

การควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ
โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ

MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM
BY CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD

วัลลภ สีดอกบวบ
WANLOP SRIDOKBUAP

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-EN-M-000-037

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ
โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ**

**MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM
BY CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD**

วัลลภ สีดอกบวบ

WANLOP SRIDOKBUAP

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **79818**
วัน,เดือน,ปี **18** เม.ย. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-EN-M-080-037

**MULTIVARIABLE CONTROL OF OVERHEAD CRANE SYSTEM
BY CHARACTERISTIC RATIO ASSIGNMENT METHOD**

WANLOP SRIDOKBUAP

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

2008

KMITL-2008-EN-M-080-037

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะ โดยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ |
| นักศึกษา | นายวัลลภ สีคอกบวบ |
| รหัสประจำตัว | 49060507 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมระบบควบคุม |
| พ.ศ. | 2551 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ. ดร.จกกล งามวิวิทย์ |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ผศ. ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบเครนเหนือศีรษะด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ เพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครน การแกว่งของภาระ และความยาวของเชือกสลิงในเวลาเดียวกัน ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมไอน์พีดีสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ตัวควบคุมพีดีสำหรับควบคุมการแกว่งของภาระ และตัวควบคุมไอน์พีดีสำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระ ตัวควบคุมทั้ง 3 นี้จะถูกรออกแบบแยกอิสระซึ่งกันและกัน

จากผลการทดลองพบว่า ตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครน ลดมุมแกว่งของภาระและควบคุมความยาวของเชือกสลิงได้ตามที่ออกแบบไว้ และสามารถเพิ่มความเร็วของผลตอบสนองของระบบได้โดยการปรับค่าแฟกเตอร์ k ตามหลักการของวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ นอกจากนี้ ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อมวลของภาระเปลี่ยนแปลง สามารถลดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบ รวมทั้งตำแหน่งของรถเครนและความยาวของเชือกสลิงยังสามารถติดตามสัญญาณอ้างอิงที่เปลี่ยนแปลงได้

| | |
|--------------------------|---|
| Thesis Title | Multivariable Control of Overhead Crane System by Characteristic Ratio Assignment Method |
| Student | Mr. Wanlop Sridokbuap |
| Student ID. | 49060507 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Control Engineering |
| Year | 2008 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit |
| Thesis Co-Advisor | Asst. Prof. Dr. Taworn Benjanarasuth |

ABSTRACT

This thesis presents controllers design by characteristic ratio assignment method (CRA) for an overhead crane system. The controllers of the overhead crane system consist of I-PD, PD and I-P controllers, which are used to control the position of trolley, load-swing angle and rope length respectively. Three controllers are designed independently and then operated simultaneously to control the system.

The experimental results show that the proposed controllers can control the trolley position, load-swing angle reduction and rope length as designed and speed of the step response can be increased by using a factor k from the concept of CRA. Moreover, the controllers can control the system efficiently when the mass of load is changed, reduce the effect of disturbance entering to the system, as well as the trolley position and the rope length can also track the changed reference input.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จงกต งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางแก้ปัญหา ความคิดริเริ่ม ตลอดจนฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความสามารถในการทำวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงให้ความดูแลเอาใจใส่สอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ผู้เขียนทำงานอย่างมีระบบและใช้เวลาอย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ถาวร เบญจนราสุทธิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นทั้งในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติแก่ผู้เขียนเสมอมา ทำให้ผู้เขียนเข้าใจปัญหานั้นๆ

ขอขอบพระคุณ พี่สองเมือง นันทขว้าง ที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้ผู้เขียนด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) และ Japan International Cooperation Agency (JICA) ที่ได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัทสหวิริยาสติลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษาและสนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้เขียน

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และพี่สาว ที่รักและเคารพ ที่สนับสนุนให้โอกาสแก่ผู้เขียนได้เล่าเรียนจนถึงวันนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องวิจัยทุกคนที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมา จนสามารถนำสิ่งต่างๆที่ได้รับมานั้นจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสิ้นสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วัลลภ สีคอกบวบ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| คำย่อและสัญลักษณ์..... | XII |
| 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 เกรนชนิดบูมส์..... | 5 |
| 2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเกรนเหนือศีรษะ..... | 6 |
| บทที่ 3 วิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ..... | 16 |
| 3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ CRA..... | 16 |
| 3.2 พหุนามคุณลักษณะ..... | 17 |
| 3.3 ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะและค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป..... | 17 |
| 3.4 การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบ..... | 18 |
| 3.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CRA..... | 19 |
| 3.6 การเลือกค่าอัตราส่วนคุณลักษณะและค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป..... | 20 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA และการสร้างตัวควบคุม..... | 21 |
| 4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือสี่ระยะ..... | 21 |
| 4.2 การออกแบบตัวควบคุม..... | 22 |
| 4.2.1 การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน..... | 22 |
| 4.2.2 การออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมแกว่งของภาระ..... | 23 |
| 4.2.3 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง..... | 24 |
| 4.3 การออกแบบตัวควบคุมเมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบ..... | 25 |
| 4.3.1 การออกแบบตัวควบคุม I-PD เมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน..... | 25 |
| 4.3.2 การออกแบบตัวควบคุม I-P เมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง..... | 25 |
| 4.4 การสร้างตัวควบคุม..... | 26 |
| 4.4.1 การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่อง เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง..... | 26 |
| 4.4.2 การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง..... | 27 |
| 4.4.3 การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบควบคุมการควบคุมแกว่งของภาระ จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง..... | 28 |
| 4.4.4 การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง..... | 29 |
| บทที่ 5 การจำลองและการทดลองระบบควบคุม..... | 30 |
| 5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบครนเหนือสี่ระยะ..... | 30 |
| 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD PD และ I-P สำหรับระบบครนเหนือสี่ระยะ..... | 32 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 5.3 ผลการจำลอง..... | 33 |
| 5.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น..... | 33 |
| 5.3.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองโดยแฟกเตอร์ k | 34 |
| 5.3.2.1 การปรับความเร็วของผลตอบสนอง การเคลื่อนที่ของรถเครน โดยแฟกเตอร์ k_x | 35 |
| 5.3.2.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนอง การควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยแฟกเตอร์ k_l | 37 |
| 5.3.2.3 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนและ ควบคุมความยาวเชือกสลิง โดยแฟกเตอร์ k_x และ k_l ในเวลาเดียวกัน..... | 38 |
| 5.3.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ..... | 42 |
| 5.3.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน..... | 43 |
| 5.3.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง..... | 45 |
| 5.4 ผลการทดลอง..... | 47 |
| 5.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น..... | 47 |
| 5.4.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองโดยแฟกเตอร์ k | 49 |
| 5.4.2.1 การปรับความเร็วของผลตอบสนอง การเคลื่อนที่ของรถเครน โดยแฟกเตอร์ k_x | 49 |
| 5.4.2.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนอง การควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยแฟกเตอร์ k_l | 51 |
| 5.4.2.3 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนและ ควบคุมความยาวเชือกสลิง โดยแฟกเตอร์ k_x และ k_l ในเวลาเดียวกัน..... | 53 |
| 5.4.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ..... | 55 |
| 5.4.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน..... | 57 |
| 5.4.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง..... | 58 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 61 |
| 6.1 บทสรุป..... | 61 |
| 6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา..... | 62 |
| 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา..... | 62 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บรรณานุกรม..... | 63 |
| ภาคผนวก..... | 64 |
| ภาคผนวก ก โครงสร้างและการหาพารามิเตอร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ รวมถึงการพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุม..... | 65 |
| ภาคผนวก ข รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง..... | 73 |
| ภาคผนวก ค โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมและการทดลอง..... | 86 |
| ภาคผนวก ง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 101 |
| ภาคผนวก จ การทดลองเพิ่มเติม..... | 108 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 114 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.1 พารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ..... | 31 |
| 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม..... | 32 |
| 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD และสมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลอง..... | 36 |
| 5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-P และสมรรถนะของระบบที่ได้จากการจำลอง..... | 38 |
| 5.5 สมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจากการจำลอง..... | 40 |
| 5.6 สมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนที่ได้จากการทดลอง..... | 50 |
| 5.7 สมรรถนะของระบบควบคุมการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ได้จากการทดลอง..... | 52 |
| 5.8 สมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจากการทดลอง..... | 54 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 2.1 | 5 |
| 2.2 | 5 |
| 2.3 | 6 |
| 2.4 | 7 |
| 2.5 | 14 |
| 4.1 | 21 |
| 4.2 | 22 |
| 4.3 | 23 |
| 4.4 | 24 |
| 4.5 | 27 |
| 5.1 | 31 |
| 5.2 | 33 |
| 5.3 | 34 |
| 5.4 | 35 |
| 5.5 | 36 |
| 5.6 | 37 |
| 5.7 | 38 |
| 5.8 | 39 |
| 5.9 | 40 |
| 5.10 | 41 |
| 5.11 | 41 |
| 5.12 | 42 |
| 5.13 | 43 |
| 5.14 | 44 |
| 5.15 | 45 |
| 5.16 | 46 |
| 5.17 | 47 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.18 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น..... | 48 |
| 5.19 สัญญาณควบคุม..... | 49 |
| 5.20 ผลการทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x | 50 |
| 5.21 สัญญาณควบคุม..... | 51 |
| 5.22 ผลการทดลองระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_f | 52 |
| 5.23 สัญญาณควบคุม..... | 53 |
| 5.24 ผลการทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและควบคุมความยาวเชือกสลิง เมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f | 54 |
| 5.25 สัญญาณควบคุม..... | 55 |
| 5.26 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ..... | 56 |
| 5.27 สัญญาณควบคุม..... | 56 |
| 5.28 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ..... | 57 |
| 5.29 สัญญาณควบคุม..... | 58 |
| 5.30 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง..... | 59 |
| 5.31 สัญญาณควบคุม..... | 60 |
| ก.1 โครงสร้างของระบบเครนเหนือศีรษะ..... | 66 |
| ก.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ..... | 66 |
| ก.3 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน..... | 68 |
| ก.4 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง..... | 68 |
| ก.5 ขอบเขตเสถียรภาพของระบบควบคุม..... | 70 |
| ข.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM..... | 74 |
| ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตฐาน 16 กับสัญญาณ PWM..... | 75 |
| ข.3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรมับจำนวนพัลส์..... | 75 |
| ข.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิทช์..... | 76 |
| ข.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด..... | 76 |
| ข.6 รายละเอียดของวงจรมับจำนวนพัลส์ภายใน ISA การ์ด..... | 77 |
| ข.7 ภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E..... | 78 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| ข.8 ภาพถ่ายการแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก..... | 79 |
| ข.9 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ..... | 79 |
| ข.10 ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเข็น..... | 80 |
| ข.11 สัญญาณ PWM ของวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความยาวเชือกสลิง..... | 80 |
| ข.12 ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความยาวเชือกสลิง..... | 81 |
| ข.13 แสดงความละเอียดของสัญญาณพัลส์ต่อการหมุนเอน โคคเตอร์ 1 รอบ..... | 81 |
| ข.14 การติดตั้งเอน โคคเตอร์สำหรับวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเข็น..... | 82 |
| ข.15 การติดตั้งเอน โคคเตอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ..... | 82 |
| ข.16 การติดตั้งเอน โคคเตอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง..... | 83 |
| ข.17 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเข็น..... | 84 |
| ข.18 ภาพถ่ายภาระที่ใช้ในการทดลอง..... | 84 |
| ข.19 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการดึงภาระ..... | 85 |
| จ.1 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1..... | 109 |
| จ.2 สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1..... | 110 |
| จ.3 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.3..... | 110 |
| จ.4 สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.3..... | 111 |
| จ.5 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.5..... | 111 |
| จ.6 สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.5..... | 112 |

คำย่อและสัญลักษณ์

| | | |
|------------------|---------|---|
| a_i | หมายถึง | ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ |
| A | หมายถึง | เซตของสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ |
| b_i | หมายถึง | ค่าอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์สมการพหุนามคุณลักษณะ |
| b_m | หมายถึง | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| b_l | หมายถึง | ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| D_i | หมายถึง | สัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| $D_x(s)$ | หมายถึง | ตัวส่วนพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| $D_\theta(s)$ | หมายถึง | ตัวส่วนพหุนามของระบบการแกว่งของภาระ |
| $D_l(s)$ | หมายถึง | ตัวส่วนพหุนามของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| $E_x(s)$ | หมายถึง | ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| $E_\theta(s)$ | หมายถึง | ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมการแกว่งของภาระ |
| $E_l(s)$ | หมายถึง | ค่าผิดพลาดของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| F_x | หมายถึง | แรงที่ทำให้รถเข็นเคลื่อนที่ |
| F_l | หมายถึง | แรงที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| g | หมายถึง | ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก |
| $G(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบป้อนกลับ |
| $G_k(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนเมื่อปรับค่าเฟกเตอร์ k |
| $G_p(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ |
| $G_{px}(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| $G_{p\theta}(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ |
| $G_{pl}(s)$ | หมายถึง | ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| h | หมายถึง | ความสูง |
| \bar{i} | หมายถึง | เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน x |
| \bar{j} | หมายถึง | เวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน y |
| k | หมายถึง | ค่าเฟกเตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วผลตอบสนอง |
| k_x | หมายถึง | ค่าเฟกเตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเข็น |
| k_l | หมายถึง | ค่าเฟกเตอร์ที่ใช้ปรับความเร็วผลตอบสนองการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| K_e | หมายถึง | พลังงานจลน์ |
| K_{dx} | หมายถึง | อัตราขยายอนุพันธ์ของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเข็น |

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|---------------|--|
| $K_{d\theta}$ | หมายถึง อัตราขยายอนุพันธ์ของตัวควบคุมการแกว่งของภาระ |
| K_{il} | หมายถึง อัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| K_{ix} | หมายถึง อัตราขยายอินทิกรัลของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| K_l | หมายถึง ค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| K_m | หมายถึง ค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| K_{ml} | หมายถึง ค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| K_{pl} | หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| K_{px} | หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| $K_{p\theta}$ | หมายถึง อัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมการแกว่งของภาระ |
| K_r | หมายถึง ค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| l | หมายถึง ความยาวเชือกสลิง |
| l_{ref} | หมายถึง ความยาวอ้างอิงของเชือกสลิง |
| L | หมายถึง ตัวกระทำลากรางจ์ |
| m | หมายถึง มวลของภาระ |
| m_n | หมายถึง มวลของวัตถุใดๆ |
| M | หมายถึง มวลของรถเครน |
| $N_x(s)$ | หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| $N_\theta(s)$ | หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการแกว่งของภาระ |
| $N_l(s)$ | หมายถึง ตัวเศษพหุนามของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| $P(s)$ | หมายถึง พหุนามคุณลักษณะวงปิด |
| $P_k(s)$ | หมายถึง พหุนามคุณลักษณะเมื่อปรับค่าเฟกเตอร์ k |
| P_e | หมายถึง พลังงานศักย์ |
| q | หมายถึง พิกัดใดๆ |
| Q | หมายถึง แรงทั่วไปที่กระทำกับระบบ |
| r_0 | หมายถึง การเคลื่อนที่ของรถเครนจากจุดเริ่มต้น |
| r_m | หมายถึง การเคลื่อนที่ของภาระจากจุดเริ่มต้น |
| t | หมายถึง เวลา |
| t_r | หมายถึง ช่วงเวลาขึ้น |
| t_s | หมายถึง ช่วงเวลาเข้าที่ |

คำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|----------------|---|
| T | หมายถึง เวลาชักตัวอย่าง |
| T_{ss} | หมายถึง ช่วงเวลาคงตัวของมอเตอร์ |
| T_i | หมายถึง แรงบิดมอเตอร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| T_m | หมายถึง แรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน |
| u_{PD} | หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม PD |
| u_{I-P} | หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม I-P |
| u_{I-PD} | หมายถึง สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม I-PD |
| v | หมายถึง ความเร็วของวัตถุ |
| V_i | หมายถึง สัญญาณควบคุมของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง |
| x | หมายถึง ตำแหน่งของรถเครน |
| x_m | หมายถึง ตำแหน่งของภาระ |
| x_{ref} | หมายถึง ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครน |
| x_{ss} | หมายถึง ตำแหน่งของรถเครนที่สภาวะคงตัว |
| y_m | หมายถึง ความสูงของภาระ |
| θ | หมายถึง มุมแกว่งของภาระ |
| θ_{ref} | หมายถึง มุมแกว่งอ้างอิงของภาระ |
| τ | หมายถึง ค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป |
| α_i | หมายถึง ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ |
| α_i^* | หมายถึง ค่าจำกัดอัตราส่วนคุณลักษณะ |
| σ | หมายถึง จำนวนจริง |
| ω | หมายถึง จำนวนจินตภาพ |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์

ระบบครนเหนือศีรษะเป็นระบบที่นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการเคลื่อนย้ายหรือยกสินค้าที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งในการควบคุมการเคลื่อนย้ายหรือยกสินค้านั้นจะต้องมีความรวดเร็ว ปลอดภัยและมีการแกว่งของสินค้าน้อยที่สุด ข้อสำคัญในการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อ กล่าวคือ ข้อแรกเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ข้อที่สองเป็นการควบคุมการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถครนเคลื่อนที่ให้แกว่งน้อยที่สุด และข้อสุดท้ายคือการควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ในการยกสินค้าเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง ถ้าหากไม่มีการควบคุมระบบให้บรรลุข้อสำคัญทั้ง 3 ข้อแล้ว นอกจากจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการนำสินค้าไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ยังอาจทำให้เกิดอันตรายในการขนถ่ายสินค้า และสินค้าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น การศึกษาและวิจัยการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ การลดการแกว่งของสินค้าในขณะที่รถครนเคลื่อนที่และการควบคุมความยาวของเชือกสลิง จึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจและน่าศึกษา

งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบครนเหนือศีรษะที่ผ่านมา นั้น ได้มีนักวิจัยนำเสนอตัวควบคุมที่ถูกออกแบบด้วยหลักการต่าง ๆ กัน เช่น ตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) [1] ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ (adaptive controller) [2] และตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาท (neural network controller) [3] ซึ่งวิธีการออกแบบที่กล่าวถึงนี้เป็นวิธีการออกแบบค่อนข้างซับซ้อนและค่อนข้างยากที่จะนำไปใช้ควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ยังมีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method) [4] ที่ให้ผลตอบสนองโดยไม่มีค่าพุงเกิน และใช้หลักการควบคุมแบบสองระดับขั้นเสรี โดยใส่พีรีฟิเตอร์เข้าไปในระบบ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้นำเสนอหลักการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ (Characteristic Ratio Assignment: CRA) [5] ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบครนเหนือศีรษะ และสามารถปรับความเร็วของผลตอบสนองได้ง่าย

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้น เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมจากพหุนามคุณลักษณะ (characteristic polynomial) ของระบบวงปิด (closed-loop system) ซึ่งกำหนดสมรรถนะได้จากอัตราส่วนคุณลักษณะ (characteristic ratio: α_i) อันเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของ

ระบบควบคุม และจากค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป (generalize time constant: τ) อันเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบควบคุม

เนื่องจากระบบครนเหนือศีรษะเป็นระบบที่มีการเชื่อมร่วม (coupling) กันหลายตัวแปร และเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงประมาณระบบครนเหนือศีรษะให้เป็นระบบเชิงเส้นย่อยๆ 3 ระบบ คือ ระบบที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของรถครน ระบบที่เกี่ยวกับมุมแกว่งของภาระ และระบบที่เกี่ยวกับความยาวเชือกสลิง หลังจากนั้น จึงออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบย่อยเหล่านี้ด้วยวิธี CRA โดยออกแบบตัวควบคุม I-PD (integral - proportional derivative controller) สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน ตัวควบคุม PD (proportional derivative controller) สำหรับควบคุมมุมแกว่งของภาระ และตัวควบคุม I-P (integral - proportional controller) สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง ซึ่งตัวควบคุมทั้ง 3 นี้ จะถูกออกแบบแยกอิสระจากกันก่อน แล้วจึงนำมาควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในเวลาเดียวกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ ยังได้ใช้หลักการของ CRA มาปรับแต่งความเร็วของผลตอบสนองในส่วนของการเคลื่อนที่ของรถครนด้วยตัวควบคุม I-PD และความเร็วของผลตอบสนองในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงด้วยตัวควบคุม I-P

1.2 ขอบเขตของการศึกษา

ในการศึกษาการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายให้ถูกต้อง พร้อมทั้งควบคุมการแกว่งของภาระและความยาวของเชือกสลิงในเวลาเดียวกันนั้นจะต้องศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาโครงสร้างและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือศีรษะเพื่อให้เกิดความเข้าใจใน โครงสร้างและการทำงานต่างๆของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมระบบครนเหนือศีรษะให้มีประสิทธิภาพ
2. ศึกษาและทำความเข้าใจวิธี CRA ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมด้วยวิธี CRA เพื่อควบคุมระบบครนเหนือศีรษะให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ
3. ศึกษาการใช้งาน โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจะช่วยในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เช่น โปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) และการสร้างตัวควบคุมจากโปรแกรมภาษาซี (C language) เพื่อนำไปควบคุมการทำงานของระบบจริงในห้องปฏิบัติการ

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์ขอบเขตของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วย 6 บท โดยมีรายละเอียดของแต่ละบทดังนี้
 บทที่ 1 วัตถุประสงค์และหลักการใหม่ในการทำวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งรายละเอียดของวิทยานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 อธิบายถึงระบบเรนชนิดต่างๆที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรม และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเรนเหนือศีรษะ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ของออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange equation of motion) และส่วนที่สองอธิบายการหาพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเรน และระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ได้มาจากผลการทดลอง

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CRA ซึ่งจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบป้อนกลับ โดยมีค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ เป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบควบคุม และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของระบบควบคุม รวมทั้งการปรับความเร็วของผลตอบสนองโดยไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว

บทที่ 4 อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สำหรับระบบเรนเหนือศีรษะ โดยการกำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะและค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุม I-PD สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถเรน ตัวควบคุม PD สำหรับควบคุมการแกว่งของภาระ และตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิง รวมถึงวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-PD และตัวควบคุม I-P เมื่อต้องการปรับความเร็วของผลตอบสนอง และการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบจริง ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปแมตแล็บ ช่วยในการออกแบบตัวควบคุม และโปรแกรมสำเร็จรูปบอร์แลนด์ซีพลัสพลัสเวอร์ชัน 5.02 (borland C++ version 5.02) ช่วยในการสร้างตัวควบคุมเพื่อควบคุมระบบจริง จากนั้นจะอธิบายการสร้างตัวควบคุม โดยแปลงตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อนำไปควบคุมระบบเรนเหนือศีรษะจริงในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 5 นำเสนอผลการจำลองและผลการทดลองควบคุมระบบเรนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุมทั้งสามที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 โดยในอันดับแรกจะจำลองการทดลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปแมตแล็บเวอร์ชัน 5.3 จากนั้นจึงนำตัวควบคุมที่ได้ไปควบคุมระบบจริง โดยจะนำเสนอผลการจำลองและผลการทดลองต่างๆ รวมถึงสมรรถนะของระบบควบคุม

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการพัฒนาวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเรนเหนือศีรษะด้วยวิธี CRA เพื่อให้การควบคุมระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในส่วนท้ายสุดของวิทยานิพนธ์นี้นั้นจะเป็นภาคผนวกที่แสดงถึงโครงสร้างและการหาพารามิเตอร์ของระบบเรนเหนือศีรษะรวมถึงการพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุม รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แนวคิดการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ และประวัติผู้เขียน

บทที่ 2

ระบบเครน

ระบบเครนเป็นระบบที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมที่มีการขนย้ายวัตถุที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ดังนั้น ระบบเครนจึงมีโครงสร้างแข็งแรงเพื่อใช้ยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงการนำระบบเครนมาใช้งานก่อสร้างที่มีความสูงและต้องใช้ความระมัดระวังมาก นอกจากนั้น ระบบเครนยังถูกนำมาใช้ขนถ่ายวัตถุหรือสินค้าต่างๆที่อยู่บนเรือเดินทะเล และในท่าเทียบเรือ เพื่อช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการควบคุมการทำงานของระบบเครนที่ผ่านมานั้นจะควบคุมการทำงานด้วยมือ (manual operation) แต่ในปัจจุบัน ได้มีผู้ค้นคว้าหาวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ในการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น [6]

2.1 ชนิดของเครน

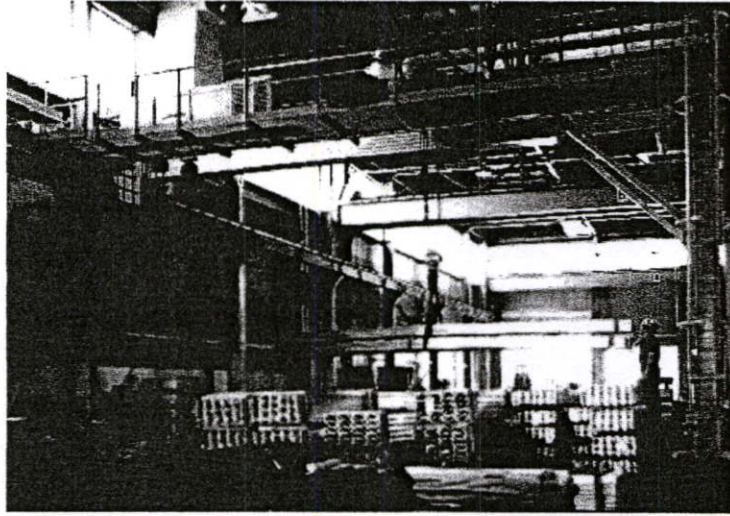
เครนถูกจำแนกออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของการเคลื่อนที่ และลักษณะโครงสร้างทางกลศาสตร์ดังนี้

2.1.1 เครนชนิดแกนตรี (gantry crane)

โครงสร้างของเครนชนิดแกนตรีแสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยส่วนของตัวรถราง (trolley) โดยจะเคลื่อนที่บนแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาซึ่งจะมีความแข็งแรงมาก โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของรถรางอธิบายได้ด้วยแบบจำลองหนึ่งระดับขั้นความเสรี (one-degree-of-freedom) ซึ่งแกนเหล็กนี้บางครั้งจะมีลักษณะเป็นรางรถไฟขนานกันและติดตั้งอยู่สูง ด้วยลักษณะนี้เองบางครั้งจึงถูกเรียกว่าเครนชนิดบริดจ์ (bridge crane) หรือเครนเหนือศีรษะ (overhead crane) การเคลื่อนที่ของรถรางจะเคลื่อนที่ในแนวนอน 2 ทิศทาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนต่ำและสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆ

2.1.2 เครนชนิดโรตารี (rotary crane)

รูปที่ 2.2 แสดงถึงโครงสร้างของเครนชนิดโรตารีซึ่ง จะประกอบด้วยแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาสามารถหมุนรอบในแนวนอนได้ และจะมีรถรางใช้สำหรับยกภาระ (load) โดยจะเคลื่อนที่อยู่บนแกนเหล็กยาว จากลักษณะการเคลื่อนที่ของรถรางและการหมุนของแกนเหล็กทำให้เครนชนิดนี้สามารถเคลื่อนย้ายภาระได้ทุกๆจุดในแนวนอนภายในขอบเขตของเครน ในการยกภาระหรือวัตถุต่างๆ ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสายเคเบิลที่ติดตั้งอยู่บริเวณแขนหรือฐานของเครน โดยจะเชื่อมต่อกับรถรางเพื่อใช้ในการดึง



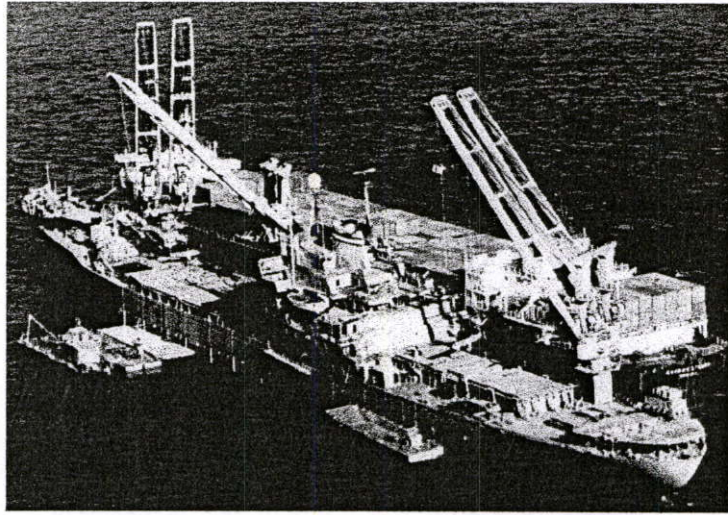
รูปที่ 2.1 เครนชนิดแกนนตรี (gantry crane)



รูปที่ 2.2 เครนชนิดโรตารี (rotary crane)

2.1.3 เครนชนิดบูมส์ (booms crane)

เครนที่นิยมใช้บนเรือเดินทะเลและท่าเรือจะเป็นเครนชนิดบูมส์ซึ่งมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยทั่วไปเครนชนิดบูมส์จะประกอบด้วยส่วนฐานที่สามารถหมุนได้ซึ่งยึดติดอยู่กับบูมส์ ในการเคลื่อนย้ายภาระจะสามารถทำได้โดยแขนไว้ที่ส่วนปลายของบูมส์ ซึ่งจะถูกลงด้วยสายเคเบิล โดยมีตุกรอกช่วยในการดึงและเก็บสายเคเบิล และส่วนฐานของเครนชนิดนี้สามารถหมุนรอบและเคลื่อนที่ในแนวนอนได้ทุกจุดภายในเรือ โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์เหมาะสำหรับการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก ในขณะที่เครนชนิดแกนนตรีและเครนชนิดโรตารีเหมาะสำหรับการยกภาระที่มีรูปทรงลักษณะแตกต่าง ดังนั้น เมื่อต้องการยกภาระที่มีน้ำหนักมากเครนชนิดบูมส์จะมีความแข็งแรงมากกว่าเครนชนิดแกนนตรีและเครนชนิดโรตารี



รูปที่ 2.3 เครนชนิดบูมส์ (booms crane)

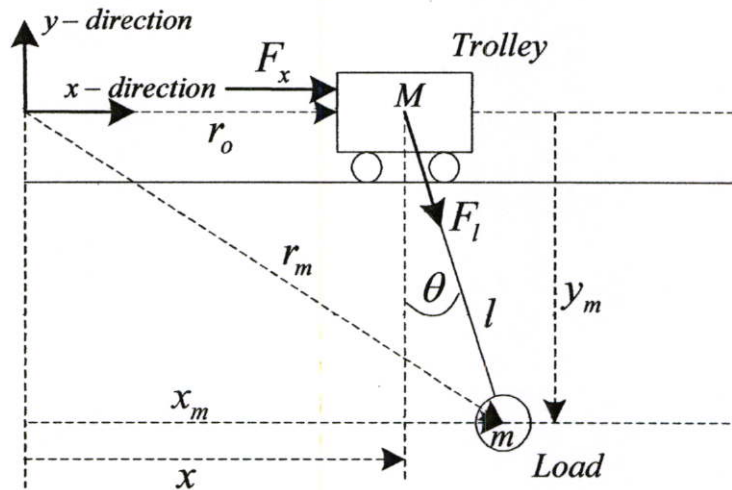
เนื่องจากระบบเครนจะมีขนาดใหญ่และสูง ดังนั้น ในการเคลื่อนย้ายภาระหรือสินค้าจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก การเคลื่อนที่ของรถรางที่ใช้ดึงภาระจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมแกว่งของภาระคือ หากรถรางเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะทำให้เวลาในการเคลื่อนย้ายภาระน้อย แต่ภาระจะแกว่งมากซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ควบคุมเครนและภาระได้ ในทำนองเดียวกัน หากรถรางเคลื่อนที่ช้าจะทำให้ภาระแกว่งน้อยและทำให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัยมากขึ้น แต่จะใช้เวลานานซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆสูงตามขึ้นด้วย ดังนั้น ข้อสำคัญที่ต้องระมัดระวังในการเคลื่อนย้ายภาระโดยใช้ระบบเครนจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อคือ ข้อแรก จะต้องควบคุมตำแหน่งของรถรางเพื่อเคลื่อนย้ายภาระให้มีความแม่นยำและใช้เวลาให้น้อยที่สุด ข้อที่สอง จะต้องลดการแกว่งของภาระที่เกิดขึ้นในขณะที่รถรางเคลื่อนที่ และข้อสุดท้าย จะต้องควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระให้มีความแม่นยำและรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้ภาระชนกับสิ่งกีดขวาง ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ควบคุมเครน ภาระและอุปกรณ์ต่างๆที่อยู่ในโรงงาน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA เพื่อควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน มุมการแกว่งของภาระ และความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระในเวลาเดียวกัน เพื่อให้ระบบการเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัย ในหัวข้อต่อไปจะอธิบายการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้น จะต้องรู้โครงสร้างหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุมก่อน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะโดยใช้วิธีการของลากรางจ์ (Lagrange) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่มีความซับซ้อน แบบจำลองของระบบครนเหนือศีรษะแสดงดังรูปที่ 2.4 จะประกอบด้วยรถราง (trolley) หรือรถครน และภาระ โดยรถครนสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 ทิศทางในแนวนอน ซึ่งจะเคลื่อนอยู่บนรางเหล็กที่วางขนานกัน และภาระถูกแขวนด้วยเชือกสลิงเพื่อใช้ดึงภาระขึ้นและลงเพื่อไม่ให้ชนสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของระบบครนเหนือศีรษะ

| | | |
|--------|----------|---|
| โดยที่ | r_0 | คือ การเคลื่อนที่ของรถครนจากจุดเริ่มต้น |
| | r_m | คือ การเคลื่อนที่ของภาระจากจุดเริ่มต้น |
| | x_m | คือ ตำแหน่งของภาระ |
| | y_m | คือ ความสูงของภาระ |
| | x | คือ ตำแหน่งของรถครน |
| | θ | คือ มุมแกว่งของภาระ |
| | l | คือ ความยาวเชือกสลิง |
| | M | คือ มวลของรถครน (กิโลกรัม) |
| | m | คือ มวลของภาระ (กิโลกรัม) |
| | F_x | คือ แรงที่ใช้ทำให้รถครนเคลื่อนที่ |
| | F_l | คือ แรงที่ใช้ในการดึงเชือกสลิง |

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถครนที่แสดงในรูปที่ 2.4 จะมีพิกัดดังนี้

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

โดยที่ \bar{i} และ \bar{j} คือเวกเตอร์ขนาด 1 หน่วยที่เคลื่อนที่ตามแนวแกน x และตามแนวแกน y ตามลำดับ แต่เนื่องจากรถครนเคลื่อนที่เฉพาะแนวแกน x เพียงแกนเดียว ดังนั้น จะได้

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

และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของภาวะ จะเคลื่อนที่ตามพิกัดวงกลม (circular coordinate) ดังสมการ

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

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

สมการการเคลื่อนที่ของระบบครนเหนือศีรษะที่หาโดยใช้วิธีของลากรางจ์ จะพิจารณาจากพลังงานจลน์ (Kinetic energy: K_e) และพลังงานศักย์ของระบบ (Potential energy: P_e) โดยที่สมการพลังงานจลน์ของระบบแสดงได้ดังนี้

$$K_e = \frac{1}{2} m_n v^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ m_n คือ มวลของวัตถุใดๆ (กิโลกรัม) และ v คือ ความเร็วของวัตถุ (เมตร ต่อ วินาที) ดังนั้นสมการพลังงานจลน์รวมของระบบครนเหนือศีรษะคือ

$$K_e = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) \quad (2.5)$$

โดยที่ \dot{x} คือ ความเร็วทางแนวแกน x ของรถครน
 \dot{x}_m คือ ความเร็วทางแนวแกน x ของภาวะ
 \dot{y}_m คือ ความเร็วทางแนวแกน y ของภาวะ
 และสมการของพลังงานศักย์ของระบบแสดงได้ดังนี้

$$P_e = mgh \quad (2.6)$$

โดยที่ h คือ ความสูง (เมตร) และ g คือ ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตร ต่อ วินาที²) ดังนั้นจะได้

$$P_e = mgy_m \quad (2.7)$$

จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่า $y_m = -l \cos \theta$ ดังนั้น สมการพลังงานศักย์รวมของระบบครนเหนือศีรษะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_e = -mgl \cos \theta \quad (2.8)$$

เมื่อได้สมการพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบแล้ว หาสมการลากรางจ์ (Lagrangian: L) จาก

$$L = K_e - P_e \quad (2.9)$$

หลังจากแทนค่าของพลังงานจลน์ K_e จากสมการที่ (2.5) และพลังงานศักย์ P_e จากสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9) จะได้

