



รายงานฉบับสมบูรณ์

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเครน

Controller Design for Crane Systems

รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์ (Assoc. Prof. Dr. Jongkol Ngamwiwit)

ผศ.ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ (Asst. Prof. Dr. Nontawat Chuladaycha)

ผศ. ถาวร เบญจนราษฎร์ (Asst. Prof. Taworn Benjanarasuth)

ผศ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ (Asst. Prof. Sumit Panaudomsup)

RCT
TJ
1363
ก 52
อ. ดอน อิศรากร (Mr. Don Isarakorn)

อ. สONGเมือง นันทขว้าง (Mr. Songmoung Nundrakwang)

นายสมรรถชัย ปัญญา (Mr. Samatthachai Panya)

นายสันติ ภูวรรณ (Mr. Santi Puwan)

เลขหมู่..... 83632
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี... 10 ก.ย. 2551

ห้องปฏิบัติการวิจัย Control and Mechatronics Laboratory

โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กันยายน พ.ศ. 2549

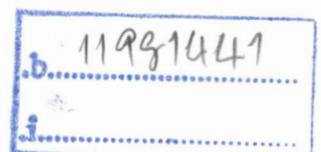
Control and Mechatronics Laboratory

Research Center for Communications and Information Technology

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

September 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจาก โครงการสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (Research Center for Communications and Information Technology: ReCCIT) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2549 วงเงินงบประมาณ 72,890 บาท และได้รับความอนุเคราะห์อุปกรณ์ เครื่องมือในการทำโครงการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ กลุ่มผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปย่อ

ระบบคอนได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งทำให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ ในอดีตที่ผ่านมา มักอาศัยผู้ควบคุมในการควบคุมทำงานของคอน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันนี้ระบบคอนมีขนาดใหญ่มากขึ้น และมีความเร็วสูงขึ้นซึ่งยากจะควบคุมด้วยผู้ควบคุม การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับคอนจึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจ มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหลายวิธี เช่น การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี (fuzzy controller) [1] และตัวควบคุมแบบเฮชทู (H_2 controller) [2] เป็นต้น

เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของระบบคอนนั้น จะมีตัวแปรสแตตส์ตัว ($x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}$) โดยมีสองตัวแปร ($\dot{x}, \dot{\theta}$) ที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบคอนเพื่อควบคุมตำแหน่งของรถคอนและมุมแกว่งของภาระให้มีสมรรถนะดีและมีเสถียรภาพ โดยใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสแตตแบบเชิงเส้น (linear state feedback) ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (minimum-order observer) ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram method: CDM) [3] และนำเสนอผลการจำลองการควบคุมระบบคอนโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

โครงการวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการดำเนินการออกเป็น 5 ขั้นตอน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบคอนเหนือศีรษะ และทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการควบคุม
2. หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคอนเพื่อจะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม
3. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบคอน ซึ่งในโครงการนี้ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสแตต ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM
4. จำลองการควบคุมระบบคอนด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ
5. สรุปผลที่ได้จากการทำโครงการวิจัย และเขียนบทความวิจัยเพื่อนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการ

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด สำหรับระบบเครน โดยค่าของอัตราขยายการป้อนกลับสเตต และอัตราขยายออบเซอร์เวอร์ จะคำนวณหาได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของระบบร่วมกับแนวคิดของวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จากผลการจำลองระบบ พบว่า การออกแบบที่นำเสนอ ทำให้ระบบมีสมรรถนะดีและมีเสถียรภาพ

Abstract

This paper presents the state feedback controller with minimum-order observer design for crane system. Linear state feedback gain and observer gain are computed based on the linearized model of the crane system employing the concept of coefficient diagram method. The simulations show that the proposed design scheme results in the crane control system with stability and good performance.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทสรุปย่อ	II
บทคัดย่อ.....	III
คำย่อและสัญลักษณ์.....	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	1
1.3 รายละเอียดของโครงการวิจัย.....	2
บทที่ 2 เนื้อเรื่อง	3
บทที่ 3 ข้อวิจารณ์.....	16
บทที่ 4 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	17
บทที่ 5 เอกสารอ้างอิง.....	18
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก สรุปผลงานภายใต้โครงการ.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

b_m	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการเคลื่อนที่ของรถเข็น
F	แรงจากภายนอก
K_r	ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่
l	ความยาวเชือกสลิง
M	มวลของรถเข็น
m	มวลของภาระ
θ	มุมแกว่งของภาระ
$P(s)$	พหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด
$a_{n-1} \dots a_0$	สัมประสิทธิ์พหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด
$P_m(s)$	พหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิดที่อยู่ในรูปโมด
$P_o(s)$	พหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิด
T	เมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น
t_s	ช่วงเวลาเข้าที่
x	ตำแหน่งรถเข็น
x_a	สแตตัสส่วนที่สามารถวัดได้โดยตรง
x_b	สแตตัสส่วนที่จะประมาณค่า
$\sigma_{n-1} \dots \sigma_0$	สัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิด
τ	ค่าคงตัวเวลาสมมูล
γ_i	ค่าดรรชนีเสถียรภาพ
γ_i^*	ค่าจำกัดเสถียรภาพ
K	อัตราขยายการป้อนกลับสเตต
K_c	อัตราขยายการป้อนกลับสเตตที่อยู่ในรูปแบบสามารถควบคุมได้
K_e	อัตราขยายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการวิจัย

ระบบควบคุมได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งทำให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ ในอดีตที่ผ่านมา นั้น มักอาศัยผู้ควบคุมในการควบคุมทำงานของเครื่อง อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันนี้ระบบควบคุมมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความเร็วสูงขึ้นซึ่งยากจะควบคุมด้วยผู้ควบคุม การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเครื่องจึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจ มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโดยพารามิเตอร์ของผู้ควบคุมหลายวิธี เช่น การออกแบบตัวควบคุมพีซี และตัวควบคุมแบบเชชทุ เป็นต้น

เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของระบบเครื่องนั้น จะมีตัวแปรสแตตส์ตัว $(x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta})$ โดยมีสองตัวแปร $(\dot{x}, \dot{\theta})$ ที่ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้น โครงการวิจัยนี้ จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเครื่องเพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครนและมุมแกว่งของภาวะให้มีสมรรถนะดีและมีเสถียรภาพโดยใช้ตัวควบคุมป้อนกลับสแตตแบบเชิงเส้น ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (minimum-order observer) ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ และนำเสนอผลการจำลองการควบคุมระบบเครื่องโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในการศึกษาการควบคุมระบบเครื่องเหนือศีรษะเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพนั้น จะต้องศึกษาข้อมูลต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาโครงสร้างของระบบเครื่องเหนือศีรษะและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเพื่อให้เกิดความเข้าใจโครงสร้างและการทำงานต่างๆ ของระบบ ซึ่งจะนำไปสู่การควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพ
2. ศึกษาและทำความเข้าใจนิยามและความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสแตตพร้อมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครื่อง เพื่อควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพและมีสมรรถนะตามที่ต้องการ
3. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งจะช่วยในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อน เช่น โปรแกรม Matlab/Simulink เป็นต้น

1.3 รายละเอียดของโครงการขอบเขตของการศึกษา

ในรายงานฉบับนี้จะแบ่งออกเป็น 8 ส่วน โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 วัตถุประสงค์ และหลักการในการทำโครงการวิจัย

ส่วนที่ 2 อธิบายระบบคอนกรีตชนิดต่างๆ และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบคอนกรีต

ส่วนที่ 3 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM

ส่วนที่ 4 อธิบายวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบคอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ และการออกแบบขอบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

