop transfer function

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (5)$$

From the characteristic polynomial $P(s)$ given in (5), the stability index γ_i and equivalent time constant τ are respectively described in general term as the following equations [4]

$$\gamma_i = \frac{a_i^2}{a_{i-1} a_{i+1}}, \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (6)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}. \quad (7)$$

In order to meet the specifications, the equivalent time constant τ and the stability index γ_i are chosen from

$$\tau = \frac{t_s}{2.5} \sim \frac{t_s}{3} \quad (8)$$

$$\gamma_i > 1.5 \gamma_i^* \quad (9)$$

where t_s is the specified settling time and γ_i^* is the stability limit defined as

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i1}} + \frac{1}{\gamma_{i2}}; \quad \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (10)$$

In general, the following standard stability index

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \quad \gamma_1 = 2.5 \quad (11)$$

is recommended for design an appropriate controller.

Consequently, the characteristic polynomial can be expressed in term of stability index γ_i , equivalent time constant τ and coefficient a_0 as

$$P(s) = a_0 \left[\left(\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i,j}} \right) (\tau s)^i \right) + \tau s + 1 \right] \quad (12)$$

In case that the monic characteristic polynomial ($a_n=1$) is required, the characteristic polynomial (12) must be divided by a_n , where

$$a_n = a_0 \tau^n / \prod_{j=1}^{n-1} \gamma_{n,j}$$

Then the corresponding monic characteristic polynomial is

$$\begin{aligned} P_m(s) &= \frac{\left(\prod_{j=1}^{n-1} \gamma_{n,j} \right)}{\tau^n} \left[\left(\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i,j}} \right) (\tau s)^i \right) + \tau s + 1 \right] \\ &= s^n - \alpha_{n-1} s^{n-1} + \dots + \alpha_1 s + \alpha_0. \end{aligned} \quad (13)$$

IV. CONTROLLER DESIGN

The overall structure of the proposed system consisting of a servo state feedback controller, minimum-order observer and the crane system is shown in Fig. 2.

The servo state gain matrix K_s consisting of state feedback gain matrix K and integral gain k_i for the servo state feedback controller and the observer gain matrix K_o for

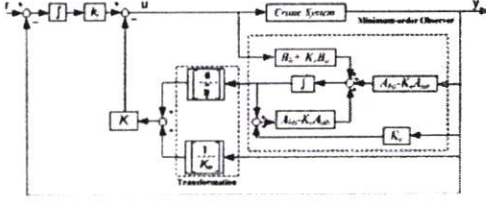


Fig. 2. Structure of the proposed control system.

minimum-order observer will be designed based on CDM concept. The details will be described in the following subsections.

A. Servo State Feedback Design

An integrator is augmented to the crane system (4) in order to reject the steady-state error of the cart position. Thus, the output matrix C is reduced to $H = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$. The state equation and output equation of the servo system shown in Fig.2 are given as follows

$$\dot{\mathbf{x}}_s(t) = A_s \mathbf{x}_s(t) + B_s u(t) + F_s r(t) \quad (14)$$

$$\bar{y}(t) = H_s \mathbf{x}_s(t) \quad (15)$$

where $\bar{y}(t)$ is the controlled output cart position, $r(t)$ is the cart position reference signal of crane system and $e(t)$ is the augmented state variable for the cart position output, and

$$A_s = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -H & 0 \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, H_s = [H \ 0], F_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_s(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ e(t) \end{bmatrix}.$$

If the pair of A and B of (4) is completely controllable and the matrix $\begin{bmatrix} A_s & B_s \\ -H_s & 0 \end{bmatrix}$ is full rank, then the pair of A_s and B_s of the servo system (14) is also completely controllable. In this case, the closed-loop characteristic polynomial can be freely assigned to meet the required specification by properly adjusting the servo state gain matrix K_s .

Defining the linear transformation

$$\mathbf{x}_s(t) = T\mathbf{z}(t),$$

the controllable form of servo system (14) can be obtained via the suitable transformation matrix T as

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = A_c \mathbf{z}(t) + B_c u(t) + F_c r(t). \quad (16)$$

The corresponding transformation matrix T for transforming the original servo system (14) into the controllable form (16) is

$$T = MW \quad (17)$$

which is obtained from the controllability matrix M

$$M = [B_s \ A_s B_s \ A_s^2 B_s \ \dots \ A_s^{n-1} B_s]$$

and from the matrix W [6]

$$W = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \dots & \delta_{n-1} & 1 \\ \delta_2 & \delta_3 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & 0 & 0 \\ \delta_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

where $\delta_{n-1}, \dots, \delta_0$ are the coefficients of the open loop characteristic polynomial defined in (18).

$$P_{ol}(s) = |sI - A_s| = s^n + \delta_{n-1}s^{n-1} + \dots + \delta_1 s + \delta_0. \quad (18)$$

Therefore, the control law $u(t)$ can be assigned as

$$u(t) = -K_c \mathbf{z}(t) = -[\hat{k}_1 \ \hat{k}_2 \ \dots \ \hat{k}_{n-1} \ \hat{k}_n] \mathbf{z}(t) \quad (19)$$

or equivalently in term of its original state vector as

$$u(t) = -K_s T^{-1} \mathbf{x}_s(t) = -K_s \mathbf{x}_s(t) = -[k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{n-1} \ k_n] \mathbf{x}_s(t) \quad (20)$$

where $K_s = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{n-1} \ k_n] - [K \ -k_1]$. Consequently, the closed-loop characteristic polynomial of the system (16) becomes

$$P_{cl}(s) = |sI - A_c + B_c K_c| = s^n + (\hat{k}_n + \delta_{n-1})s^{n-1} + \dots + (\hat{k}_2 + \delta_1)s + (\hat{k}_1 + \delta_0). \quad (21)$$

