ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครน

(Design of position control of Crane)

นางสาวอนุธิดา หงษ์ศรี

นางสาวเบญจวรรณ สุขโรจน์

นายปฏิเวธ ภัยอย่ามี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2551

ใบรับรองโครงงาน

หัวข้อโครงงาน	: ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครน (Design of position control of Crane)
ผู้ดำเนินโครงงาน	: 1.นางสาวอนุธิดา หงษ์ศรี รหัส 47360961 2.นางสาวเบญจวรรณ สุขโรจน์ รหัส 47361001 3.นายปฏิเวธ ภัยอย่ามี รหัส 47362926
อาจารย์ที่ปรึกษา	: อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	: 2551

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการตรวจสอบโครงงาน

สุรัตน์ ปัญญาแก้ว ประธานกรรมการ
(อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว)

..................................กรรมการ
(อาจารย์อนันตชัย อยู่แก้ว)

ปองพันธ์ โอทกานนท์ กรรมการ
(อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์)

หัวข้อโครงงาน	ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครน		
ผู้ดำเนินโครงงาน	1.นางสาวอนุธิดา	หงษ์ศรี	รหัส 47360961
	2.นางสาวเบญจวรรณ	สุขโรจน์	รหัส 47361001
	3.นายปฏิเวธ	ภัยอย่ามี	รหัส 47362926
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สุรัตน์	ปัญญาแก้ว	
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2551		

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบของรถเครนแล้วนำไปออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครนเพื่อให้ตัวรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการพร้อมกันกับควบคุมไม่ให้แท่ง pendulum เกิดการแกว่ง และทำการทดสอบสมรรถนะของการเคลื่อนที่ของเครนและมุมการแกว่งของแท่ง pendulum

โครงงานนี้ได้ทำการเลือกใช้ การออกแบบระบบควบคุมทาง State space โดยวิธี pole placement และใช้ตัวควบคุมแบบ Integral control เพื่อช่วยแก้ปัญหา Steady state error จากการทดสอบด้วยโปรแกรม Matlab พบว่าระบบมี percent overshoot เท่ากับ 8.9% และมีค่า Setting time เท่ากับ 0.7 วินาที

Project title	: Design of position control of Crane		
Name	: 1.Miss Anutida	Hongsri	Code 47360961
	2. Miss Benjawan	Sukkarod	Code 47361001
	3. Mr. Pativet	Taiyame	Code 47362926
Project Advisor	: Mr.Surat	Punyakeaw	
Academic Year	: 2008		

Abstract

This project was to simulate mathematical pattern of Crane before designing a control system of crane position for the right required movement and preventing pendulum from vibration in the same time. Besides, competency of movement and vibration corner of pendulum was tested.

This project used system design of State space with pole placement and Integral control for solving Steady state error in order to stabilize the system. In Matlab, the result sheet that the system has 8.9 percent overshoot and setting time 0.7 secound.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและคณะกรรมการการสอบโครงงานทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการตรวจแก้ไขโครงงานนี้จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากโครงงานเล่มนี้ ขอมอบให้แด่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้จัดทำมาตลอดในทุกเรื่องจนสำเร็จการศึกษา ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้ดำเนินโครงงาน

สารบัญ

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญตาราง

สารบัญรูปภาพ

สารบัญกราฟ

ลำดับสัญลักษณ์

A	เมตริกซ์ A	-
a	ความเร่งแนวแกน x	m/s^2
B	เมตริกซ์ B	-
C	เมตริกซ์ C	-
~~D~~	~~Disturbance~~	-
F	แรง	N
g	แรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
I	โมเมนต์ความเฉื่อย	$kg.m^2$
K	ค่าคงที่	-
k_I	ค่าคงที่ของ Integral control	-
L	ระยะจากปลายไม้ถึงจุดC.G	m
M	มวลของตัวรถ	kg
m	มวลของแท่ง Pendulum	kg
O	จุดศูนย์กลางมวล	-
r	Reference input	-
u	สัญญาณควบคุม(Input)	-
x	ระยะทางของรถ	m
$\dot{x}$	ความเร็วเชิงเส้นของรถ	m/s
$\ddot{x}$	ความเร่งเชิงเส้นของรถ	m/s^2
y	สัญญาณ Output	-
θ	มุมของ Pendulum	$Radian$
$\dot{\theta}$	ความเร็วเชิงมุมของ Pendulum	Rad/s
$\ddot{\theta}$	ความเร่งเชิงมุมของ Pendulum	Rad/s^2
ω_n	ความถี่ธรรมชาติ	$Hertz$
ξ	สัญญาณ Out put ที่ออกจากตัว Integrator	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญหรือที่มาของปัญหา

โดยทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมและในไซด์ก่อสร้างนั้นจะใช้รถเครนเพื่อทำการขนย้ายสินค้าหรือวัสดุที่มีน้ำหนักมาก ซึ่งตามปกติแล้วในระหว่างการขนย้ายนั้นสินค้าและวัสดุจะเกิดการแกว่งไปและแกว่งมาอย่างอิสระ ซึ่งถ้าสินค้าหรือวัสดุนี้เกิดการแกว่งมากเกินไปจะทำให้การวางสินค้าหรือวัสดุนี้เกิดการผิดพลาดและเกิดความเสียหายได้

ดังนั้นในโครงงานนี้จึงทำการออกแบบและสร้างระบบควบคุมตำแหน่งสำหรับรถเครนขึ้นมาเพื่อให้รถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ถูกต้องและทำให้สินค้าเกิดการแกว่งน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1). เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบของรถเครน

2). เพื่อออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครน

1.3 ขอบเขต

1). ในการออกแบบสร้างระบบควบคุมตำแหน่งของโครงสำหรับติดรอกยกนั้นจะไม่คำนึงถึงความยืดหยุ่นตัวของลวดสลิงและไม่คำนึงถึงแรงเสียดทานที่มีอยู่ในระบบ

2). การเคลื่อนที่ของรถเครนเป็นการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ

3). ในการทดสอบนั้นเราจะไม่ทดลองกับระบบจริงแต่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถเครนที่ได้และตัวควบคุมที่ออกแบบได้ไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Matlab แล้วใช้โปรแกรม Matlab ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลออกมา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1). ได้ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ให้สมรรถนะการตอบสนองเป็นไปตามต้องการ

2). ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถเครน

1.5 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและแผนปฏิบัติงาน

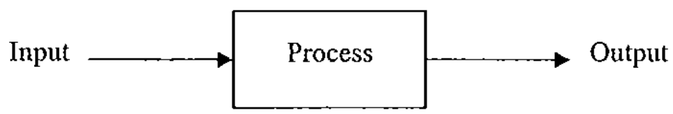
แผนการปฏิบัติงาน	ระยะเวลาปฏิบัติงาน (2550)								
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีเบื้องต้น	↔								
2. ออกแบบและสร้างแบบจำลองของระบบกลไกของรถเครน		↔	↔	↔	↔				
3. คิดสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องและหาค่าพารามิเตอร์ในระบบ						↔			
4.ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครน							↔		
5. ศึกษาโปรแกรม Matlab								↔	
6. ทดสอบระบบควบคุมตำแหน่งที่ออกแบบมา								↔	
7. วิเคราะห์ผลการทดลอง									↔
8. สรุปผลการทดลอง									↔

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ ส่วนประกอบหลายๆส่วนต่อเชื่อมกันขึ้นเป็นระบบที่จะใช้การตอบสนองตามที่เราต้องการ พื้นฐานของการวิเคราะห์ระบบจะมีพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้นซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาท์พุทหรือการตอบสนอง ดังนั้นส่วนประกอบหรือกระบวนการ (Process) ที่เราต้องการที่จะควบคุม สามารถแทนด้วย block ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดย Input จะเป็นส่วนสำคัญของ Output นั่นเอง