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + mgl \cos \theta \quad (2.10)$$

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

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{l}^2 + \dot{\theta}^2 l^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l \cos \theta + 2\dot{x}l \sin \theta) + mgl \cos \theta \quad (2.11)$$

สมการการเคลื่อนที่ของออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange equation of motion) แสดงได้ ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (2.12)$$

โดยที่ Q คือแรงทั่วไปที่กระทำกับระบบ (general force of system) ซึ่งสมการการเคลื่อนที่นี้จะนำมาใช้ในการหาแบบจำลองของระบบเคนเหนือสี่รหะ

เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของออยเลอร์-ลากรางจ์จะมีความสัมพันธ์กับพิกัดทั่วไป (generalizes coordinates) โดยที่ $q = [x, \theta, l]^T$ ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของรถเคน สมการการแกว่งของภาวะ และสมการของความยาวเชือกสลิง จะแสดงได้ดังต่อไปนี้

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

$$F_x - b_m \dot{x} = (M + m) \ddot{x} + ml (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + m \ddot{l} \sin \theta + 2m \dot{l} \dot{\theta} \cos \theta \quad (2.13)$$

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

$$0 = l\ddot{\theta} + 2\dot{\theta}\dot{l} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta \quad (2.14)$$

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

$$F_l - b_l \dot{l} = m\ddot{l} + m\ddot{x} \sin \theta - ml\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta \quad (2.15)$$

โดยที่ b_m คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และ b_l คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง จากผลการทดลองพบว่า ค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้า (electrical time constant) ของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบเครนเหนือศีรษะมีค่าน้อยกว่าค่าคงตัวเวลาเชิงกล (mechanical time constant) ของระบบกลไกอยู่มาก ดังนั้น จึงไม่นำค่าคงตัวเวลาทางไฟฟ้าของมอเตอร์ในระบบการเคลื่อนที่มาพิจารณาเพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ

เนื่องจาก F_x ในสมการการเคลื่อนที่ของรถเครน (2.13) คือแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถเครน และมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$F_x = K_m T_m \cong K_r D_i \quad (2.16)$$

โดยที่ K_m คือค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน T_m คือแรงบิดมอเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (นิวตัน-เมตร) D_i (duty cycle) คือ ค่าอินพุตที่ป้อนให้แก่วงจรขับกระแส (current driver) เพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์โดยจะมีค่าตั้งแต่ $0 - \pm 100$ เปอร์เซ็นต์ (แรงบิดของมอเตอร์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ D_i คือ ถ้า D_i มีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์จะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดสูงสุด และถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นบวกจะทำให้รถเครนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ถ้าเครื่องหมายของ D_i เป็นลบจะทำให้รถเครนเคลื่อนที่ไปข้างหลัง) และ K_r คือค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเครนซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของมอเตอร์ K_m และอัตราการส่งกำลังของสายพานของระบบขับเคลื่อนรถเครน และเมื่อแทนค่า F_x จากสมการที่ (2.16) ลงในสมการที่ (2.13) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเครนดังนี้

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

สำหรับ F_l ในสมการของความยาวเชือกสลิง (2.14) คือแรงที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง ซึ่งมีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ดังสมการ

$$F_l = K_m T_l \cong K_l V_l \quad (2.18)$$

โดยที่ K_m คือค่าคงที่มอเตอร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง T_l คือค่าแรงบิดมอเตอร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง V_l คือแรงดันอินพุตที่ป้อนให้แก่วงจรขับเคลื่อนเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยจะมีค่าแรงดันอยู่ระหว่าง -24 โวลต์ ถึง 24 โวลต์ และ K_l คือค่าคงที่ของแรงที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของมอเตอร์ K_m และอัตราทดของเกียร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง และแทนค่า F_l จากสมการที่ (2.18) ลงในสมการที่ (2.15) จะทำให้ได้สมการของความยาวดิ่งเชือกสลิงใหม่ดังนี้

$$K_l V_l - b_l \dot{l} = m \ddot{l} + m \ddot{x} \sin \theta - m l \dot{\theta}^2 - m g \cos \theta \quad (2.19)$$

เมื่อจัดรูปสมการการเคลื่อนที่ของรถเครน (2.17) สมการการแกว่งของภาระ (2.14) และสมการของความยาวเชือกสลิง (2.19) ใหม่จะได้ดังนี้

$$\ddot{x} = \frac{K_r D_l - b_m \dot{x} - m l (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) - m \ddot{l} \sin \theta - 2 m l \dot{\theta} \cos \theta}{M + m} \quad (2.20)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-\ddot{x} \cos \theta - 2 \dot{\theta} \dot{l} - g \sin \theta}{l} \quad (2.21)$$

$$\ddot{l} = \frac{K_l V_l - b_l \dot{l} - m \ddot{x} \sin \theta + m l \dot{\theta}^2 + m g \cos \theta}{m} \quad (2.22)$$

หลังจากได้สมการของ \ddot{x} , $\ddot{\theta}$ และ \ddot{l} แล้ว จึงหาฟังก์ชันของ $f(\ddot{x})$ โดยแทนค่า $\ddot{\theta}$ จากสมการที่ (2.21) และแทนค่า \ddot{l} จากสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้

$$f(\ddot{x}) = \frac{[K_r D_l - b_m \dot{x} - K_l V_l \sin \theta + b_l \dot{l} \sin \theta]}{M} \quad (2.23)$$

ต่อไปหาฟังก์ชัน $f(\ddot{\theta})$ โดยแทนค่า \ddot{x} จากสมการที่ (2.20) ลงในสมการที่ (2.21) จะได้

$$f(\ddot{\theta}) = \frac{-2\dot{\theta}i - g \sin \theta}{l} - \frac{(K_r D_i - b_m \dot{x} - K_l V_i \sin \theta + b_l \dot{l} \sin \theta)}{Ml} \cos \theta \quad (2.24)$$

และหาฟังก์ชัน $f(\ddot{l})$ โดยแทนค่า \ddot{x} จากสมการที่ (2.20) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$f(\ddot{l}) = \frac{K_l V_i - b_l \dot{l} + ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta}{m} - \frac{(K_r D_i - b_m \dot{x} - K_l V_i \sin \theta + b_l \dot{l} \sin \theta)}{M} \sin \theta \quad (2.25)$$

จากนั้นนำสมการที่ (2.23) สมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) มาทำให้อยู่ในรูปเชิงเส้นด้วยวิธี ลีอาปูนอฟ (Lyapunov's linearization method) [6] โดยใช้สมการ

$$\dot{x} = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{(x=0, u=0)} x + \left(\frac{\partial f}{\partial u} \right)_{(x=0, u=0)} u + f_{h.o.t.}(x, u) \quad (2.26)$$

เมื่อ $f_{h.o.t.}$ แทนด้วยเทอมของ x และ u ที่อันดับสูงกว่า ดังนั้น สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของรถครนโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{x})$ สมการการแกว่งของภาระโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{\theta})$ และสมการของความยาวเชือกสลิงโดยใช้ฟังก์ชัน $f(\ddot{l})$ โดยพิจารณาเมื่อระบบครนเหนือศีรษะอยู่ในสภาวะสมดุล (equilibrium point) แสดงดังนี้

$$\ddot{x} = \left(\frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial \dot{l}} \dot{l} \right) \Bigg|_{(\theta=0, \dot{l}=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{x})}{\partial V_i} V_i \right) \Bigg|_{(\theta=0)} \quad (2.27)$$

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \dot{\theta}} \dot{\theta} + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial \dot{l}} \dot{l} \right) \Bigg|_{(\theta=0, \dot{\theta}=0, \dot{l}=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{\theta})}{\partial V_i} V_i \right) \Bigg|_{(\theta=0)} \quad (2.28)$$

$$\ddot{l} = \left(\frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \dot{\theta}} \dot{\theta} + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial \dot{l}} \dot{l} \right) \Bigg|_{(\theta=0, \dot{\theta}=0, \dot{l}=0)} + \left(\frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial D_i} D_i + \frac{\partial f(\ddot{l})}{\partial V_i} V_i \right) \Bigg|_{(\theta=0)} \quad (2.29)$$

และเมื่อแก้สมการทั้งสามแล้ว จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถเครน สมการการแกว่งของภาชนะ และสมการของความยาวเชือกสลิงที่เป็นสมการเชิงเส้น (linear equation) ดังนี้

$$\text{สมการการเคลื่อนที่ของรถเครน} \quad \ddot{x} = \frac{-b_m}{M} \dot{x} + \frac{K_r}{M} D_i \quad (2.30)$$

$$\text{สมการการแกว่งของภาชนะ} \quad \ddot{\theta} = \frac{b_m}{Ml} \dot{x} - \frac{g}{l} \theta - \frac{K_r}{Ml} D_i \quad (2.31)$$

$$\text{สมการของความยาวเชือกสลิง} \quad \ddot{l} = -\frac{b_l}{m} \dot{l} + \frac{K_l}{m} V_i \quad (2.32)$$

จากนั้นแปลงลาปลาซของสมการที่ (2.30) (2.31) และ (2.32) เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบครนเหนือศีรษะ ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (อินพุต คือ duty cycle $D_i(s)$ และเอาต์พุตคือตำแหน่งของรถเครน $X(s)$) และเมื่อพิจารณาให้รถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่จำกัด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานรวมของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนมีค่าน้อยมาก จึงสามารถประมาณโดยไม่คิดผลของ $\frac{b_m}{Ml}$ ในสมการการแกว่งของภาชนะ ซึ่งจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของการแกว่งของภาชนะ (อินพุต คือ duty cycle $D_i(s)$ และเอาต์พุตคือมุมแกว่งของภาชนะ $\theta(s)$) และฟังก์ชันถ่ายโอนของความยาวเชือกสลิง (อินพุตคือ แรงดัน $V_i(s)$ และเอาต์พุตคือความยาวของเชือกสลิง $L(s)$) ตามลำดับดังนี้

$$G_{px}(s) = \frac{X(s)}{D_i(s)} = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)} \quad (2.33)$$

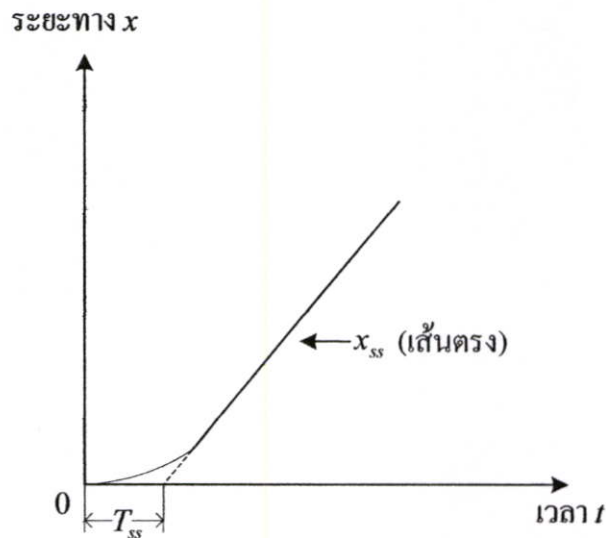
$$G_{p\theta}(s) = \frac{\Theta(s)}{D_i(s)} = -\frac{K_r s}{Mls^3 + b_m ls^2 + Mgs + b_m g} \quad (2.34)$$

$$G_{pl}(s) = \frac{L(s)}{V_i(s)} = \frac{K_l}{s(ms + b_l)} \quad (2.35)$$

เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน การแกว่งของภาชนะ และความยาวเชือกสลิงดังสมการที่ (2.33) (2.34) และ (2.35) นั้นมีความอิสระจากกัน ดังนั้น จึงสามารถออกแบบตัวควบคุม I-PD PD และ I-P จากฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสามนี้ได้อย่างอิสระ แต่ค่าของพารามิเตอร์ K_r , b_m , K_l และ b_l ที่อยู่ในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบครนเหนือศีรษะทั้งสามนั้นยัง

ไม่รู้ค่า และจะสามารถหาได้จากผลการทดลองระบบวงเปิด (open-loop system) ของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์และระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง

การทดสอบระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถยนต์เพื่อหาค่า K_r และ b_m นั้นสามารถทำได้โดยป้อนสัญญาณอินพุตคงที่ D_i กำหนดให้กับวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อนรถยนต์ให้เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้อัตราการตอบสนองดังรูปที่ 2.5 จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของผลตอบสนองระบบวงเปิด กับฟังก์ชันถ่ายโอนของการเคลื่อนที่ของรถยนต์ในสมการที่ (2.33)



รูปที่ 2.5 ผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณอินพุตคงที่

โดยกำหนดให้ $D_i(s)$ ในสมการที่ (2.33) เป็นอินพุตแบบขั้น (step input) มีขนาดเท่ากับ D_i จะได้

$$X(s) = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)} \cdot \frac{1}{s} D_i \quad (2.36)$$

หลังจากนั้นกระจาย $X(s)$ จะได้

$$X(s) = \frac{K_r D_i}{b_m} \left[\frac{1}{s^2} - T_{ss} \frac{1}{s} + \frac{T_{ss}^2}{T_{ss} s + 1} \right] \quad (2.37)$$

โดยที่ $T_{ss} = \frac{M}{b_m}$ และเมื่อแปลงลาปลาซผกผัน (inverse Laplace) ของสมการที่ (2.37) แล้วจะได้

$$x = \frac{K_r D_i}{b_m} \cdot [t - T_{ss} + T e^{-t/T_{ss}}] \quad (2.38)$$

โดยที่ $t \geq 0$ เมื่อ t คือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถครนนั้น เข้าใกล้ค่าอนันต์ (infinity) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของรถครน x_{ss} ที่สถานะอยู่ตัว (steady state) ดังนี้

$$x_{ss} = \frac{K_r D_i}{b_m} \cdot [t - T_{ss}] \quad (2.39)$$

จะเห็นได้ว่า สมการที่ (2.39) นั้นเป็นสมการเส้นตรง โดยเส้นกราฟที่แสดงคุณสมบัติของสมการนี้คือ เส้นประในรูปที่ 2.5 และจากสมการที่ (2.37) เมื่อรู้ค่าของ T_{ss} และค่าของ M ก็จะสามารถหาค่าของพารามิเตอร์ b_m ได้ และจากสมการที่ (2.39) เมื่อรู้ค่าของ b_m ค่าอินพุต D_i และค่าความชันของเส้นประแล้ว ก็สามารถหาค่าของพารามิเตอร์ K_r ได้ ในทำนองเดียวกัน การหาค่าของพารามิเตอร์ K_i และ b_i ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้น ก็สามารถหาได้จากการทดสอบระบบวงเปิดของการควบคุมความยาวเชือกสลิง โดยจะป้อนแรงดันอินพุต V_i คงที่ค่าหนึ่งให้กับวงจรขับเคลื่อนเพื่อขับเคลื่อนที่ใช้ในการดึงภาระ ซึ่งจะได้ผลตอบสนองคล้ายกับรูปที่ 2.5 ดังนั้น ในการหาค่าของพารามิเตอร์ K_i และ b_i จึงสามารถใช้ขั้นตอนเหมือนกับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถครนดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้น

บทที่ 3

วิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ

ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามต้องการนั้น โดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกเป็น 3 ทฤษฎีหลักๆ กล่าวคือ ทฤษฎีการควบคุมตามแบบฉบับ (classical control theory) ทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ (modern control theory) และทฤษฎีการควบคุมโดยใช้พหุนาม (polynomial) หรือในบางครั้งเรียกว่า ทฤษฎีพีชคณิต ตัวอย่างวิธีการควบคุมตามแบบฉบับ เช่น วิธีการตอบสนองทางความถี่ (frequency response method) และวิธีโลกัสของราก (root-locus method) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน เพราะเป็นเครื่องมือที่ง่ายในการออกแบบระบบควบคุม แต่ถ้าหากโพลและซีโรของระบบเกิดการหักล้างกัน จะทำให้ไม่สามารถควบคุม (uncontrollable) และไม่สามารถสังเกต (unobservable) พฤติการณ์ของระบบได้ สำหรับตัวอย่างทฤษฎีการควบคุมแบบสมัยใหม่ เช่น วิธีการวางโพล (pole placement method) และวิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด (optimal control) ซึ่งจะใช้กับระบบที่อยู่ในรูปของปริภูมิสเตต (state space representation) รูปแบบปริภูมิสเตตนี้ จะมีความแม่นยำและเหมาะสมในการคำนวณด้วยเครื่องคำนวณ สำหรับวิธีกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะหรือ CRA นั้นเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมจากพหุนามคุณลักษณะวงปิด โดยพิจารณาจากส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมนั้นๆ เพื่อให้ระบบควบคุมมีผลตอบสนองที่ไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว รวมทั้งสามารถใช้หลักการของ CRA ปรับความเร็วของผลตอบสนองได้

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวิธี CRA

ศาสตราจารย์ วาย ซี คิม และคณะ (Y.C. Kim et al) [5] ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ซึ่งเป็นหลักการออกแบบให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA นั้น จะพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบป้อนกลับและพหุนามคุณลักษณะวงปิด เพื่อให้ได้ผลตอบสนองชั่วคราวดีขึ้นโดยใช้หลักการทางพีชคณิตโดยที่

- (1) ระบบจะถูกแทนด้วยสมการพหุนาม
- (2) สามารถออกแบบสมการพหุนามคุณลักษณะที่รวม โครงสร้างตัวควบคุมเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมได้
- (3) เสถียรภาพของ CRA จะอยู่บนเงื่อนไขความพอเพียงของลีพาทอฟ (Lipatov's sufficient condition for stability)

3.2 พหุนามคุณลักษณะ

ในหลักการของวิธี CRA จะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบป้อนกลับ $G(s)$ ดังสมการที่ (3.1)

$$G(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.1)$$

โดยที่ตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนนี้คือ พหุนามคุณลักษณะวงปิดซึ่งจะแทนด้วย $P(s)$ ดังสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0, \forall a_i > 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ a_0, a_1, \dots, a_n คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ โดยที่สัมประสิทธิ์ทุกๆตัวจะต้องมีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ของกระบวนการที่รู้ค่าและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ยังไม่รู้ค่า และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการนั้นๆจะถูกออกแบบด้วยวิธี CRA ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

3.3 ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะและค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป

วิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วย CRA จะเป็นวิธีการออกแบบจากระบบควบคุมวงปิดทั้งระบบ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม จะประกอบด้วยค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบ และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนองของระบบ โดยที่ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพหุนามคุณลักษณะวงปิด

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ แสดงได้ดังสมการที่ (3.3) และ (3.4) ดังนี้

$$\alpha_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}} \quad (3.3)$$

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad (3.4)$$

จากความสัมพันธ์ของค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i ในสมการที่ (3.3) และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ในสมการที่ (3.4) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ a_i แสดงได้ดังสมการที่ (3.5)

$$a_i = a_0 \tau^i \frac{1}{\alpha_{i-1} \dots \alpha_2 \alpha_1^{i-1}} \quad (3.5)$$

ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะที่ได้จากวิธี CRA ที่แสดงอยู่ในเทอมของ a_0 τ และ α_i และนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อหาค่าของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุมต่อไป

3.4 การปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบ

จากพหุนามคุณลักษณะวงปิด $P(s)$ ในสมการที่ (3.2) ของระบบป้อนกลับ $G(s)$ นั้น จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเซตของสัมประสิทธิ์ได้ดังสมการที่ (3.6)

$$A = [a_n \quad a_{n-1} \quad \dots \quad a_1 \quad a_0] \quad (3.6)$$

และสามารถจัดสมการที่ (3.1) ให้อยู่ในรูปแบบใหม่ได้ดังสมการที่ (3.7)

$$G(s) = \frac{a_0 / a_n}{s^n + \frac{a_{n-1}}{a_n} s^{n-1} + \dots + \frac{a_1}{a_n} s + \frac{a_0}{a_n}} \quad (3.7)$$

เมื่อเขียนตัวส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการที่ (3.7) ให้อยู่ในรูปเซตของสัมประสิทธิ์ที่สอดคล้องกับสมการที่ (3.6) แล้วจะได้

$$A = \left[1 \quad \frac{a_{n-1}}{a_n} \quad \dots \quad \frac{a_1}{a_n} \quad \frac{a_0}{a_n} \right]$$

หรือ

$$A = \left[1 \quad \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad \prod_{i=1}^{n-1} b_i \quad \prod_{i=0}^{n-1} b_i \right] \quad (3.8)$$

โดยที่ $b_i = \frac{a_i}{a_{i+1}}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ และเมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ก็สามารถปรับได้โดยใช้แฟกเตอร์ k ดังนั้นรูปเซตของสัมประสิทธิ์ในรูปแบบใหม่คือ

$$A = \left[1 \quad k \prod_{i=n-1}^{n-1} b_i \quad \dots \quad k^{n-1} \prod_{i=1}^{n-1} b_i \quad k^n \prod_{i=0}^{n-1} b_i \right] \quad (3.9)$$

ซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ของสมการที่ (3.4) เปลี่ยนไปดังนี้

$$\tau = \frac{1}{k} \left(\frac{a_1}{a_0} \right) \quad (3.10)$$

โดยที่ k มีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ มีค่าน้อยลงจากเดิมที่ได้ออกแบบไว้แล้ว ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบป้อนกลับเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k จะเป็นดังนี้

$$G_k(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0} \quad (3.11)$$

และจะได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบ $P_k(s)$ เมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k แล้วดังต่อไปนี้

$$P_k(s) = a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0 \quad (3.12)$$

ซึ่งเป็นสมการพหุนามคุณลักษณะที่จะนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบด้วยวิธี CRA

3.5 เงื่อนไขเสถียรภาพของ CRA

การพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกออกแบบโดยวิธี CRA นั้น จะใช้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลิพาทอฟ [7] แสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656 \quad \text{สำหรับทุกๆค่าของ } i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (3.13)$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^* \quad \text{สำหรับทุกๆค่าของ } i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (3.14)$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_{i-1}}; \alpha_0, \alpha_n = \infty \quad \text{โดยที่ } i = 1, \dots, n-1 \quad (3.15)$$

โดยที่ α_i^* คือค่าจำกัดอัตราส่วนคุณลักษณะ

3.6 การเลือกค่าอัตราส่วนคุณลักษณะและค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป

การเลือกค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ จะเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบควบคุมวงปิดมีเสถียรภาพและมีผลตอบสนองตามต้องการอย่างไรก็ตาม ก็ยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนคุณลักษณะนี้เพื่อให้ระบบควบคุมวงปิดมีสมรรถนะตามที่ต้องการได้ แต่ในการปรับเปลี่ยนค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i นั้น จะต้องปรับเปลี่ยนให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขความพอเพียงสำหรับเสถียรภาพของลีพาทอฟดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อ 3.5 ซึ่งศาสตราจารย์คิมได้แนะนำการกำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i ทุกตัวว่า ควรให้ มีค่ามากกว่า 2 และให้ค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ เท่ากับ 1 เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบ แต่จะสามารถเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นเหล่านั้นเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการได้

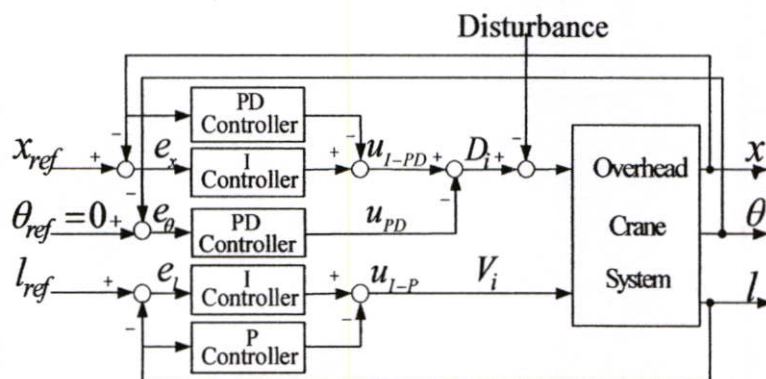
บทที่ 4

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA และการสร้างตัวควบคุม

ในบทนี้จะอธิบายโครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ และการออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบนี้ด้วยวิธี CRA ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 เพื่อควบคุมการทำงานของระบบครนเหนือศีรษะให้มีสมรรถนะตามที่ต้องการ ตัวควบคุมที่นำมาใช้จะประกอบด้วยตัวควบคุม I-PD สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถเครนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระให้น้อยลงในขณะที่มีการเคลื่อนย้ายภาระ และตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิงเพื่อไม่ให้ภาระชนกับสิ่งกีดขวาง

การออกแบบตัวควบคุมหลายตัวแปรด้วยวิธี CRA จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ในส่วนแรกเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-PD เพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครน ในส่วนที่สองเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุม PD เพื่อลดมุมแกว่งของภาระ ในส่วนที่สามเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุม I-P เพื่อควบคุมความยาวของเชือกสลิง โดยใน 3 ส่วนนั้นจะอธิบายการกำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ การกำหนดค่าเวลาคงตัวนับทั่วไป พร้อมทั้งอธิบายถึงขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สำหรับส่วนที่สี่จะอธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม I-PD โดยการปรับค่าแฟกเตอร์ k_x เมื่อต้องการปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของรถเครน และในส่วนสุดท้ายจะอธิบายขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม I-P เมื่อต้องการปรับความเร็วของการควบคุมความยาวเชือกสลิงด้วยการปรับค่าแฟกเตอร์ k_l และการสร้างตัวควบคุมเพื่อนำตัวควบคุมที่ออกแบบได้นั้นมาควบคุมระบบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จากนั้น จึงนำตัวควบคุมทั้งหมดที่ถูกแปลงเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องมาเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบครนเหนือศีรษะให้ได้สมรรถนะของระบบควบคุมตามต้องการ

4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ



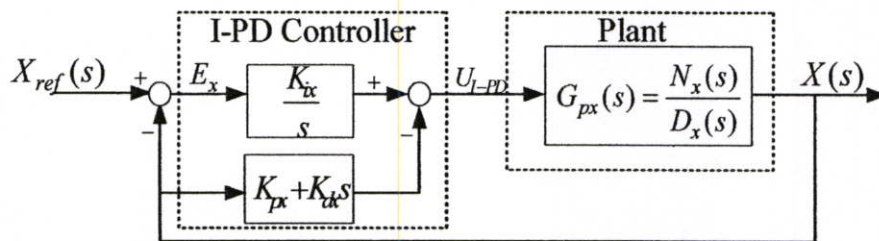
รูปที่ 4.1 โครงสร้างการควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะ

ในการออกแบบตัวควบคุมของระบบแรงเหวี่ยงแสดงดังรูปที่ 4.1 นั้น จะออกแบบตัวควบคุมทั้งสามด้วยวิธี CRA และออกแบบโดยแยกอิสระจากกัน ซึ่งตัวควบคุม I-PD จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (2.33) ตัวควบคุม PD จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ (2.34) และตัวควบคุม I-P จะถูกออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง (2.35) สำหรับขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมทั้งสาม จะกล่าวโดยละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.2 การออกแบบตัวควบคุม

4.2.1 การออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมตำแหน่งของรถเครน

รูปที่ 4.2 แสดงถึงโครงสร้างของระบบควบคุมในส่วนของรถเครนที่แยกอิสระ โดยมีตัวควบคุม I-PD เป็นตัวควบคุมตำแหน่งของรถเครน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนที่แยกอิสระ

สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD ที่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนเขียนได้ดังนี้

$$U_{I-PD}(s) = \frac{K_{ix}}{s} E_x(s) - (K_{px} + K_{dx}s)X(s) \quad (4.1)$$

โดยที่ K_{ix} คือ อัตราขยายอินทิกรัล (integral gain) K_{px} คืออัตราขยายสัดส่วน (proportional gain) K_{dx} คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (derivative gain) และ $E_x(s) = X_{ref}(s) - X(s)$ ในส่วนของกระบวนการ $G_{px}(s) = \frac{N_x(s)}{D_x(s)} = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)}$ (สมการที่(2.33)) ซึ่งคือระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนจะมีสมการพหุนามคือ

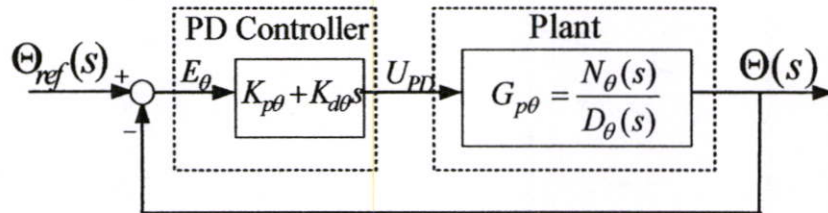
$$N_x(s) = K_r \text{ และ } D_x(s) = Ms^2 + b_ms \quad (4.2)$$

หลังจากได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD ในสมการที่ (4.1) และสมการพหุนามของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนในสมการที่ (4.2) แล้ว ก็ใช้วิธี CRA ออกแบบหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_{ix} K_{px} และ K_{dx} ได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_i และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ที่เหมาะสมกับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน ทำให้ได้พหุนามคุณลักษณะวงปิด
- 2) หาพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน ซึ่งในสมการนี้จะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต้องการหาค่าและพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนที่รู้ค่า จากนั้นจึงเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดนี้เข้ากับพหุนามคุณลักษณะวงปิดที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 และเมื่อแก้สมการแล้วก็จะได้ค่าพารามิเตอร์ K_{ix} K_{px} และ K_{dx} ของตัวควบคุม I-PD

4.2.2 การออกแบบตัวควบคุม PD ด้วยวิธี CRA สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ

โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระที่แยกอิสระ โดยมีตัวควบคุม PD เป็นตัวควบคุมนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระที่แยกอิสระ

สำหรับสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PD เพื่อควบคุมมุมแกว่งของภาระที่เกิดขึ้นในระบบเครนเหนือศีรษะนั้นแสดงได้ดังสมการที่ (4.3)

$$U_{PD}(s) = (K_{p\theta} + K_{d\theta}s)E_{\theta}(s) \quad (4.3)$$

โดยที่ $K_{p\theta}$ คือ อัตราขยายสัดส่วน $K_{d\theta}$ คือ อัตราขยายอนุพันธ์ และ $E_{\theta}(s) = \Theta_{ref}(s) - \Theta(s)$ ในส่วนของสมการพหุนามของกระบวนการ $G_{p\theta}(s) = \frac{N_{\theta}(s)}{D_{\theta}(s)} = -\frac{K_r s}{MIs^3 + b_m Is^2 + Mgs + b_m g}$ (สมการที่(2.34)) ซึ่งก็คือระบบควบคุมมุมแกว่งของภาระนั้นแสดงได้ดังนี้คือ

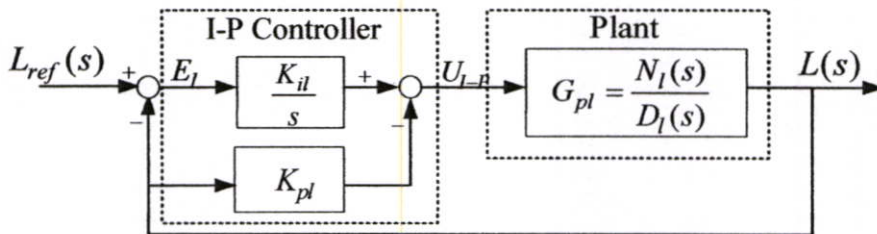
$$N_\theta(s) = -K_r s \quad \text{และ} \quad D_\theta(s) = Ms^3 + b_m ls^2 + Mgs + b_m g \quad (4.4)$$

เมื่อได้สัญญาณของตัวควบคุม PD ในสมการที่ (4.3) และสมการพหุนามของระบบการแกว่งของภาระในสมการที่ (4.4) ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p\theta}$ และ $K_{d\theta}$ ของตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ได้โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α , และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ที่เหมาะสมกับระบบการแกว่งของภาระ ทำให้ได้พหุนามคุณลักษณะวงปิด
- 2) หาพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบการแกว่งของภาระ ซึ่งในสมการนี้ก็จะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต้องการหาค่าและพารามิเตอร์ของระบบการแกว่งของภาระที่รู้ค่า จากนั้นเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดนี้เข้ากับพหุนามคุณลักษณะวงปิดที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ $K_{p\theta}$ และ $K_{d\theta}$ ของตัวควบคุม PD

4.2.3 การออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง

โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่แยกอิสระ โดยมีตัวควบคุม I-P ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่แยกอิสระ

จากโครงสร้างของตัวควบคุม I-P จะได้สัญญาณควบคุม $U_{I-P}(s)$ ของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงดังสมการที่ (4.5)

$$U_{I-P}(s) = \frac{K_{il}}{s} E_I(s) - K_{pl} L(s) \quad (4.5)$$

โดยที่ K_{il} คือ อัตราขยายอินทิกรัล K_{pl} คือ อัตราขยายสัดส่วน และ $E_I(s) = L_{ref}(s) - L(s)$ ในส่วนของกระบวนการ $G_{pl}(s) = \frac{N_I(s)}{D_I(s)} = \frac{K_I}{s(ms + b_I)}$ (สมการที่ (2.35)) ซึ่งก็คือระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้น จะมีสมการพหุนามดังนี้

$$N_I(s) = K_I \text{ และ } D_I(s) = ms^2 + b_I s \quad (4.6)$$

เมื่อได้สัญญาณของตัวควบคุม I-P ในสมการที่ (4.5) และสมการพหุนามของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงในสมการที่ (4.6) ขั้นตอนต่อไปก็คือการหาค่าพารามิเตอร์ K_{II} และ K_{PI} ของตัวควบคุม ด้วยวิธี CRA ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ α_I และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ที่เหมาะสมกับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง ทำให้ได้พหุนามคุณลักษณะวงปิด
- 2) หาพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบการดึงเชือกสลิง ซึ่งในสมการนี้ก็จะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ต้องการหาค่าและพารามิเตอร์ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่รู้ค่า จากนั้นเทียบสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะวงปิดนี้เข้ากับพหุนามคุณลักษณะวงปิดที่ได้ในขั้นตอนที่ 1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_{II} และ K_{PI} ของตัวควบคุม I-P

4.3 การออกแบบตัวควบคุมเมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองของระบบ

เมื่อได้ออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-P ให้ระบบควบคุมมีสมรรถนะตามที่ต้องการแล้ว ในกรณีที่ต้องการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถเครนและในการควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เร็วขึ้น จะกระทำได้โดยปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_I ของระบบควบคุมวงปิด ซึ่งจะมีขั้นตอนในการออกแบบตัวควบคุมทั้งสองดังต่อไปนี้

4.3.1 การออกแบบตัวควบคุม I-PD เมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองด้วยวิธี CRA

หลังจากหาค่าพารามิเตอร์ K_{ix} , K_{px} และ K_{dx} ของตัวควบคุม I-PD ที่ให้ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของรถเครนไม่มีค่าพุ่งเกินแล้ว เมื่อต้องการปรับความเร็วการเคลื่อนที่ของรถเครนให้เร็วขึ้นจะสามารถทำได้ดังนี้

- 1) กำหนดค่าแฟกเตอร์ k_x ที่มีค่ามากกว่าหนึ่ง และมีค่าที่เหมาะสมกับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน ทำให้ได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดดังสมการที่ (3.12)
- 2) หาพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน จากนั้นจึงแล้วดำเนินการเหมือนกับหัวข้อ 4.2.1 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_{ix} , K_{px} และ K_{dx} ซึ่งจะเป็นค่าใหม่ของตัวควบคุม I-PD

4.3.2 การออกแบบตัวควบคุม I-P เมื่อต้องการปรับความเร็วผลตอบสนองด้วยวิธี CRA

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.3.1 เมื่อต้องการปรับความเร็วของผลตอบสนองในการควบคุมความยาวเชือกสลิง ก็จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ K_{II} และ K_{PI} ของตัวควบคุม I-P ใหม่ดังนี้

- 1) กำหนดค่าแฟกเตอร์ k_f ที่มีค่ามากกว่าหนึ่ง และมีค่าที่เหมาะสมกับระบบการควบคุมความยาว เชือกสลิง ทำให้ได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดดังสมการที่ (3.12)
- 2) หาพหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง จากนั้นจึงหาค่าใหม่ของ พารามิเตอร์ K_{ii} และ K_{pi} ของตัวควบคุม I-P โดยดำเนินการเหมือนกับหัวข้อ 4.2.3 เพื่อที่จะ นำไปใช้ในการควบคุมต่อไป

4.4 การสร้างตัวควบคุม

4.4.1 การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

การแปลงสัญญาณควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเพื่อสร้างตัว ควบคุม I-PD ตัวควบคุม PD และตัวควบคุม I-P ที่ได้ออกแบบไว้แล้วนั้น สามารถทำได้หลายวิธี [8] ดังต่อไปนี้