ส่วนที่ 5 ผลการจำลองการควบคุมระบบคอนกรีตเหนือศีรษะด้วยตัวควบคุมที่นำเสนอ

ส่วนที่ 6 ข้อวิจารณ์

ส่วนที่ 7 สรุป และข้อเสนอแนะ

ส่วนที่ 8 เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก



บทที่ 2

ระบบเครน

ระบบเครนเป็นระบบที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการขนย้ายวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ซึ่งระบบเครนจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพื่อใช้ยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ รวมถึงการนำระบบเครนมาใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกในงานก่อสร้างที่มีความสูงและต้องใช้เวลาในการทำงาน นอกจากนั้น ระบบเครนถูกนำมาใช้บนเรือเดินทะเลและในท่าเทียบเรือ เพื่อช่วยประหยัดเวลาค่าใช้จ่ายในการขนถ่ายวัตถุดิบต่างๆ ในการควบคุมการทำงานของระบบเครนที่ผ่านมานั้นจะควบคุมการทำงานด้วยมือ (manual operation) แต่ในปัจจุบันระบบเครนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความเร็วสูงซึ่งยากที่จะควบคุมการทำงานด้วยมือ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการค้นคว้าหาวิธีการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกและปลอดภัยมากขึ้น

2.1 ชนิดของเครน [4]

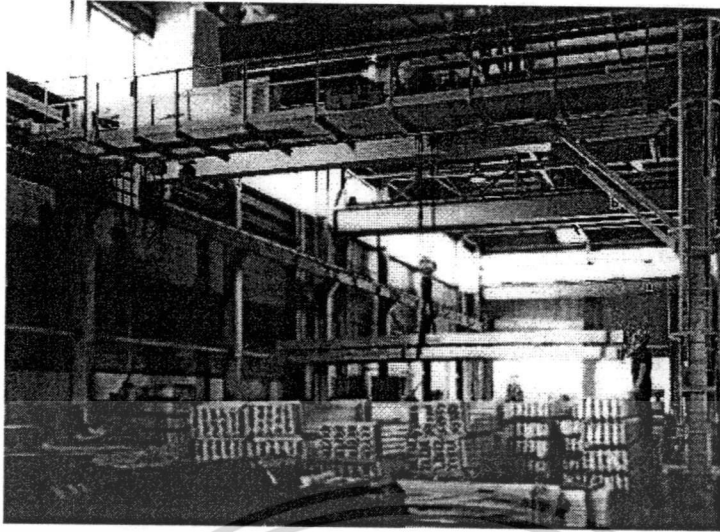
เครนถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามลักษณะการเคลื่อนที่และโครงสร้างทางพลวัต (dynamic) ดังนี้

2.1.1 เครนชนิดแกนตรี (gantry crane)

โครงสร้างของเครนชนิดแกนตรีแสดงดังรูปที่ 2.1 จะประกอบด้วยส่วนของตัวรถเครน โดยจะเคลื่อนที่บนแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาซึ่งจะมีความแข็งแรงมาก ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนจะอธิบายได้ด้วยแบบจำลองหนึ่งระดับขั้นความเสรี (one-degree-of-freedom model) ซึ่งแกนเหล็กนี้บางครั้งจะมีลักษณะเป็นรางรถไฟขนาบกันและติดตั้งอยู่ในที่สูง ด้วยลักษณะนี้เองบางครั้งจึงถูกเรียกว่า เครนชนิดบริดจ์ (bridge crane) หรือเครนเหนือศีรษะ (overhead crane) การเคลื่อนที่ของรถเครนจะเคลื่อนที่ในแนวนอน 2 ทิศทาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันใ้โรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนต่ำและสะดวกในการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆ

2.1.2 เครนชนิดโรตารี (rotary crane)

โครงสร้างของเครนชนิดโรตารีแสดงดังรูปที่ 2.2 จะประกอบด้วยแกนเหล็กยาวมีลักษณะเป็นแขนยื่นออกมาสามารถหมุนรอบในแนวนอนได้ และจะมีรถเครนใช้สำหรับยกภาระ โดยจะเคลื่อนที่อยู่บนแกนเหล็กยาว จากลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเครนและการหมุนของแกนเหล็กทำให้เครนชนิดนี้สามารถเคลื่อนย้ายภาระได้ทุกจุดในแนวนอนภายในขอบเขตของเครน ซึ่งในการยกภาระหรือวัตถุต่างๆ ทำได้โดยการควบคุมความยาวของสายเคเบิลที่ติดตั้งอยู่บริเวณแขนหรือฐานของเครนโดยจะเชื่อมต่อกับรถเครนเพื่อใช้ในการดึง



รูปที่ 2.1 เครนชนิดแกนตรึ



รูปที่ 2.2 เครนชนิดโรตารี

2.1.3 เครนชนิดบูมส์ (booms crane)

โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์แสดงดังรูปที่ 2.3 เครนชนิดนี้นิยมใช้บนเรือเดินทะเลและท่าเรือ โดยทั่วไปเครนชนิดบูมส์จะประกอบด้วยส่วนฐานที่สามารถหมุนได้ซึ่งยึดติดอยู่กับบูมส์ การเคลื่อนย้ายภาระสามารถทำได้โดยแขวนไว้ที่ส่วนปลายของบูมส์ซึ่งจะถูกดึงด้วยสายเคเบิล โดยมีลูกรอกช่วยในการดึงและเก็บสายเคเบิล และส่วนฐานของเครนชนิดนี้สามารถหมุนรอบและเคลื่อนที่ในแนวอนได้ทุกจุดภายในเรือ โครงสร้างของเครนชนิดบูมส์เหมาะสำหรับการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก ในขณะที่เครนชนิดแกนตรึและเครนชนิดโรตารีเหมาะสำหรับการยกภาระที่มีรูปทรงลักษณะต่างๆ ดังนั้น เมื่อต้องการยกภาระที่มีน้ำหนักมาก เครนชนิดบูมส์จะมีความแข็งแรงมากกว่าเครนชนิดแกนตรึและเครนชนิดโรตารีหันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 เครนชนิดบูมส์

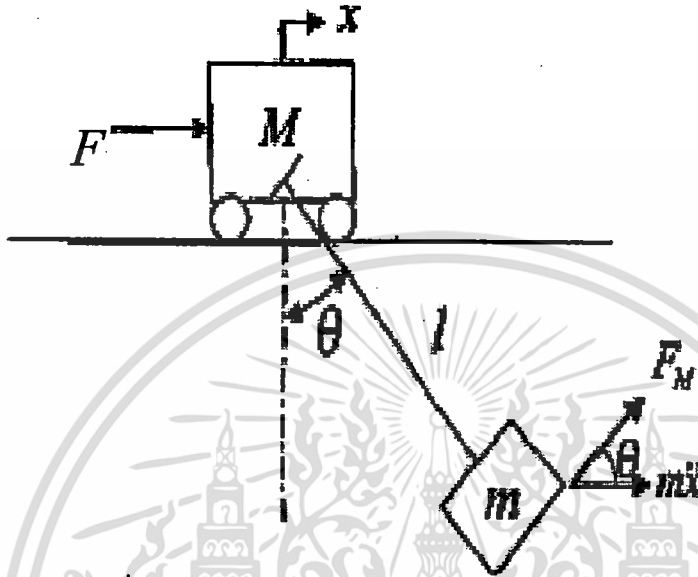
จากเครนชนิดต่างๆ ที่ได้กล่าวมานั้น ปัญหาสำคัญของระบบเครนคือ เครนมีขนาดใหญ่และสูง ดังนั้น ในการเคลื่อนย้ายภาระหรือสินค้าจึงต้องใช้ความระมัดระวังอย่างมาก การเคลื่อนที่ของรถเครนที่ใช้ดึงภาระจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับมุมแกว่งของภาระ กล่าวคือ หากรถเครนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วจะทำให้เวลาในการเคลื่อนย้ายภาระน้อย แต่ภาระจะแกว่งมาก ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ ควบคุมเครนและภาระได้ ในทำนองเดียวกัน หากรถเครนเคลื่อนที่ช้าจะทำให้ภาระแกว่งน้อยทำให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัยมากขึ้น แต่จะใช้ระยะเวลาที่มากซึ่งจะทำให้ค่าใช้จ่ายต่างๆ สูงขึ้นด้วย ดังนั้น ข้อสำคัญในการเคลื่อนย้ายภาระโดยใช้ระบบเครนจะมีอยู่ด้วยกัน 3 ข้อ ข้อแรก การควบคุมตำแหน่งของรถเครนเพื่อเคลื่อนย้ายภาระจะต้องมีความแม่นยำและใช้ระยะเวลาให้น้อยที่สุด ข้อที่สองจะต้องลดการแกว่งของภาระที่เกิดขึ้นขณะที่รถเครนเคลื่อนที่ และข้อสุดท้ายการควบคุมความยาวของเชือกสลิงที่ใช้ดึงภาระจะต้องมีความแม่นยำและรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายกับสิ่งกีดขวางต่างๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับผู้ควบคุมเครน ภาระ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในโรงงาน

โครงการวิจัยนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมป้องกันกลับสเตรตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครน เพื่อควบคุมระบบเครนเหนือศีรษะ โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถเครน และการแกว่งของภาระ เพื่อให้การเคลื่อนย้ายภาระมีความปลอดภัย ซึ่งในการออกแบบตัวควบคุมนั้น จำเป็นต้องทราบโครงสร้างหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่จะควบคุมก่อน ดังนั้น หัวข้อต่อไปจะอธิบายการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครนเหนือศีรษะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบครนเหนื่อศึระ

แบบจำลองทางกายภาพของระบบครน [2] แสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งประกอบด้วยรถครนและภาะระที่ถูกเชื่อมต่อดัวยเชือกสลึง



รูปที่ 2.4 แบบจำลองทางกายภาพของระบบครน [2]

โดยที่

ตำแหน่งรถครน (x)

มุมแกว่งของภาะระ (θ)

แรงจากภายนอก (F)

ความยาวเชือกสลึง (l)

มวลของภาะระ (m)

และ มวลของรถครน (M) เป็นพารามิเตอร์ของระบบครน

ดังนั้น สมการที่อธิบายการเคลื่อนที่ของตัวรถครนและสมการการเคลื่อนที่ของภาะระของระบบในรูปที่ 2.4 แสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ คือ

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

$$ml\ddot{\theta} = -mg \sin \theta + F_m \quad (2)$$

$$F_m = m\ddot{x} \cos \theta$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (1) และ (2) จะได้สมการของการเคลื่อนที่ของระบบครนดังนี้

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

โดยแรง F จะแปรผันตามแรงดัน u ที่ป้อนให้กับวงจรถับรถครน หรือ $F = K_r u$ และเมื่อระบบอยู่ในบริเวณจุดสมดุล $x=0, \theta=0, \dot{x}=0$ และ $\dot{\theta}=0$ จะได้ $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$ และ $\dot{\theta}^2 \approx 0$ ดังนั้น ระบบที่อยู่ในรูปปริภูมิสแตตเชิงเส้นเพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM คือ

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

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

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

บทที่ 3 อธิบายทฤษฎีพื้นฐานของวิธี CDM

วิธี CDM เป็นวิธีที่สามารถออกแบบตัวควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพ มีความเร็วในการตอบสนอง และมีความคงทนของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ โดยจะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด

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

และค่าดรรชนีเสถียรภาพ (stability index: γ_i) ค่าคงตัวเวลาสมมูล (time constant: τ) และค่าจำกัดเสถียรภาพ (stability limit: γ_i^*) ของระบบ คือ

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

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

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}}, \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (8)$$

โดยที่ $i = 1, \dots, n-1$ ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น ช่วงเวลาเข้าที่ t_s จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังนี้

$$t_s = 2.5 \sim 3\tau \quad (9)$$

และค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐานที่นิยมใช้ คือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (10)$$

โดยมีเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบ พิจารณาได้จาก

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^*, \quad i = 2 \sim n-2 \quad (11)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (6) (7) และ (8) จะได้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_{i+1}/a_i &= (a_j/a_{j-1})/(\gamma_i\gamma_{i-1}\dots\gamma_{j+1}\gamma_j) \quad i \geq j \\ a_i &= a_0\tau^i / (\gamma_{i-1}\gamma_{i-2}\dots\gamma_2\gamma_1^{i-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

และเมื่อจัดรูปพหุนามคุณลักษณะของสมการที่(5) ให้อยู่ในเทอมของ $\gamma_i, \tau,$ และ a_0 แล้วจะได้

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

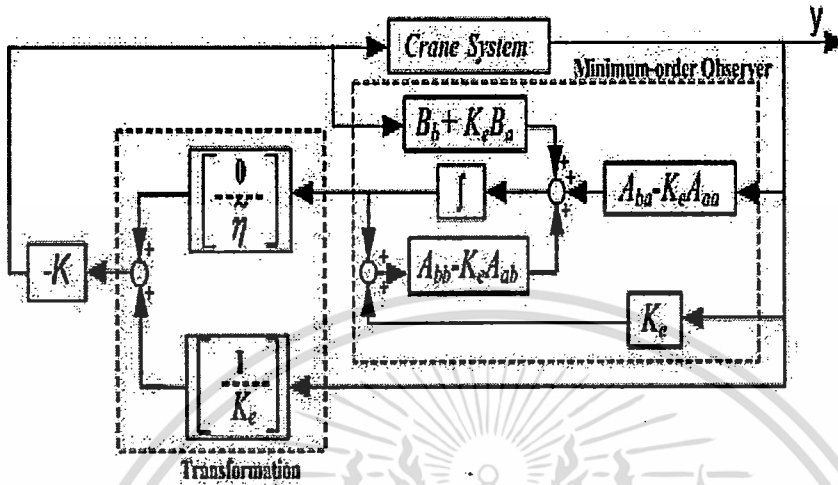
เมื่อ $a_n = \frac{a_0\tau^n}{\prod_{j=n}^{n-1} \gamma_{n-j}}$ จะได้พหุนามคุณลักษณะ $P_m(s)$ คือ

$$P_m(s) = \frac{\prod_{j=1}^{n-1} \gamma_{i-j}}{\tau^n} \left[\left\{ \sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \right] \quad (13)$$

ซึ่งจะนำสมการนี้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ต่อไป

บทที่ 4

วิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเครน



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบควบคุมเครน

โครงสร้างของระบบควบคุมเครนที่ประกอบด้วยระบบเครนและตัวควบคุมป้อนกลับสเตต ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมซึ่งจะต้องหาค่าอัตราขยายการป้อนกลับสเตต (K) และอัตราขยายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (K_e) โดยแนวคิดวิธี CDM

4.1 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ

ขั้นแรกต้องตรวจสอบว่าระบบสามารถควบคุมได้หรือไม่ เมื่อคู่ของเมตริกซ์ A และ B มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมได้ จึงใช้เมตริกซ์การแปลงเชิงเส้น $T = MW$ เพื่อแปลงตัวแปรสเตต $x = Tz$ เมื่อ

$$M = [B : AB : \dots : A^{n-1} B]$$

และ

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \dots & \sigma_{n-1} & 1 \\ \sigma_2 & \sigma_3 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\sigma_{n-1}, \dots, \sigma_0$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิดของระบบแครนซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$P_0(s) = |sI - A| = s^n + \sigma_{n-1}s^{n-1} + \dots + \sigma_1s + \sigma_0 \quad (14)$$

ดังนั้น ปริภูมิสถานะรูปแบบสามารถควบคุมได้ (controllable canonical form) คือ

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A_c z(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C_c z(t) \end{aligned} \quad (15)$$

และกฎการควบคุมป้อนกลับสเตต $u(t)$ คือ

$$u(t) = -K_c z(t) = -Kx(t) \quad (16)$$

โดยที่ $K_c = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n]$ คือ อัตราขยายป้อนกลับสเตตของระบบ (15) และ $K = K_c \cdot T^{-1}$ คืออัตราขยายป้อนกลับสเตตของระบบ (4) ดังนั้น จะได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดของระบบ (15) เป็น

$$\begin{aligned} P_c(s) &= |sI - (A_c - B_c \cdot K_c)| \\ &= s^n + (\sigma_{n-1} + \delta_n)s^{n-1} + \dots + (\sigma_1 + \delta_2)s + (\sigma_0 + \delta_1) \end{aligned} \quad (17)$$