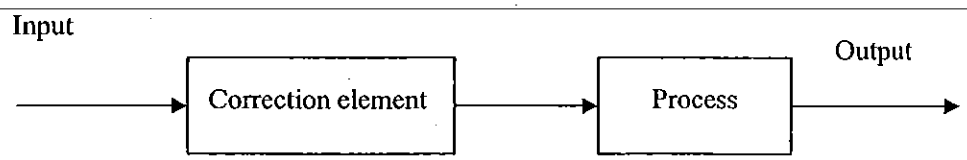
รูปที่ 2.1 การควบคุมระบบ

ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบคือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)
2. ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

2.1.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)

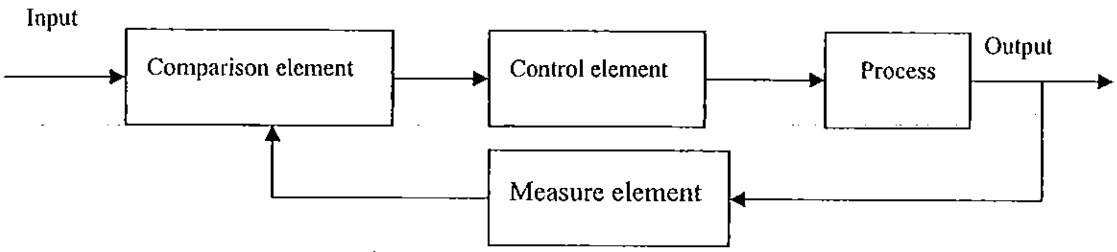
ระบบควบคุมแบบเปิดเป็นการใช้อุปกรณ์ควบคุม (Controller) หรือ อุปกรณ์ส่งกำลัง (Control Actuator) เพื่อให้ได้การตอบสนองตามที่เราต้องการโดยไม่ต้องนำผลการตอบสนองของระบบกลับเข้ามาสู่การพิจารณาอีก ลักษณะของระบบควบคุมแบบเปิดแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบควบคุมแบบเปิด

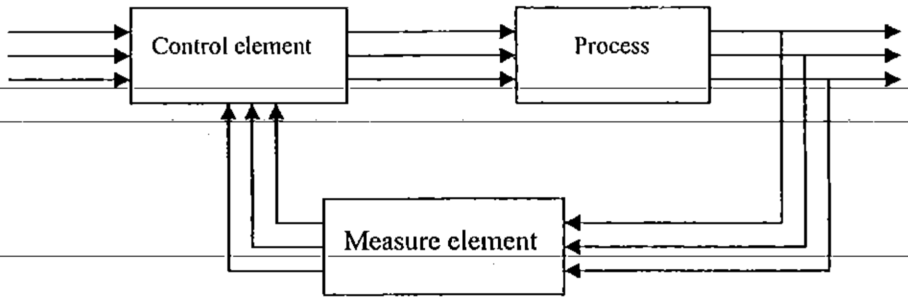
2.1.2 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed Loop or Feedback Control System)

ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมป้อนกลับจะแตกต่างจากระบบควบคุมแบบเปิดก็คือมีการนำเอาผลที่ได้จากกระบวนการกลับเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลที่จะส่งเข้าไปเป็นInput ให้กับระบบอีกครั้ง การที่เราจะทราบค่าOutputได้เราจะต้องมีการวัดข้อมูลของOutput เมื่อเราทราบค่าOutputแล้วเรามักจะนำค่าOutputที่ได้ไปเปรียบเทียบกับOutputที่เราต้องการจากระบบ จากนั้นความแตกต่างระหว่างOutputที่ต้องการและOutputที่แท้จริงจะได้รับการส่งต่อไปสู่อุปกรณ์ควบคุม แล้วส่งต่อเป็นInputเข้าสู่ระบบเพื่อให้ความแตกต่างของOutputที่ต้องการและOutputที่แท้จริงลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ดังนั้นเราก็จะได้ว่า ค่าOutputของระบบเป็นไปตามต้องการ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแสดงในรูปที่ 2.3 สำหรับหลักการของการป้อนกลับที่ได้อธิบายไปแล้วนี้ถือว่าเป็นพื้นฐานของการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบปิด หรือ ระบบควบคุมป้อนกลับ