1. การอินทิเกรต โดยวิธีหาผลต่างถดถอย (backward difference)
2. การอินทิเกรต โดยวิธีหาผลต่างก้าวหน้า (forward difference)
3. การอินทิเกรต โดยวิธีหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูหรือวิธีไบลิเนียร์ (trapezoidal integration or bilinear transformation)
4. การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของตัวควบคุม (impulse-invariance)
5. การเปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณระดับของตัวควบคุม (step-invariance)
6. การเปรียบเทียบตำแหน่งโพลและซีโรของตัวควบคุม (matched pole-zero mapping)

เนื่องจากการอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอยนั้นเป็นวิธีที่สะดวกและง่ายต่อการนำมาใช้ แปลงสัญญาณควบคุมจากระบบเวลาต่อเนื่องให้เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ จึงได้เลือกใช้วิธีนี้ โดยสมการที่นำมาใช้ในการแปลงสัญญาณควบคุมนั้นแสดงได้ดังสมการที่ (4.7)

$$s = \frac{1 - z^{-1}}{T} \quad (4.7)$$

โดยที่ T คือ เวลาชักตัวอย่าง (sampling time) มีหน่วยเป็นวินาที

การแปลงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องให้เป็นชนิดสัญญาณ ไม่ต่อเนื่องโดยวิธีอินทิเกรตหาผลต่างถดถอย สามารถพิจารณาเสถียรภาพของตัวควบคุมได้จาก สมการที่ (4.7) ร่วมกับขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน s ของฟังก์ชันการแปลงลาปลาซ โดยค่าจริงของตัวแปร s มีค่าน้อยกว่า 0 ดังนี้

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

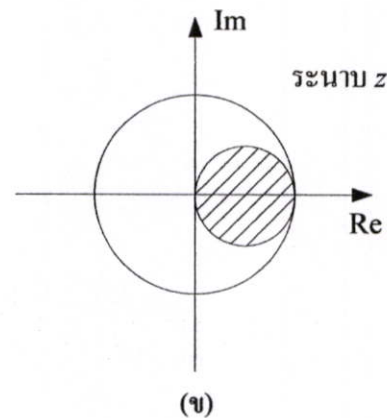
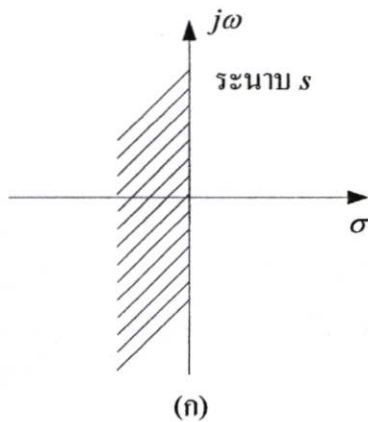
$$\operatorname{Re}\left(\frac{z-1}{Tz}\right) < 0$$

เนื่องจาก $T > 0$ เสมอ และตัวแปรเชิงซ้อน $z = \sigma + j\omega$ ดังนั้นจะได้

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

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

ซึ่งขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน z คือพื้นที่ภายในวงกลมรัศมี $\frac{1}{2}$ จุดศูนย์กลางตำแหน่ง $\left(\frac{1}{2}, 0\right)$ ของระนาบ z ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยจะเห็นว่ากรอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอยสามารถแปลงตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่มีเสถียรภาพ เป็นตัวควบคุมชนิดดิจิทัลที่มีเสถียรภาพได้เสมอ แต่คุณสมบัติการตอบสนองชั่วขณะและ คุณสมบัติการตอบสนองเชิงความถี่ของตัวควบคุมจะแตกต่างกัน



รูปที่ 4.5 ขอบเขตเสถียรภาพในการอินทิเกรตโดยวิธีหาผลต่างถดถอย

4.4.2 การแปลงสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ 4.2 นั้น คือ

$$U_{I-PD}(s) = \frac{K_{ix}}{s} E_x(s) - (K_{px} + K_{dx}s)X(s) \quad (4.8)$$

เมื่อแทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.8) จะได้

$$U_{I-PD}(z) = \frac{K_{ix}}{\frac{1-z^{-1}}{T}} E_x(z) - [K_{px} + K_{dx}(\frac{1-z^{-1}}{T})]X(z) \quad (4.9)$$

และเมื่อคูณสมการ (4.9) ด้วย $\frac{1-z^{-1}}{T}$ ทั้งสองข้างจะได้

$$\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)U_{I-PD}(z) = K_{ix}E_x(z) - K_{px}\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)X(z) + K_{dx}\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)^2 X(z) \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right)U_{I-PD}(z) = \frac{K_{ix}T^2E(z) - K_{px}T(1-z^{-1})X(z) - K_{dx}(1-2z^{-1}+z^{-2})X(z)}{T^2} \quad (4.11)$$

$$U_{I-PD}(z) - z^{-1}U_{I-PD}(z) = K_{ix}TE(z) - K_{px}(1-z^{-1})X(z) - \frac{K_{dx}}{T}(1-2z^{-1}+z^{-2})X(z) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} U_{I-PD}(z) &= K_{ix}TE(z) - K_{px}X(z) + K_{px}z^{-1}X(z) - \frac{K_{dx}}{T}X(z) \\ &\quad + \frac{2K_{dx}}{T}z^{-1}X(z) - \frac{K_{dx}}{T}z^{-2}X(z) + z^{-1}U_{I-PD}(z) \end{aligned} \quad (4.13)$$

หลังจากแปลงแซคคพผันแล้ว จะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD ดังนี้

$$\begin{aligned} u_{I-PD}(nT) &= K_{ix}Te_x(nT) - K_{px}x(nT) + K_{px}x(nT-T) - \frac{K_{dx}}{T}x(nT) \\ &\quad - \frac{2K_{dx}}{T}x(nT-T) - \frac{K_{dx}}{T}x(nT-2T) + u_{I-PD}(nT-T) \end{aligned} \quad (4.14)$$

4.4.3 การแปลงสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระจากระบบเวลา

ต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากโครงสร้างของระบบควบคุมการลดมุมแกว่งของภาระแสดงดังรูปที่ 4.3 จะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PD แสดงดังสมการที่ (4.15)

$$U_{PD}(s) = (K_{p\theta} + K_{d\theta}s)E_\theta(s) \quad (4.15)$$

ในทำนองเดียวกันกับหัวข้อ 4.4.2 หลังจากแทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.15) แล้วจะได้

$$U_{PD}(z) = K_{p\theta}E_\theta(z) + \frac{K_{d\theta}}{T}(E_\theta(z) - E_\theta(z)z^{-1}) \quad (4.16)$$

และเมื่อแปลงแซดพหุคูณแล้ว จะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PD ดังนี้

$$u_{PD}(nT) = K_{p\theta}e_\theta(nT) + \frac{K_{d\theta}}{T}(e_\theta(nT) - e_\theta(nT - T)) \quad (4.17)$$

4.4.4 การแปลงสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจากระบบเวลาต่อเนื่อง เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากโครงสร้างของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงดังรูปที่ 4.4 จะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P แสดงดังสมการที่ (4.18)

$$U_{I-P}(s) = \frac{K_{iI}}{s}E_I(s) - K_{pI}L(s) \quad (4.18)$$

แทนค่า $s = \frac{1-z^{-1}}{T}$ ลงในสมการ (4.18) พร้อมทั้งจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$U_{I-P}(z) = K_{iI}TE_I(z) - K_{pI}L(z) + K_{pI}L(z)z^{-1} + U_{I-P}(z)z^{-1} \quad (4.19)$$

และเมื่อแปลงแซดพหุคูณแล้ว จะได้สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-P ดังนี้

$$u_{I-P}(nT) = K_{iI}Te_I(nT) - K_{pI}l(nT) + K_{pI}l(nT - T) + u_{I-P}(nT - T) \quad (4.20)$$

การหาสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD และ I-P ในกรณีที่ต้องการปรับความเร็วของผลตอบสนองด้วยวิธี CRA จากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องนั้น จะได้รูปแบบสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD และ I-P เหมือนกับสมการที่ (4.14) และ (4.20) เพียงแต่ค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD และ I-P ที่ได้จะแตกต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถใช้สัญญาณควบคุมที่อยู่ในรูปของสมการที่ (4.14) และ (4.20) แทนได้

การจำลองและการทดลองระบบควบคุม

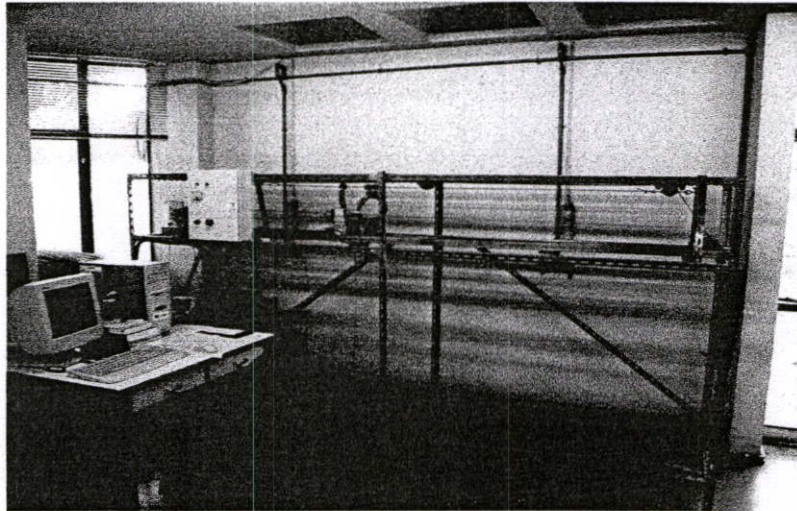
ในบทนี้จะกล่าวถึงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบครน ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบครนด้วยวิธี CRA หลังจากนั้นจะนำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบแล้วไปทดสอบประสิทธิภาพโดยการจำลองการควบคุมระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (MATLAB) ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้คือ ขั้นตอนแรกทดสอบผลตอบสนองของระบบวงปิด เมื่อกำหนดอินพุตของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเป็นแบบขั้น ขั้นตอนที่สองศึกษาความสัมพันธ์ของการออกแบบตัวควบคุม I-PD ด้วยการปรับค่าแฟกเตอร์ k_x ให้มีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งจะไปมีผลกับค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ โดยไม่เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถครนและความยาวเชือกสลิง และศึกษาความีผลอย่างไรกับผลตอบสนองของระบบ ขั้นตอนที่สามศึกษาผลของการออกแบบตัวควบคุม I-P ด้วยการปรับค่าแฟกเตอร์ k_f ให้มีค่ามากกว่าหนึ่ง โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถครนและความยาวเชือกสลิง ขั้นตอนที่สุดศึกษาผลของการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-P ด้วยการปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f ในเวลาเดียวกันว่ามีผลอย่างไรกับผลตอบสนองของระบบ ขั้นตอนสุดท้ายทดสอบความคงทนของตัวควบคุมเมื่อพารามิเตอร์(ภาวะ)ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ขั้นตอนสุดท้ายทดสอบการกำจัดผลกระทบจากสิ่งรบกวนในระบบ และขั้นตอนสุดท้าย ทดสอบการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งหลังจากที่ศึกษาผลการจำลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว จะนำตัวควบคุมที่ออกแบบมาควบคุมระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกันกับขั้นตอนการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

สำหรับโครงสร้างของระบบครนเหนือศีรษะ การหาพารามิเตอร์ของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจากผลตอบสนองระบบวงเปิด รวมถึงการพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุมนั้น แสดงในภาคผนวก ก. ส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะและวงจรที่ใช้ในการทดลอง แสดงในภาคผนวก ข. และโปรแกรมที่ใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือศีรษะ และสร้างตัวควบคุม I-PD PD และ I-P แสดงในภาคผนวก ค.

5.1 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบครนเหนือศีรษะ

สำหรับระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 นั้น เมื่อใช้ค่าของพารามิเตอร์ที่สามารถวัดได้โดยตรง และใช้ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบครนดังกล่าว

ทดลองในภาคผนวก ก. เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ K_r และ b_m ของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็นและพารามิเตอร์ K_l และ b_l ของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงดังวิธีที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 แล้วค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบครนเหนือศีรษะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายระบบครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ระบบครนเหนือศีรษะ

| | |
|---|-------------------------|
| น้ำหนักของรถเข็น M | 6.12 kg |
| น้ำหนักของภาระ m | 1 kg |
| ความยาวเชือกสลิง (ที่ระยะเริ่มต้น) l | 0.8 m |
| แรงโน้มถ่วงโลก g | 9.81 m/sec ² |
| ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น K_r | 0.6281 |
| ค่าคงที่แรงของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง K_l | 0.0684 |
| สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็น b_m | 12.24 N sec/m |
| สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง b_l | 10 N sec/m |

ดังนั้น จากสมการที่ (2.33) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเข็นคือ

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

และจากสมการที่ (2.34) เมื่อพิจารณาว่าความยาวเชือกสลิง l อยู่ที่ระยะเริ่มต้น 0.8 เมตร จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการแกว่งของภาระ ดังนี้

$$G_{po}(s) = \frac{\Theta(s)}{D_i(s)} = -\frac{0.1283 s}{s^3 + 2 s^2 + 12.26 s + 24.52} \quad (5.2)$$

และจากสมการที่ (2.35) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของความยาวเชือกสลิงคือ

$$G_{pl}(s) = \frac{L(s)}{V_i(s)} = \frac{0.06838}{s(s+10)} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และระบบการแกว่งของภาระจะมีอินพุตเดียวกัน เนื่องจากทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันคือ เมื่อรถเครนเคลื่อนที่จะทำให้เกิดการแกว่งขึ้น โดยหากรถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมาก มุมแกว่งของภาระจะมาก ในทำนองเดียวกัน หากรถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว น้อย มุมแกว่งของภาระจะน้อยตามไปด้วย

5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD PD และ I-P สำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ

การออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมสำหรับระบบเครนเหนือศีรษะ จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ $\alpha_1 = 4$ และ $\alpha_2 = 4$ และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป $\tau = 4$ วินาที ส่วนถัดมาคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ $\alpha_1 = 2.89$ และ $\alpha_2 = 0.07$ และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป $\tau = 0.86$ วินาที ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุม PD นั้นจะเลือกออกแบบที่ความยาวเชือก l เท่ากับ 0.8 เมตร และส่วนสุดท้ายคือการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวของเชือกสลิง โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ $\alpha_1 = 13.33$ และ $\alpha_2 = 0.3$ และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป $\tau = 2$ วินาที การกำหนดค่าอัตราส่วนคุณลักษณะ และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปทั้งหมดนี้ได้จากการจำลองการควบคุมระบบเพื่อหาค่าที่เหมาะสม (trial and error) และจากขั้นตอนการออกแบบพารามิเตอร์ของตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ที่ได้อธิบายในบทที่ 4 แล้วนั้น จะได้พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD PD และ I-P แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม

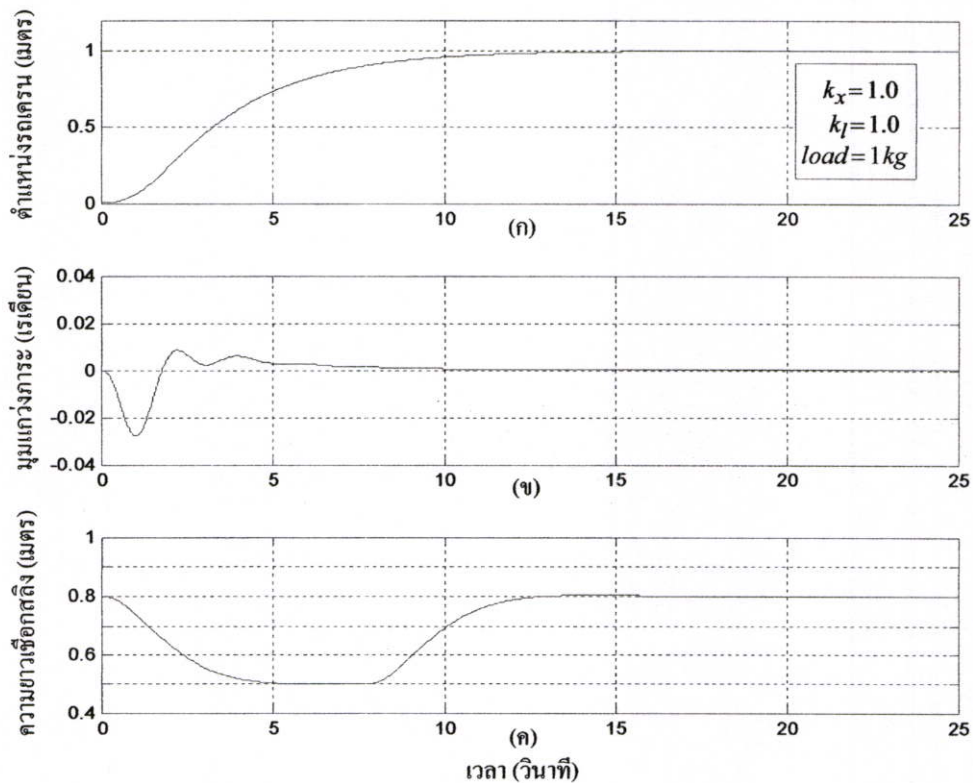
| ตัวควบคุม | α_1 | α_2 | τ (sec) | K_p | K_i | K_d |
|-----------|------------|------------|--------------|--------|-------|-------|
| I-PD | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 38.98 | 9.74 | 19.49 |
| PD | 2.89 | 0.07 | 0.86 | 40.00 | - | 10.00 |
| I-P | 13.33 | 0.30 | 2.00 | 194.89 | 97.44 | - |

จากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิงจะมีค่า K_p และ K_i มาก เนื่องจากการควบคุมความยาวเชือกสลิงจะใช้มอเตอร์ซึ่งจะมีเกียร์บ็อกซ์ช่วยในการลดรอบความเร็วมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดเพื่อใช้ในการดึงภาระที่มีน้ำหนักมาก ทำให้ผลตอบสนองของระบบนี้ช้า ดังนั้น จึงออกแบบให้ K_p และ K_i มีค่ามากเพื่อให้ระบบมีผลตอบสนองเร็ว

5.3 ผลการจำลอง

5.3.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

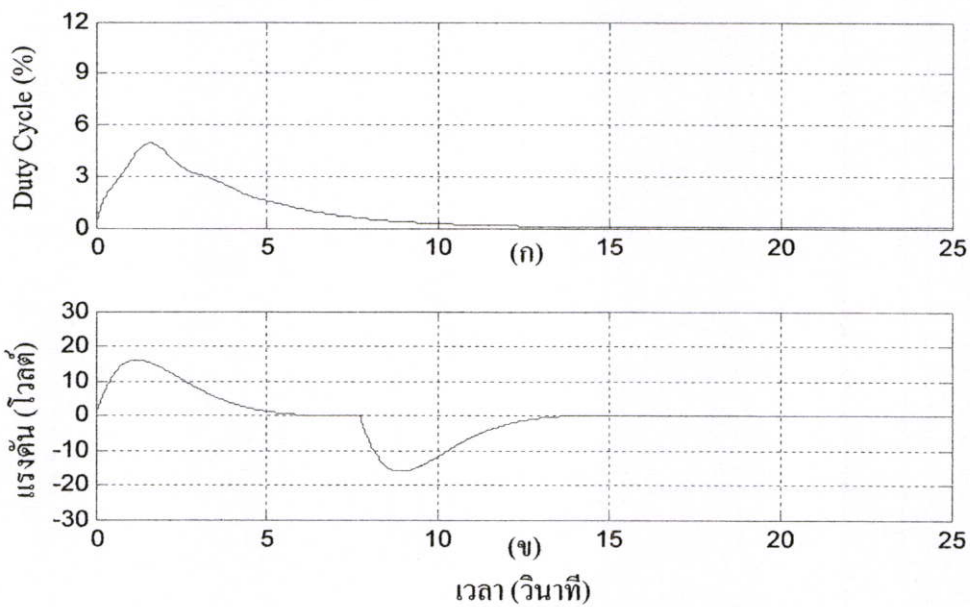
การจำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ใช้ควบคุมระบบว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นเป็นไปตามต้องการหรือไม่ ก่อนที่จะนำตัวควบคุมนี้ไปทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ การจำลองจะกำหนดให้รถครนเคลื่อนที่ไปตำแหน่ง 1 เมตร พร้อมกับลดมุมแกว่งของภาระให้ไม่เกิน 0.03 เรเดียน และหยุดแกว่งที่มุม 0 เรเดียน ในขณะเดียวกันก็ควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 0.8 เมตรไปที่ความยาว 0.5 เมตร แล้วกลับมาที่ความยาว 0.8 เมตรเมื่อรถครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.2 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.3



(ก) ตำแหน่งของรถครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

จากรูปที่ 5.2 (ก) พบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน และไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error) มีช่วงเวลาเข้าที่เท่ากับ 12 วินาที ในขณะที่ตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระไม่ให้เกิน 0.03 เรเดียนและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรแล้ว ดังผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.2 (ข) และในส่วนของ การควบคุมความยาวเชือกสลิงเพื่อยกภาระให้พ้นสิ่งกีดขวางพบว่า ตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.2 (ค)



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.3 สัญญาณควบคุม

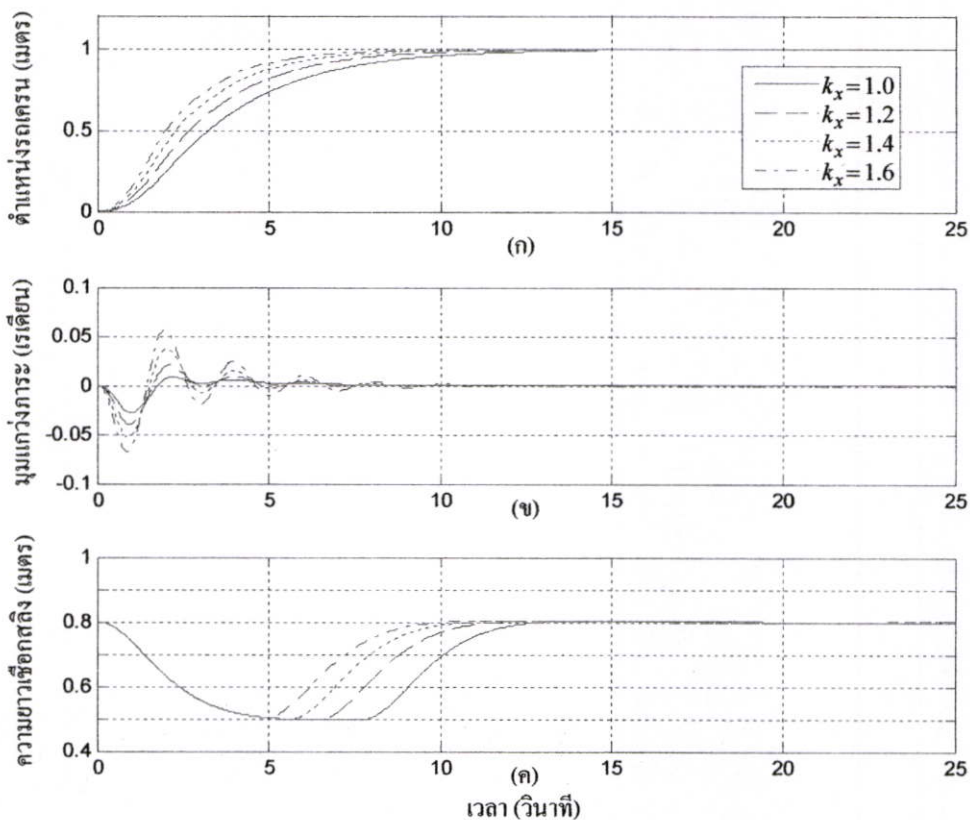
5.3.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองโดยแฟกเตอร์ k

การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ได้กล่าวไว้ว่า หากต้องการปรับเปลี่ยนความเร็วผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด สามารถทำได้โดยการปรับค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วของระบบควบคุม โดยหากค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปมีค่าน้อย ผลตอบสนองของระบบควบคุมจะเร็ว ในทำนองเดียวกัน หากค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปมีค่ามาก ผลตอบสนองจะช้า ซึ่งวิธี CRA ได้แนะนำการปรับเปลี่ยนความเร็วของผลตอบสนองโดยการปรับค่าแฟกเตอร์ k ให้มีค่ามากกว่า 1.0 ซึ่งจะมีผลต่อค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงศึกษาผลกระทบของการปรับค่าแฟกเตอร์ k โดยจะศึกษาส่วนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง เนื่องจากการออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและการ

ออกแบบตัวควบคุม I-P สำหรับระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงสามารถกำหนดค่าแฟกเตอร์ k ได้ ซึ่งในที่นี้ใช้แฟกเตอร์ k_x สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และ k_y สำหรับระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

5.3.2.1 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนโดยแฟกเตอร์ k_x

ค่าแฟกเตอร์ k_x ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนคือ 1.2 1.4 และ 1.6 ตามลำดับโดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบเครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจะยังคงเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.1 ผลการจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.4 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.5

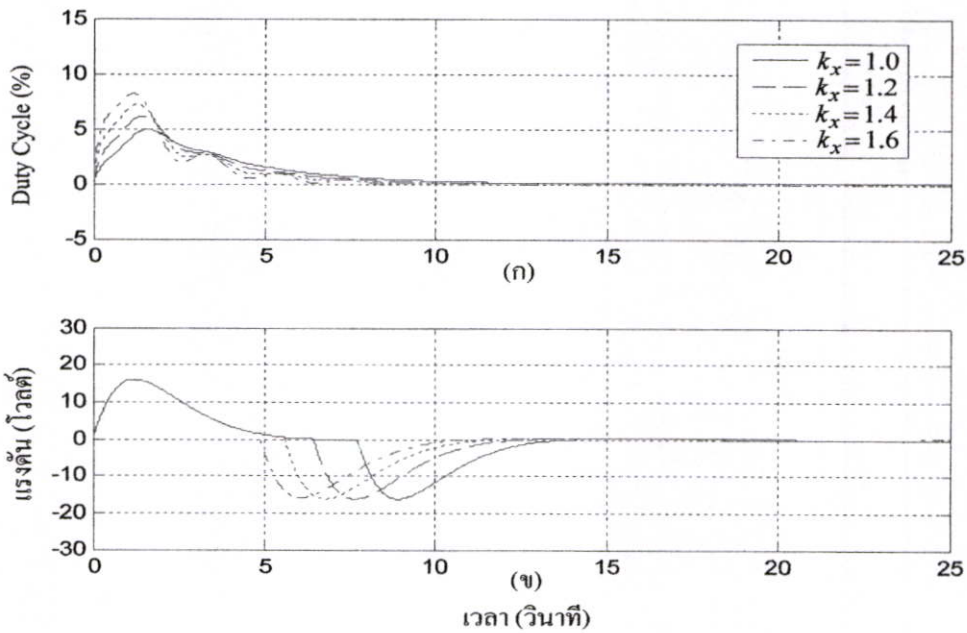


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.4 ผลการจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x

จากรูปที่ 5.4 พบว่า ตัวควบคุม I-PD ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_x ที่มีค่าสูงกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนเร็วขึ้น และไม่มีค่าพุ่งเกินแสดงในรูปที่ 5.4 (ก) อย่างไรก็ตาม มุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นแสดงในรูปที่ 5.4 (ข) และในส่วนการควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงในรูปที่ 5.4 (ค) จะเห็นว่าการปรับค่า k_x ในการออกแบบตัวควบคุม I-PD มี

ผลกระทบโดยตรงต่อการควบคุมความยาวเชือกสลิง พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD และสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนเมื่อปรับค่า k_x แสดงดังตารางที่ 5.3



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

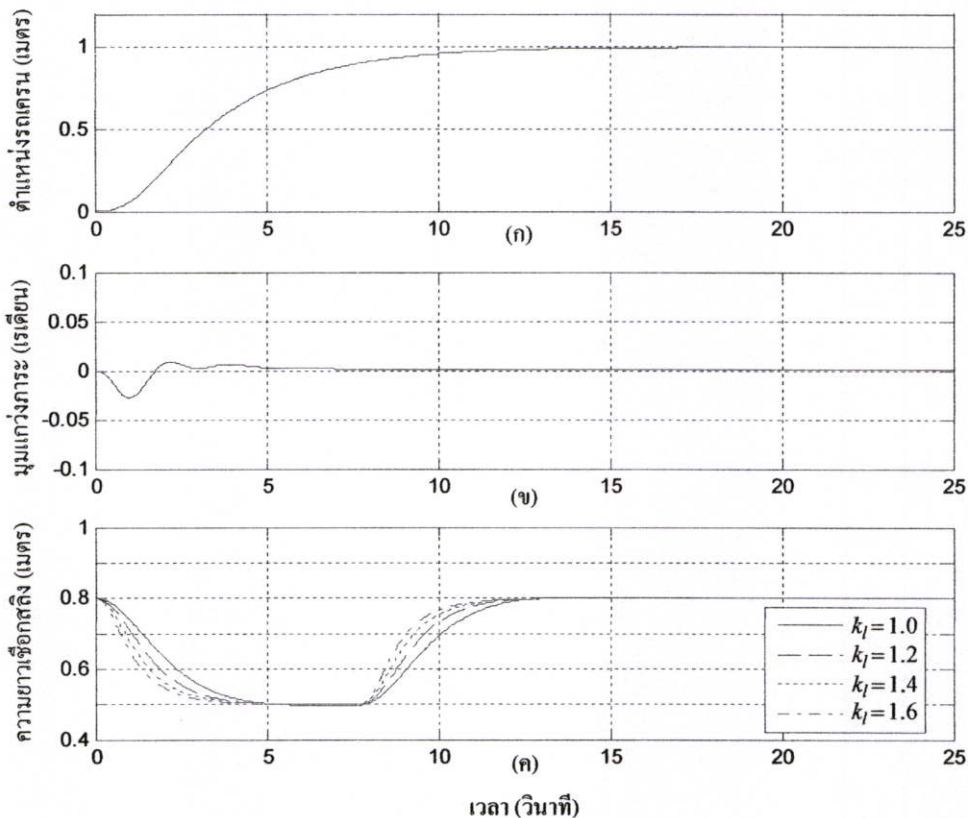
รูปที่ 5.5 สัญญาณควบคุม

จากรูปที่ 5.5 (ก) จะเห็นว่าเมื่อค่าแฟกเตอร์ k_x มาก สัญญาณควบคุม D_i จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม I-PD พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าแฟกเตอร์ k_x ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป และในทางกลับกัน หากกำหนดค่าแฟกเตอร์ k_x น้อย สัญญาณควบคุมจะมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากระบบควบคุมต้องการความเร็วของผลตอบสนองที่ช้าลง และรูปที่ 5.5 (ข) สัญญาณควบคุมของการควบคุมความยาวเชือกสลิงทั้งสามนั้นจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยจะต่างกันที่เวลาที่ใช้ในการปล่อยเชือกสลิงเท่านั้น

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD และสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้จากการจำลอง

| k_x | τ | K_p | K_i | K_d | t_r (sec) | t_s (sec) |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| 1.0 | 4.00 | 38.98 | 9.74 | 19.49 | 6.38 | 12.08 |
| 1.2 | 3.33 | 56.14 | 16.84 | 27.29 | 5.30 | 10.09 |
| 1.4 | 2.85 | 76.41 | 26.74 | 35.08 | 4.59 | 8.61 |
| 1.6 | 2.50 | 99.80 | 39.92 | 42.88 | 3.97 | 7.76 |

5.3.2.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยแฟกเตอร์ k_f
 ค่าแฟกเตอร์ k_f ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-P สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง คือ 1.2 1.4 และ 1.6 เช่นเดียวกับหัวข้อย่อย 5.3.2.1 โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ ครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจะยังคงเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อย ที่ 5.3.1 ผลการจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.6 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.7



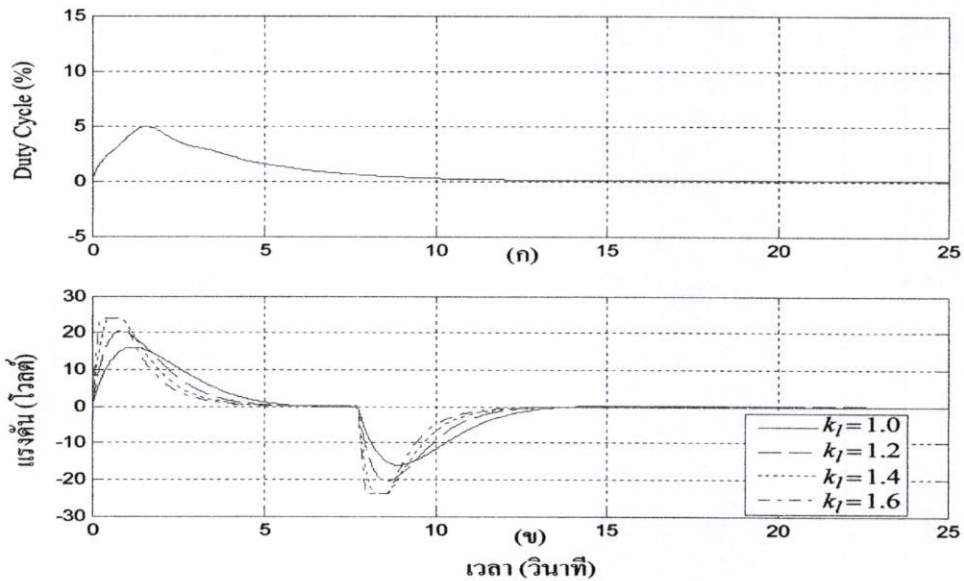
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของการะ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_f

จากรูปที่ 5.6 พบว่า ตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_f ที่มีค่าสูงกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการดึงขึ้นและปล่อยลงของเชือกสลิงเร็วขึ้น โดยไม่มีค่าพุ่งเกินแสดงในรูปที่ 5.6(ค) และจะเห็นว่าที่ค่าแฟกเตอร์ $k_f = 1.6$ ความยาวเชือกสลิงจะถูกปล่อยสู่ตำแหน่งเป้าหมายและถูกดึงขึ้นกลับสู่ความยาวเชือกสลิงที่ค่าอ้างอิงได้เร็วที่สุด ตารางที่ 5.4 แสดงถึงพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-P และสมรรถนะของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง

จากรูปที่ 5.7 (ก) แม้ว่าค่าแฟกเตอร์ k_f เปลี่ยนไป แต่สัญญาณควบคุมของการเคลื่อนที่ของรถเครนจะมีลักษณะเหมือนกัน และจากรูปที่ 5.7 (ข) จะเห็นว่าเมื่อค่าแฟกเตอร์ k_f มาก สัญญาณ

ควบคุม V_i จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม I-P พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุมให้ภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าแฟกเตอร์ k_f จนเกิดการอิ่มตัว (saturate) ที่ ± 24 โวลต์ และเมื่อค่าแฟกเตอร์ $k_f = 1.6$ สัญญาณควบคุม V_i มีค่ามากขึ้นและสอดคล้องกับค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป และในทางกลับกัน หากกำหนดค่าแฟกเตอร์ k_f น้อย สัญญาณควบคุมจะมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากระบบควบคุมต้องการความเร็วของผลตอบสนองที่ช้าลง



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.7 สัญญาณควบคุม

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-P และสมรรถนะของระบบควบคุมที่ได้จากการจำลอง

| k_f | τ | K_p | K_i | t_r (sec) | t_s (sec) |
|-------|--------|--------|--------|-------------|-------------|
| 1.0 | 2.00 | 194.89 | 97.44 | 2.93 | 4.72 |
| 1.2 | 1.66 | 280.64 | 168.38 | 2.54 | 4.39 |
| 1.4 | 1.42 | 381.98 | 267.39 | 2.25 | 4.16 |
| 1.6 | 1.25 | 498.92 | 399.13 | 2.05 | 3.89 |