Finally, the gain matrix K_s for the controllable form of the servo system (16) can be obtained by equating the closed-loop characteristic polynomial (21) to the desired characteristic polynomial (13).

$$K_s = [\alpha_0 - \delta_0 \ \dots \ \alpha_{n-2} - \delta_{n-2} \ \dots \ \alpha_{n-1} - \delta_{n-1}]$$

Substituting the gain matrix K_s into (20), the servo state feedback gain matrix K_c of the original servo system (14) is derived as

$$K_2 = [\alpha_0 - \delta_0 \quad \dots \quad \alpha_{n-2} - \delta_{n-2} \quad : \quad \alpha_{n-1} - \delta_{n-1}] T^{-1}. \quad (22)$$

B. State Minimum-order Observer Design

Consider the crane system (4), the state vector \mathbf{x} can obviously be partitioned into two parts as \mathbf{x}_a and \mathbf{x}_b . Here \mathbf{x}_a is equal to output vector \mathbf{y} and thus can be directly measured, and \mathbf{x}_b is the unmeasured portion of the state vector that must be estimated. Then the partitioned state and output equations become

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a(t) \\ \dots \\ \dot{\mathbf{x}}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & : & A_{ab} \\ \dots & & \dots \\ A_{ba} & : & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ \dots \\ B_b \end{bmatrix} u(t) \quad (23)$$

$$\mathbf{y}(t) = [1 \quad : \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

From (23) and (24), the state minimum-order observer equation can be obtained

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_b(t) &= (A_{bb} - K_o A_{ba}) \hat{\mathbf{x}}_b(t) + A_{ba} \mathbf{x}_a(t) \\ &\quad + B_b u(t) + K_o A_{ab} \mathbf{x}_a(t) \end{aligned} \quad (25)$$

where $\hat{\mathbf{x}}_b(t)$ is the estimated state variable of \mathbf{x}_b . If the pair of A_{bb} and A_{ba} is completely observable, the state minimum-order observer gain matrix K_o can be designed. In order to design observer gain matrix K_o , the standard stability index γ_i in (11) are used and time constant τ is selected to be three time faster than in servo state feedback gain matrix K_s . Based on duality and separation principle, the observer gain matrix K_o and servo state feedback gain matrix K_s can be assigned independently. The observer gain matrix K_o can be designed in a similar way as the servo state feedback gain matrix K_s . Therefore, the details are neglected here.

V. SIMULATION RESULTS

In this section, the simulation results of the crane control system using the proposed CDM based servo state feedback controller with minimum-order observer are conducted by MATLAB/Simulink.

TABLE I
PARAMETER VALUES OF CRANE SYSTEM

M (kg)	m (kg)	l (m)	g (m/s ²)	K_s	b_o (Nsec/m)
6.12	1	1	9.81	0.6281	12.24

Utilizing the parameter values of the crane system shown in Table I [7], its linear model (4) can be obtained with

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.60 & -2 & 0 \\ 0 & -11.41 & -2 & 0 \end{bmatrix} \text{ and } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}.$$

Consequently, the servo state feedback gain K_s and minimum-order observer gain K_o can be designed based on CDM as mentioned in section IV. Using time constant $\tau = 1.5$ seconds and standard stability index $\gamma_1 = 2.5$ and $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 2$. The servo state feedback gain can be computed as

$$K_s = [490.49 \quad 264.41 \quad 241.47 \quad -131.04 \quad -326.99],$$

or the state feedback gain matrix

$$K = [490.49 \quad 264.41 \quad 241.47 \quad -131.04]$$

and integral gain

$$k_i = -326.99.$$

Similarly by using time constant $\tau = 0.5$ second and standard stability index $\gamma_1 = 2.5$, the following state minimum-order observer gain K_o can be obtained.

$$K_o = \begin{bmatrix} 0.50 & -1.94 \\ -0.06 & 2.50 \end{bmatrix}$$

The responses of the designed crane control system are then simulated by using Matlab/Simulink.

A. Initial Responses

In this sub-section, the cart position x at 1 meter, the load-swing angle θ at 0 radian, the cart speed \dot{x} at 0 meter/second, the load-swing angle speed $\dot{\theta}$ at 0 radian/second are set as the initial values. Fig. 3 shows the responses of the cart position and the load-swing angle and Fig. 4 shows the estimation errors of state minimum-order observer ($\dot{x} - \hat{\dot{x}}, \dot{\theta} - \hat{\dot{\theta}}$). It can be seen from the simulation results that the controller has good performance in controlling the system around the equilibrium point. The servo state feedback controllers are settled within 4 seconds and the minimum-order observer can be estimated unmeasured state variables ($\hat{\dot{x}}, \hat{\dot{\theta}}$) within 2 seconds.

performance and robustness of the designed crane control system. The proposed controller can control the cart position at the desired position without steady state error in short period of time while the load-swing angle can be kept sufficiently small.

REFERENCES

- [1] Yuzo Suzuki, Shin-Ichi 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 gantry crane scale model," *IEEE Control System Magazine*, vol. 11, Issue. 1, pp. 57-62, 1991.
- [3] S.U. Chou, 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.
- [5] N. Kodani, "Traveling Crane using H_2 Controller based on Minimum Order Observer", *SICE Annual Conference*, August 4-6, 2003 Fukui University, Japan.
- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Second Edition, Prentice-Hall international, Inc., 1990.
- [7] A. Tantaworrasip, "Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane system", *Master Thesis*, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2004.