สำหรับระบบควบคุมหนึ่งๆนั้น อาจจะมีพารามิเตอร์หรือตัวแปรที่ต้องการจะควบคุมมากกว่าหนึ่งพารามิเตอร์ ซึ่งระบบควบคุมดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น แต่หลักการของระบบควบคุมก็จะเหมือนเดิม คือ ทุกตัวแปรที่เราต้องการควบคุมจะต้องมีการวัดค่าที่ได้จากOutput และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราต้องการของตัวแปรตัวนั้นๆ สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) จะมีลักษณะดังในรูปที่ 2.4

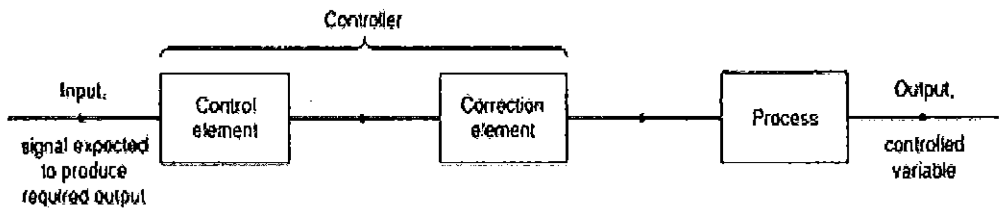


รูปที่ 2.4 ระบบควบคุมหลายตัวแปร

2.1.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุม

1. ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบเปิด

ในระบบควบคุมแบบเปิด เราสามารถพิจารณาได้ว่าระบบประกอบด้วยระบบย่อย ดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 ในความเป็นจริงอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นระบบย่อยเหล่านี้ เราอาจจะไม่สามารถแยกออกมาเป็นส่วนๆได้ หรือแยกอย่างชัดเจนได้ว่าอุปกรณ์ใดทำหน้าที่อย่างใดโดยเฉพาะ แต่ว่าอุปกรณ์ในความเป็นจริงเหล่านั้น สามารถแยกหน้าที่การทำงานออกเป็นส่วนๆ ได้ตามที่แสดงในรูป 2.5



ที่มา: http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter17.htm

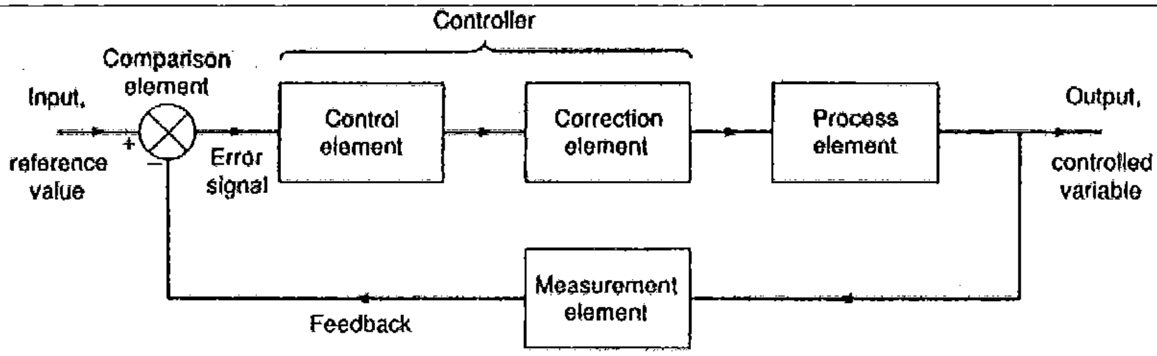
รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบเปิด

ซึ่งส่วนประกอบย่อยจะประกอบด้วย

- Control element ส่วนนี้จะพิจารณาว่าควรจะให้ระบบทำงานต่อไปอย่างไรเมื่อได้รับค่า Inputของระบบควบคุม
- Correction element ส่วนนี้จะตอบสนองต่อInputที่ได้รับจากส่วนของ Control element และนำไปปรับเปลี่ยนตัวแปรที่จะถูกควบคุมเพื่อให้ได้ค่าตามต้องการ
- Process หรืออาจเรียกว่า Plant ระบบจะเป็นส่วนปฏิบัติการเพื่อให้ได้ค่าOutputที่เราต้องการออกมา

2. ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบปิดสามารถพิจารณาได้ว่า ประกอบด้วยระบบย่อยที่ต่อวางกันตามรูป 2.3 ซึ่งในความเป็นจริงระบบย่อยเหล่านี้ไม่สามารถที่จะแยกแต่ละชิ้นส่วนออกมาเป็นส่วนๆ ได้ หรือไม่สามารถแยกอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่งได้ว่าอุปกรณ์นั้นทำหน้าที่โดยเฉพาะ อย่างหนึ่งอย่างใด แต่ในความเป็นจริงอุปกรณ์เหล่านี้ สามารถแยกการทำงานออกเป็นส่วนต่างๆ ได้ตามที่แสดงในรูป 2.6



ที่มา: http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter18.htm

รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

โดยส่วนต่างๆ ในระบบควบคุมแบบปิดนี้จะประกอบด้วย

- Comparison element ส่วนนี้จะทำหน้าที่เปรียบเทียบค่าตัวแปรที่เราต้องการออกมา หรืออาจเรียกว่าค่ามาตรฐานของตัวแปรที่เราต้องการ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เราวัดค่าตัวแปรนั้นได้ในสภาพความเป็นจริง ซึ่งเป็นค่าOutputของระบบ ส่วนนี้จะให้สัญญาณหรือค่าความผิดพลาดออกมา ซึ่งความผิดพลาดนี้จะบอกให้ทราบว่าขณะนี้ค่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่เราต้องการให้มันเป็นเท่าใด นั่นก็คือ

ค่าความผิดพลาด = ค่าสัญญาณอ้างอิง – ค่าสัญญาณที่วัดได้

- Control element เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าจะต้องทำอย่างไร เมื่อได้รับสัญญาณความผิดพลาด เรามักจะใช้คำว่า Controller เมื่อเราเรียกส่วนนี้รวมกับส่วน Correction element
- Correction element ส่วนนี้มีหน้าที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดให้น้อยลง เรามักเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในส่วนนี้ว่า Actuator
- Process element กระบวนการ หรือ Plant จะเป็นระบบซึ่งเราต้องการควบคุมค่าตัวแปรตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว

- Measure element ส่วนนี้จะเป็นส่วนของเครื่องมือวัด ซึ่งเครื่องมือวัดนี้จะให้สัญญาณที่แสดงถึงขนาดของตัวแปรที่เราต้องการที่จะควบคุม และเมื่อได้ค่าที่วัดแล้วก็จะมีการป้อนสัญญาณนั้นกลับเข้าสู่ส่วนเปรียบเทียบ (Comparison element) เพื่อให้ระบบพิจารณาว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่

การทำงานของระบบป้อนกลับนี้จะทำไปเรื่อยๆ จนกว่าค่ามาตรฐาน และค่าที่วัดได้มีค่าเท่ากัน นั่นคือระบบควบคุมของเราสามารถควบคุมให้ค่าตัวแปรที่เราต้องการมีค่าตามที่เรากำหนดได้เรียบร้อยแล้วนั่นเอง ส่วนสำคัญและจำเป็นของระบบควบคุมแบบปิดก็คือส่วนป้อนกลับ ซึ่งหมายถึงสัญญาณที่ได้มาจากค่าตัวแปรที่ต้องการจริงๆ เปลี่ยนเป็นสัญญาณแล้วป้อนกลับ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าของตัวแปรที่ต้องการ การป้อนกลับนี้จะถือว่าเป็นการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เมื่อสัญญาณป้อนกลับนี้นำไปลบออกจากค่าที่ต้องการหรือค่ามาตรฐานนั่นก็คือ