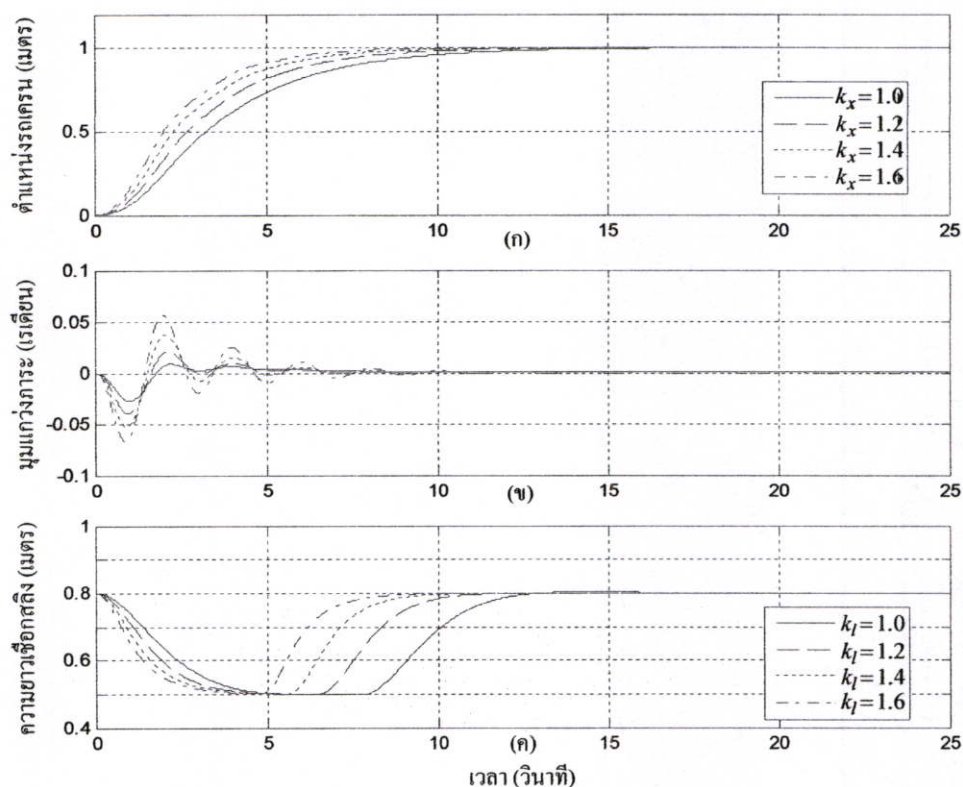
5.3.2.3 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนและควบคุมความยาว

เชือกสลิง โดยแฟกเตอร์ k_x และ k_f ในเวลาเดียวกัน

ค่าแฟกเตอร์ k ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และตัวควบคุม I-P สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงในเวลาเดียวกัน คือ 1.2 1.4 และ 1.6

เหมือนกันทั้ง 2 ตัวควบคุม โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถครนและความยาวเชือกสลิงจะยังคงเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.1 ผลการจำลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.8 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.9

จากรูปที่ 5.8 พบว่า ตัวควบคุม I-PD ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_x ที่มีค่าสูงกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถครนเร็วขึ้น โดยไม่มีค่าพุ่งเกินดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ก) อย่างไรก็ตาม มุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ข) และในส่วนของควบคุมความยาวเชือกสลิง พบว่าตัวควบคุม I-P ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_l ที่มีค่าสูงกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงเร็วขึ้นและไม่มีค่าพุ่งเกินแสดงในรูปที่ 5.8 (ค) สำหรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD และ I-P และสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนและการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 5.5

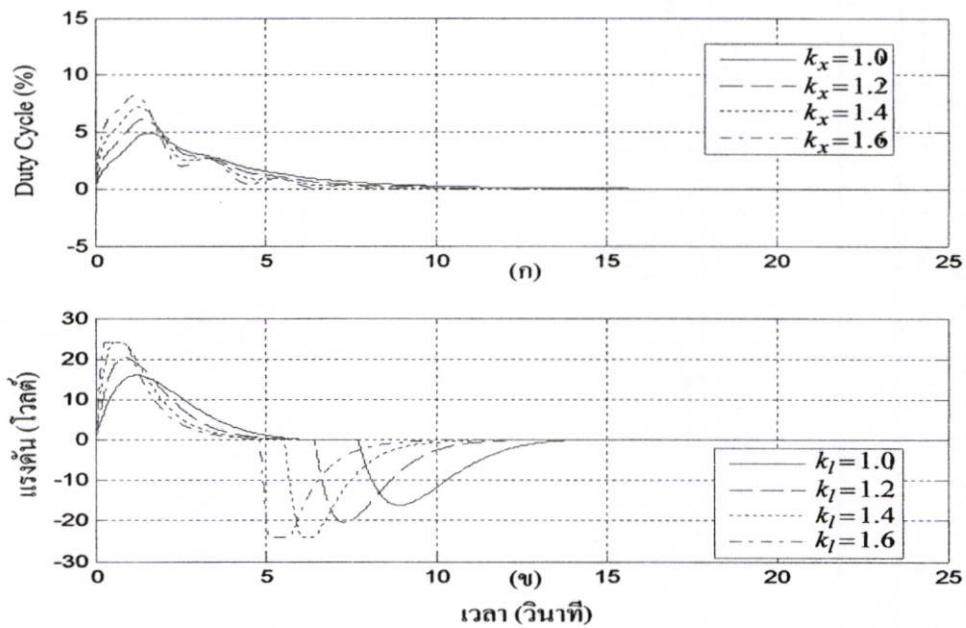


(ก) ตำแหน่งของรถครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.8 ผลการจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถครนและควบคุมความยาวเชือกสลิงเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_l

จากรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) จะเห็นว่าที่ค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_l มาก สัญญาณควบคุม D_i และ V_i จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม I-PD และ I-P พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น

เพื่อควบคุมให้รถเครนและภาระเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f และในทางกลับกัน หากกำหนดค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f น้อย สัญญาณควบคุมจะมีค่าน้อยตามไปด้วย เนื่องจากระบบควบคุมต้องการความเร็วของผลตอบสนองที่ช้าลง และในส่วนของตัวควบคุม I-P นั้น เมื่อค่า k_f มีค่าสูงจะไม่สามารถตั้งขึ้นได้ตามความเร็วที่ต้องการเพราะสัญญาณควบคุมเกิดการอิมตัว



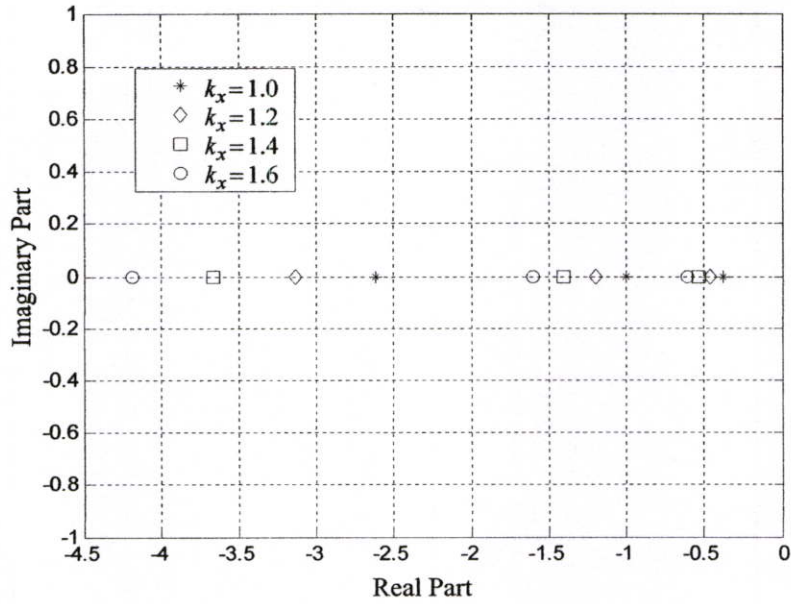
(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.9 สัญญาณควบคุม

ตารางที่ 5.5 สมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจากการจำลอง

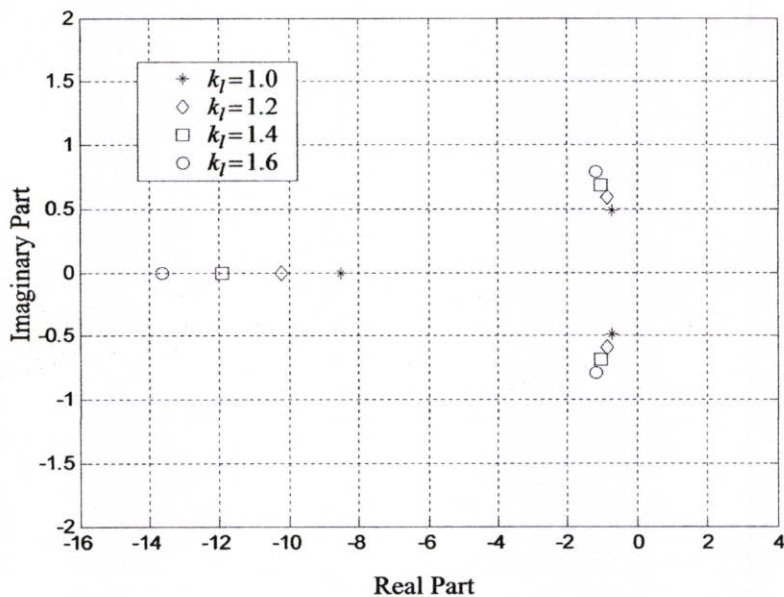
| k_x, k_f | การเคลื่อนที่ของรถเครน | | การควบคุมความยาวเชือกสลิง | |
|------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | t_r (sec) | t_s (sec) | t_r (sec) | t_s (sec) |
| 1.0 | 6.38 | 12.08 | 2.93 | 4.72 |
| 1.2 | 5.30 | 10.09 | 2.53 | 4.38 |
| 1.4 | 4.59 | 8.61 | 2.25 | 4.16 |
| 1.6 | 3.97 | 7.76 | 2.05 | 3.89 |

เมื่อนำสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามคุณลักษณะ $P_k(s)$ ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน และระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่เกิดจากการออกแบบเปลี่ยนค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f มาหาดำแหน่งโพลของระบบ และพลีออตลงในระนาบ s แสดงดังรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 โพลของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นว่า เมื่อค่าแฟกเตอร์ k_x เพิ่มขึ้น โพลของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนทั้งหมดซึ่งเป็นจำนวนจริงจะเลื่อนไปทางซ้ายของแกนจริง ทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธี CRA



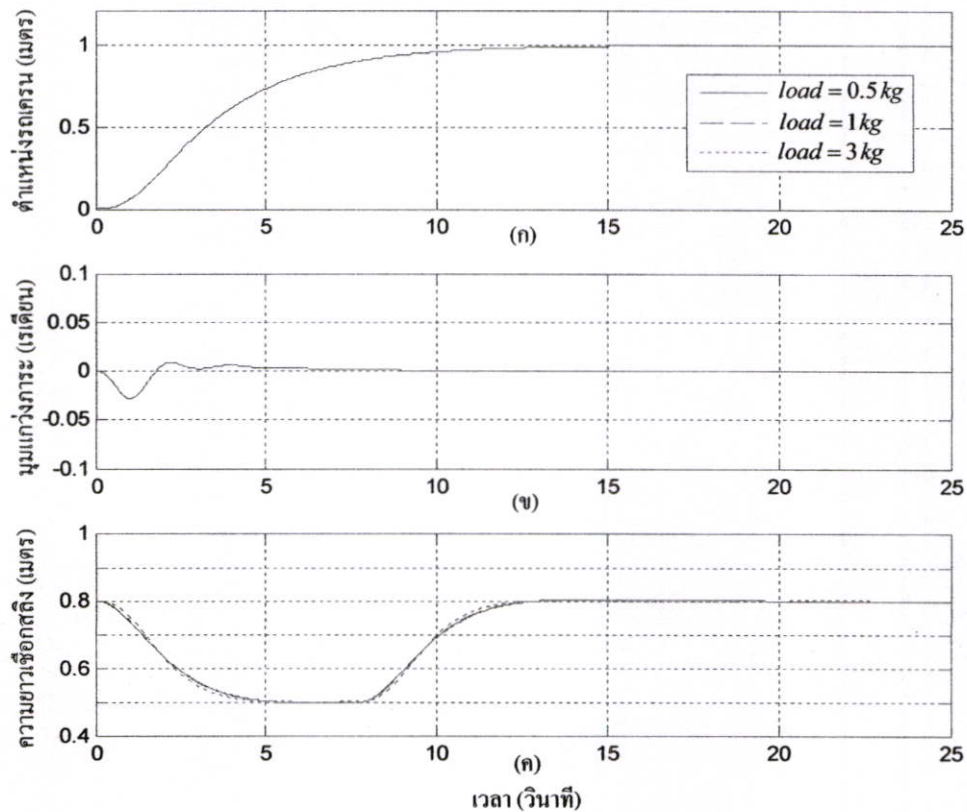
รูปที่ 5.11 โพลของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง

ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 5.11 จะเห็นว่า เมื่อค่าแฟกเตอร์ k_l เพิ่มขึ้น โพลของระบบระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่เป็นจำนวนจริงจะมีค่าลบจริงมาก และอีก 1 คู่ จะเป็นโพล

เชิงซ้อนสังกรณ (complex conjugate poles) ที่มีส่วนจริงเป็นค่าลบน้อยและส่วนจินตภาพมีค่ามาก ทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้น

5.3.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

ในหัวข้อนี้จะนำตัวควบคุม I-PD PD และ I-P ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CRA ในหัวข้อที่ 5.2 มาจำลองการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม และศึกษาการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระว่ามีผลกระทบต่อ ผลตอบสนองของระบบควบคุมอย่างไร ในการจำลองจะใช้ภาระที่มีมวล 0.5 กิโลกรัม 1 กิโลกรัม และ 3 กิโลกรัม ซึ่งผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.12 และสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.13

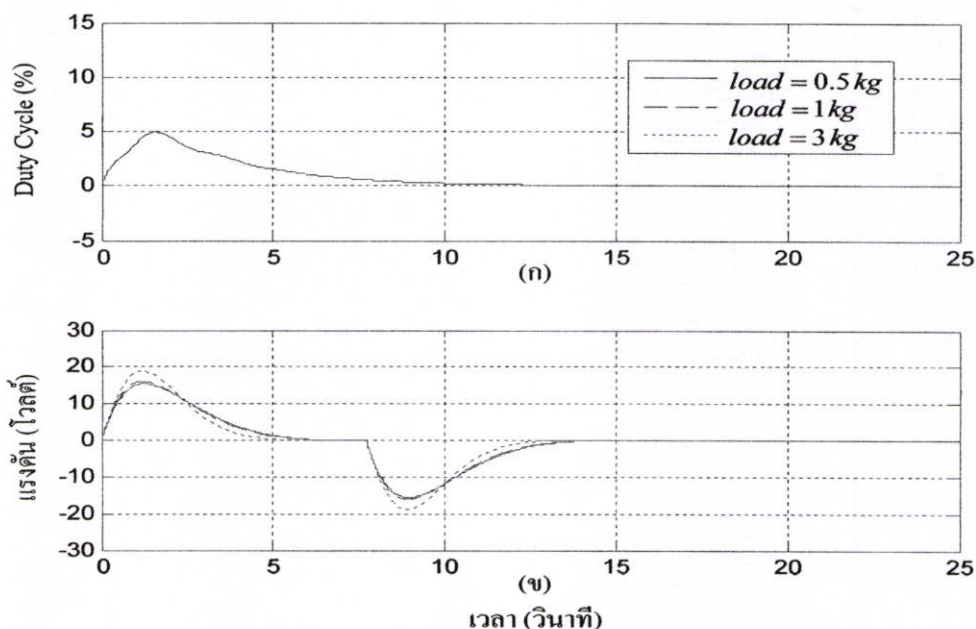


(ก) ตำแหน่งของรถครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

จากผลตอบสนองในรูปที่ 5.12 จะพบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมตำแหน่งของรถครนให้ถึงตำแหน่งเป้าหมายโดยไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ถึงแม้มวลของภาระจะเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 5.12 (ก) และตัวควบคุม PD สามารถลดขนาดของมุมที่แกว่งและหยุด

แกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงผลตอบสนองดังรูปที่ 5.12 (ข) ส่วนการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้นก็ไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระมากนัก โดยสังเกตจากรูปที่ 5.12 (ค)



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

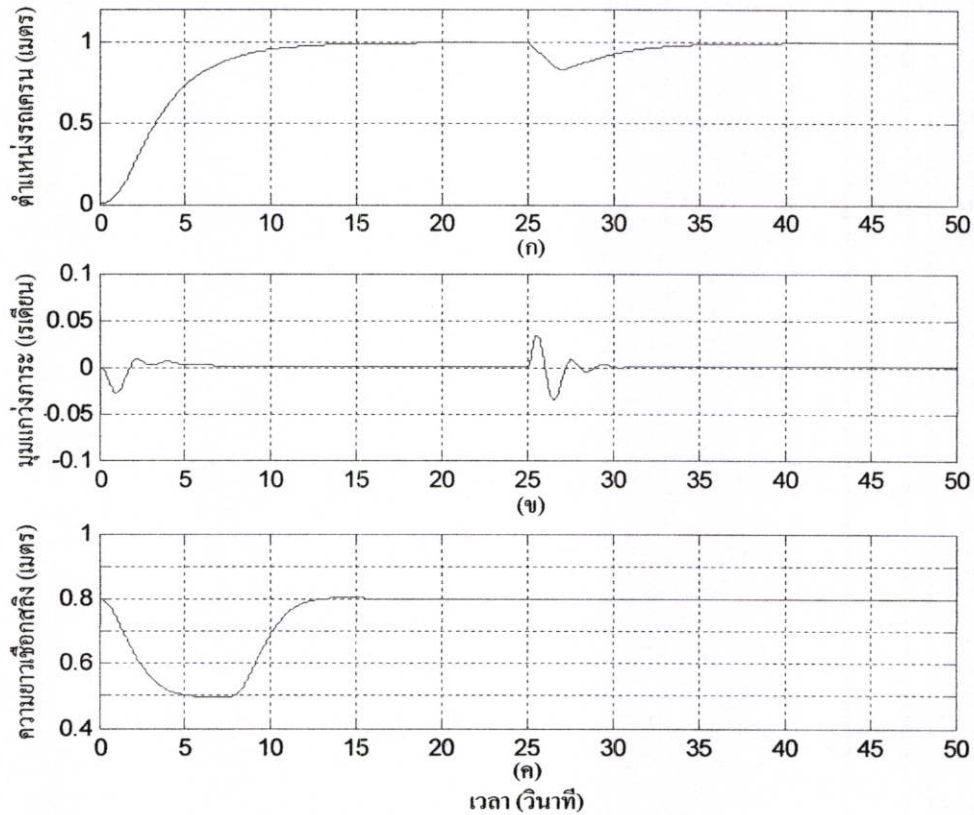
รูปที่ 5.13 สัญญาณควบคุม

จากสัญญาณควบคุมในรูปที่ 5.13 (ก) จะเห็นว่าสัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนจะมีลักษณะเหมือนกัน แม้จะเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ แต่สัญญาณควบคุมของการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ภาระมีมวลมากจะมีสัญญาณควบคุมมาก เนื่องจากเมื่อมวลของภาระมากจะมีแรงกระทำที่มอเตอร์มาก ดังนั้น เมื่อตัวควบคุมส่งสัญญาณควบคุมความยาวเชือกสลิงแล้วไม่สามารถควบคุมได้ตามความเร็วที่ต้องการ ทำให้ตัวควบคุมเพิ่มขนาดของสัญญาณมากขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.13 (ข)

5.3.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน

การจำลองการกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบควบคุม ทำได้โดยป้อนสัญญาณรบกวน (disturbance) แบบขั้นขนาด 7% เข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน (รูปที่ 4.1) ที่เวลา 25 วินาที โดยตัวควบคุม I-PD ควบคุมรถเครนให้ถึงตำแหน่ง 1 เมตร ตัวควบคุม PD ลดการแกว่งของมุมให้ไม่เกิน 0.03 เรเดียน และตัวควบคุม I-P ควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 0.8 เมตร คึงภาระที่หนัก 1 กิโลกรัมขึ้นไป 0.5 เมตร และปล่อยลงมาที่ 0.8 เมตรเมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสามจะใช้ค่าที่ได้ออกแบบไว้

แล้วในหัวข้อที่ 5.2 ผลตอบสนองของระบบแสดงดังรูปที่ 5.14 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.15

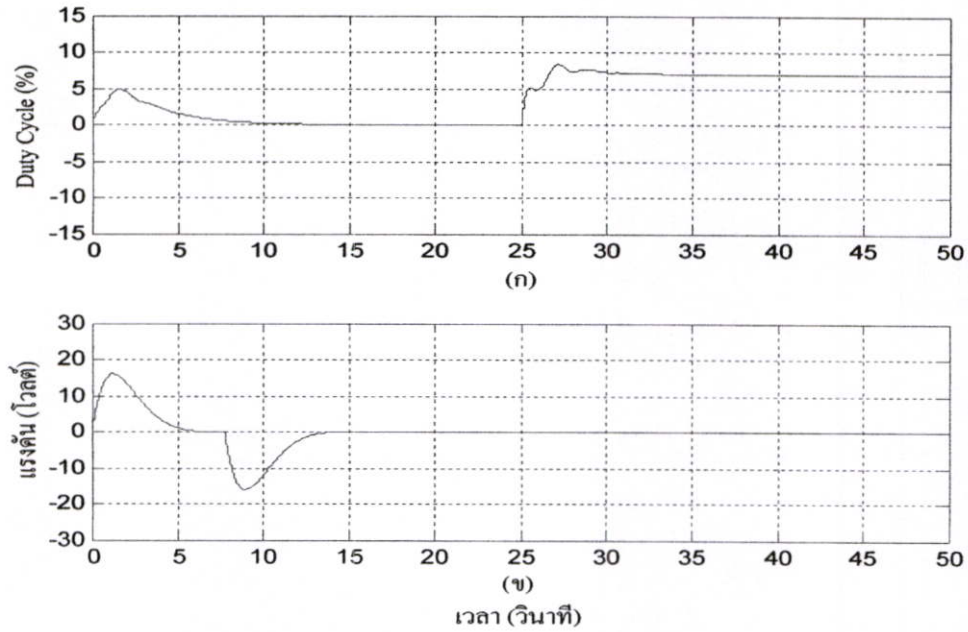


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาวะ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.14 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 (ก) พบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD ก็ สามารถลดมุมแกว่งของภาวะและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วแสดงในรูปที่ 5.14 (ข) และสิ่งรบกวน จะไม่มีผลกระทบต่อการควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงในรูปที่ 5.14 (ค)

เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบที่เวลา 25 วินาที สัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นดังรูปที่ 5.15 (ก) เนื่องจากตัวควบคุม I-PD และ PD จะปรับแต่งสัญญาณควบคุมเพื่อชดเชยสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบกลับสู่สถานะเดิม ส่วนสัญญาณควบคุมความยาวเชือกสลิงในรูปที่ 5.15 (ข) จะไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากไม่มีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

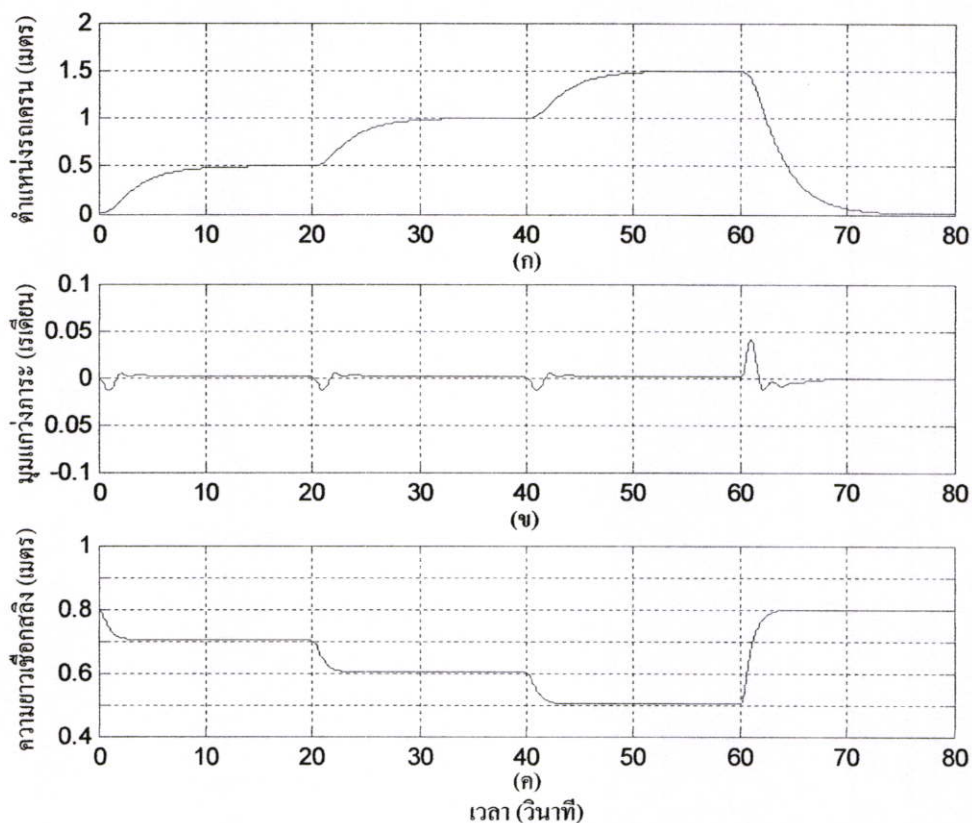
รูปที่ 5.15 สัญญาณควบคุม

5.3.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง

ในหัวข้อย่อยนี้จะเป็นการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุมในการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุม โดยจะกำหนดสัญญาณอ้างอิงให้กับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงดังนี้ กำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.5 เมตร 1 เมตร 1.5 เมตร และกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น พร้อมทั้งกำหนดความยาวเชือกสลิงจาก 0.8 เมตร เป็น 0.7 เมตร 0.6 เมตร 0.5 เมตร และกลับมาที่ความยาว 0.8 เมตร โดยแต่ละตำแหน่งการเคลื่อนที่และความยาวเชือกสลิงจะเปลี่ยนแปลงทุกๆ 20 วินาที ซึ่งสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนจะป้อนเข้าทาง x_{ref} และสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจะป้อนเข้าทาง l_{ref} ของระบบควบคุมหลายตัวแปรของระบบเครนเหนือศีรษะที่แสดงในรูปที่ 4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.16 และสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.17 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.16 (ก) พบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมรถเครนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงได้อย่างถูกต้อง โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน ส่วนตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระและควบคุมภาระหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงแล้ว แต่จะสังเกตว่าในช่วงเวลา 60 ถึง 70 วินาที นั้น ในกรณีที่รถเครนเคลื่อนที่จาก 1.5 เมตร กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น มุมแกว่งของภาระจะมีค่ามากกว่า 0.03 เรเดียน เนื่องจากตัวควบคุม I-PD

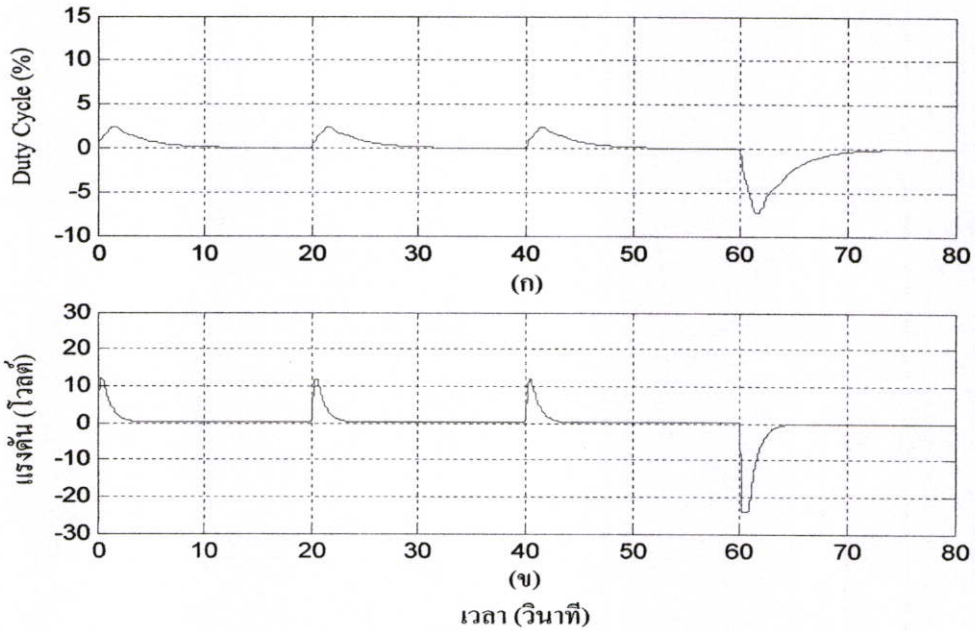
พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่กำหนดจากค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป τ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.16 (ข) และตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมเชือกสลิงให้มีความยาวตามที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง และผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน แสดงดังรูปที่ 5.16 (ค)



(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของการะ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.16 ผลตอบสนองของระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง

จากสัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนที่แสดงดังรูป 5.17 (ก) พบว่า สัญญาณควบคุมที่ค่าประมาณ 3 % เป็นค่าสัญญาณควบคุมเริ่มต้นที่สามารถทำให้รถเครนเริ่มเคลื่อนที่ ในทำนองเดียวกัน จากสัญญาณควบคุมความยาวเชือกสลิงในรูปที่ 5.17 (ข) พบว่า สัญญาณควบคุมที่ค่าประมาณ 10 โวลต์ เป็นค่าสัญญาณควบคุมเริ่มต้นที่ทำให้การะ ซึ่งถูกควบคุมโดยเชือกสลิงสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่จะสังเกตว่าในช่วงเวลา 60 ถึง 70 วินาที นั้น ในกรณีที่รถเครนเคลื่อนที่จาก 1.5 เมตร กลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น และที่ความยาวเชือกสลิง 0.5 เมตร และกลับมาที่ความยาว 0.8 เมตร สัญญาณควบคุมจะมีค่ามาก



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.17 สัญญาณควบคุม

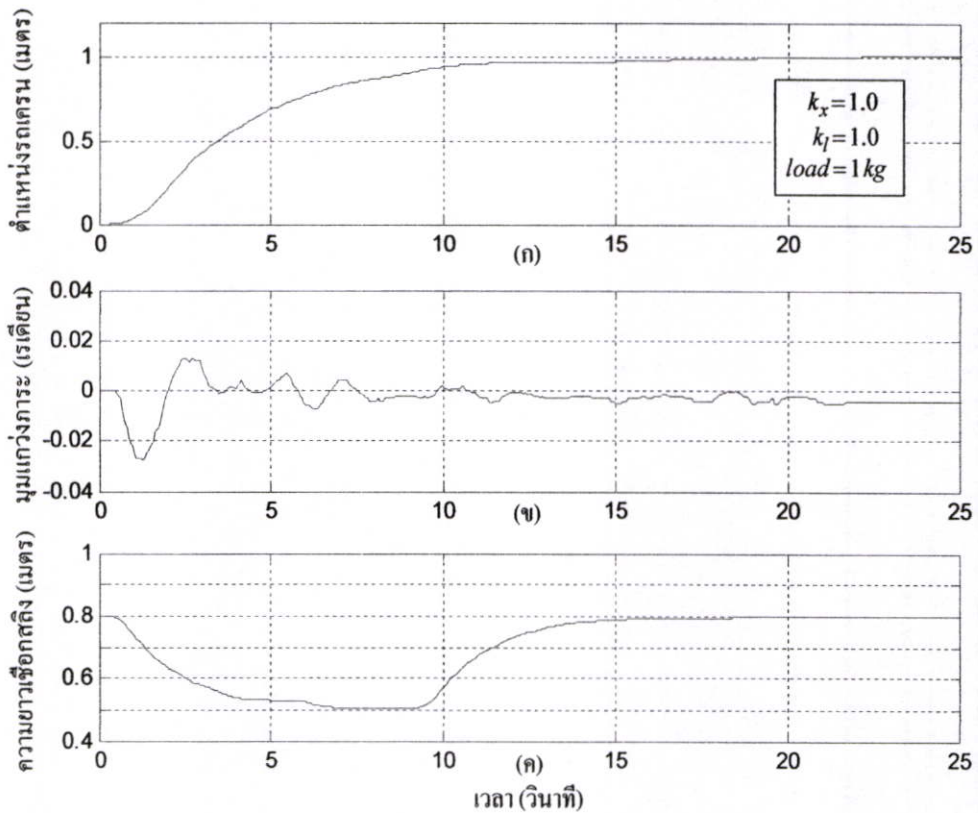
5.4 ผลการทดลอง

หลังจากได้ผลการจำลองการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุม I-PD PD และ I-P ที่ออกแบบด้วยวิธี CRA แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะนำตัวควบคุมดังกล่าวมาควบคุมระบบจริงในห้องปฏิบัติการ ตัวควบคุม I-PD PD และ I-P จะถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาซีโดยใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง (T) เท่ากับ 0.05 วินาที ในการทดลองควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ขั้นตอนการทดลองและรูปแบบการทดลองเช่นเดียวกันกับการจำลองระบบควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้กล่าวมาแล้ว

5.4.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นแสดงดังรูปที่ 5.18 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.19 จากรูปที่ 5.18 (ก) พบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรได้โดยไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระไม่ให้เกิน 0.03 เรเดียน แต่จะมีการแกว่งเล็กน้อยหลังจากรถเครนเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายแล้ว ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.18 (ข) และตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.18 (ค)

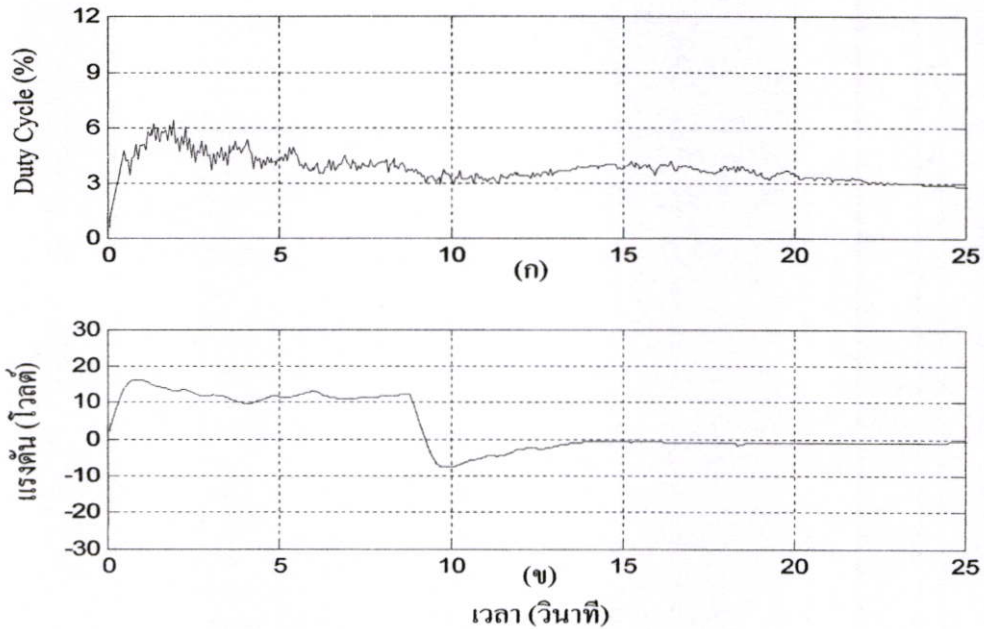
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.18 (ข) จะเห็นว่ามุมแกว่งของภาระจะไม่แกว่งอยู่รอบ 0 เรเดียน เนื่องจากรางของรถเครนมีการ โค้งงอเล็กน้อย ดังนั้น มุมแกว่งของภาระไม่สามารถมาอยู่ที่ตำแหน่ง 0 เรเดียนได้ เมื่อรถเครนหยุด



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

รูปที่ 5.18 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบขั้น

จากสัญญาณควบคุมของระบบควบคุมวงปิด เมื่อป้อนอินพุตแบบขั้นดังรูปที่ 5.19 (ก) พบว่า เมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว สัญญาณควบคุม D_i จะได้ออยู่ที่ระดับ 3.0 % ถึง 4.5 % เนื่องจากสัญญาณควบคุมค่าแรกที่ทำให้รถเครนเริ่มเคลื่อนที่ได้ คือ 4 % ในทำนองเดียวกัน สัญญาณควบคุม (แรงดัน) แรกที่สามารถดึงภาระที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัมได้คือแรงดัน 10 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 5.19 (ข) และเมื่อภาระถูกดึงขึ้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้วกลับลงมาที่ตำแหน่งเดิม สัญญาณควบคุม (แรงดัน) ก็จะกลับมาอยู่ที่ประมาณ 0 โวลต์