ขั้นตอนในการหาค่าอัตราขยายป้อนกลับสเตต [4] มีดังนี้

1. คำนวณหาค่าเวลาคงตัวสมมูล τ จากช่วงเวลาเข้าที่ t_r ที่ต้องการ และเลือกค่าดรรชนีมาตรฐานที่แสดงในสมการ (10) แล้วแทนค่าเหล่านั้นลงในสมการ (14) จะได้พหุนามคุณลักษณะวงปิดที่อยู่ในรูป

$$P(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 \quad (18)$$

2. เทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (17) กับสมการที่ (18) เพื่อหาค่าอัตราขยายป้อนกลับสเตตของระบบ (4) จะได้

$$K = K_c T^{-1} = [(a_{n-1} - \sigma_{n-1}) \dots (a_1 - \sigma_1) (a_0 - \sigma_0)] \cdot T^{-1}$$

4.2 การออกแบบออปเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

เมื่อใช้หลักการในการแปลง (transformation) สเตตของระบบ (4) ให้ออกเป็นสองส่วนคือ สเตตส่วนที่สามารถวัดได้โดยตรง (\mathbf{x}_a) และสเตตส่วนที่จะประมาณค่า (\mathbf{x}_b) จะได้ปริภูมิสเตตใหม่ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_a(t) \\ \dots \\ \dot{\mathbf{x}}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ \dots & \dots \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ \dots \\ B_b \end{bmatrix} u(t) \quad (19)$$

$$y = [1 \quad \dots \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_b(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

และเมื่อค่าของเมตริกซ์ A_{bb} และ A_{ab} นั้นสามารถสังเกตได้ จะได้สมการสเตตของออปเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด คือ

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_b = (A_{bb} - K_e A_{ab}) \hat{\mathbf{x}}_b + A_{ba} \mathbf{x}_a + B_b u + K_e A_{ab} \mathbf{x}_b \quad (21)$$

โดยที่ K_e คือ ค่าอัตราขยายออปเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดที่จะหาด้วยวิธี CDM ซึ่งมีขั้นตอนการหา เช่นเดียวกับการหาอัตราขยายป้อนกลับโดยเลือกค่าคงตัวเวลาสมมูล τ น้อยกว่าประมาณ 3 เท่า

บทที่ 5

ผลการจำลองการควบคุมระบบครนเหนื่อสี่ระยะ

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองการควบคุมระบบควบคุมครนโดยใช้พารามิเตอร์ของระบบครน

[5] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบครนที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

มวลของรถครน (M)	6.12 kg
มวลของภาระ (m)	1 kg
ความยาวเชือกสลิง (l)	1 m
แรงโน้มถ่วงโลก (g)	9.81 m/sec ²
ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่ (K_r)	0.6281
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการเคลื่อนที่ของรถครน (b_m)	12.24 N sec/m

ในการออกแบบตัวป้อนกลับสเตตเจ็งเส้น ได้ใช้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 1.5$ วินาทีและค่าดรรชนีเสถียรภาพมาตรฐาน $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ ส่วนในการออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดนั้นใช้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 0.5$ วินาทีและ $\gamma_1 = 2.5$ ดังนั้น จากหัวข้อที่ 4.1 จะได้ค่าอัตราขยายป้อนกลับ

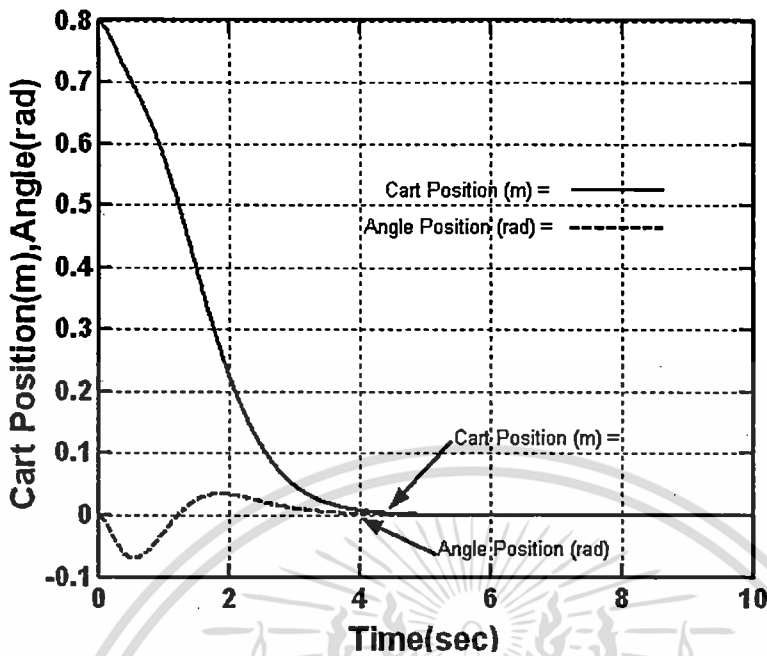
$$K = [30.65 \quad 129.79 \quad 24.49 \quad 36.21]$$

และจากหัวข้อที่ 4.2 จะได้อัตราขยายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

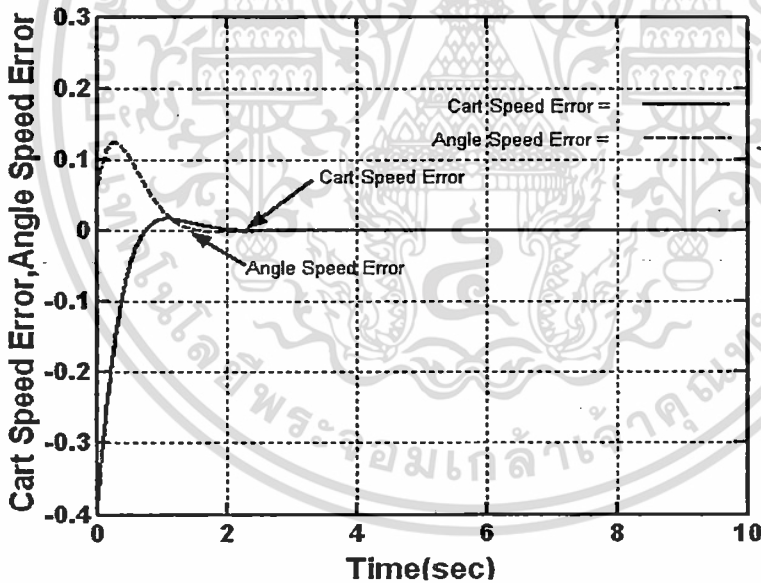
$$K_e = \begin{bmatrix} 0.50 & -1.94 \\ -0.06 & 2.50 \end{bmatrix}$$

เมื่อจำลองการควบคุมระบบครนโดยวางตำแหน่งเริ่มต้นของรถครนไว้ที่ 0.8 เมตร จะได้ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งของรถครนและมุมของภาระดังรูปที่ 5.1 พบว่า ตำแหน่งของรถครนและมุมของภาระจะกลับไปอยู่จุดสมดุลในเวลาประมาณ 4 วินาที สำหรับรูปที่ 5.2 เป็นรูปที่แสดงค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วของรถครน ($\hat{x} - \dot{x}$) และความเร็วเชิงมุมของภาระ ($\hat{\theta} - \dot{\theta}$) ด้วยออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด พบว่า การประมาณความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาระจะเข้าสู่สเตตเจ็งจริงภายในเวลาประมาณ 2 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 สเตตของตำแหน่งของรถครนและมุมของภาะ



รูปที่ 5.2 ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วของรถครนและความเร็วเชิงมุมของภาะ