ค่าความผิดพลาด = ค่าสัญญาณอ้างอิง – ค่าสัญญาณป้อนกลับ

การป้อนกลับแบบลบนี้ มีความจำเป็นในการที่เราต้องการให้ค่าตัวแปรที่เราต้องการควบคุมมีค่าตรงกับความต้องการของเราคือค่าของสัญญาณมาตรฐานส่วนการป้อนกลับแบบบวก (Positive feedback) นั้น จะเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณป้อนกลับจะนำมารวมกับค่ามาตรฐาน นั่นคือ

ความผิดพลาด = ค่าสัญญาณอ้างอิง + ค่าสัญญาณป้อนกลับ

2.1.4 คำจำกัดความของระบบควบคุมพื้นฐาน

คำจำกัดความของระบบควบคุมพื้นฐานมีดังนี้

1. สัญญาณด้านเข้า (Input) สัญญาณด้านเข้านั้นบางครั้งเราอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า อินพุทอ้างอิง (Reference input) หรือค่าที่ตั้งไว้ (Set point) ซึ่งหมายถึงค่าหรือผลตอบสนองที่ต้องการของระบบที่ต้องการควบคุมที่กำหนดไว้

2. ตัวควบคุม (Controller) หมายถึงเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการควบคุมให้มีสัญญาณด้านออก (Output) หรือผลตอบสนองตามที่ต้องการ โดยตัวควบคุมจะมีหลายแบบ

3. กระบวนการ (Plant or Process) หมายถึงระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุม หรืออาจจะเป็นวัตถุทางกายภาพที่ถูกควบคุมก็ได้

4. สัญญาณด้านออก (Output) หมายถึง ผลตอบสนองของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมซึ่งโดยทั่วไปแล้วต้องการจะควบคุมให้สัญญาณด้านออกมีค่าตามสัญญาณด้านเข้า (Input)

ที่กำหนด (หรือตามค่าของสัญญาณด้านเข้าที่เปลี่ยนแปลงไป) หรือมีค่าคงเดิมได้เมื่อมีการรบกวนทั้งภายในและภายนอกที่มากระทำต่อระบบควบคุม

5. การรบกวน (Disturbance) หมายถึงสัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นในระบบที่ถูกควบคุม สัญญาณรบกวนนี้อาจเกิดขึ้นที่จุดใดๆในระบบก็ได้ เช่นเกิดขึ้นที่กระบวนการ เกิดขึ้นที่อุปกรณ์วัดเป็นต้น การเกิดขึ้นของสัญญาณรบกวนอาจเกิดขึ้นในเวลาใดๆทั้งที่คาดเดาได้และคาดเดาไม่ได้การรบกวนนี้แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ

- การรบกวนภายใน (Internal disturbance) ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ของอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ
- การรบกวนจากภายนอก (External disturbance) เป็นการรบกวนที่เกิดขึ้นจากภายนอกระบบ แต่มีผลต่อระบบที่กำลังควบคุมอยู่ โดยทั่วไปจะถือว่าการรบกวนจากภายนอกเป็นสัญญาณด้านเข้าหนึ่งที่ไม่พึงประสงค์ของระบบควบคุม

6. อุปกรณ์วัด (Measuring instruments) หมายถึงอุปกรณ์ เช่น เซนเซอร์ (Sensor) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรืออุปกรณ์แปลงสัญญาณ หรือวัดสัญญาณอื่นๆที่ทำหน้าที่วัดค่า Outputของระบบที่ถูกควบคุม

7. ระบบ (System) หมายถึงการนำเอาอุปกรณ์ต่างๆที่สามารถทำงานร่วมกันได้ มารวบรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้ทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งที่ต้องการ เช่น ระบบเชิงกล ระบบทางกายภาพของวงจรไฟฟ้าเป็นต้น