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.19 สัญญาณควบคุม

5.4.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองโดยแฟกเตอร์ k

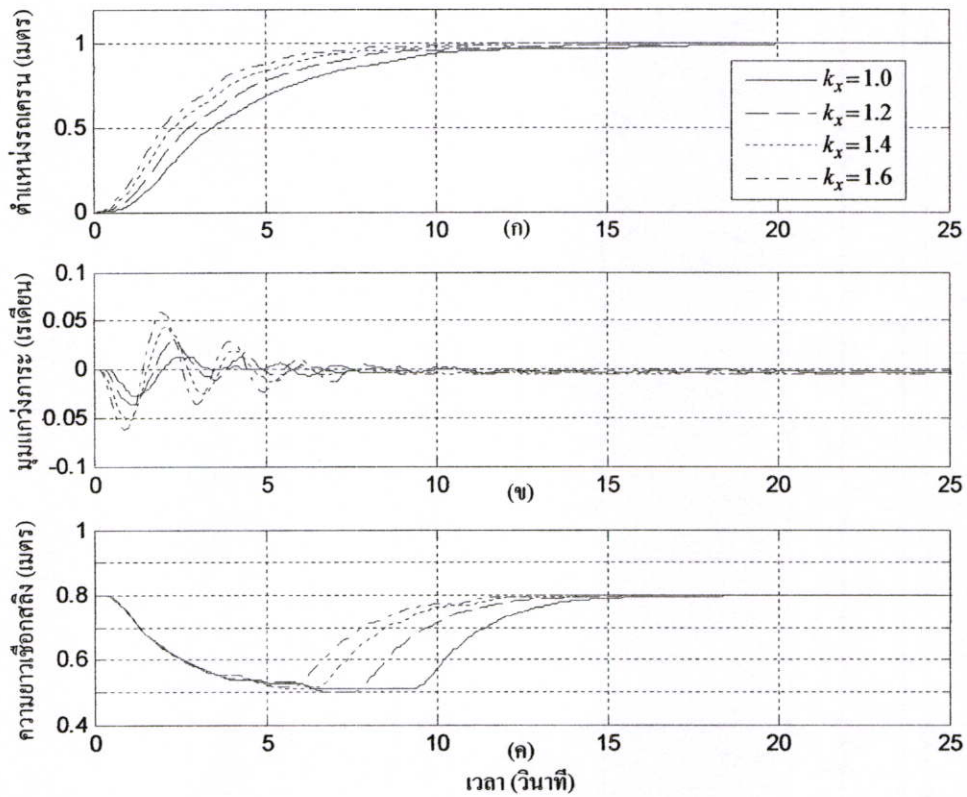
ผลทดลองการปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_i ในการออกแบบตัวควบคุม I-PD และตัวควบคุม I-P สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง จะแสดงและศึกษาเหมือนกับหัวข้อ 5.3.2

5.4.2.1 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนโดยแฟกเตอร์ k_x

ค่าแฟกเตอร์ k_x ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนจะยังคงเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.2.1 โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบเครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและความยาวเชือกสลิง ผลตอบสนองการนำตัวควบคุม I-PD ที่ออกแบบจากค่าแฟกเตอร์ k_x ที่มีค่าต่างกันมาควบคุมระบบแสดงดังรูปที่ 5.20 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.21

ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนที่ได้จากการทดลองจะคล้ายกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์กล่าวคือ เมื่อควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม I-PD ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_x ที่มากกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเร็วขึ้นโดยไม่มีค่าพุงเกินแสดงดังรูปที่ 5.20 (ก) อย่างไรก็ตาม มุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นด้วยดังแสดงในรูปที่ 5.20 (ข) และในส่วนของ การควบคุมความยาวเชือกสลิงด้วยตัวควบคุม I-PD ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ $k_x = 1.6$ พบว่า ความ

ยาวเชือกจะยาวไม่ถึง 0.5 เมตรตามที่กำหนดไว้ เนื่องจากรถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ก่อนที่เชือกจะถูกดึงขึ้น สมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแสดงดังตารางที่ 5.6



(ก) ตำแหน่งของรถ (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

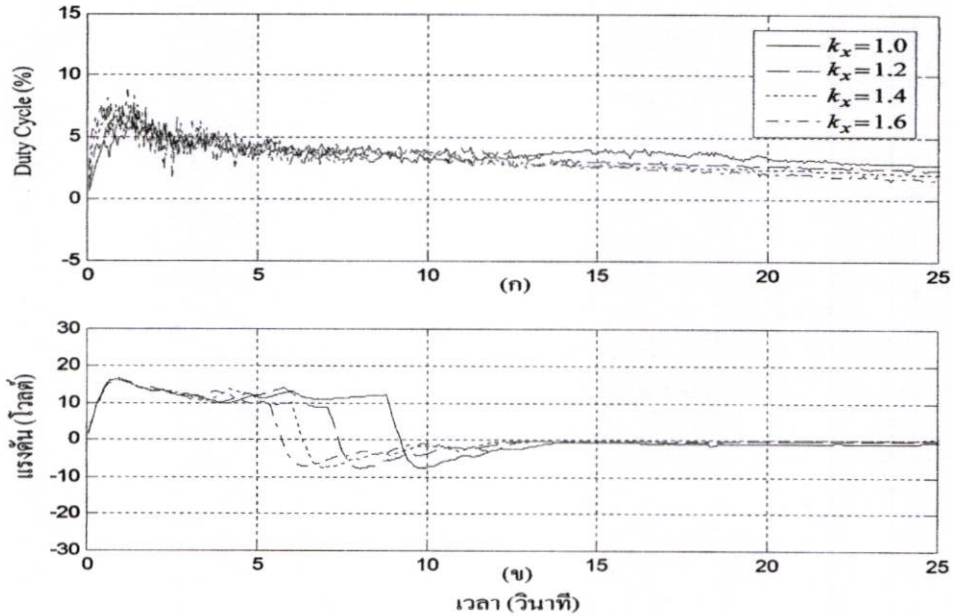
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x

ตารางที่ 5.6 สมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่ได้จากการทดลอง

| k_x | t_r (sec) | t_s (sec) |
|-------|-------------|-------------|
| 1.0 | 7.19 | 13.78 |
| 1.2 | 5.99 | 12.14 |
| 1.4 | 5.05 | 9.50 |
| 1.6 | 4.50 | 8.02 |

จากรูปที่ 5.21 (ก) จะเห็นว่า เมื่อค่าแฟกเตอร์ k_x มากสัญญาณควบคุม D_i ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม I-PD จะมีค่ามากเพื่อควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าแฟกเตอร์ k_x ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าคงตัวเวลานัยทั่วไปที่มีค่า

น้อยลง และในทางกลับกัน หากกำหนดค่าแฟกเตอร์ k_x น้อย สัญญาณควบคุมจะมีค่าน้อยทำให้ความเร็วของผลตอบสนองช้าลง สำหรับสัญญาณควบคุมของการควบคุมความยาวเชือกสลิงจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยจะต่างกันที่เวลาที่ใช้ในการปล่อยเชือกสลิงเท่านั้นดังรูปที่ 5.21 (ข)



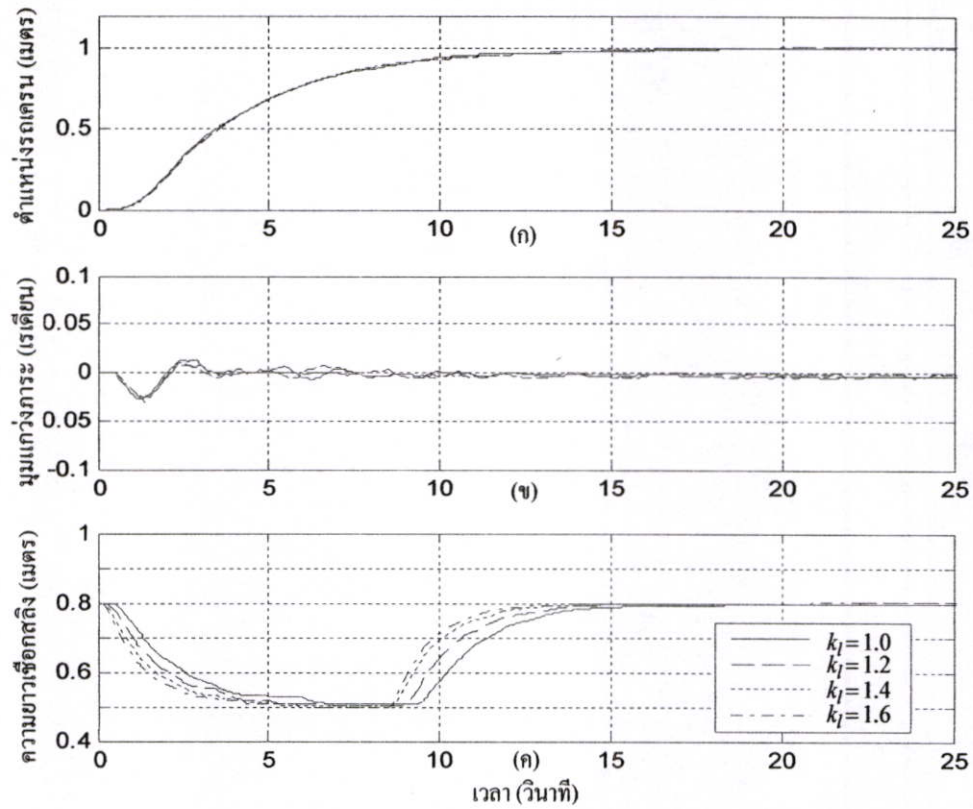
(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_c ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.21 สัญญาณควบคุม

5.4.2.2 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยแฟกเตอร์ k_f

ค่าแฟกเตอร์ k_f ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-P สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง จะยังคงใช้ค่าเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.2.2 โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบเครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและความยาวเชือกสลิง ผลการทดลองในการควบคุมระบบเครนแสดงดังรูปที่ 5.22 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.23

จากรูปที่ 5.22 พบว่า แม้มีการปรับค่าแฟกเตอร์ k_f สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง แต่ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนและมุมแกว่งของภาระที่ได้จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนักดังแสดงในรูปที่ 5.22 (ก) และ 5.22 (ข) และในส่วนการควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงในรูปที่ 5.22 (ค) จะเห็นว่าเมื่อแฟกเตอร์ $k_f = 1.6$ ความยาวเชือกสลิงจะถูกปล่อยสู่ตำแหน่งเป้าหมาย และถูกดึงขึ้นกลับสู่ความยาวเชือกสลิงที่อ้างอิงเร็วที่สุด สมรรถนะของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงดังตารางที่ 5.7



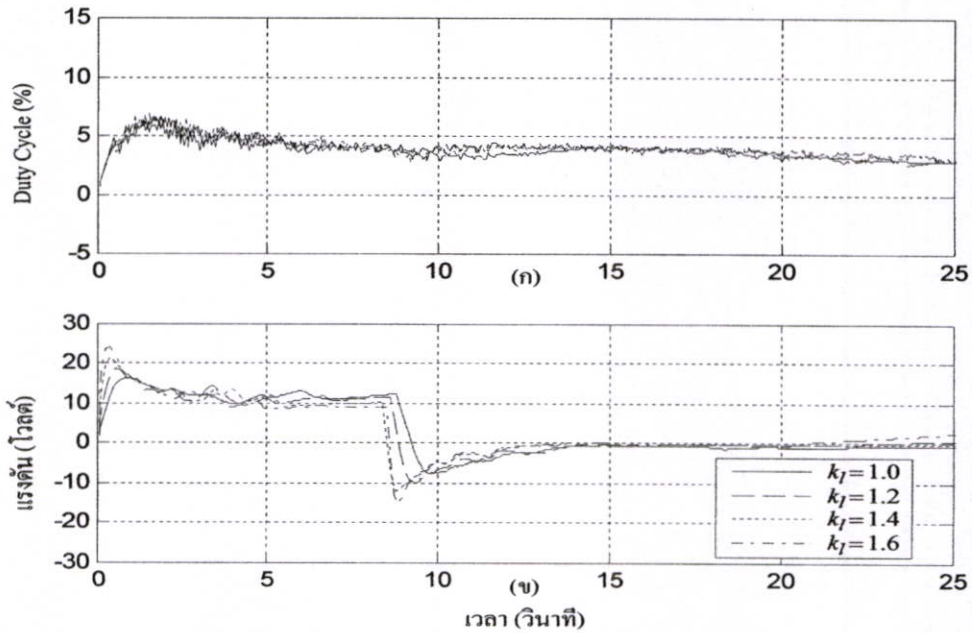
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.22 ผลการทดลองระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงเมื่อปรับค่าเฟดเตอร์ k_f

จากรูปที่ 5.23 (ก) จะพบว่าสัญญาณควบคุมของการเคลื่อนที่ของรถเครนทั้งสี่จะมีลักษณะคล้ายกันและรูปที่ 5.23 (ข) จะเห็นว่าเมื่อค่าเฟดเตอร์ k_f มาก สัญญาณควบคุม V_f จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม I-P พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุมให้ภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าเฟดเตอร์ k_f

ตารางที่ 5.7 สมรรถนะของระบบควบคุมการควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ได้จากการทดลอง

| k_f | t_r (sec) | t_s (sec) |
|-------|-------------|-------------|
| 1.0 | 3.62 | 7.14 |
| 1.2 | 3.29 | 6.76 |
| 1.4 | 2.83 | 5.55 |
| 1.6 | 2.59 | 4.94 |



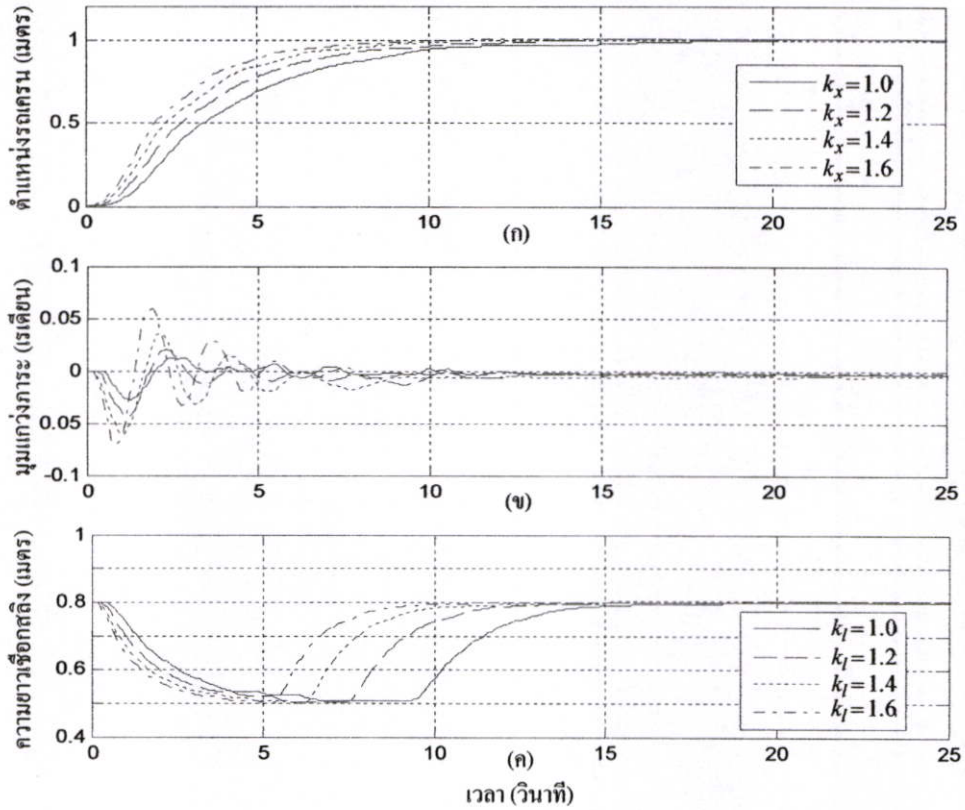
(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.23 สัญญาณควบคุม

5.4.2.3 การปรับความเร็วของผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถเครนและควบคุมความยาวเชือกสลิงโดยแฟกเตอร์ k_x และ k_f ในเวลาเดียวกัน

ในหัวข้อนี้ค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f ที่ใช้ออกแบบตัวควบคุม I-PD สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และตัวควบคุม I-P สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงในเวลาเดียวกัน จะยังคงเหมือนกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.2.3 โดยไม่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบเครน ตำแหน่งอ้างอิงของรถเครนและความยาวเชือกสลิง ผลการทดลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.24 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.25

จากรูปที่ 5.24 พบว่า ตัวควบคุม I-PD และ I-P ที่ออกแบบด้วยค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f ที่มีค่าสูงกว่า จะทำให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน และการควบคุมความยาวเชือกสลิงเร็วขึ้น โดยไม่มีค่าพุ่งเกินดังแสดงในรูปที่ 5.24 (ก) และรูปที่ 5.24 (ค) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม มุมแกว่งของภาระจะมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.24 (ข) สำหรับสมรรถนะของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงที่ได้จากการทดลองนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 5.8



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

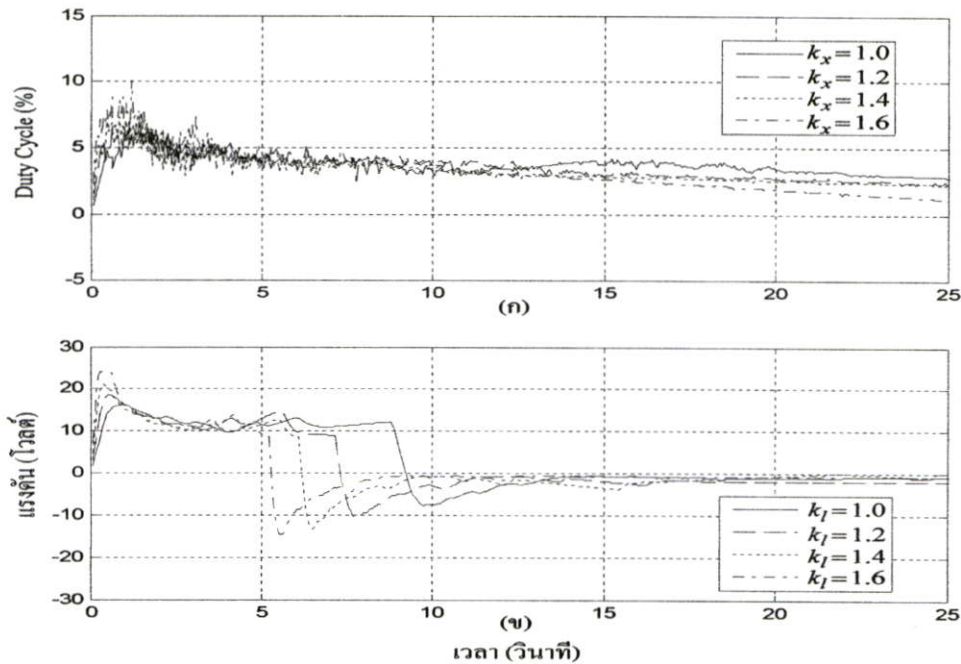
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและควบคุมความยาวเชือกสลิง
เมื่อปรับค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_l

ตารางที่ 5.8 สมรรถนะระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิงจากการทดลอง

| k_x, k_l | การเคลื่อนที่ของรถเครน | | การควบคุมความยาวเชือกสลิง | |
|------------|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | t_r (sec) | t_s (sec) | t_r (sec) | t_s (sec) |
| 1.0 | 7.19 | 13.78 | 3.65 | 7.14 |
| 1.2 | 5.99 | 11.97 | 3.27 | 6.76 |
| 1.4 | 5.05 | 9.45 | 2.83 | 5.55 |
| 1.6 | 4.33 | 8.46 | 2.59 | 4.94 |

จากรูปที่ 5.25 จะเห็นว่าที่ค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_l มาก สัญญาณควบคุม D_i และ V_i จะมีค่ามาก เนื่องจากตัวควบคุม I-PD และ I-P พยายามที่จะสร้างสัญญาณควบคุมให้มากขึ้น เพื่อควบคุม

ให้รถเคลื่อนที่และควบคุมภาระไปยังตำแหน่งที่ต้องการด้วยความเร็วที่ถูกกำหนดจากค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f



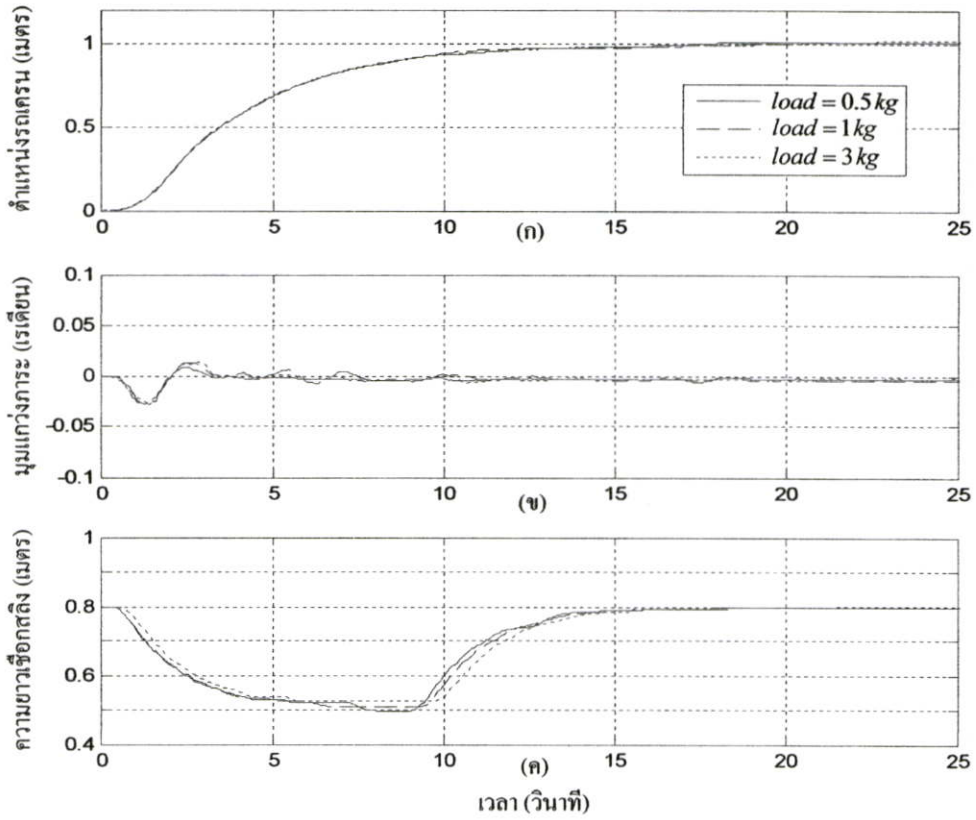
(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.25 สัญญาณควบคุม

5.4.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

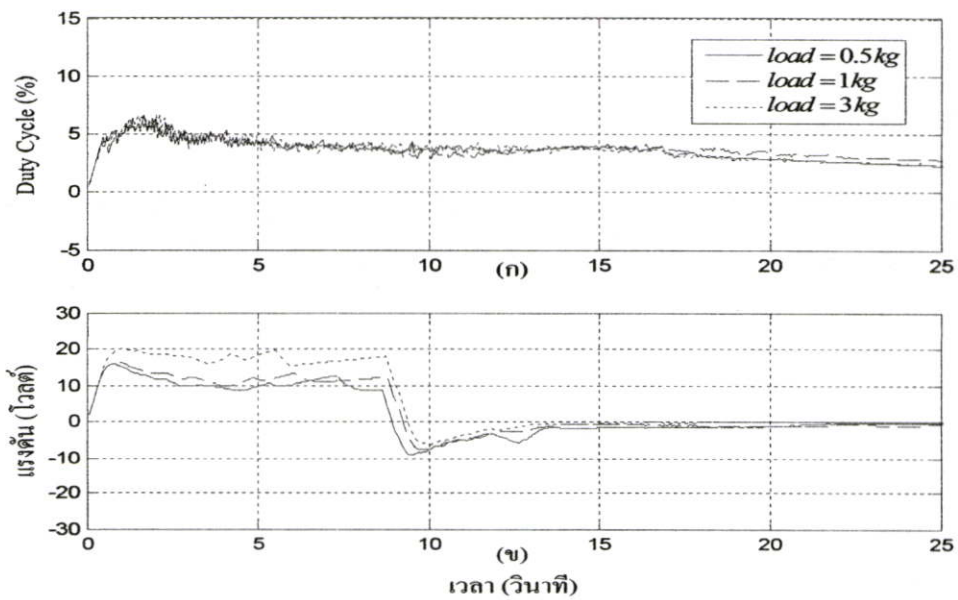
ในหัวข้อย่อยนี้จะนำตัวควบคุม I-PD PD และ I-P ที่ได้ออกแบบด้วยวิธี CRA ไว้แล้วในหัวข้อที่ 5.2 มาทดลองควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ โดยเปลี่ยนแปลงมวลของภาระจาก 1 กิโลกรัม เป็น 0.5 กิโลกรัม และ 3 กิโลกรัม เพื่อทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม ผลการทดลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.26 และสัญญาณควบคุมของระบบแสดงดังรูปที่ 5.27 ตามลำดับ

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.26 จะพบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนให้ถึงตำแหน่งเป้าหมาย โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว แม้มวลของภาระจะมีการเปลี่ยนแปลงแสดงดังรูปที่ 5.26 (ก) และในขณะเดียวกันตัวควบคุม PD ก็ยังสามารถลดมุมแกว่งของภาระไม่ให้เกิน 0.03 เรเดียนได้แสดงดังรูปที่ 5.26 (ข) ส่วนการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้นพบว่า ตัวควบคุม I-P ก็สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงตามที่ต้องการได้ และไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 5.26 (ค)



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

รูปที่ 5.26 ผลการทดลองระบบควบคุมเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ



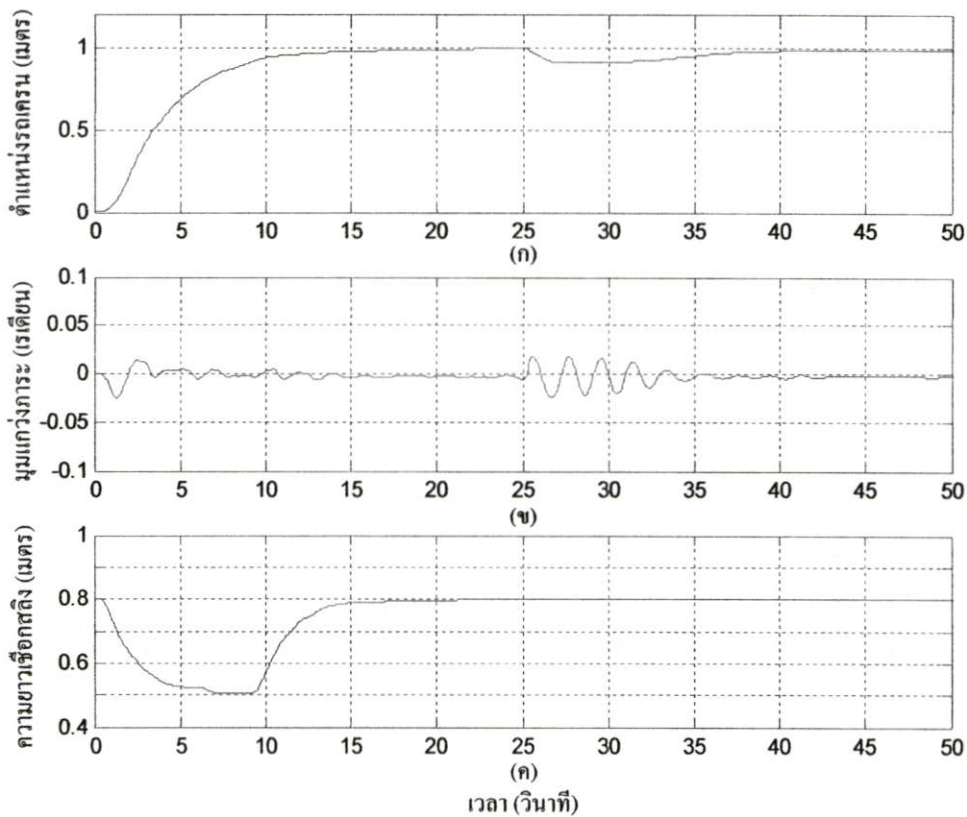
(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.27 สัญญาณควบคุม

5.4.4 การกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวน

การทดลองการกำจัดผลกระทบของสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบควบคุม จะกระทำโดยป้อนสัญญาณรบกวนแบบขั้นขนาด 7% เข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนที่เวลา 25 วินาที โดยมีขั้นตอนและวิธีการทดลองรวมถึงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD PD และ I-P เช่นเดียวกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.4 ผลตอบสนองที่ได้จากการการทดลองควบคุมระบบแสดงดังรูปที่ 5.28 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.29

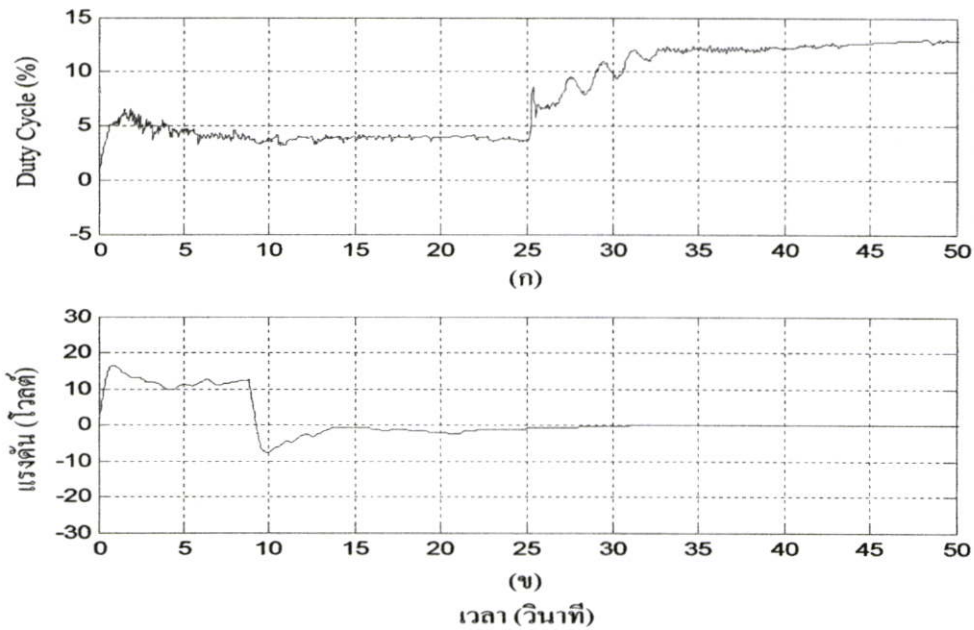
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.28 (ก) นั้นพบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนกลับเข้าสู่สัญญาณอ้างอิงได้ ในขณะที่ตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.28 (ข) และสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบจะไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรดังผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 5.28 (ค)



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

รูปที่ 5.28 ผลการทดลองระบบควบคุมเมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ

จากสัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนที่แสดงดังรูป 5.29 (ก) พบว่า เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบที่เวลา 25 วินาที สัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น เนื่องจากตัวควบคุม I-PD และ PD จะปรับแต่งสัญญาณควบคุมเพื่อชดเชยสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น ทำให้ระบบกลับสู่สถานะเดิม และจากสัญญาณควบคุมความยาวเชือกสลิงในรูปที่ 5.29 (ข) พบว่า สัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบจะไม่มีผลต่อสัญญาณควบคุมของความยาวเชือกสลิง เนื่องจากระบบทั้งสองแยกออกจากกันอย่างอิสระ

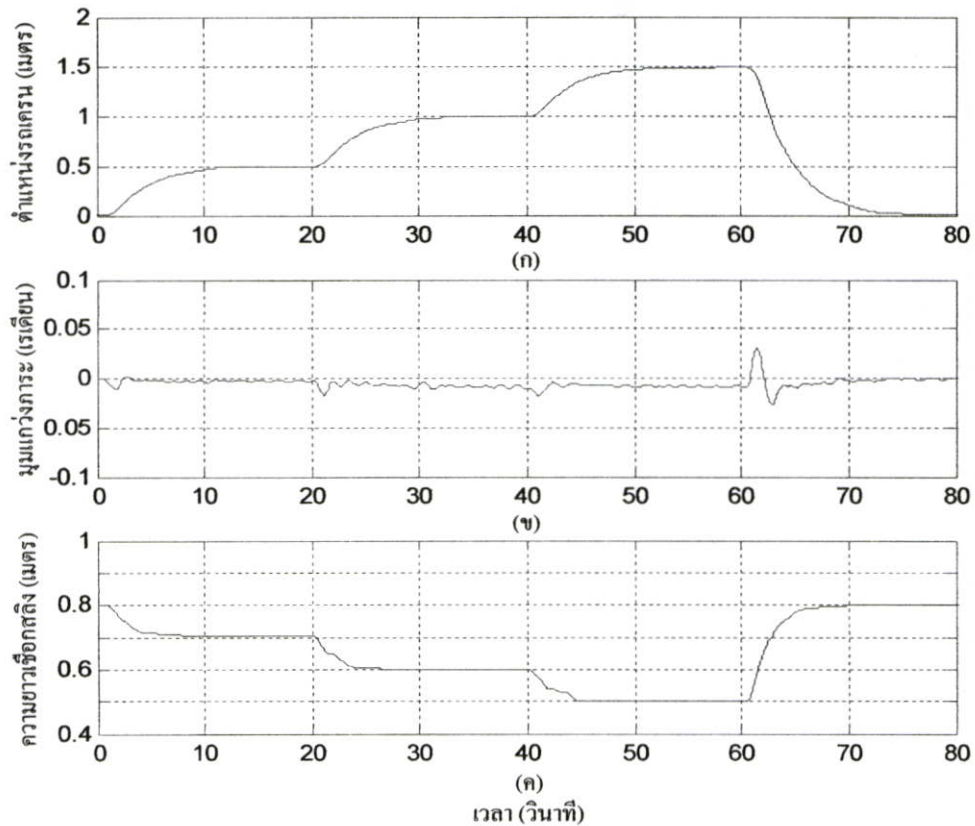


(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.29 สัญญาณควบคุม

5.4.5 การติดตามสัญญาณอ้างอิง

ในหัวข้อนี้จะทดลองการติดตามสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนและความยาวเชือกสลิง โดยจะกำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.5 เมตร 1 เมตร 1.5 เมตร และกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น พร้อมทั้งกำหนดความยาวเชือกสลิงจาก 0.8 เมตร เป็น 0.7 เมตร 0.6 เมตร 0.5 เมตร และกลับมาที่ความยาว 0.8 เมตร โดยแต่ละตำแหน่งการเคลื่อนที่และความยาวเชือกสลิงจะเปลี่ยนแปลงทุกๆ 20 วินาที ซึ่งสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนจะป้อนเข้าทาง x_{ref} และสัญญาณอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงจะป้อนเข้าทาง l_{ref} ของระบบควบคุมหลายตัวแปรของระบบครนเหนือศีรษะในรูปที่ 4.1 เช่นเดียวกับการจำลองในหัวข้อย่อยที่ 5.3.5 ผลการทดลองระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.30 และสัญญาณควบคุมแสดงดังรูปที่ 5.31 ตามลำดับ

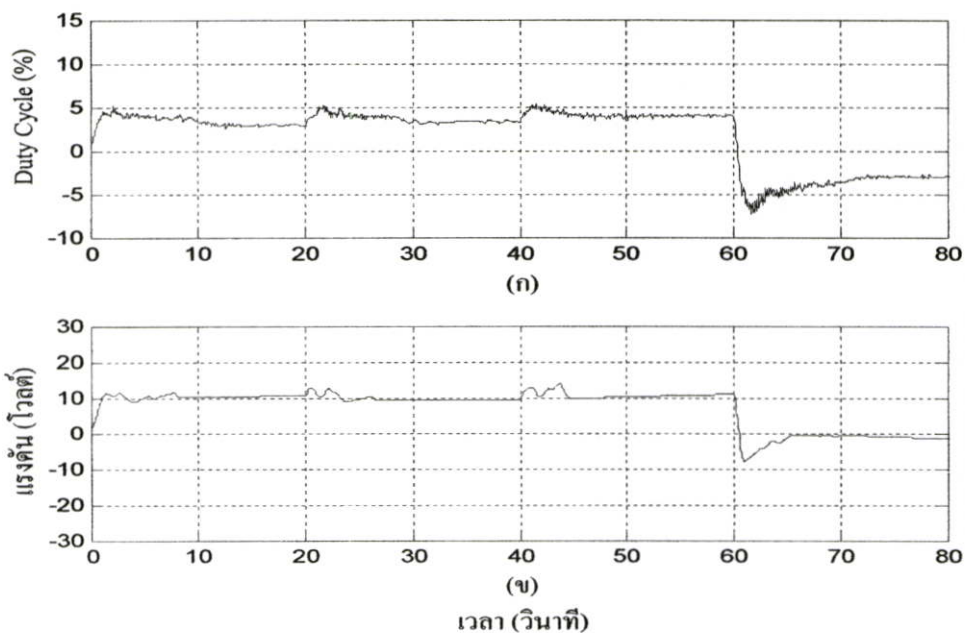


(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาวะ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.30 ผลการทดลองระบบในการติดตามสัญญาณอ้างอิง