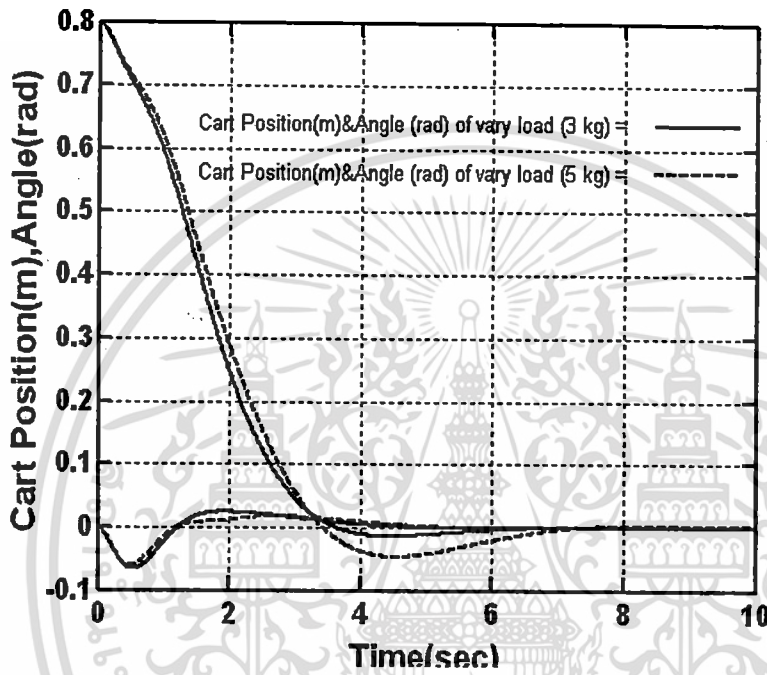
หากทำการจำลองระบบ โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังนี้

1. เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นเป็นศูนย์ และเปลี่ยนมุมเริ่มต้นอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 0.7\pi$ เรเดียน
2. เมื่อมุมเริ่มต้นเท่ากับศูนย์องศา และเปลี่ยนตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 5.4 เมตร

พบว่า ระบบจะยังสามารถควบคุมให้กลับเข้าสู่จุดสมดุลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการควบคุมระบบแครนเมื่อให้มวลของภาระเป็น 3 และ 5 กิโลกรัมโดยไม่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ที่ 1 กิโลกรัม พบว่า ตัวควบคุมที่ออกแบบโดย CDM ยังสามารถควบคุมตำแหน่งของรถแครนและมุมของภาระไว้ได้โดยแต่ละกลับไปอยู่จุดสมดุลในเวลาที่ยาวนานกว่าในกรณีที่มีมวลของภาระเป็น 1 กิโลกรัมเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แสดงของตำแหน่งของรถแครนและมุมของภาระเมื่อมวลของภาระเปลี่ยนเป็น 3 และ 5 กิโลกรัม

บทที่ 6 ข้อวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวควบคุมป้อนกลับสแตตเวอรัทร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบคอน ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนแต่ยังคงมีประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมระบบคอนให้เป็นไปตามต้องการ และจากผลการจำลองระบบควบคุมคอนที่ใช้ที่ได้นำเสนอในข้างต้นพบว่า ตัวควบคุมที่นำเสนอนี้สามารถควบคุมตำแหน่งของรถคอน มุมการแกว่งของภาระให้เป็นไปตามต้องการ และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ รวมทั้งการใช้ออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดยังสามารถประมาณค่าความเร็วของรถคอน และความเร็วเชิงมุมของภาระได้ภายในระยะเวลาอันสั้น และมีค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
สรุป

โครงการวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสแตตร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบแครน พบว่าระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดีและการแกว่งของภาระน้อย โดยออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถประมาณค่าสแตตของความเร็วของรถแครน และความเร็วเชิงมุมของภาระได้ภายในระยะเวลาอันสั้นโดยมีค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ รวมทั้งระบบยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ



83632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.I. Cahyadi, "Design of Servo System for Rotational Inverted Pendulum by CDM Approach", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2005.
- [2] N. Kodani, "Traveling Crane using H_2 Controller based on Minimum Order Observer", SICE Annual Conference in Fukui, August 4-6, 2003 Fukui University, Japan
- [3] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method", 14th IFAC Symposium in Aerospace, 1998.
- [4] T. Apicit, "Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane System", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2004.
- [5] Y. Suzuki, S. Yamada and H. 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

ภาคผนวก ก.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON29) ชื่อเรื่อง "การออกแบบตัวควบคุม
ป้อนกลับสแตตพร้อมับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครน"
2. International Symposium on Communications and Information Technologies 2006 (ISCIT2006)
entitle "CDM Based Servo State Feedback Controller with Minimum-order Observer for Crane
System"



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบตัวควบคุมป้องกันสั่นสะเทือนร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครน

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

สันติ ภูวรรณ^{*} จงกล งามวิวิทย์^{*} ถาวร เญญจนราสุทธิ์^{*} สองเมือง นันทขำ^{*} และ Noriyuki Komine^{**}
^{*}ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนคลองกรุง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร. 0-2326-4221 Email: knjongko@kmitl.ac.th

^{**}Department of Embedded Technology, School of Information Science and Technology, Tokai University

1117 Kitakaname, Hiratsuka-Shi, Kanagawa-Ken 259-1292, Japan E-mail: komine@tokai.ac.jp

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมป้องกันสั่นสะเทือนร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสำหรับระบบเครน โดยค่าของอัตราขยายการป้องกันสั่นสะเทือน และอัตราขยายออบเซอร์เวอร์ จะคำนวณหาได้จากแบบจำลองเชิงเส้นของระบบร่วมกับแนวคิดของวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ จากผลการจำลองระบบพบว่า การออกแบบที่นำเสนอ ทำให้ระบบมีสมรรถนะดีและมีเสถียรภาพ

Abstract

This paper presents the state feedback controller with minimum-order observer design for crane system. Linear state feedback gain and observer gain are computed based on the linearized model of the crane system employing the concept of coefficient diagram method. The simulations show that the proposed design scheme results in the crane control system with stability and good performance.

Keyword: minimum-order observer, crane system, CDM, state feedback

1. บทนำ

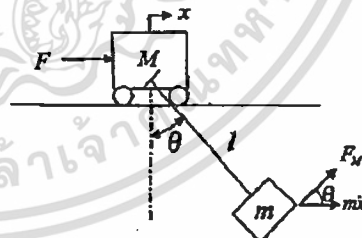
ระบบเครนได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง อาทิเช่น การยกวัตถุหรือสินค้าภายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้เกิดความรวดเร็วในกระบวนการผลิตต่างๆ ในอดีตที่ผ่านมา นั้นมักอาศัยผู้ควบคุมในการควบคุมทำงานของเครน อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันนี้ระบบเครนมีขนาดใหญ่มากขึ้นและมีความเร็วสูงขึ้นซึ่งยากจะควบคุมด้วยผู้ควบคุม การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับเครนจึงเป็นปัญหาที่น่าสนใจ มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบโดยพารามิเตอร์ของตัวควบคุมหลายวิธี เช่น การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี่ (Fuzzy controller) [1] และตัวควบคุมแบบอนุพัทธ์ (H_2 controller) [2] เป็นต้น

เนื่องจากแบบจำลองโดยทั่วไปของระบบเครนนั้น จะมีตัวแปรสแตตส์ตัว ($x, \theta, \dot{x}, \dot{\theta}$) โดยมีสองตัวแปร ($\dot{x}, \dot{\theta}$) ที่ไม่สามารถวัดค่า

ได้โดยตรง ดังนั้น บทความนี้จะนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเครนเพื่อควบคุมตำแหน่งของรถเครนและมุมแกว่งของภาระให้มีสมรรถนะดีและมีเสถียรภาพ โดยใช้ตัวควบคุมป้องกันสั่นสะเทือนแบบเชิงเส้น (linear state feedback) ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (minimum-order observer) ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีแผนผังค่าสัมประสิทธิ์ (coefficient diagram method: CDM) [3] และนำเสนอผลการจำลองการควบคุมระบบเครนโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

2. แบบจำลองของระบบเครน

แบบจำลองทางกายภาพของระบบเครน [2] แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยรถเครนและภาระที่ผูกเชื่อมต่อกันด้วยเชือกสลิง โดยมีตัวแปร คือ ตำแหน่งรถเครน (x) มุมแกว่งของภาระ (θ) และแรงจากภายนอก (F) และมีความยาวเชือกสลิง (l) มวลของภาระ (m) และมวลของรถเครน (M) เป็นพารามิเตอร์ของระบบเครน



รูปที่ 1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบเครน [2]