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.30 (ก) พบว่าตัวควบคุม I-PD สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ติดตามตำแหน่งอ้างอิงได้อย่างถูกต้องโดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุงเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกัน ตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาวะและควบคุมมุมให้หยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงแล้วแสดงในรูปที่ 5.30 (ข) และตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมเชือกสลิงให้มีความยาวตามที่กำหนดได้อย่างถูกต้องโดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุงเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวแสดงดังรูปที่ 5.30 (ค)

จากสัญญาณควบคุมตำแหน่งของรถเครนที่แสดงดังรูป 5.31 (ก) พบว่า สัญญาณควบคุมจะค้างอยู่ที่ค่า 3 – 4 % และจากสัญญาณควบคุมความยาวเชือกสลิงในรูปที่ 5.31 (ข) พบว่า สัญญาณควบคุมจะค้างอยู่ที่ค่าประมาณ 10 โวลต์ ซึ่งทั้งสองค่านี้เป็นค่าสัญญาณควบคุมเริ่มต้นที่สามารถทำให้รถเครนเคลื่อนที่ และภาวะที่ถูกดึงโดยเชือกสลิงได้



(ก) อินพุต D , ของรถเครน (ข) อินพุต V , ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ 5.31 สัญญาณควบคุม

ในบทต่อไป จะกล่าวถึงบทสรุปงานวิจัยจากผลการจำลองและทดลองระบบเครนเหนือศีรษะที่ได้นำเสนอมาแล้วในข้างต้น รวมถึงปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา นอกจากนี้ ยังมีข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาการควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA สำหรับระบบ เคนเหนือสี่ระยะ โดยตัวควบคุมที่ใช้คือตัวควบคุม I-PD สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เคน ตัวควบคุม PD สำหรับลดมุมแกว่งของภาระ และตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิง ที่ใช้ดึงภาระ ทั้งนี้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA จะต้องรู้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ระบบเคนเหนือสี่ระยะก่อน และใช้วิธีการของลากรางจ์หาแบบจำลองของระบบโดยพิจารณาระบบ จากพลังงานศักย์และพลังงานจลน์รวมของระบบ และเมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วพบว่า ระบบเคนเหนือสี่ระยะนี้จะเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นที่ประกอบด้วยตัวแปรที่มีความเกี่ยวเนื่องกันใน ระบบ คือตำแหน่งของรถเคน มุมแกว่งของภาระและความยาวเชือกสลิง ดังนั้น จึงแปลง แบบจำลองให้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีลีโอทอนอฟเพื่อที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นี้ไป ออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA ต่อไป การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA จะออกแบบจากค่า อัตราส่วนคุณลักษณะ ซึ่งเป็นตัวกำหนดเสถียรภาพของระบบควบคุม และค่าคงตัวเวลานัยทั่วไป ซึ่งเป็นตัวกำหนดความเร็วของผลตอบสนอง สำหรับการออกแบบตัวควบคุม I-PD PD และ I-P นี้ จะออกแบบโดยแยกอิสระจากกัน แต่จะนำมาควบคุมระบบในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ หลักการ ของวิธี CRA ยังสามารถปรับความเร็วของผลตอบสนองเพิ่มขึ้นจากเดิมได้อีก โดยการปรับค่าแฟก เทอร์ k ให้มีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบ

จากผลการจำลองและผลการทดลองพบว่า พารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD, PD และ I-P ที่ ออกแบบด้วยวิธี CRA สำหรับควบคุมระบบเคนเหนือสี่ระยะสามารถควบคุมให้ผลตอบสนองของ ระบบเข้าสู่สู่สภาวะนิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในส่วนของตัวควบคุม I-PD สำหรับ ควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเคน และตัวควบคุม I-P สำหรับควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้น สามารถ ควบคุมให้ผลตอบสนองของระบบไม่มีค่าพุ่งเกินและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และเมื่อปรับ ค่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f ในการออกแบบตัวควบคุม I-PD และ I-P เพื่อเพิ่มความเร็วของผลตอบสนอง ในการไปสู่ตำแหน่งเป้าหมายของรถเคน และเพิ่มความเร็วของการควบคุมความยาวเชือกสลิง พบ ว่าแฟกเตอร์ k_x และ k_f ที่มีค่ามากจะทำให้รถเคนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้เร็ว และการ ควบคุมความยาวเชือกสลิงก็เร็วขึ้น แต่การแกว่งของมุมจะมากขึ้นตามไปด้วย และตัวควบคุมทั้ง สองมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของระบบและสามารถกำจัดผลกระทบจาก สิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบได้ นอกจากนี้ตัวควบคุม I-PD และ I-P สามารถควบคุมให้ระบบการ เคลื่อนที่ของรถเคนและระบบความยาวเชือกสลิงติดตามสัญญาณอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในขณะที่ยวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายแล้ว

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ในการวัดมุมแกว่งของภาระนั้นจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากรางของรถเครนมีการโก่งงอ จึงทำให้ มุมแกว่งของภาระไม่สามารถมาอยู่ที่ตำแหน่ง 0 เรเดียนได้เมื่อรถเครนหยุด ซึ่งแนวทางการแก้ไขคือ ปรับปรุงโครงสร้างของระบบเครนเหนือศีรษะและเปลี่ยนรางของรถเครนให้แข็งแรงขึ้น

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งทำงานบนระบบปฏิบัติการดอส ทำให้การใช้งานไม่สะดวกเท่าที่ควร จึงขอเสนอแนะแนวทางการพัฒนาเพื่อให้การควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะในห้องปฏิบัติการจริงให้สะดวกมากขึ้น คือ พัฒนาโปรแกรมให้ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์เพื่อให้สะดวกในการใช้งานมากขึ้น และในการปฏิบัติงานจริงนั้น ระบบเครนเหนือศีรษะจะเป็นแบบสองเพนดูลัม (double-pendulum-type overhead crane) ซึ่งพิจารณาผลของตะขอ (hook) และภาระแยกกัน ดังนั้น การศึกษาเพื่อออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CRA เพื่อควบคุมระบบเครนแบบสองเพนดูลัมนี้ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

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] Y. C. Kim, L. H. Keel and S. P. Bhattacharya, "Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 12, pp. 2238-2244, 2003
- [6] อภิสิทธิ์ ดันตระวรศิลป์. "การประยุกต์ใช้วิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์สำหรับการควบคุมหลายตัวแปรของระบบคอนกรีตเหนื่อสี่ระนะ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [7] A.Lipatov and N.Sokolov. "Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems." Automat. Remote Cont., 1979, pp. 1285-1291
- [8] วิพันธ์ ปรีชาพานิช, การวิเคราะห์ระบบควบคุมเวลาติสครีต. ครั้งที่1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536
- [9] K. Ogata, **Modern Control Engineering**, Second Edition, Prentice-Hall international, Inc1990

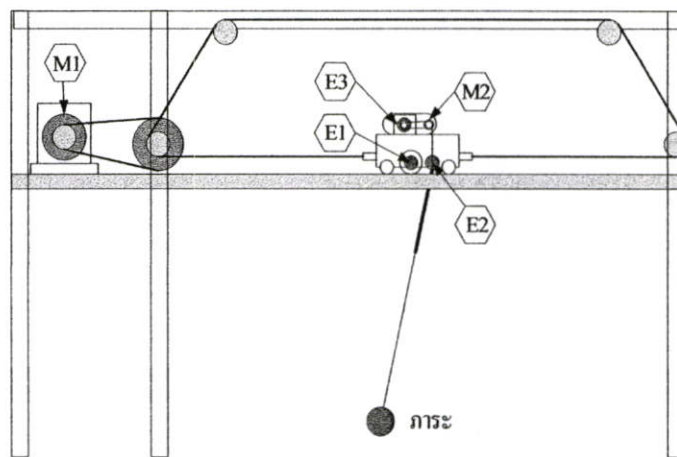
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**โครงสร้างและการหาพารามิเตอร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะ
รวมถึงการพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุม**

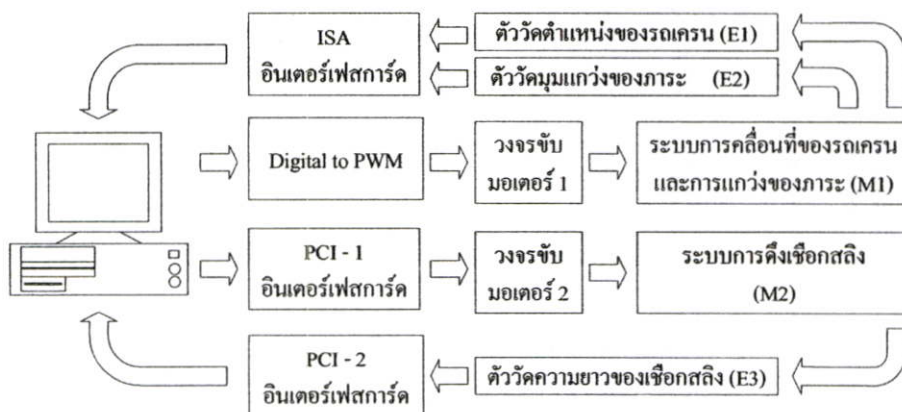
ก.1 โครงสร้างของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

โครงสร้างของระบบครนเหนื่อสี่ระยะแสดงดังรูปที่ ก.1 ประกอบด้วยระบบส่งกำลัง ซึ่งใช้ ดีไซน์มอเตอร์สองตัว โดยมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง (M1) ทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับพูลเลย์ (pulley) และ สายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์พร้อมทั้งเพิ่มแรงบิดให้กับชุดส่งกำลังเพื่อทำให้รถครนเคลื่อนที่ และมอเตอร์ตัวที่สอง (M2) ทำหน้าที่ดึงภาระขึ้นและลงโดยมีชุดส่งกำลังคือชุดเกียร์บ็อกซ์ (gear box) ที่ติดอยู่ส่วนปลายของมอเตอร์ ในส่วนของตัวตรวจวัดจะประกอบด้วยเอนโคเดอร์ (encoder) ทั้งหมด 3 ตัว โดยเอนโคเดอร์ตัวที่หนึ่ง (E1) จะใช้วัดตำแหน่งหรือระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครน เอนโคเดอร์ตัวที่สอง (E2) ใช้วัดมุมแกว่งของภาระและเอนโคเดอร์ตัวที่สาม (E3) ใช้วัดความยาวของเชือกสลิง และในส่วนของการภาระที่ใช้ในการทดลองจะมีทั้งหมด 3 ขนาดคือขนาด 0.5 กิโลกรัม 1 กิโลกรัมและ 3 กิโลกรัม



รูปที่ ก.1 โครงสร้างของระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

ก.2 การควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

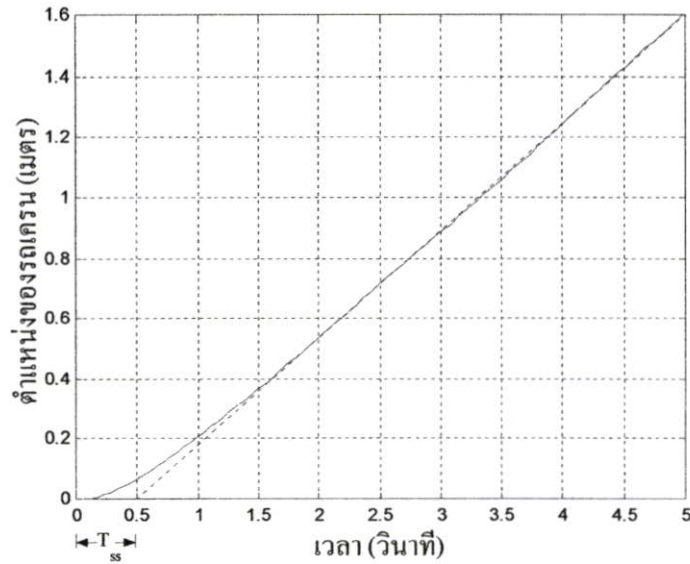


รูปที่ ก.2 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

รูปที่ ก.2 แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบครนเหนือศีรษะ ซึ่งประกอบด้วย ส่วนต่างๆดังนี้ ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะทำหน้าที่รับและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อาประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมให้แก่ระบบ ส่วนที่สองคืออุปกรณ์เชื่อมต่อ ซึ่งประกอบด้วย ISA อินเทอร์เฟซการ์ดทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากเอนโคเดอร์ ((E1) สำหรับวัดระยะทางของรถครนและ (E2) สำหรับวัดการแกว่งของมุม) แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป ในส่วนของการ์ดเชื่อมต่อแบบ PCI หรือ PCI อินเทอร์เฟซการ์ดจะมีสองการ์ดด้วยกัน การ์ดแรก PCI-1 ทำหน้าที่รับข้อมูลดิจิทัลจากบัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์แล้วแปลงเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งสัญญาณอนาล็อกนี้ให้แก่วงจรขับกระแสของมอเตอร์ตัวที่สอง ((M2) สำหรับระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง) และการ์ดที่สอง PCI-2 ทำหน้าที่รับสัญญาณพัลส์จากเอนโคเดอร์ ((E3) สำหรับวัดความยาวเชือกสลิง) แล้วแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป และในส่วนของวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ อนาล็อกจะทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลจากพอร์ตขนาน (parallel port) ของคอมพิวเตอร์เป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณ PWM นี้ให้กับวงจรขับกระแสของมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ((M1) สำหรับระบบการเคลื่อนที่ของรถครน) และส่วนสุดท้ายคือส่วนของวงจรขับกระแสของมอเตอร์ ซึ่งจะมียู่ด้วยกันสองวงจร โดยวงจรที่หนึ่งจะรับสัญญาณพัลส์จากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดมากขึ้นเพื่อส่งสัญญาณไปให้แก่ระบบส่งกำลังสำหรับการเคลื่อนที่ของรถครน ส่วนอีกวงจรหนึ่งจะทำหน้าที่รับแรงดันจากการ์ดอินเทอร์เฟซ PCI-1 จากนั้นจะแปลงขนาดของแรงดันให้เป็นสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง

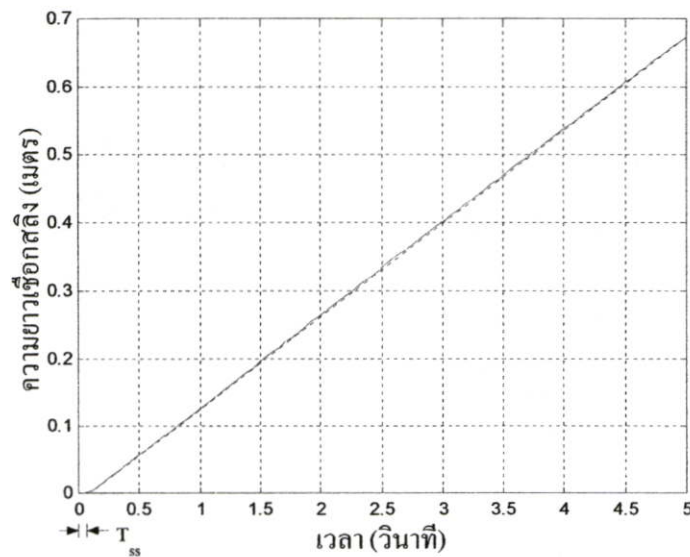
ก.3 พารามิเตอร์ของระบบครนเหนือศีรษะ

การหาพารามิเตอร์ K_r และ b_m ของระบบการเคลื่อนที่ของรถครนและพารามิเตอร์ K_f และ b_f ของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง สามารถทำได้โดยทดลองป้อนสัญญาณอินพุต D_i ที่มีค่าคงที่หลายค่าให้กับระบบการเคลื่อนที่ของรถครน และเมื่อป้อนแรงดันอินพุต V_i ที่มีค่าคงที่หลายค่าให้กับระบบการดึงเชือกสลิงแล้ว พบว่าค่าของสัญญาณอินพุต D_i ที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทำงานของระบบจริงมีค่าเท่ากับ 7% และค่าแรงดันอินพุต V_i ที่เลือกใช้มีขนาด +20 โวลต์ (+V ดึงภาระขึ้น และ -V ปล่อยภาระลง) เนื่องจากเป็นแรงดันเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับการนำไปควบคุมระบบวงปิดจริง โดยผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถครน และระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิงแสดงดังรูปที่ ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน

จากผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนจะเห็นว่าเส้นผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัว (steady-state) จะมีความชันเท่ากับ 0.3592 และเมื่อลากเส้นตรงจากสภาวะอยู่ตัว (แสดงดังเส้นประในรูปที่ 3.3) มาตัดกับแกนเวลาซึ่งจะได้ช่วงเวลา T_{ss} เท่ากับ 0.5 วินาที เมื่อแก้สมการตามขั้นตอนในบทที่ 2 แล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ K_r เท่ากับ 0.6281 และ b_m เท่ากับ 12.24 N sec/m



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง

ในการทำงานเดียวกัน จากผลตอบสนองระบบวงเปิดของระบบการควบคุมความยาวเชือกสลิง ในรูปที่ ก.4 จะเห็นว่าเส้นผลตอบสนองที่สภาวะอยู่ตัวจะมีความชันเท่ากับ 0.1368 และเมื่อลากเส้นตรงจากสภาวะอยู่ตัวมาตัดกับแกนเวลาจะได้ช่วงของเวลา T_{ss} เท่ากับ 0.1 วินาที หลังจากแก้สมการแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ K_f เท่ากับ 0.0684 และ b_f เท่ากับ 10 N sec/m

ก.4 การพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุมจากเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

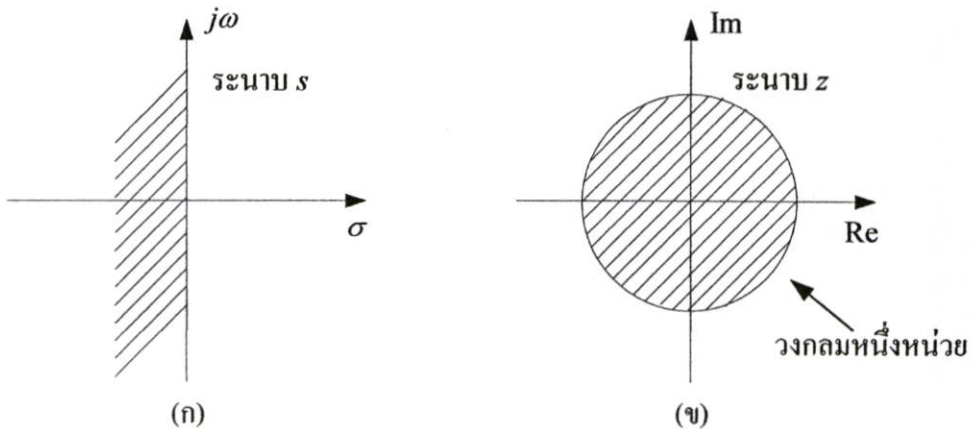
การควบคุมระบบจริงนั้นต้องแปลงระบบควบคุมจากเวลาต่อเนื่องไปเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องก่อน และต้องพิจารณาเสถียรภาพของระบบที่ถูกแปลงแล้ว ซึ่งในการแปลงจากระบบเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องนั้นจะใช้การคงค่าอันดับศูนย์ (zero-order hold) ในการสุ่มสัญญาณด้วยแสดงได้ดังนี้

$$G_{ho}(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \quad (\text{ก1})$$

โดยที่ T คือ เวลาชักตัวอย่าง มีหน่วยเป็นวินาที ดังนั้นระบบควบคุม $G(s)$ ที่ถูกแปลงแล้วคือ

$$G(z) = \mathcal{Z}\left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} G(s)\right] \quad (\text{ก2})$$

การพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุมจากเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครนที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม I-PD ระบบมุมแกว่งของภาระที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PD และระบบความยาวของเชือกสลิงที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม I-P นั้น สามารถพิจารณาเสถียรภาพของระบบควบคุมจากขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน s ของฟังก์ชันการแปลงลาปลาซ ซึ่งจะเมื่อบริเวณขอบเขตเสถียรภาพของตัวแปรเชิงซ้อน z คือพื้นที่ภายในวงกลมหนึ่งหน่วยบนระนาบ z ดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ๕ ขอบเขตเสถียรภาพของระบบควบคุม

สำหรับตัวควบคุม I-PD ตัวควบคุม PD และตัวควบคุม I-P นั้นใช้การแปลงตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องให้เป็นตัวควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องโดยวิธีอินทิเกรตหาผลต่างถดถอย ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถแปลงตัวควบคุมชนิดสัญญาณต่อเนื่องที่มีเสถียรภาพเป็นตัวควบคุมชนิดสัญญาณไม่ต่อเนื่องที่มีเสถียรภาพได้เสมอ

การควบคุมระบบจริงในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่าเวลาชักตัวอย่าง T เท่ากับ 0.05 วินาที ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบการเคลื่อนที่ของรถเครน $G_{px}(s)$ อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{px}(z) = \frac{X(z)}{D_i(z)} = \frac{0.0001241 z + 0.00012}{z^2 - 1.905 z + 0.9048} \quad (ก3)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบมุมแกว่งของภาระ $G_{p\theta}(s)$ ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{p\theta}(z) = \frac{\Theta(z)}{D_i(z)} = \frac{-0.0001548 z^2 + 0.000005063 z + 0.0001497}{z^3 - 2.874 z^2 + 2.782 z - 0.9048} \quad (ก4)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิง $G_{pl}(s)$ ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{pl}(z) = \frac{L(z)}{V_i(z)} = \frac{0.00007285 z + 0.00006168}{z^2 - 1.607 z + 0.6065} \quad (ก5)$$

ในส่วนของการแปลงตัวควบคุม I-PD PD และ I-P จากเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องนั้น จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมในตารางที่ 5.2 และแปลงด้วยวิธีอินทิเกรตหาผลต่าง ถดถอย ตามที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม I-PD ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{cix}(z) = \frac{0.487 z}{z-1} \quad (ก6)$$

$$G_{cpdx}(z) = \frac{428.8 z - 389.8}{z} \quad (ก7)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PD ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{cpd\theta}(z) = \frac{160 z - 200}{z} \quad (ก8)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม I-P ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{cil}(z) = \frac{4.872 z}{z-1} \quad (ก9)$$

$$G_{cpl}(z) = 195 \quad (ก10)$$

จากนั้นจึงหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมครนเหนือสี่ระยะที่ใช้ตัวควบคุมทั้งสามเพื่อพิจารณาเสถียรภาพระบบควบคุม โดยตรวจสอบว่าโพลของระบบควบคุมวงปิดจะอยู่ในพื้นที่วงกลมหนึ่งหน่วยบนระนาบ z หรือไม่ ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุม การเคลื่อนที่ของรถเครนที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม I-PD ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{clx}(z) = \frac{0.00006043 z^3 + 0.00005845 z^2}{z^4 - 2.852 z^3 + 2.76 z^2 - 0.9547 z + 0.04678} \quad (ก11)$$

และมีโพลของระบบควบคุมวงปิดการเคลื่อนที่ของรถเครนคือ 0.9814, 0.9513, 0.8607 และ 0.0582

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบมุมแกว่งของภาระที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม PD ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{cl\theta}(z) = \frac{0.02476 z^3 - 0.03176 z^2 - 0.02294 z + 0.02994}{z^4 - 2.85 z^3 + 2.75 z^2 - 0.9278 z + 0.02994} \quad (ก12)$$

และมีโพลของระบบควบคุมวงปิดมุมแกว่งของภาระคือ $0.9890 \pm 0.1350j$, 0.8356 และ 0.0360

และฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบควบคุมความยาวเชือกสลิงที่ควบคุมด้วยตัวควบคุม I-P ที่อยู่ในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$G_{cll}(z) = \frac{0.0003549 z^2 + 0.0003005 z}{z^3 - 2.592 z^2 + 2.211 z - 0.6186} \quad (ก13)$$

ได้โพลของระบบควบคุมวงปิดความยาวของเชือกสลิงคือ $0.9619 \pm 0.0229j$ และ 0.668

จะเห็นว่าโพลวงปิดของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน มุมแกว่งของภาระ และความยาวของเชือกสลิงจะอยู่ในวงกลมหนึ่งหน่วยบนระนาบ z แสดงว่าระบบควบคุมเครนเหนือศีรษะที่ใช้ตัวควบคุมทั้งสามนี้ยังมีเสถียรภาพเมื่อแปลงจากเวลาต่อเนื่องเป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

ภาคผนวก ข.

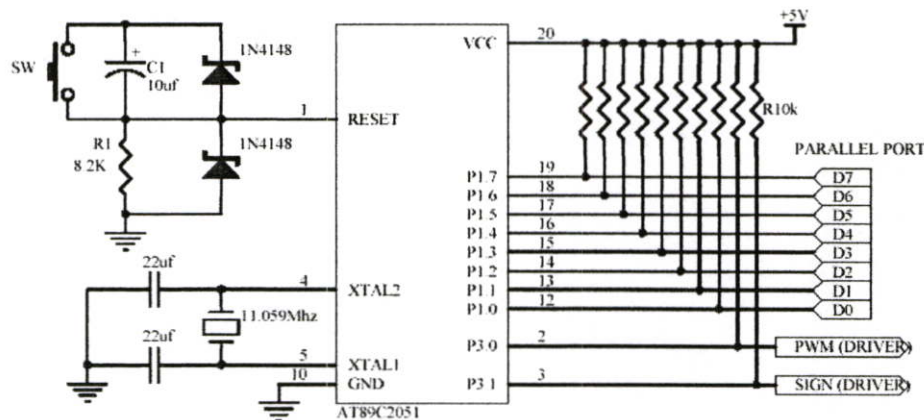
รายละเอียดของอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในการทดลอง

ข.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบเครื่องเนื้อที่ระยะด้วยโปรแกรมภาษาซี (C language) ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ทฤษฎีการควบคุม

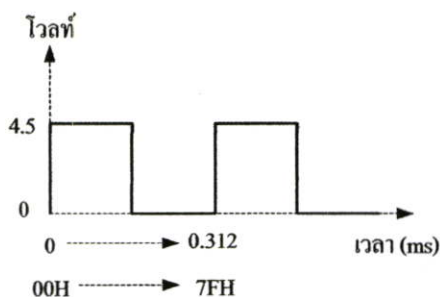
ข.2 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณพัลส์วามอดูเลชัน (Digital to PWM)

วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM เป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์และวงจรขับเคลื่อนทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ฐาน 16 ที่ส่งมาจากพอร์ตขนาน (parallel port) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ให้เป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งสัญญาณให้วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของรถเกรน โดยรายละเอียดของวงจรแสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM

จากรูปที่ ก.1 ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C2051 ซึ่งจะถูโปรแกรมให้ทำหน้าที่แปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM ซึ่งข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิต ฐาน 16 นี้จะเข้ามาทางพื้ด P1.0-P1.7 โดยพื้ด P1.0-p1.6 จะเป็นข้อมูลที่ใช้ในการปรับความกว้างของพัลส์โดยถ้าข้อมูลเป็นค่า 00H ทำจะทำให้รถเกรนหยุดเคลื่อนที่ และถ้าข้อมูลเป็น 7FH จะทำให้รถเกรนเคลื่อนที่เร็วที่สุด ส่วนพื้ด P1.7 จะเป็นข้อมูลที่ใช้บอกทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยถ้าพื้ด P1.7 มีสถานะเป็น “1” (4.5 โวลต์) มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาทำให้รถเกรนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และถ้าพื้ด P1.7 มีสถานะเป็น “0” (0 โวลต์) มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาทำให้รถเกรนเคลื่อนที่กลับหลัง โดยข้อมูลขนาด 8 บิต ฐาน 16 และความกว้างของพัลส์แสดงรายละเอียดดังรูปที่ ข.2 โดยความถี่ของสัญญาณ PWM คือ 3.2 กิโลเฮิรซ์

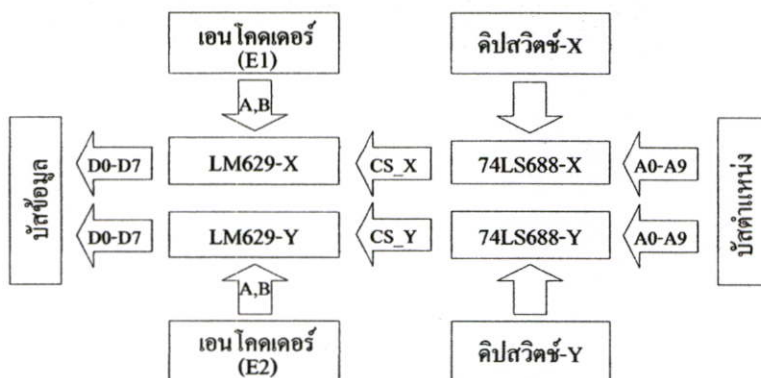


รูปที่ ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตฐาน 16 กับสัญญาณ PWM

ข.3 วงจรนับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดเจอร์ (counter)

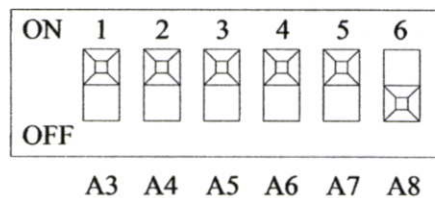
วงจรถับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดเจอร์ เป็นวงจรเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ตรวจนับซึ่งในการทดลองใช้เอนโคเดเจอร์ โดยวงจรจะอยู่บนการ์ดต่อกับบอร์ดของคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะมือคู่ด้วยกัน 2 การ์ดคือ

ข.3.1 การ์ดนับจำนวนพัลส์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครนและมุมแกว่งของภาระ
 การ์ดนับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดเจอร์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครนและมุมแกว่งของภาระ จะมีลักษณะเป็น ISA การ์ด ใช้เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับเอนโคเดเจอร์ที่ใช้วัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครนและวัฏมุมแกว่งของภาระ โดยตัวการ์ดนี้จะประกอบด้วยไอซี LM629 จำนวนสองตัวโดยตัวหนึ่งทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดเจอร์ที่วัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครน และอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ของเอนโคเดเจอร์ที่วัฏมุมแกว่งของภาระ โดยข้อมูลที่นับได้เป็นข้อมูลดิจิทัลขนาด 8 บิตโดยจะส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป และในวงจรได้เพิ่มไอซี 26LS31 และ 26LS32 ซึ่งเป็นตัวขับและตัวรับในสายส่งสัญญาณของเอนโคเดเจอร์ เพื่อความชัดเจนและแน่นอนของสัญญาณพัลส์ การรับส่งสัญญาณในการ์ดนี้ได้ใช้ไอซี 74LS244 ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในการ์ด ได้อย่างถูกต้องบล็อกลไกอะแกรมการทำงานของวงจรถับจำนวนพัลส์แสดงดังรูปที่ ข.3

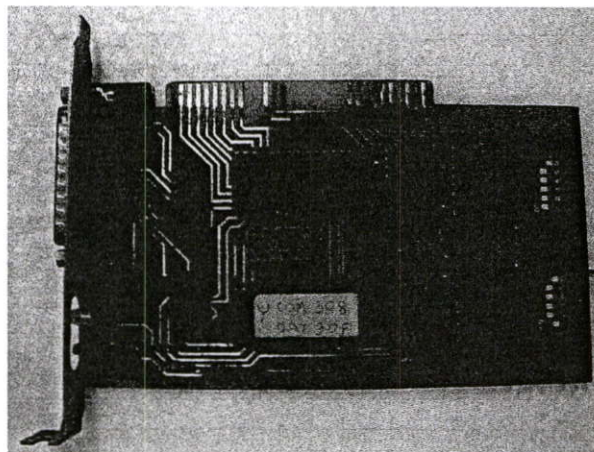


รูปที่ ข.3 บล็อกลไกอะแกรมการทำงานของวงจรถับจำนวนพัลส์

จากรูปที่ ข.3 หลักการทำงานของวงจรถือ ไอซี 74LS688 จะดีโคดตำแหน่งจากบัสตำแหน่ง (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 ข.4 ซึ่ง A9 จะถูกกำหนดให้มีค่าเป็น 1 โดยในการทดลองได้กำหนดแอดเดรสให้กับ 74LS688-X คือ 300H และ 74LS688-Y คือ 308H ดังนั้นหากไอซี 74LS688-X ดีโคดตำแหน่งได้ตรงกับที่กำหนดแล้ว ไอซี 74LS688-X จะส่งสัญญาณ CS-X ไปที่ขา CS (chip select) ของไอซี LM629-X และเมื่อได้รับสัญญาณจากบิตตำแหน่ง A0 ที่ขา PS แล้ว ไอซี LM629-X จะทำงานโดยรับสัญญาณจากเอนโคเดอร์ที่วัดระยะทางการเคลื่อนที่ของรถครนที่ขา A และ B โดยสัญญาณที่รับจะมีสองเส้นมีลักษณะสัญญาณเป็นพัลส์ โดยแต่ละเส้นจะมีเฟสต่างกันอยู่ 90 องศา จากนั้น LM629-X จะทำการนับจำนวนพัลส์ที่รับเข้ามาแล้วส่งข้อมูลขนาด 8 บิต เข้าสู่บัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลต่อไป และในกรณีที่ต้องการอ่านค่าของเอนโคเดอร์ที่วัดการแกว่งของมุมก็จะมีหลักการเดียวกันดังที่กล่าวมาข้างต้น โดยภาพถ่ายของ ISA การ์ดแสดงดังรูปที่ ข.5 และรายละเอียดของวงจรมับจำนวนพัลส์แสดงดังรูปที่ ข.6 ส่วนตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ข.9



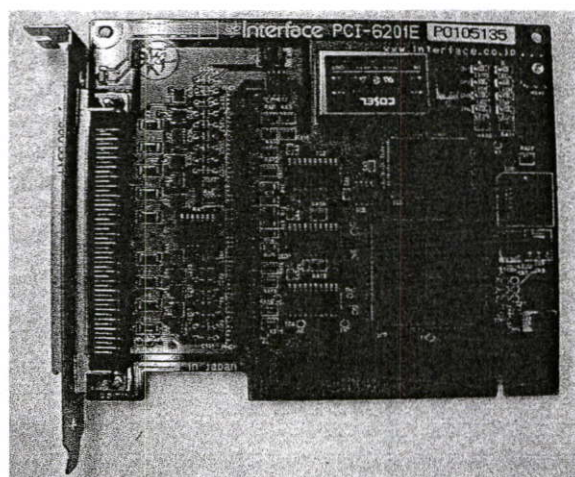
รูปที่ ข.4 แสดงตัวอย่างการเลือกตำแหน่งของคิปสวิตช์



รูปที่ ข.5 ภาพถ่ายของ ISA การ์ด

ข.3.2 การ์ดนับจำนวนพัลส์สำหรับวัดความยาวเชือกสลิง

การ์ดนับจำนวนพัลส์จากเอน โคดเดอร์สำหรับวัดความยาวเชือกสลิงจะมีลักษณะเป็น PCI การ์ดเบอร์ PCI-6201E ซึ่งเป็นการ์ดสำเร็จรูปที่ โดยภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E แสดงดังรูปที่ ข.7 และการตำแหน่งการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.7 ภาพถ่ายการ์ดนับจำนวนพัลส์ เบอร์ PCI-6201E

ข.4 วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก

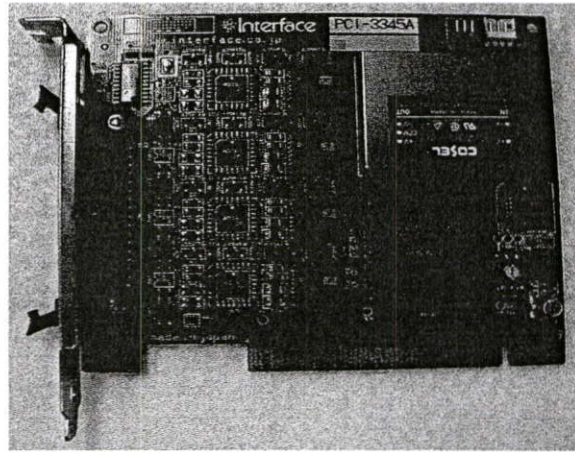
วงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก จะมีลักษณะเป็น PCI การ์ดเบอร์ PCI-3345A ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับวงจรขับมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมความยาวเชือกสลิง โดยตัวการ์ดจะรับข้อมูลดิจิทัลขนาด 12 บิตจากคอมพิวเตอร์และจะแปลงข้อมูลนี้เป็นสัญญาณอนาล็อกอยู่ในรูปที่ของแรงดันไฟฟ้ามีขนาด -10 โวลต์ ถึง $+10$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

ถ้าส่งค่า FFFH เข้าการ์ดจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดสูงสุดคือ 10 โวลต์

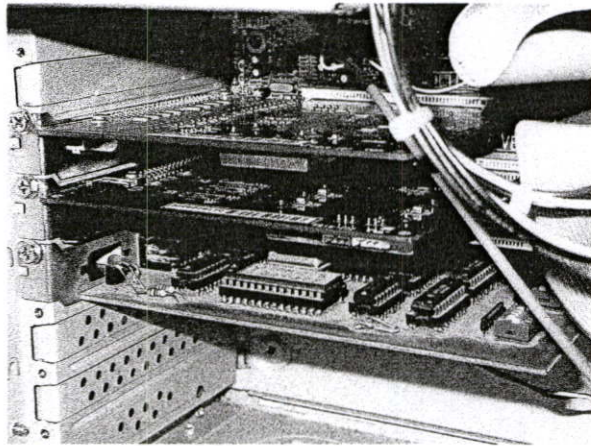
ถ้าส่งค่า 7FFH เข้าการ์ดจะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดคือ 0 โวลต์

ถ้าส่งค่า 0H จะได้ค่าแรงดันเอาต์พุตขนาดต่ำสุดคือ -10 โวลต์

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



รูปที่ ข.8 ภาพถ่ายการ์ดแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก



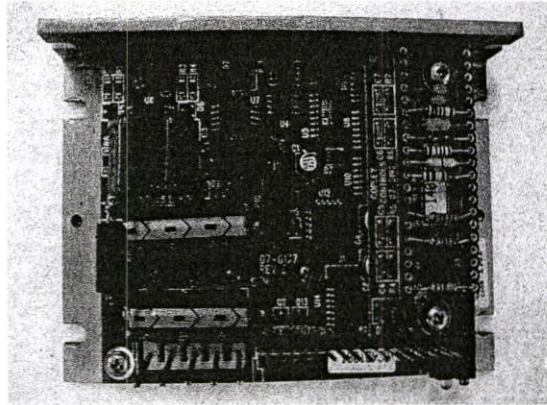
รูปที่ ข.9 ภาพถ่ายการติดตั้งการ์ดเชื่อมต่อต่างๆ

ข.5 วงจรขับกระแสของมอเตอร์ (current driver motor)

วงจรขับกระแสของมอเตอร์เป็นวงจรที่สำคัญวงจรหนึ่ง ทำหน้าที่ขับมอเตอร์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการทดลองจะประกอบด้วยวงจรขับกระแสของมอเตอร์ 2 วงจรด้วยกันคือ

ข.5.1 วงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน

วงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนจะใช้วงจรสำเร็จรูปของบริษัท Copley Controls Corp. รุ่น 412 โดยมีคุณสมบัติคือ ให้แรงดันเอาต์พุตขนาด 24 – 90 โวลต์ กระแสเอาต์พุตสูงสุด 20 แอมป์ สัญญาณ PWM มีความถี่ 3 กิโลเฮิรซ์ ป้องกันการลัดวงจรทางเอาต์พุต และมีระบบตัดการทำงานของวงจรเมื่ออุณหภูมิของวงจรร้อนเกิน 70 องศาเซลเซียส โดยวงจรขับกระแสของมอเตอร์นี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณ PWM และสัญญาณตำแหน่งจากวงจรแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM จากนั้นจะขยายสัญญาณและส่งสัญญาณนี้ไปขับมอเตอร์ ภาพถ่ายวงจรขับกระแสของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครนแสดงดังรูปที่ ข.10



รูปที่ ข.10 ภาพถ่ายวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเครน

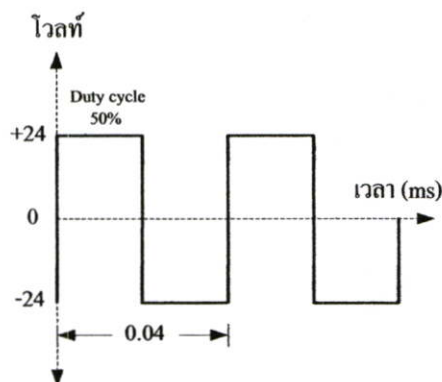
ข.5.2 วงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความยาวเชิงอกสลิ้ง

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

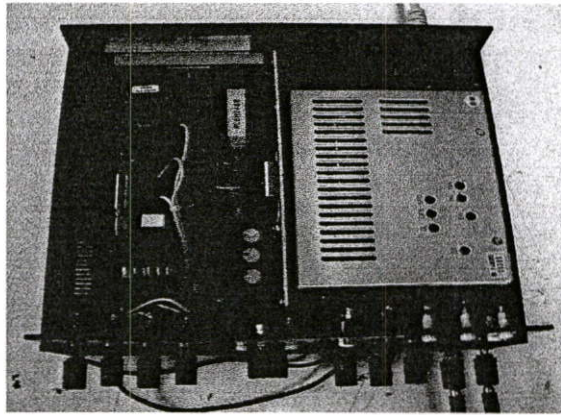
- แรงดันอินพุตเท่ากับ +10 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 100% มอเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด

- แรงดันอินพุตเท่ากับ 0 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 50% มอเตอร์จะหยุดหมุน

- แรงดันอินพุตเท่ากับ -10 โวลต์ จะทำให้ duty cycle = 0% มอเตอร์จะหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วสูงสุด โดยลักษณะของสัญญาณ PWM แสดงดังรูปที่ ข.11 และภาพถ่ายของวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการดึงเชิงอกสลิ้งแสดงดังรูปที่ ข.12



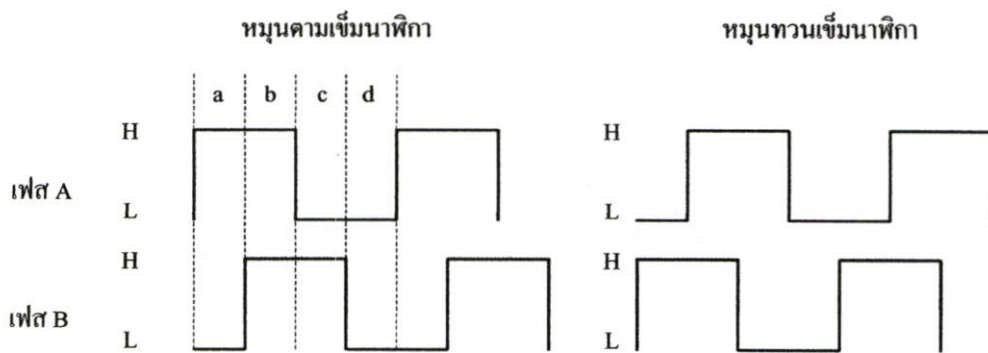
รูปที่ ข.11 สัญญาณ PWM ของวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความยาวเชิงอกสลิ้ง



รูปที่ ข.12 ภาพถ่ายวงจรขับเคลื่อนของมอเตอร์สำหรับการควบคุมความยาวเชือกสลิง

ข.6 เอนโคเดอร์

เอนโคเดอร์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ เนื่องจากสัญญาณที่ป้อนกลับที่ส่งมาจากเอนโคเดอร์ตานั้น สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ หรือสามารถบอกสถานะของระบบนั้นได้ว่าเป็นอย่างไร โดยนำสัญญาณป้อนกลับที่ได้นี้มาคำนวณเพื่อหาสัญญาณควบคุมให้กับระบบนั้นทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเอนโคเดอร์ที่ใช้ในระบบเครน จะเป็นแบบโรตารีเอนโคเดอร์มีความละเอียด 2000 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ (360 องศา) แต่เนื่องจากเมื่อเอนโคเดอร์หมุนจะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์ขึ้นที่ขา A และ B ของ เอนโคเดอร์ซึ่งต่างเฟสกันอยู่ 90 องศา โดยทั้งสองสัญญาณนี้จะถูกขยายสัญญาณและส่งเข้าสู่วงจรรับ ซึ่งวงจรรับ จะทำการแบ่งสัญญาณพัลส์ทั้งสองออกเป็น 4 ส่วนแสดงดังรูปที่ ข.13



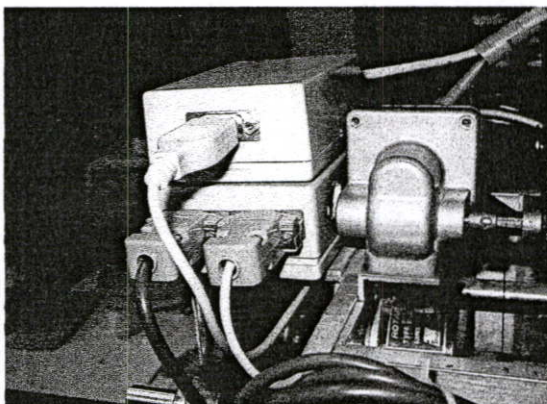
(a,b,c,d) คือ (2000,4000,6000,8000) พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ

รูปที่ ข.13 แสดงลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นเมื่อเอนโคเดอร์หมุน 1 รอบ

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

ข.6.1 เอนโคคเตอร์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน

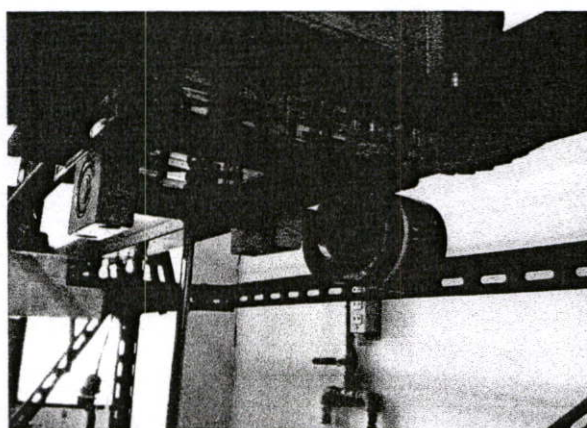
เอนโคคเตอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของรถเครน โดยจะต่ออยู่กับล้ออย่างซึ่งเชื่อมต่อ (coupling) ด้วยวัสดุที่ทำจากกาวแห้ง ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ข.14



รูปที่ ข.14 การติดตั้งเอนโคคเตอร์สำหรับวัฏระยะทางการเคลื่อนที่ของรถเครน

ข.6.2 เอนโคคเตอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ

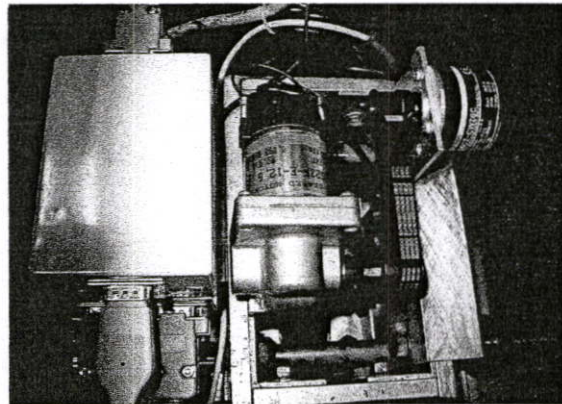
เอนโคคเตอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณด้านใต้รถเครน โดยจะต่ออยู่กับแท่งเหล็ก โดยตรงกลางของแท่งเหล็กนี้จะต่ออยู่กับทอสแตนเลด เพื่อให้เชือกสลิงสอดผ่านได้ เหตุที่ทำเช่นนี้เนื่องจากเวลาเชือกแกว่งจะทำให้แท่งสแตนเลดแกว่งตาม และทำให้แท่งเหล็กแกว่งตามไปด้วย และแท่งเหล็กนี้จะเชื่อมต่อกับเอนโคคเตอร์ด้วยวัสดุที่ทำจากอีพ็อกซี่ ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ข.15



รูปที่ ข.15 การติดตั้งเอนโคคเตอร์สำหรับวัดมุมแกว่งของภาระ

ข.6.3 เอนโคคเคอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง

เอนโคคเคอร์ตัวนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของรถเครน โดยจะต่ออยู่กับมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความยาวเชือกสลิง โดยตัวเอนโคคเคอร์จะเชื่อมต่อกับมอเตอร์ด้วยพูลเลย์และสายพานชนิดฟันเลื่อย ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ ข.16



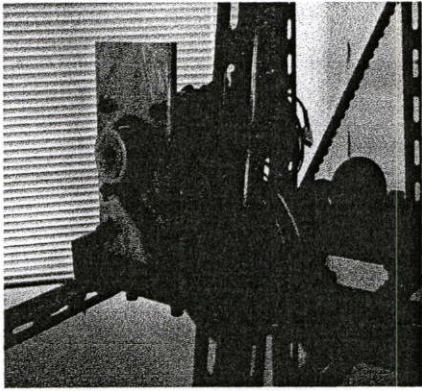
รูปที่ ข.16 การติดตั้งเอนโคคเคอร์สำหรับวัดความยาวของเชือกสลิง

ข.7 ระบบส่งกำลัง

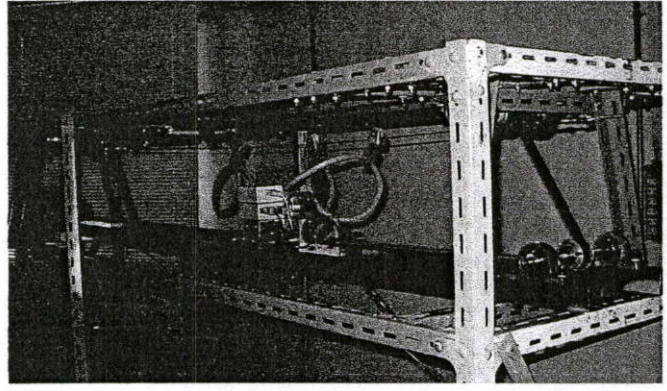
ระบบส่งกำลังเป็นระบบที่ทำให้รถเครนและภาระเกิดการเคลื่อนที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข.7.1 ระบบส่งกำลังของรถเครน

ระบบส่งกำลังของรถเครนจะประกอบด้วยมอเตอร์ขนาด 500 วัตต์ 70 โวลต์ เป็นตัวส่งกำลัง และมีชุดทดรอบเพื่อลดความเร็วของมอเตอร์ แต่เพิ่มแรงบิดให้มากขึ้น โดยชุดทดรอบจะประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่ง (timing belt) และไทม์มิ่งพูลเลย์ (timing pulley) ซึ่งไทม์มิ่งพูลเลย์ที่ใช้จะมีสองตัว โดยตัวแรกจะยึดติดกับปลายของมอเตอร์ ส่วนอีกตัวจะยึดติดกับแกนหมุนของชุดส่งกำลัง โดยไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวแรกจะมีขนาดเป็น $1/3$ ของไทม์มิ่งพูลเลย์ตัวที่สองเนื่องจากการลดความเร็วของมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดของมอเตอร์ขึ้นเป็น 3 เท่า การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์นี้สามารถลดเบ็คแลชที่เกิดขึ้นในระบบทดรอบที่ใช้เฟืองเกียร์ได้ ส่วนชุดส่งกำลังนี้ก็จะประกอบด้วยสายพานแบบไทม์มิ่งและไทม์มิ่งพูลเลย์เช่นกัน ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งกำลังให้กับรถเครนเพื่อให้รถเครนสามารถเคลื่อนได้ การใช้สายพานแบบไทม์มิ่งในการส่งกำลังเนื่องจากสามารถลดสลลิปที่เกิดขึ้นในระบบส่งกำลังได้ดีกว่าการใช้สายพานธรรมดา โดยระบบส่งกำลังของรถเครนแสดงดังรูปที่ ข.17



(ก)



(ข)

(ก) ชุดครอบมอเตอร์ (ข) ระบบส่งกำลังของรถเข็น

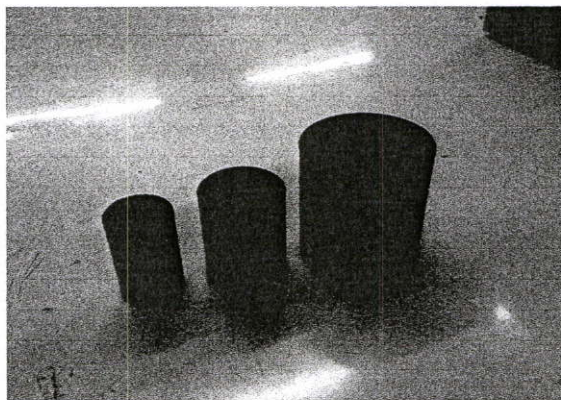
รูปที่ ข.17 ภาพถ่ายระบบส่งกำลังของรถเข็น

ข.7.2 ระบบส่งกำลังของภาระ

ระบบส่งกำลังของภาระจะประกอบด้วยดีซีมอเตอร์ซึ่งจะมีเกียร์บล็อกต่อกันอยู่ด้านปลายของมอเตอร์เพื่อลดความเร็วของมอเตอร์และเพิ่มแรงบิดให้มากขึ้นทำให้สามารถยกภาระที่มีน้ำหนักมากขึ้นและลงได้ ระบบการส่งกำลังของภาระแสดงดังรูปที่ ข.16

ข.8 ภาระที่ใช้ในการทดลอง

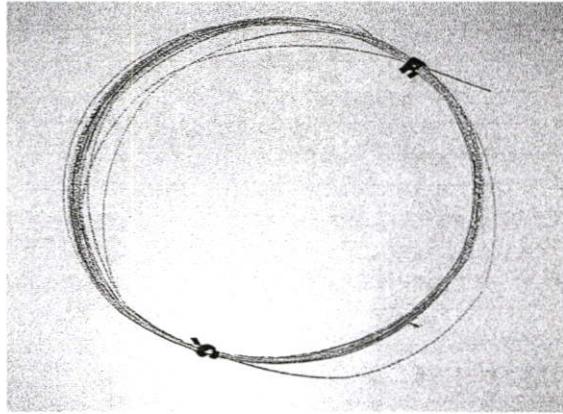
ภาระที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ทำจากเหล็กตันแข็ง มีมวล 0.5 กิโลกรัม 1 กิโลกรัม และ 3 กิโลกรัม แสดงดังรูปที่ ข.18



รูปที่ ข.18 ภาพถ่ายภาระที่ใช้ในการทดลอง

ข.9 เชือกสลิง

เชือกสลิงที่ใช้ในการคังภาระสามารถรับน้ำหนักได้ 10 กิโลกรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.42 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ ข.19



รูปที่ ข.19 ภาพถ่ายเชือกสลิงที่ใช้ในการคังภาระ

ภาคผนวก ค.

**โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
และการทดลอง**

ค.1 โปรแกรมหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนือสี่ระยะ

(โปรแกรมเมตเล็บ)

format short;

M=6.12; y1=1.433; y0=0.535; x1=4.5; x0=2; a=(y1-y0)/(x1-x0); T=0.5; bm=M/T ; D=7;

kr=(a*bm)/D; g=9.81; T1=0.1; m=1; L=0.8; bl=m/T1; y11=0.673; y00=0.126; x11=5; x00=1;

v=20; a1=(y11-y00)/(x11-x00); kl=(a1*bl)/v;

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

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

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

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

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

inputs={'u_distance' 'u_length'};

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

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

'inputname',inputs,...

'outputname',outputs);

tf(sys_mimo)

ค.2 โปรแกรมหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม I-PD PD และ I-P ด้วยวิธี CRA (โปรแกรมแมตแล็บ)

ค.2.1 ตัวควบคุม I-PD

```

%Parameter I-PD for Trolley Position%

tau_1 = 4;
alpha1_1 = 4;
alpha2_1 = 4;
a3_1 = 1;
a0_1 = (a3_1*alpha2_1*(alpha1_1)^2)/(tau_1^3);
a1_1 = (a0_1*tau_1);
a2_1 = (a0_1*(tau_1^2))/alpha1_1;
Ps1 = [a3_1 a2_1 a1_1 a0_1];
Kd1 = (a2_1-2)/0.1026;
Kp1 = a1_1/0.1026;
Ki1 = a0_1/0.1026;
sys1 = tf([a0_1],[a3_1 a2_1 a1_1 a0_1]);

```

ค.2.2 ตัวควบคุม PD

```

%Parameter PD for Load swing Angle%

tau_2 = 0.32;
alpha1_2 = 3.02;
alpha2_2 = 0.07;
a3_2 = 1;
a0_2 = 25.36;
a1_2 = (a0_2*tau_2);
a2_2 = (a1_2*a3_2*alpha2_2)^0.5;
Ps2 = [a3_2 a2_2 a1_2 a0_2];
Kd2 = (2-a2_2)/0.114;
Kp2 = (12.68-a1_2)/0.114;
sys2 = tf([a0_2],[a3_2 a2_2 a1_2 a0_2]);

```

ก.2.3 ตัวควบคุม I-P

```
%Parameter I-P for Hoisting Length%  
tau_3 = 2;  
alpha1_3 = 13.33;  
alpha2_3 = 0.3;  
a3_3 = 1;  
a0_3 = (a3_1*alpha2_1*(alpha1_1)^2)/(tau_1^3);  
a1_3 = (a0_1*tau_1);  
a2_3 = 10;  
Ps3 = [a3_1 a2_1 a1_1 a0_1];  
Kp3 = a1_1/0.06838;  
Ki3 = a0_1/0.06838;  
Sys3 = tf([a0_1],[a3_1 a2_1 a1_1 a0_1]);
```

ค.3 โปรแกรมแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณ PWM

(โปรแกรมภาษา Assembly ของไมโครคอนโทรลเลอร์ AT89C2051)

```

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

```

```

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

```

ก.4 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบเครนเหนือศีรษะ

(โปรแกรมภาษาซี)

```

/*=====
Sample program for Interface DA (digital to analog) PCI boards under MS-DOS/PC DOS.

Console application for C language

Copyright 2001 Interface Corporation. All rights reserved.

===== */

#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <bios.h>
#include <process.h>
#include <math.h>
#include "DA.H"
#include "GETBAR.H"
#include "i2c_x_1.h"
#include "i2c_y_1.h"
#define drive_port 0x378
#define run_dat "C:\\WIN98\\DESKTOP\\P.NOO\\DATAREAL.m"
#define cls(l); { short i; for(i=1; i<25; i++) lineclr(i); }
#define Locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH", (y)+1, (x)+1)
#define lineclr(l) printf("\x1b[s\x1b[%d;1H\x1b[0K\x1b[u", l+1)
#define range DA_10V

PCI_CONFIG PciData; DASMPCHREQ SmplChReq[2]; DABOARDSPEC BoardSpec;
HANDLE OpenBoard(void); void INITIAL_DTOA(void); void CLOSE_DTOA(void);

//-----
// Function void main()
//-----

int main(void){ HANDLE hDevice;

```

```

// parameter of encoder
unsigned int adr0,adr1,bus_info; unsigned int lByte; unsigned int mByte; unsigned int hByte;
unsigned long dwCounter; int key;

// system variable
float sam_time = 0.05; float ts = 0.00; float run_time = 0.00; int stop_ang_count = 0;
clock_t start,end; int dis=0;

// digital to analog
int ret; int hexout=0; float volt=0.00; WORD DaData[1];

// variable of rope length
float dif_length = 0.00; float length_old = 0.00; float Ki1_length = 0.00; float Kp1_length = 0.00;
float Kd1_length = 0.00; float length_ref=0.00; float length_ft1 = 0.00; float length_ft2 = 0.00;
float length_ft3 = 0.00; float length_ft4 = 0.00; float length_ft = 0.00; float length_ft_old = 1.00;
float length_Kp1 = 0.00; float length_Ki1 = 0.00; float length_Ki1_old = 0.00; float length_Kd1
= 0.00; float con_length = 0.00; float con_length_old = 0.00; float length_err = 0.00;
float length_err_old = 0.00; float length_err_old1 = 0.00; float rope_length = 0.00;
float rope_old = 0.00; float length_ret = 0.00; float move_length = 0.00; float value_length = 0.00;
int direction = 0.0; float rope_length_old = 0.00; float con_length_old = 0.00;

//---> variable of distance
float con_float = 0.00; int con = 0; float con_i = 0; float con_i_old = 0; float con_pd = 0;
float con_pos = 0; float con_ang = 0; float vel = 0.00; float pos = 0.00; float pos_err = 0.00;
float pos_err_old = 0.00; float dif_pos_err = 0.00; float dif_pos = 0.00; float pos_ref = 0.00;
float pos_old = 0.00; float con_Kp = 0.00; float con_Ki = 0.00; float con_Kd = 0.00;
float pos_ft = 0.00; float pos_ft1 = 0.00; float pos_ft2 = 0.00; float pos_ft3 = 0.00;
float pos_ft4 = 0.00; float pos_ft_old = 0.00; float pos_ft_old1 = 0.00; float pos_err_old1 = 0.00;
float con_pos_old = 0.00; float pos_length = 0.00; float pos_ref1 = 0.00; float pos_ref2 = 0.00;
float pos_ref3 = 0.00; float length_ref1 = 0.00; float length_ref2 = 0.00; float length_ref3 = 0.00;
float pos_old = 0.00; float pos_old1 = 0.00; float con_pos1 = 0.00;

// variable of swing angle
float ang = 0.00; float ang_err = 0.00; float ang_err_old = 0.00; float dif_ang_err = 0.00;
float ang_ref = 0.00;

// controller for Position
float Kp_pos = 0; float Ki_pos = 0; float Kd_pos = 0;

```

```

// controller for swing angle
float Kp_ang = 0; float Kd_ang = 0;
// open file
FILE *run_fin;
clrscr();
run_fin = fopen(run_dat,"wt+");
fprintf(run_fin,"source_matrix = [");
// Set initial value of Digital to Analog PCI Card (PCI-3345A)
INITIAL_DTOA();
        hDevice = OpenBoard();
        DaGetDeviceInfo(hDevice, &BoardSpec);
        SmplChReq[0].ulChNo = 1;
        SmplChReq[0].ulRange = range;
// Initial Encoder PCI Card (PCI-6201E)
PciGetConfigRegEx(1, 0x1147, 6201, 0x1147, 0x0011,&bus_info, &PciData);
        adr0=PciData.BaseAddresses[0]&0xffff;
        //adr1=PciData.BaseAddresses[1]&0xffff;
//outp(adr0+0x08,0x06); // forward direction
outp(adr0+0x0d,0x01);
// initial LM629 for read data from encoder (distance and swing angle)
INIT_LM629(); INIT_LM629_y(); SET_PID_FILTER(1, 1, 1, 100);
// Manual adjust rope length ( <-- for down & --> for up )
do
{ if(bioskey(1)!=0)
        { key = bioskey(1);
        switch( bioskey(0) )
        { case 0x4b00 :
                { if(volt < 24)
                        {volt = volt+1;}
                        else
                                { volt = 24;} } break;
                case 0x4d00 :

```



```

        printf(" ang : %f\t",ang); } } while( key != 0x011b );
volt=0; // volt = 8 for load 5kg
hexout=((volt+24)/48)*4095;
DaData[0] = hexout;
ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
// Control rope length with PID controller designed by CDM
clrscr();
printf("start value of rope length = %f ", rope_length);
printf("\ndistance value of rope length (0.3-0.4)m = ");
scanf("%f", &length_ref);
/* length_ref1 = 0.2; length_ref2 = 0.3; length_ref3 = 0; */
move_length = rope_length + length_ref;
length_ret= rope_length;
//rope_old= rope_length;
printf("\npress anykey for clear port.");
    getch();
    outp(drive_port,0);
//----- data input -----//
    printf("\nEnter distance :");
    scanf("%f", &pos_ref);
    pos_ref1=1; pos_ref2=1.5; pos_ref3=0;
// alpha1=4 alpha2=4 tau = 4
Kp_pos = 38.98;    Ki_pos = 9.746; Kd_pos = 19.49;
Kp_ang = 40; Kd_ang = 10;
Kp1_length = 194.89; Ki1_length = 97.44;
printf("\nPress any key to start.....");
    sound(700);
    getch();
    nosound();
//ts=0.00;
run_time = 0.00;
start = clock();

```

```

do
{ end = clock();
  ts = (end - start) / CLK_TCK ;
  if (ts >= sam_time)
  {
    ang = READ_ANGLE_RADIAL();
    ang_err = ang_ref - ang;
    dif_ang_err = (ang_err - ang_err_old) / ts;
    con_ang = (Kp_ang * ang_err) + (Kd_ang * dif_ang_err);
    pos = READ_REAL_POS();
    pos_old = pos;
    pos_old1 = pos_old;
    pos_err = (pos_ref - pos);
    dif_pos = ((pos - pos_old) / ts);
    con_i = ((Ki_pos * ts * pos_err);
    con_pd = ((Kp_pos * pos) - (Kp_pos * pos_old) + ((Kd_pos / ts) * pos)
              + ((2 * Kd_pos / ts) * pos_old) + (Kd_pos / ts) * pos_old1);
    con_pos = con_i - con_pd + con_pos1;
    con_float = con_pos - con_ang;
    con_pos1 = con_pos ;
  }
// rope length
  outp(adr0 + 0x0c, 2);
  lByte = inp(adr0 + 0x00);
  mByte = inp(adr0 + 0x00);
  hByte = inp(adr0 + 0x00);
  dwCounter = lByte + ((unsigned long)mByte << 8) + ((unsigned long)hByte << 16);
  if (dwCounter < 0x7ffff)
  { dwCounter = dwCounter;
    rope_length = (dwCounter * 0.00002826) ; }
  else
  { dwCounter = 0xfffff - dwCounter ;
    rope_length = -(dwCounter * 0.00002826) ; } //1 round (8000 pulse) = 5.6 cm

```

```

//rope_length=(dwCounter*0.00000375); // rope length start at 23 cm.
// control signal for rope length
    length_err          = (move_length - rope_length);
    //dif_length        = (rope_length-rope_old)/ts;
    length_Kp1          = (Kp1_length*rope_length)-(Kp1_length*rope_length_old);
    length_Ki1          = ((Ki1_length*length_err*ts)+length_Ki1_old);
    con_length          = (length_Ki1-length_Kp1+ con_length_old);
                        con = (int)(con_float);

    rope_length_old = rope_length;
    con_length_old = con_length;
    pos_length = (pos_ref / 100)*90;
    /* con=con+dis;
    if (run_time > 25)
        {dis=-9;} */
    /* if (run_time > 20)
        { pos_ref = pos_ref1;
          move_length = length_ref1; }
    if (run_time > 40)
        { pos_ref = pos_ref2;
          move_length = length_ref2;; }
    if (run_time > 60)
        { pos_ref = pos_ref3;
          move_length = length_ret; } */
    if (pos >= pos_length)
        { move_length = length_ret; }
    if (con >= 0)
        { if ( con >= 100)
            { con=abs((100)+128);
              outp(drive_port,con);}
        else
            { con=abs(con+128);
              outp(drive_port,con)}}

```

```

else
{ if ( con <= -100)
    { con=abs(-100);
      outp(drive_port,con);}

else

{ con=abs(con);
  outp(drive_port,con);} }
if (con_length > 24)
    { con_length=24;}
if (con_length < -24)
    { con_length=-24;}
/* if (rope_length > 0.8)
    { rope_length=0.00;}
if (rope_length < 0.00)
    { rope_length= 0.00;} */
// send Control signal to Driver motor
volt= con_length;
hexout=((volt+24)/48)*4095;
    DaData[0] = hexout;
    ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
    {printf("\n");
printf("time = %4.4f",run_time);
printf("  ang = %4.4f",ang);
printf("  pos = %4.4f",pos);
//printf("  difpos= %4.4f",dif_pos);
printf("  length = %4.4f",rope_length);
//printf("  diflength = %4.4f",dif_length);
//printf("  length = %4.4f",con);
printf("  con_l = %4.4f",con_length);
    //printf("  i = %4.4f",con_i);}
run_time = run_time + ts;
start = end;

```

```

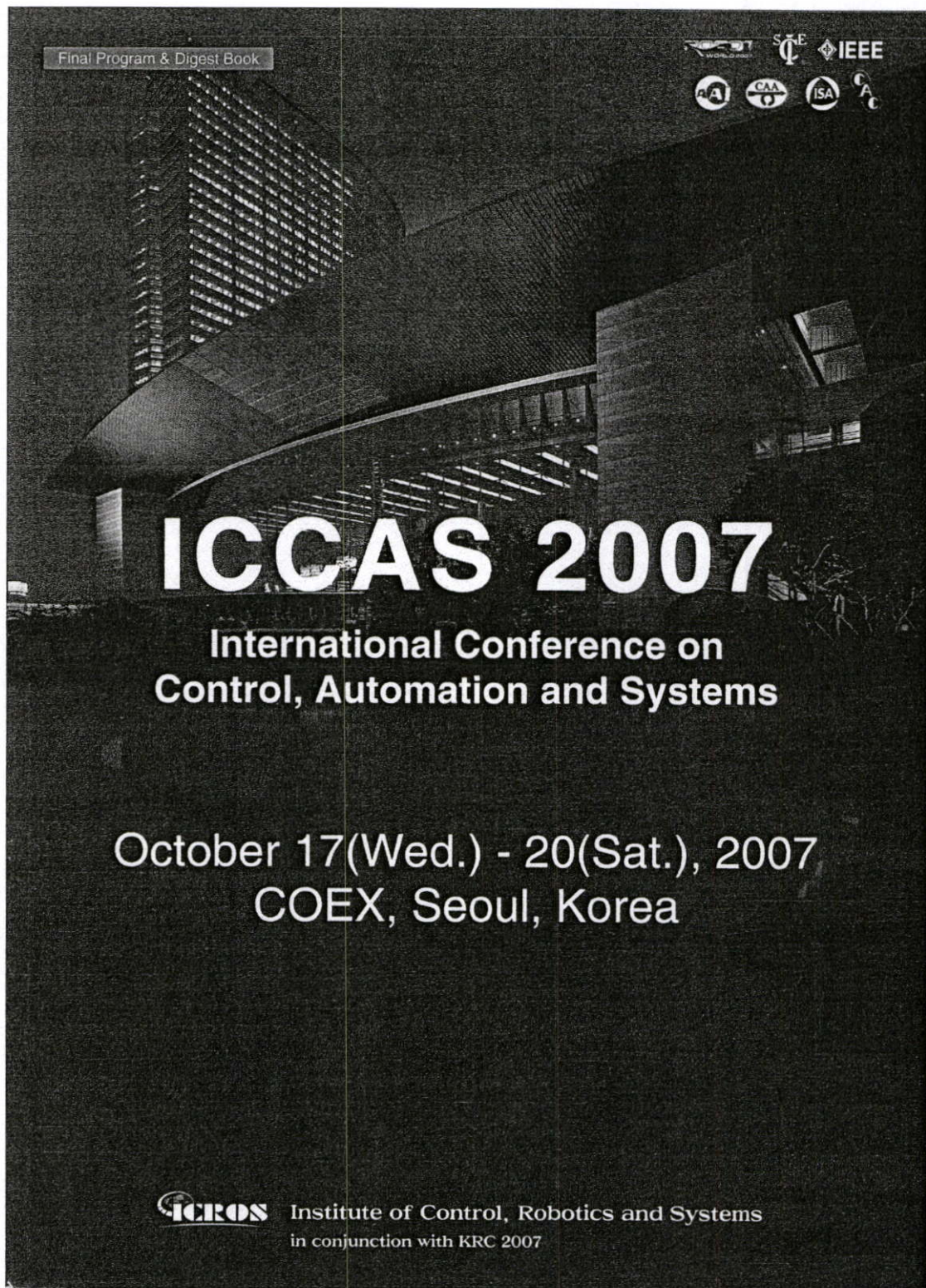
    rope_old = rope_length; pos_old = pos; pos_ft_old1 = pos_ft_old; pos_ft_old = pos_ft;
    pos_err_old1 = pos_err_old; pos_err_old = pos_err; ang_err_old = ang_err;
    con_pos_old = con_pos; con_length_old = con_length; length_err_old1 = length_err_old;
    length_err_old = length_err; length_ft_old=length_ft; length_Ki1_old = length_Ki1;
    con_i_old = con_i; value_length = 0.8 - rope_length;
fprintf(run_fin,"\n"); fprintf(run_fin,"%4.4ft",run_time); fprintf(run_fin,"%4.4ft",ang);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",pos); //fprintf(run_fin,"%4.4ft",dif_pos); //fprintf(run_fin,"%d\t",con);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",value_length); //fprintf(run_fin,"%4.4ft",rope_length);
fprintf(run_fin,"%4.4ft",con_float); fprintf(run_fin,"%4.4ft",volt);
//fprintf(run_fin,"%4.4ft",dif_length);}}
while (bioskey(1) == 0); fprintf(run_fin,"\n ];"); fclose(run_fin);

// clear all data set
hexout=((0+24)/48)*4095;
    DaData[0] = hexout;
ret = DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
outp(drive_port,0); DaClose(hDevice); CLOSE_DTOA(); return(0);}
//-----
// Function    void OpenBoard(void)
//-----
HANDLE OpenBoard(void)
{HANDLE hDevice;
    hDevice = DaOpen(3345, 0x0001, 0);
    return hDevice; }
void CLOSE_DTOA(void)
{char *pString;
    pString = "/R";
    spawnl(P_WAIT,"dadrv.exe",pString,NULL);}
void INITIAL_DTOA(void)
{
    char *pString;
    pString = "/B=1";
    spawnl(P_WAIT,"dadrv.exe",pString,NULL);}

```

ภาคผนวก ง.