จากรูปที่ 1 สมการการเคลื่อนที่ของตัวรถเครนและสมการการเคลื่อนที่ของภาระอธิบายได้ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ คือ

$$M\ddot{x} = F - m\ddot{x}_m - b_m\dot{x} \quad (1)$$

$$x_m = x - l \sin \theta$$

$$ml\ddot{\theta} = -mg \sin \theta + F_m \quad (2)$$

$$F_m = m\ddot{x} \cos \theta$$

จากสมการ (1) และ (2) จะได้สมการของการเคลื่อนที่ของระบบเครนดังนี้

$$(M + m)\ddot{x} = -ml\dot{\theta}^2 \sin \theta + ml\ddot{\theta} \cos \theta + F - b_m\dot{x} \quad (3)$$

$$l\ddot{\theta} = \ddot{x} \cos \theta - g \sin \theta$$

CT16

โดยแรง F จะแปรผันตามแรงคืน u ที่ป้อนให้กับวงจรขับเคลื่อน หรือ $F = K_r u$ และเมื่อระบบอยู่ในบริเวณจุดสมดุล $x = 0, \theta = 0, \dot{x} = 0$ และ $\dot{\theta} = 0$ จะได้ $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1$ และ $\theta^2 \approx 0$ ดังนั้น ระบบที่อยู่ในรูปปริภูมิสถานะเชิงเส้นเพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม คือ

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

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

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

3. วิธี CDM

วิธี CDM เป็นวิธีที่สามารถออกแบบตัวควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพ มีความเร็วในการตอบสนองและมีความคงทนของระบบต่อการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการ โดยจะมีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงปิด

$$P(s) = a_n s^n + \dots + a_1 s + a_0 \quad (5)$$

และค่าครุขนิเสถียรภาพ (stability index: γ_i) ค่าคงตัวเวลาสมมูล (time constant: τ) และค่าจำกัดเสถียรภาพ (stability limit: γ_i^*) ของระบบ คือ

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

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

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_{i-1}} + \frac{1}{\gamma_{i+1}}, \gamma_0, \gamma_n = \infty \quad (8)$$

โดยที่ $i = 1, \dots, n-1$ ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM นั้น ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time) t_s จะสัมพันธ์กับค่าคงตัวเวลาสมมูล τ ดังนี้

$$t_s = 2.5 \sim 3\tau \quad (9)$$

และค่าครุขนิเสถียรภาพมาตรฐานที่นิยมใช้คือ

$$\gamma_{n-1} = \dots = \gamma_3 = \gamma_2 = 2, \gamma_1 = 2.5 \quad (10)$$

โดยมีเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบ พิจารณาได้จาก

$$\gamma_i > 1.12\gamma_i^*, \quad i = 2 \sim n-2 \quad (11)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (6) (7) และ (8) จะได้สมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_{i+1}/a_i &= (a_j/a_{j-1}) / (\gamma_i \gamma_{i-1} \dots \gamma_{j+1} \gamma_j), \quad i \geq j \\ a_i &= a_0 \tau^i / (\gamma_{i-1} \gamma_{i-2} \dots \gamma_2^2 \gamma_1^{i-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

และเมื่อจัดรูปพหุนามคุณลักษณะของสมการที่(5) ให้อยู่ในเทอมของ $\gamma_i, \tau,$ และ a_0 แล้วจะได้

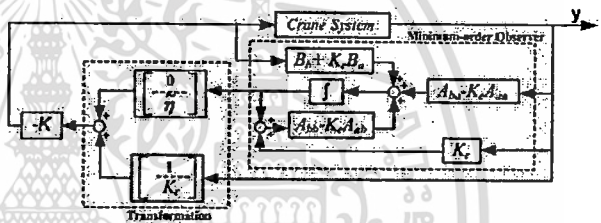
$$P(s) = a_0 \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1$$

เมื่อ $a_n = a_0 \tau^n / \prod_{j=n}^{n-1} \gamma_{n-j}^j$ จะได้พหุนามคุณลักษณะ $P_m(s)$ คือ

$$P_m(s) = \frac{\prod_{j=1}^{n-1} \gamma_{i-j}^j}{\tau^n} \left[\sum_{i=2}^n \left(\prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{\gamma_{i-j}} \right) (\tau s)^i \right] + \tau s + 1 \quad (13)$$

ซึ่งจะนำสมการนี้มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี CDM ต่อไป

4. การออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุมเครน

โครงสร้างของระบบควบคุมเครนที่ประกอบด้วยระบบแครนและตัวควบคุมป้อนกลับสเตต ร่วมกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด แสดงได้ดังรูปที่ 2 ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมซึ่งจะต้องหากำอัตรายขาข่ายการป้อนกลับสเตต (K) และอัตรายขาข่ายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด (K_c) โดยแนวคิดวิธี CDM

4.1 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ

ขั้นแรกต้องตรวจสอบว่าระบบสามารถควบคุมได้หรือไม่ เมื่อคู่ของเมทริกซ์ A และ B มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมได้ จึงใช้เมทริกซ์การแปลงเชิงเส้น $T = MW$ เพื่อแปลงตัวแปรสเกลด์ $\mathbf{x} = T\mathbf{z}$ เมื่อ

$$M = [B : AB : \dots : A^{n-1}B]$$

$$W = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \dots & \sigma_{n-1} & 1 \\ \sigma_2 & \sigma_3 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\sigma_{n-1}, \dots, \sigma_0$ คือสัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะของระบบวงเปิดของระบบแครนซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (14)

$$P_0(s) = |sI - A| = s^n + \sigma_{n-1}s^{n-1} + \dots + \sigma_1 s + \sigma_0 \quad (14)$$

ดังนั้น ปริภูมิสเตรูปแบบสามารถควบคุมได้ (controllable canonical form) คือ

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= A_c z(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C_c z(t) \end{aligned} \quad (15)$$

และกฎการควบคุมป้อนกลับสเตรูปแบบ $u(t)$ คือ

$$u(t) = -K_c z(t) = -Kx(t) \quad (16)$$

โดยที่ $K_c = [\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_n]$ คือ อัตรายบายป้อนกลับสเตรูปแบบของระบบ

(15) และ $K = K_c \cdot T^{-1}$ คือ อัตรายบายป้อนกลับสเตรูปแบบของระบบ (4)

ดังนั้น จะได้พหุนามคุณลักษณะปิดของระบบ (15) เป็น

$$\begin{aligned} P_c(s) &= |sI - (A_c - B_c \cdot K_c)| \\ &= s^n + (\sigma_{n-1} + \delta_n) s^{n-1} + \dots + (\sigma_1 + \delta_2) s + (\sigma_0 + \delta_1) \end{aligned} \quad (17)$$

ขั้นตอนในการหาค่าอัตรายบายป้อนกลับสเตรูปแบบ [4] มีดังนี้

1. คำนวณหาค่าเวลาคงตัวสมมูล τ จากช่วงเวลาเข้าที่ t_r ที่ต้องการ และเลือกค่าครุขนิยามมาตรฐานที่แสดงในสมการ (10) แล้วแทนค่าเหล่านั้นลงในสมการ (14) จะได้พหุนามคุณลักษณะปิดที่อยู่ในรูป

$$P(s) = s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (18)$$

2. เทียบค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (17) กับสมการที่ (18) เพื่อหาค่าอัตรายบายป้อนกลับสเตรูปแบบของระบบ (4) จะได้

$$K = K_c T^{-1} = [(a_{n-1} - \sigma_{n-1}) \ \dots \ (a_1 - \sigma_1) \ (a_0 - \sigma_0)] \cdot T^{-1}$$

4.2 การออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

เมื่อใช้หลักการในการแปลง (transformation) สเตรูปแบบ

- (4) ให้ออกเป็นสองส่วนคือ สเตรูปแบบที่สามารถวัดได้โดยตรง (x_a) และสเตรูปแบบที่จะประมาณค่า (x_b) จะได้ปริภูมิสเตรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a(t) \\ \dots \\ \dot{x}_b(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ \dots & \dots \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ \dots \\ x_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ \dots \\ B_b \end{bmatrix} u(t) \quad (19)$$

$$y = [1 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} x_a(t) \\ \dots \\ x_b(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