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์




Final Program & Digest Book

IEEE
ISA
CAA
RAE

ICCAS 2007

International Conference on
Control, Automation and Systems

October 17(Wed.) - 20(Sat.), 2007
COEX, Seoul, Korea

 **ICROS** Institute of Control, Robotics and Systems
in conjunction with KRC 2007

I-PD and PD Controllers Designed by CRA for Overhead Crane System

Wanlop Sridokbuap¹, Songmoung Nundrakwang¹, Taworn Benjanarasuth¹, Jongkol Ngamwiwit¹ and Noriyuki Komine²

¹ Faculty 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, Email: kjongko@kmitl.ac.th

² School of Information Science and Technology, Tokai University, Kanagawa 259-1292, Japan
(Tel: +81-463-58-1211, E-mail: komine@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp)

Abstract: An overhead crane system controlled by an I-PD controller incorporating with PD controller is presented in this paper. The characteristic ratio assignment method is employed to design the I-PD controller and the PD controller for controlling the position of trolley and for controlling the load swing angle of the overhead crane system, respectively. Using the concept of characteristic ratio assignment method, the speed of the step response can also be increased by using a design factor k . The simulation results show that the step response can reach to the desired position without overshoot and with small load swing angle. The slightly change of the step responses when changing the parameters of the overhead crane system are also shown. The simulation results also show that when the speed of the step response is increased, the load swing angle is large related to the speed increased while the disturbance effect rejection is fast.

Keywords: Characteristic ratio assignment, overhead crane system, I-PD, PD.

1. INTRODUCTION

The overhead crane systems are widely used in industrial applications for loading and unloading in the factory. The control purposes are to transport loads quickly, safely and accurately, and to reduce load swing angle. The control schemes previously presented for the crane system include fuzzy control [1], adaptive control [2] and neural network [3]. These methods give good performances; however, they are complicated to design and implement.

A new design approach called characteristic ratio assignment (CRA) has been recently proposed by Y. C. Kim et al [4]. The generalized time constant and characteristic ratios are introduced so that a desired characteristic polynomial resulting in a desired response can be specified. Small or zero overshoot with arbitrary speed in the step response is expected when CRA method is used to assign an appropriate controller. If the speed of the desired response is needed to increase, CRA method also introduces a factor to improve it.

In this paper, an I-PD controller and a PD controller designed by CRA method for corporately controlling the overhead crane system to the desired position with small load swing angle is presented. The speed of the step response can also be increased by CRA method with a design factor k . Reference input tracking, load variation, rope length variation and disturbance effect rejection properties of the designed crane control system are investigated by simulations and reported in this paper.

2. DYNAMIC MODEL OF OVERHEAD CRANE

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

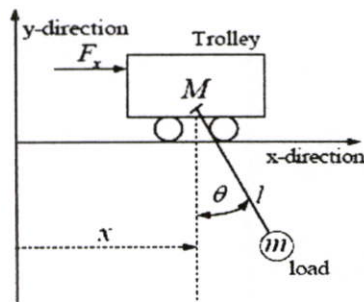


Fig. 1 Model of overhead crane system.

The mathematical model of overhead crane system can be found based on the Euler-Lagrange's equation of motion expressed as

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q, \quad (1)$$

where q is the generalized coordinates, Q is the generalized force of system and L is the Lagrangian.

From Fig. 1, the kinetic energy of the trolley and load (KE) and the potential energy of load (PE) are evaluated as

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

$$PE = -mgl \cos \theta \quad (3)$$

respectively, where g is the gravitational acceleration. Hence, the Lagrangian of the crane can be written as

$$L = KE - PE = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}l \cos \theta + \dot{\theta}^2 l^2) + mgl \cos \theta. \quad (4)$$

In this case, $q = [x \ \theta]^T$ and the equations of motion can be derived as

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

and

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

where b_m is the viscous damping coefficient of the trolley motion. Consequently, Eq. (5) and Eq. (6) can be respectively rewritten as

$$F_x - b_m \dot{x} = (M + m)\ddot{x} + ml(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) \quad (7)$$

and

$$0 = l\ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta. \quad (8)$$

The control force of the trolley F_x , when the electrical dynamic is considered negligible, can be approximated to be

$$F_x = K_m I_m \cong K_r D \quad (9)$$

where K_m and I_m are the trolley motor constant and torque respectively. D is duty cycle which is the input to current driver of the trolley motor and K_r is a force constant of motion. By using Lyapunov's linearization method, the linear equation of motion in Eq. (7) and Eq. (8) can be given by

$$\ddot{x} = \frac{-b_m}{M} \dot{x} + \frac{K_r}{M} D \quad (10)$$

and

$$\ddot{\theta} = \frac{b_m}{Ml} \dot{x} - \frac{(M+m)g}{Ml} \theta - \frac{K_r}{Ml} D, \quad (11)$$

and their transfer functions respectively are

$$\frac{x(s)}{D(s)} = \frac{K_r}{s(Ms + b_m)} \quad (12)$$

and

$$\frac{\theta(s)}{D(s)} = \frac{-MK_r s}{M^2 l s^3 + Mb_m l s^2 + (M+m)Mg s + (M+m)b_m g}. \quad (13)$$

These transfer functions are employed to design the appropriate parameters of controllers for the overhead crane system by CRA method. Note that the values of b_m and K_r are not known and can be found from the experiment.

3. CRA METHOD

Given a closed-loop transfer function for assigning an appropriate controller [4]

$$G(s) = \frac{a_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (14)$$

where its closed-loop polynomial is expressed as

$$P(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0, \forall a_i > 0. \quad (15)$$

From Eq. (15), the following characteristic ratios are defined as

$$\alpha_1 = \frac{a_1^2}{a_0 a_2}, \alpha_2 = \frac{a_2^2}{a_1 a_3}, \dots, \alpha_{n-1} = \frac{a_{n-1}^2}{a_{n-2} a_n} \quad (16)$$

and the generalized time constant corresponding to the response speed of system with $P(s)$ is defined to be

$$\tau = \frac{a_1}{a_0}. \quad (17)$$

The coefficients a_i of $P(s)$ can also be expressed as

$$a_1 = a_0 \tau \quad (18)$$

$$a_i = \frac{a_0 \tau^i}{\alpha_{i-1} \alpha_{i-2} \alpha_{i-3} \dots \alpha_2^2 \alpha_1^{i-1}} \quad \text{for } i = 2, \dots, n. \quad (19)$$

For a set of values of α_i 's, τ and a_0 , the corresponding polynomial $P(s)$ can be determined. The sufficient condition for stability of CRA method can be ensured by the rule of Lipatov and Sokolov [6] as

$$\sqrt{\alpha_i \alpha_{i+1}} > 1.4656, i = 1, 2, \dots, n-2 \quad (20)$$

$$\alpha_i \geq 1.12374 \alpha_i^*, i = 2, 3, \dots, n-2 \quad (21)$$

$$\alpha_i^* = \frac{1}{\alpha_{i+1}} + \frac{1}{\alpha_{i-1}}, \alpha_n = \alpha_0 = \infty. \quad (22)$$

By changing the value of the generalized time constant to be

$$\tau = \frac{1}{k} \left(\frac{a_1}{a_0} \right), \quad (23)$$

where $k > 1$, the speed of step response can be adjusted without changing the characteristic ratios. Hence, the closed-loop transfer function in Eq. (14) becomes

$$G_k(s) = \frac{k^n a_0}{a_n s^n + k a_{n-1} s^{n-1} + \dots + k^{n-1} a_1 s + k^n a_0} \quad (24)$$

In next section, the I-PD controller and PD controller designing procedure using the CRA method will be described respectively.

4. CONTROLLER DESIGN

The structure of overhead crane control system with I-PD controller for controlling the trolley position and PD controller for controlling the load swing angle of the crane is shown in Fig. 2. In the following sub-sections, the controller design procedure for each controller is described.

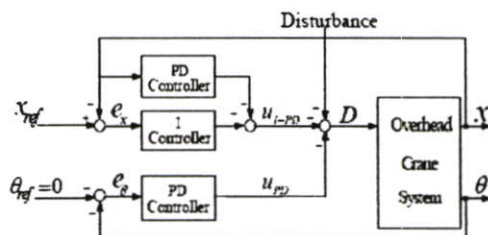


Fig. 2 Overhead crane control system.

4.1 I-PD Controller Design

From Fig. 2, the control signal $U_{I-PD}(s)$ of I-PD controller designed by CRA method for trolley position control is expressed as

$$U_{I-PD}(s) = \frac{K_i}{s} E_x(s) - (K_p + K_d s) X(s) \quad (25)$$

where $E_x(s)$ is the error signal of the reference trolley position $X_{ref}(s)$ and the desired trolley position. K_i is the integral gain of the integral controller and K_p and K_d are the proportional and derivative gains of the feedback controller respectively. The designing steps are then given as follows:

- (1) Assign the appropriate values of the characteristic ratios α_1 , α_2 and the generalized time constant τ to find the closed-loop characteristic polynomial $P(s)$ of Eq. (15).
- (2) Find the closed-loop characteristic polynomial from the closed-loop transfer function which is included the unknown parameters of I-PD controller and equate it to the closed-loop characteristic polynomial obtained from step (1) to find the values of K_p , K_i and K_d .

If response speed improvement is required, the factor k must be increased greater than one and repeat the design procedure.

4.2 PD Controller Design

The control signal of PD controller for load swing angle control in Fig. 2 is

$$U_{PD}(s) = (K_p + K_d s) E_\theta(s) \quad (26)$$

where $E_\theta(s)$ is the error signal. K_p and K_d are the proportional and derivative gains of the controller. Then, the designing steps are given as follows:

- (1) Follow step (1) as stated in sub-section 4.1.
- (2) Find the closed-loop characteristic polynomial from the closed-loop transfer function which is included the unknown parameters of PD controller and equate it to the closed-loop characteristic polynomial obtained from step (1) to find the values of K_p and K_d .

Next section is the simulation results of the position and load swing angle when all designed controllers are employed.

5. SIMULATION RESULT

The transfer functions of Eq. (12) and Eq. (13) for the crane system are first found by using parameter values shown in Table 1 [5].

Table 1 Parameter of overhead crane system.

| | |
|---|-------------------------|
| Mass of trolley (M) | 6.12 kg |
| Mass of load (m) | 1.0 kg |
| Rope length (l) | 0.8 m |
| Gravitation acceleration (g) | 9.81 m/sec ² |
| Viscous damping coefficient of motion (b_m) | 12.32 N·sec/m |
| Force constant of motion (K_r) | 0.57024 |

Then, the gains of I-PD and PD controllers are respectively assigned for factor $k=1.0$ from the design procedures stated in sub-section 4.1 and 4.2 are summarized in Table 2.

Table 2 Parameters of the controllers when $k=1.0$.

| Controller | α_1 | α_2 | τ | K_p | K_i | K_d |
|------------|------------|------------|--------|-------|-------|-------|
| I-PD | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 38.98 | 9.74 | 19.49 |
| PD | 3.02 | 0.09 | 0.32 | 40.0 | - | 10.0 |

The control specifications are to control the trolley moving from 0 m to 1.0 m with small load swing angle.

5.1 System Responses

The results of trolley motion control and the load swing angle control when the value of the factor $k=1.0$ are firstly investigated as shown in Fig. 3.

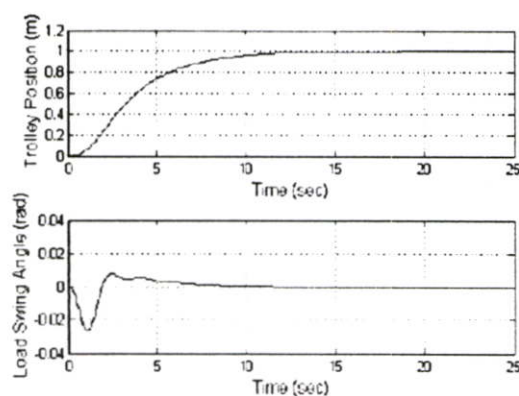


Fig. 3 Crane system responses.

It is seen that the crane can move to the desired position without overshoot and steady-state error. The load swing angle is also small. The system performances are summarized in Table 3.

5.2 System responses with the variation of factor k

In CRA method, the speed of the response can be adjusted by a factor k . The responses when k in the I-PD closed-loop transfer function increased from $k = 1.0$ to $k = 1.8$ are also included in Fig. 4.

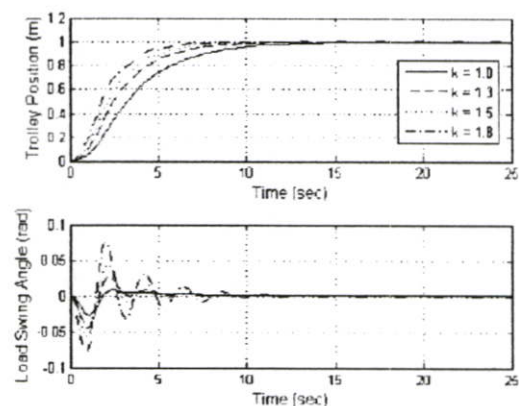
Fig. 4 Responses when the factor k is varied.

Table 3 I-PD controller parameters and performances.

| k | K_p | K_i | K_d | t_r (sec) | t_s (sec) |
|-----|--------|-------|-------|----------------|----------------|
| 1.0 | 38.98 | 9.74 | 19.49 | 6.4 | 12.2 |
| 1.3 | 65.88 | 21.41 | 31.18 | 4.9 | 9.4 |
| 1.5 | 87.71 | 32.89 | 38.98 | 4.2 | 8.2 |
| 1.8 | 126.31 | 56.84 | 50.68 | 3.5 | 6.6 |

It can be observed from the figure that the larger value of the factor k will result the faster response but with

larger load swing angle. The system performances when the factor k is varied of the system are also summarized in Table 3.

5.3 Effect of load variation

In this subsection, the effect of load mass varied from 0.3 kg to 3.0 kg is investigated. The responses of the trolley position and load swing angle of overhead crane system are shown in Fig. 5 and it is seen that the variation of load does not significantly affect the system response.

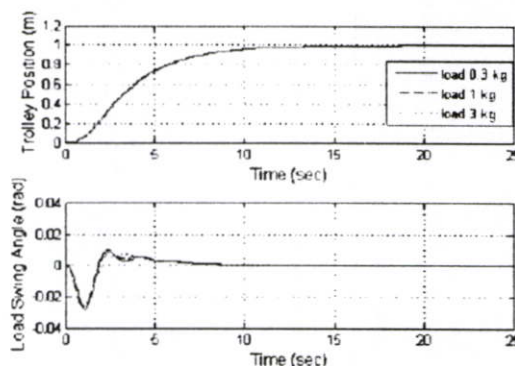


Fig. 5 Responses when load is varied.

5.4 Variation of rope length

The results of trolley motion control and the load swing angle control when the rope length is changed from 0.7 m to 0.9 m are shown in Fig. 6. It can be seen that the response are not different when rope length is varied. Hence, the variation of rope length does not significantly affect the system response.

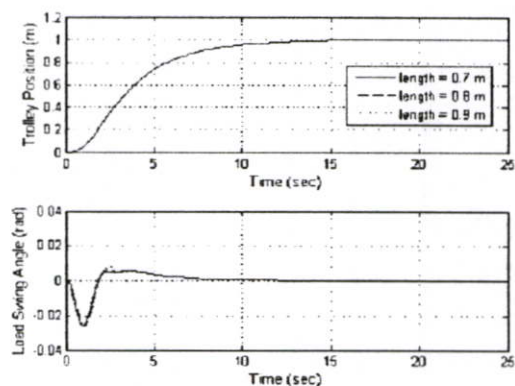


Fig. 6 Responses when rope length is varied.

5.5 Disturbance effect rejection

In this section, the capability of disturbance effect rejection with different values of factor k is investigated. It is seen from Fig. 7 that the larger the value of k , the faster the disturbance rejection of the trolley position can

be achieved. However, the larger value of the factor k will cause the larger load swing angle when the disturbance entering at the trolley position.

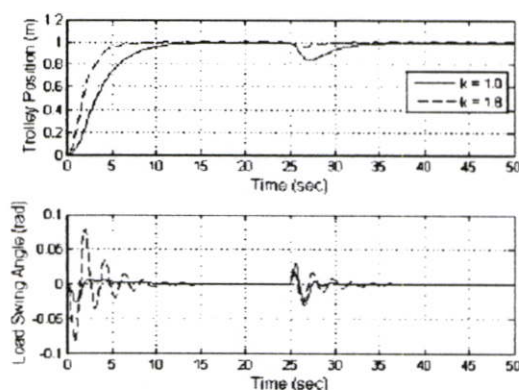


Fig. 7 Disturbance effect rejection capability.

6. CONCLUSIONS

In this paper, the I-PD and PD controllers designed by using the CRA method for the trolley position and load swing angle of overhead crane system have been proposed. The advantage of CRA method for designing the control system so that the system performances are satisfied not only in the transient responses but also in the steady-state responses, have also been confirmed by the simulation results. In addition, the improvement in responses' speed of the trolley position without affecting the overshoot can be achieved by increasing the value of the factor k greater than one in I-PD controller design.

REFERENCES

- [1] Y. Suzuki, S.-I. Yamada and H. Fufikawa, "Anti-Swing Control of the Container Crane by Fuzzy Control," *Proceeding of the International Conference on Industrial Electronic Control and Instrumentation*, Vol. 1, pp. 230-235, 1993.
- [2] H. Butler, G. Honderd and J. Van Amerongen, "Model Reference Adaptive Control of a Gantry Crane Scale Model," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 11, No. 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] Y. C. Kim, L. H. Keel and S. P. Bhattacharya, "Transient Response Control via Characteristic Ratio Assignment," *IEEE Transactions on Automatic Control*, December 2003, Vol. 48, No. 12, pp. 2238-2244.
- [5] A. Tantaworasilp, T. Benjanarasuth, J. Ngamwiwit, N. Komine, "Application of Coefficient Diagram

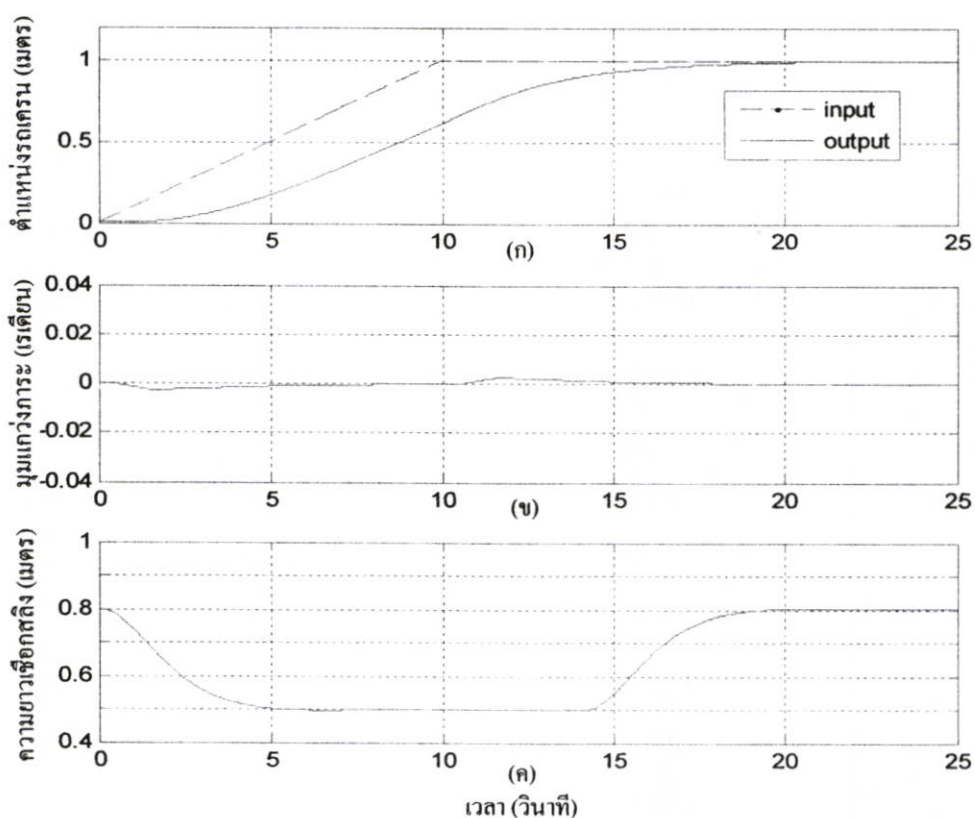
Method for Multivariable Control of Overhead Crane System," *International Conference on Control, Automation and Systems*, 22-25 Oct. 2003, pp. 2240-2245.

- [6] A. V. Lipatov and N. I. Solokov, "Some Sufficient Conditions for Stability and Instability of Continuous Linear Stationary Systems," *Automation and Remote Control*, Vol. 39, pp. 1285-1291, 1979.

ภาคผนวก จ.
การจำลองเพิ่มเติม

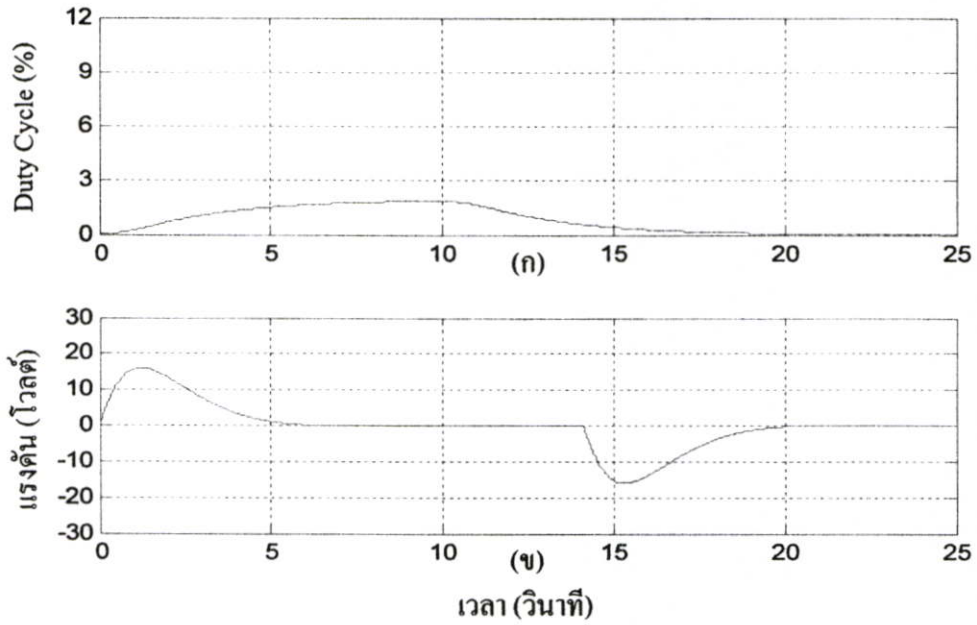
จ.1 ผลตอบสนองของระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียง

การจำลองนี้จะนำตัวควบคุม I-PD เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน ตัวควบคุม PD เพื่อลดมุมแกว่งของภาระ และตัวควบคุม I-P เพื่อควบคุมความยาวของเชือกสลิงของระบบเครนเหนือศิริยะ เมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1 0.3 และ 0.5 เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน แต่มุมแกว่งของภาระ และการควบคุมความยาวของเชือกสลิง ยังคงใช้อินพุตแบบขั้นเช่นเดิม โดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้งสามจะใช้ในตารางที่ 5.2 มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบตัวควบคุมว่า มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิง เป็นไปตามต้องการหรือไม่ โดยการจำลองจะกำหนดให้รถเครนเคลื่อนที่ไปตำแหน่ง 1 เมตร พร้อมกับลดมุมแกว่งของภาระให้ไม่เกิน 0.03 เรเดียน และหยุดแกว่งที่มุม 0 เรเดียน ในขณะที่เดียวกันก็ควบคุมความยาวเชือกสลิงจากความยาว 0.8 เมตรไปที่ความยาว 0.5 เมตร แล้วกลับมาที่ความยาว 0.8 เมตรเมื่อรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0.9 เมตร ผลตอบสนองของระบบควบคุม และสัญญาณควบคุม เมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1 0.3 และ 0.5 แสดงตามลำดับดังนี้



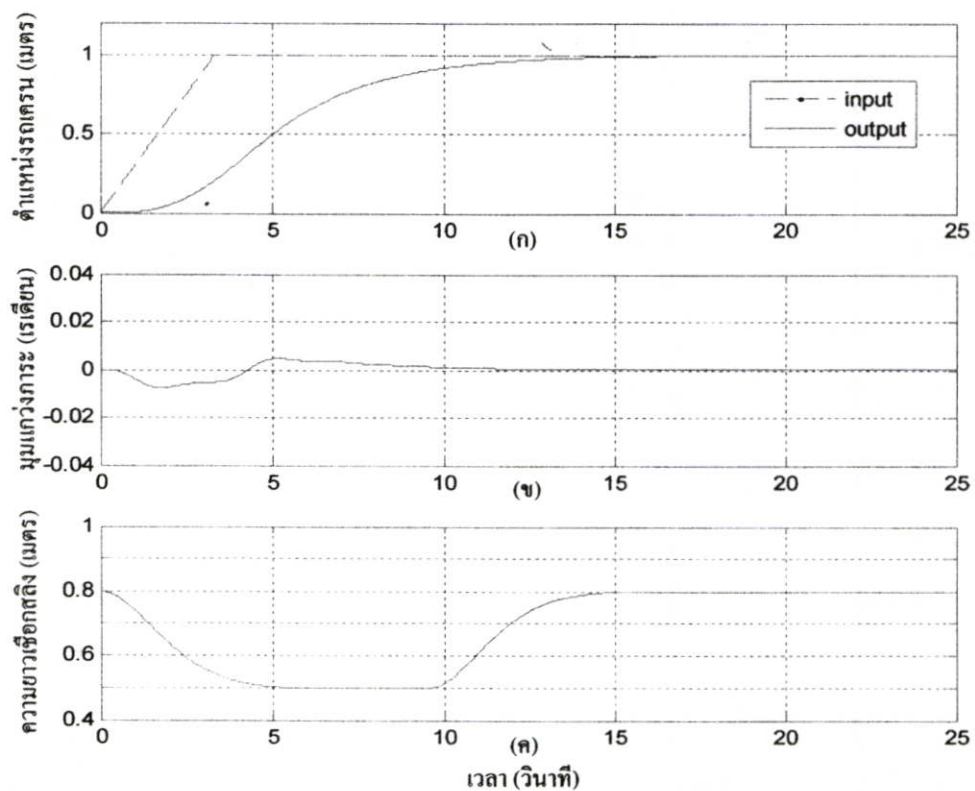
(ก) ตำแหน่งของรถเครน (ข) มุมแกว่งของภาระ (ค) ความยาวเชือกสลิง

รูปที่ จ.1 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1 เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน

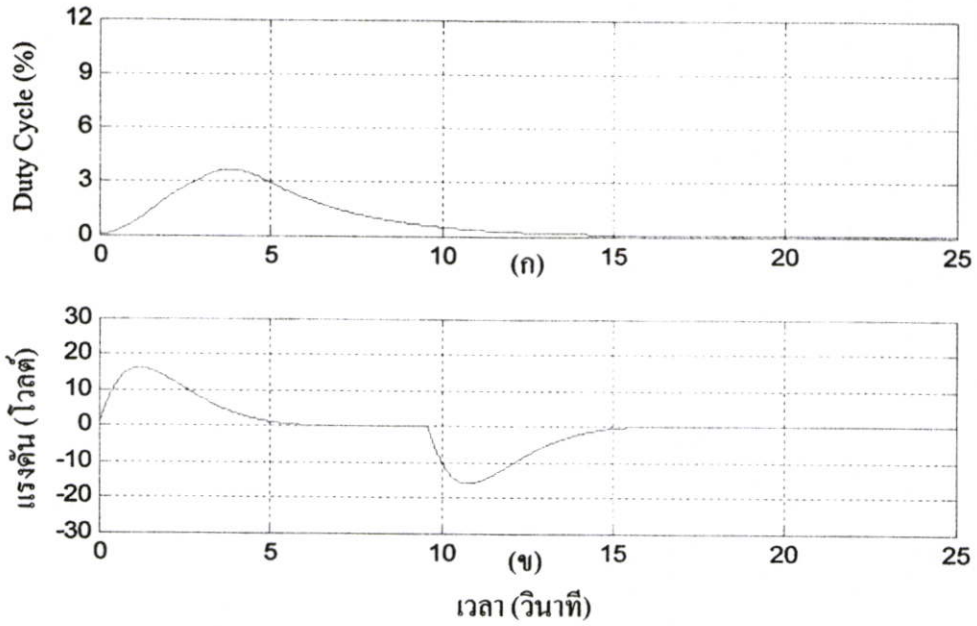


(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ จ.2 สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1
เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน

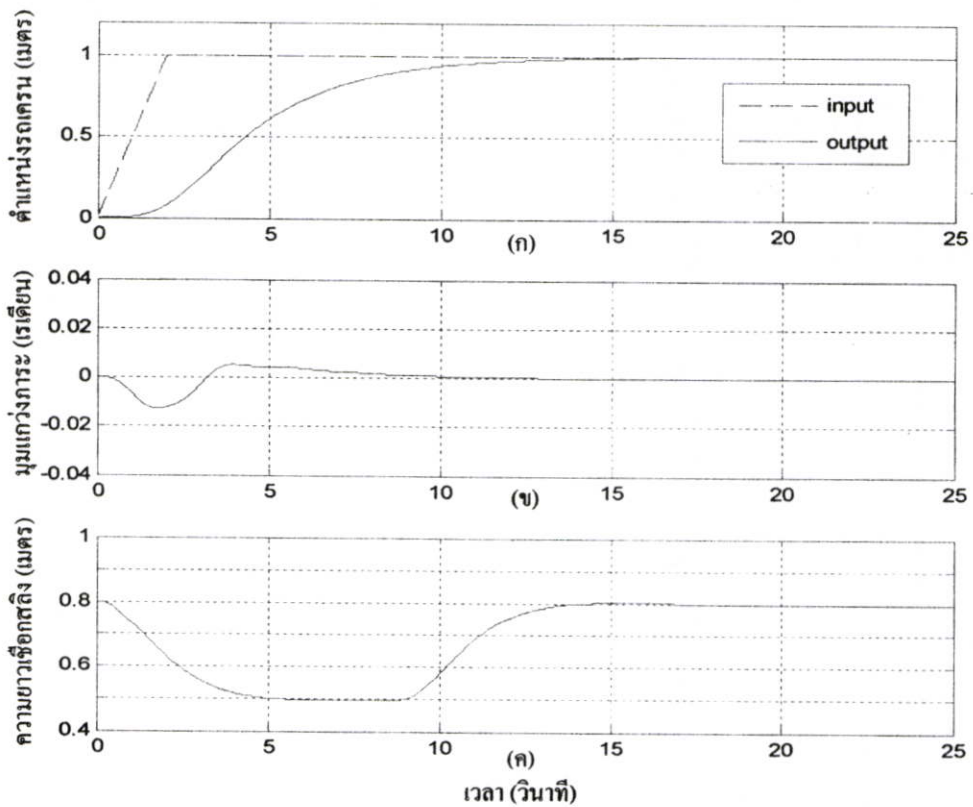


รูปที่ จ.3 ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.3
เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน

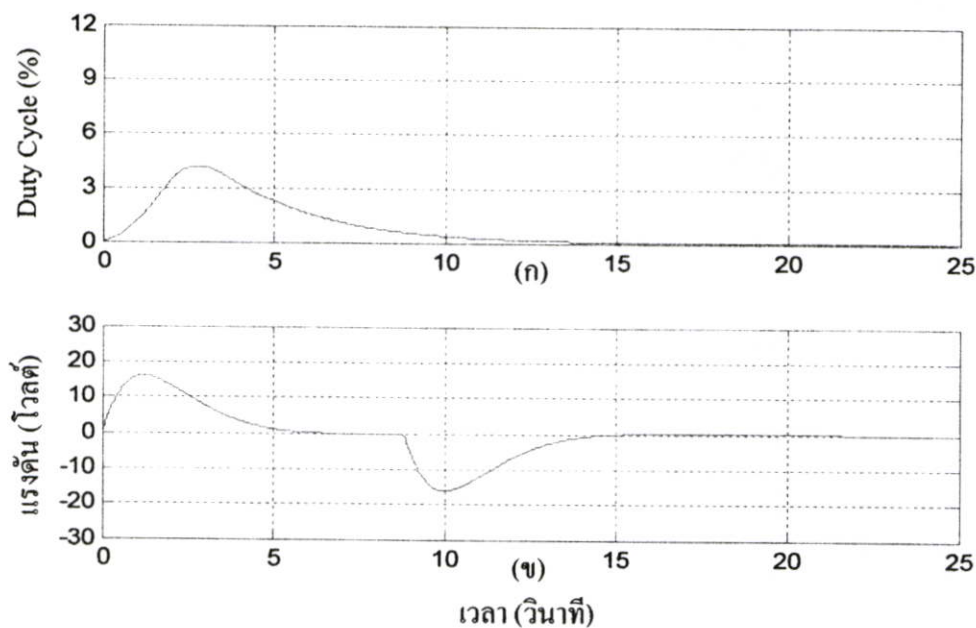


(ก) อินพุต D , ของรถเครน (ข) อินพุต V , ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ ๑.๔ สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.3
เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน



รูปที่ ๑.๕ ผลตอบสนองระบบควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.5
เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน



(ก) อินพุต D_i ของรถเครน (ข) อินพุต V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิง

รูปที่ ๖.6 สัญญาณควบคุมเมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.5
เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครน

จากรูปที่ ๖.1 (ก) ๖.3 (ก) และ ๖.5 (ก) พบว่าเมื่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงมีความชันมากขึ้น ผลตอบสนองของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครนที่ได้จะเร็วขึ้น และมีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวมากขึ้น และตัวควบคุม I-PD ก็สามารถควบคุมให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกิน ในขณะที่เดียวกันตัวควบคุม PD สามารถลดมุมแกว่งของภาระไม่ให้เกิน 0.03 เรเดียนและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรแล้ว ดังผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ ๖.1 (ข) ๖.3 (ข) และ ๖.5 (ข) และในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงเพื่อยกภาระให้พ้นสิ่งกีดขวางพบว่า ตัวควบคุม I-P สามารถควบคุมความยาวเชือกสลิงให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยผลตอบสนองไม่มีค่าพุ่งเกินและค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว และผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ ๖.1 (ค) ๖.3 (ค) และ ๖.5 (ค)

สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมวงปิด เมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียงที่มีความชันเท่ากับ 0.1 0.3 และ 0.5 เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถเครนดังรูปที่ ๖.2 (ก) ๖.4 (ก) และ ๖.6 (ก) พบว่า เมื่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงมีความชันมากขึ้น สัญญาณควบคุม D_i ที่ทำให้รถเครนเคลื่อนที่ก็จะมากขึ้น สำหรับสัญญาณควบคุม V_i ของการควบคุมความยาวเชือกสลิงจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยจะต่างกันที่เวลาที่ใช้ในการปล่อยเชือกสลิงเท่านั้นดังรูปที่ ๖.2 (ข) ๖.4 (ข) และ ๖.6 (ข)

สรุปผลการจำลอง

จากการจำลองเพิ่มเติม พบว่า เมื่อป้อนอินพุตแบบลาดเอียง เข้าไปในการเคลื่อนที่ของรถ เคน ตัวควบคุม I-PD ก็มีประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณอ้างอิงเป็นไปตามต้องการ โดยไม่มีค่าพุ่งเกิน เมื่อความชันเพิ่มขึ้นผลตอบสนองการเคลื่อนที่ของรถ เคนจะเร็วขึ้นแต่มีค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวมากขึ้น และตัวควบคุม PD ก็สามารถลดมุมแกว่งของภาระไม่ให้เกิน 0.03 เรเดียนและหยุดแกว่งได้อย่างรวดเร็วหลังจากที่รถ เคนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 1 เมตรแล้ว ในส่วนของการควบคุมความยาวเชือกสลิงนั้น เมื่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงที่ป้อนเข้าที่การเคลื่อนที่ของรถ เคนมีความชันเพิ่มขึ้น จะทำให้เวลาในการปล่อยภาระเร็วขึ้น เนื่องจากรถ เคนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

ประวัติผู้เขียน

นายวัลลภ สีดอกบวบ เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่ตำบลคลองวาฬ อำเภอเมือง ประจวบคีรีขันธ์ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ในปี พ.ศ. 2542 จากนั้นสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในปี พ.ศ. 2546 และเข้าทำงานที่บริษัท สหวิริยาสติลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) และต่อมาได้รับทุนการศึกษาจากบริษัท เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2549