และเมื่อดูของเมทริกซ์ A_{bb} และ A_{ab} นั้นสามารถสังเกตได้ จะได้สมการสเตรูปแบบของออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด คือ

$$\dot{\hat{x}}_b = (A_{bb} - K_e A_{ab}) \hat{x}_b + A_{ba} x_a + B_b u + K_e A_{ab} x_a \quad (21)$$

โดยที่ K_e คือ ค่าอัตรายบายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดที่จะหาด้วยวิธี CDM ซึ่งมีขั้นตอนการหาเช่นเดียวกับการหาอัตรายบายป้อนกลับโดยเลือกค่าคงตัวเวลาสมมูล τ น้อยกว่าประมาณ 3 เท่า

5. ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการจำลองระบบควบคุมแบริดจ์โดย

พารามิเตอร์ของระบบแบริดจ์ [5] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ระบบแบริดจ์ที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

มวลของรถแบริดจ์ (M)	6.12 kg
มวลของภาระ (m)	1 kg
ความยาวเชือกสลิง (l)	1 m
แรงโน้มถ่วงโลก (g)	9.81 m/sec ²
ค่าคงที่แรงของระบบการเคลื่อนที่ (K_r)	0.6281
สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการเคลื่อนที่ของรถแบริดจ์ (b_m)	12.24 N sec/m

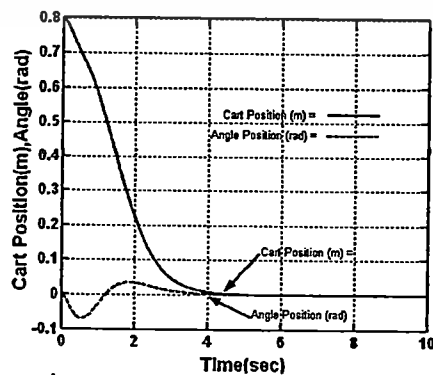
ในการออกแบบตัวป้อนกลับสเตรูปแบบเชิงเส้น ได้ใช้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 1.5$ วินาทีและค่าครุขนิยามมาตรฐาน $\gamma_1 = 2.5$ และ $\gamma_2 = \gamma_3 = 2$ ส่วนในการออกแบบออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดนั้นใช้ค่าคงตัวเวลาสมมูล $\tau = 0.5$ วินาทีและ $\gamma_1 = 2.5$ ดังนั้น จากขั้นตอนการออกแบบในหัวข้อที่ 4.1 จะได้ค่าอัตรายบายป้อนกลับ

$$K = [30.65 \ 129.79 \ 24.49 \ 36.21]$$

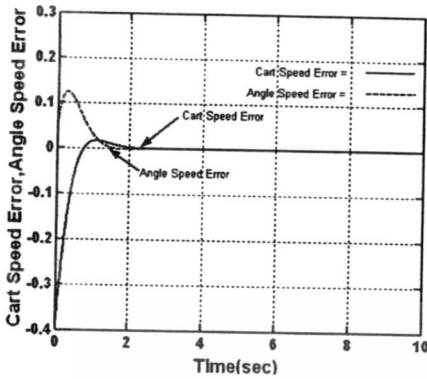
และจากหัวข้อที่ 4.2 จะได้อัตรายบายออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด

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

เมื่อจำลองการควบคุมระบบแบริดจ์โดยวางตำแหน่งเริ่มต้นของรถแบริดจ์ไว้ที่ 0.8 เมตร จะได้ผลตอบสนองของการควบคุมตำแหน่งของรถแบริดจ์และมุมของภาระดังรูปที่ 3 พบว่ามีผลเป็นที่น่าพอใจโดยตำแหน่งของรถแบริดจ์และมุมของภาระจะกลับไปอยู่จุดสมดุลในเวลาประมาณ 4 วินาที สำหรับรูปที่ 4 นั้น เป็นรูปที่แสดงค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วของรถแบริดจ์ ($\dot{x} - \hat{\dot{x}}$) และความเร็วเชิงมุมของภาระ ($\dot{\theta} - \hat{\dot{\theta}}$) ด้วยออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุด พบว่า การประมาณค่าความเร็วของรถแบริดจ์และความเร็วเชิงมุมของภาระจะเข้าสู่สเตรูปแบบภายในเวลาประมาณ 2 วินาที



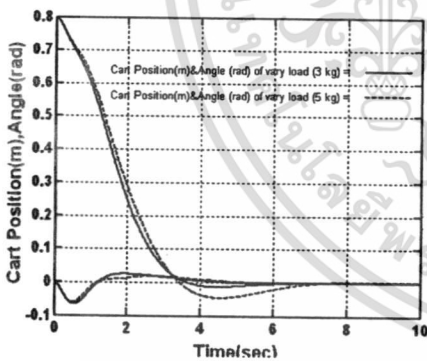
รูปที่ 3 สเตรูปแบบของตำแหน่งของรถแบริดจ์และมุมของภาระ



รูปที่ 4 ค่าผิดพลาดในการประมาณค่าความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาระ

และเมื่อทำการจำลองระบบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้นต่างๆกัน พบว่าระบบจะยังสามารถควบคุมให้กลับเข้าสู่จุดสมดุลได้หาก มุมเริ่มต้นอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 0.7\pi$ เรเดียน เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นเป็นศูนย์ และตำแหน่งเริ่มต้นไม่เกิน ± 5.4 เมตร เมื่อมุมเริ่มต้นเท่ากับศูนย์องศา

ผลการจำลองการควบคุมระบบเครนเมื่อให้มวลของภาระเป็น 3 และ 5 กิโลกรัม โดยไม่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ที่ 1 กิโลกรัม พบว่า ตัวควบคุมยังสามารถควบคุมตำแหน่งของรถเครนและมุมของภาระไว้ได้โดยกลับไปอยู่จุดสมดุลในเวลาที่ยาวกว่าในกรณีที่มีมวลของภาระเป็น 1 กิโลกรัมเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงของตำแหน่งของรถเครนและมุมของภาระเมื่อมวลของภาระเปลี่ยนเป็น 3 และ 5 กิโลกรัม

6. สรุป

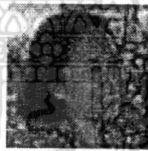
บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตรตจิกกับออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดด้วยวิธี CDM สำหรับระบบเครน พบว่า ระบบควบคุมมีสมรรถนะที่ดีและการแกว่งของภาระน้อย โดยออบเซอร์เวอร์แบบอันดับต่ำสุดสามารถประมาณค่าตำแหน่งและความเร็วของรถเครนและความเร็วเชิงมุมของภาระด้วยได้ดีโดยผลตอบสนองเข้าสู่ค่าจริงได้เร็ว และมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมวลของภาระ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Y. Suzuki, S. Yamada and H. 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] N. Kodani, "Traveling Crane using H_2 Controller based on Minimum Order Observer", SICE Annual Conference in Fukui, August 4-6, 2003 Fukui University, Japan
- [3] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method", 14th IFAC Symposium in Aerospace, 1998.
- [4] A.I. Cahyadi, "Design of Servo System for Rotational Inverted Pendulum by CDM Approach", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2005.
- [5] T. Apicit, "Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane System", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2004.



สันติ ภูววรรณ ปริญญาตรี นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย ระบบควบคุม



จงกล จามวิวิทย์ ปริญญาเอก อิเล็กทรอนิกส์ จากมหาวิทยาลัยโคโค ประเทศญี่ปุ่น รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย ระบบควบคุม



กาวร เบนจอนราต ปริญญาโท ระบบควบคุม จากมหาวิทยาลัยมิชิแกน ประเทศสหรัฐอเมริกา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย การออกแบบระบบควบคุมทางอุตสาหกรรม



สองเมือง นันทขว้าง ปริญญาโท ระบบควบคุม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. งานวิจัย ระบบควบคุม หุ่นยนต์จ้าว



Noriyuki Komine received master degree in electronic engineering from Tokai University, Japan. He has been with the Department of Embedded Technology, Tokai University. His research interest is control design method for system with a vibration mechanism.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

III. CDM CONCEPT

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

In general, the following standard stability index

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

is recommended for design an appropriate controller.

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

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

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

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

Then the corresponding monic characteristic polynomial is

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

IV. CONTROLLER DESIGN

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

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

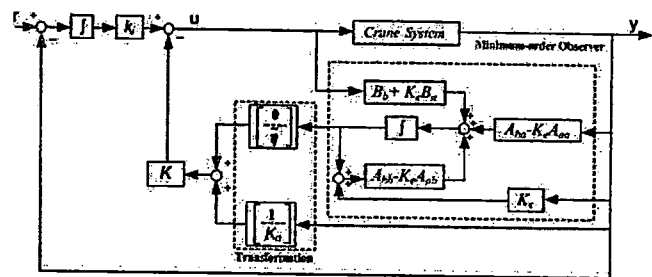


Fig. 2. Structure of the proposed control system.

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

A. Servo State Feedback Design

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

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

$$\bar{y}(t) = H_s x_s(t) \quad (15)$$

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

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

$$x_s(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ e(t) \end{bmatrix}$$

If the pair of A and B of (4) is completely controllable and the matrix $\begin{bmatrix} A_s & B_s \\ -H_s & 0 \end{bmatrix}$ is full rank, then the pair of A_s and

B_s of the servo system (14) is also completely controllable. In this case, the closed-loop characteristic polynomial can be freely assigned to meet the required specification by properly adjusting the servo state gain matrix K_s .

Defining the linear transformation

$$x_s(t) = Tz(t),$$

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

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

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

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

which is obtained from the controllability matrix M

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

and from the matrix W [6]

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

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

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

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

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

or equivalently in term of its original state vector as

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

or the state feedback gain matrix

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

and integral gain

$$k_i = -326.99.$$

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

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

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

A. Initial Responses

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

B. State Minimum-order Observer Design

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

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

$$y(t) = [1 \ : \ 0] \begin{bmatrix} x_a(t) \\ \dots \\ x_b(t) \end{bmatrix}. \quad (24)$$

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

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

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

V. SIMULATION RESULTS

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

TABLE I
PARAMETER VALUES OF CRANE SYSTEM

M (kg)	m (kg)	l (m)	g (m/s ²)	K_s	b_m (N sec/m)
6.12	1	1	9.81	0.6281	12.24

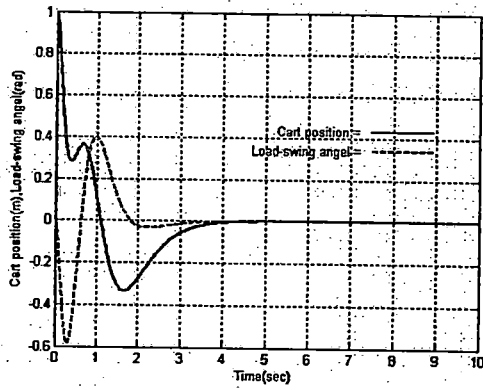


Fig. 3. Cart position and load-swing angle.

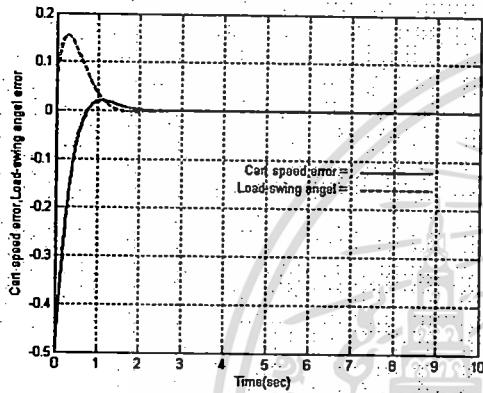


Fig. 4. Cart speed error and load-swing angle speed error.

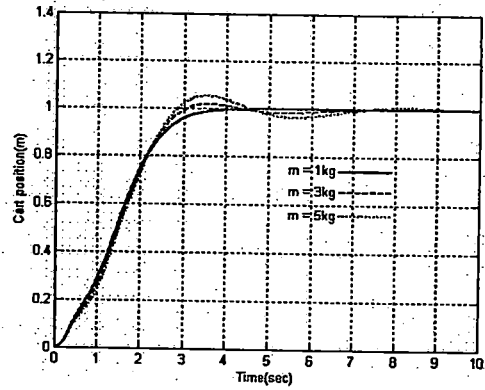


Fig. 6. Cart positions due to load variation.

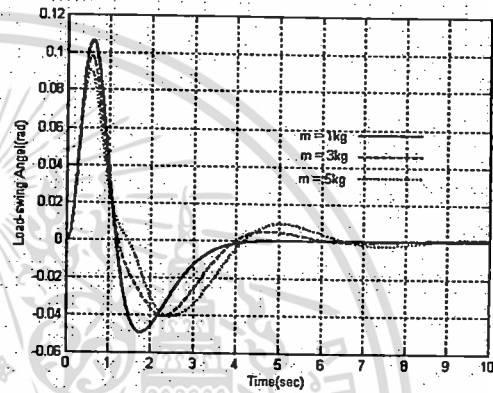


Fig. 7. Load-swing angles due to load variation.

B. Step Responses

The responses due to the constant reference cart position at 1 meter are shown in Fig. 5. It is seen that cart position can track reference value within 4 seconds without steady state error. The oscillation of load-swing angle is less than ± 0.12 radian and damped out within 3.2 seconds.

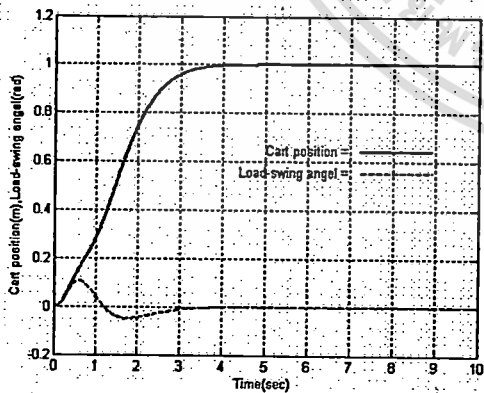


Fig. 5. Cart position and load-swing angle.

C. Effect of Load Variation

In this sub-section, the effect of the load variation is investigated when the mass of load is varied from 1 kilogram to 3 kilograms and 5 kilograms without redesigning the controller. The simulation results due to applying step reference input are shown in Fig. 6 and Fig. 7. It can be seen from Fig. 6 that the cart position can properly track the reference within 4 seconds, 7 seconds and 9 seconds respectively. From Fig. 7, it can be noticed that the oscillation of load-swing angle is still less than ± 0.12 radian and damped out within 4.3 seconds, 6.2 seconds and 8.7 seconds respectively.

In short, the designed crane control system can maintain its good performance even when the mass of load is significantly varied with no need to adjust the parameters of the controller which are originally designed for the mass of load at 1 kilogram.

VI. CONCLUSIONS

The design of servo state feedback controller with minimum-order observer based on CDM concept has been presented in this paper. The simulation results show good

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

REFERENCES

- [1] Yuzo Suzuki, Shin-Ichi and Hideji Fufikawa, "Anti-Swing Control of the Container Crane by Fuzzy Control," *Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics Control and Instrumentation*, vol. 1, pp. 230-235, 1993.
- [2] Hans Butler, ger Honderd and Job Van Amerongen, "Model reference adaptive control gantry crane scale model," *IEEE Control System Magazine*, vol. 11. Issue. 1, pp. 57-62, 1991.
- [3] S.U. Chou, J.H. Kim, J.W. Lee, Y.J. Lee and K.S. Lee, "A Study on Gantry Crane Control using Nerual Network Two Degree of PID Controller," *IEEE. International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 3, pp. 1896-1900, 2001.
- [4] S. Manabe, "Coefficient Diagram Method," *14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, 1998.
- [5] N. Kodani, "Traveling Crane using H₂ Controller based on Minimum Order Observer", *SICE Annual Conference*, August 4-6, 2003 Fukui University, Japan.
- [6] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Second Edition, Prentice-Hall international, Inc., 1990.
- [7] A. Tantaworrasilp, "Application of Coefficient Diagram Method for Multivariable Control of Overhead Crane system", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2004.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้