2.2 State space approach

สมการ differential equation อันดับที่ n โดยทั่วไปสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบของกลุ่มสมการ differential equation อันดับที่ 1 ได้ โดยการเปลี่ยนตัวแปรและดิริเวทิฟของตัวแปรที่อยู่ในสมการ differential equation ให้อยู่ในรูปของตัวแปรใหม่ ซึ่งจะเรียกตัวแปรใหม่อย่างนี้ว่า ตัวแปรสเตต (state variables) โดยค่าตัวแปรสเตท เหล่านี้ได้จากการแก้กลุ่มสมการ differential equation อันดับที่ 1 นั้นสามารถนำมาแสดงในปริภูมิ (Space) n มิติ ซึ่งประกอบไปด้วยแกนอ้างอิง n แกนซึ่งได้แก่แกน x_1 ,แกน x_2 ,.......,แกนx_n โดยที่ x_1 , x_2 ,.......,x_n คือ ตัวแปรสเตตและจะเรียก Space ตามที่กล่าวมานี้ว่า State-space

การออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธี State-space นั้นมีข้อดีดังนี้

- ใช้งานได้กับระบบหลายInputและหลายOutput (Multiple-input multiple-output system)
- สามารถใช้กับระบบที่ใช้การออกแบบในโดเมนของความถี่ได้
- สามารถใช้แสดง non linear systems ที่มี backlash , saturation และ dead zone

2.2.1 แบบจำลองปริภูมิสเตต (State – Space Model)

แบบจำลองปริภูมิสเตต (State – Space Model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้สำหรับระบบควบคุมหลายตัวแปร (Multivariable Control System) และระบบที่มีInputและOutputเพียงหนึ่ง (Single Input Single Output)

สมมุติว่าระบบควบคุมหลายตัวแปร มี n Integrators และสมมุติว่ามี r อินพุท $u_1(t), u_2(t), ..., u_r(t)$ ซึ่งเราได้สมการดังต่อไปนี้

$$\dot{x}_1(t) = f_1(x_1, x_2, ... x_n, u_1, u_2, u_r; t)$$
$$\dot{x}_2(t) = f_2(x_1, x_2, ... x_n, u_1, u_2, u_r; t) \qquad (2.1)$$
$$\dot{x}_3(t) = f_3(x_1, x_2, ... x_n, u_1, u_2, u_r; t)$$

และมี m Output $y_1(t), y_2(t), ..., y_m(t)$ ของระบบจะเขียนได้ดังนี้

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad , \quad f(x,u,t) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \\ f_2(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \end{bmatrix},$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix} \quad , \quad g(x,u,t) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \\ g_2(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \ldots, x_n; u_1, u_2, \ldots, u_r; t) \end{bmatrix},$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix} \qquad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.1) และสมการที่ (2.2) จะได้

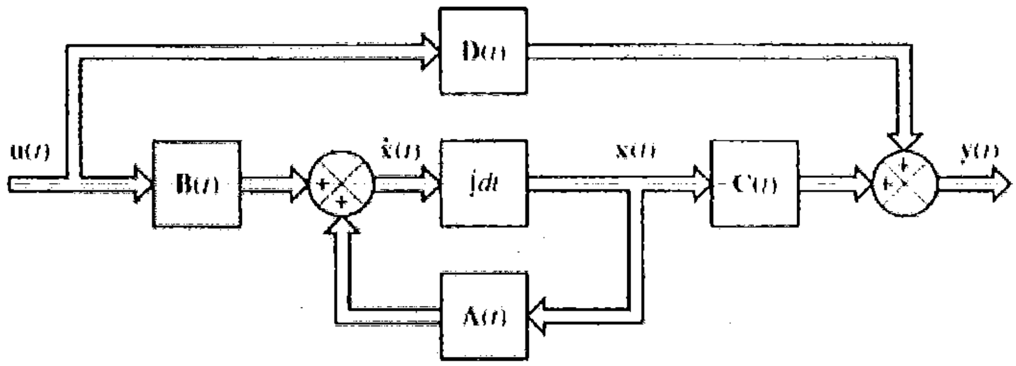
$$\dot{x}(t) = f(x,u,t) \qquad (2.3)$$
$$y(t) = g(x,u,t) \qquad (2.4)$$

โดยที่สมการที่ (2.3) คือ State equation และสมการที่ (2.4) คือ Output equation ถ้าฟังก์ชั่นเวคเตอร์ f และหรือ g มีอิทธิพลต่อเวลา t ที่แสดงออกมาอย่างชัดเจน ดังนั้นจะเรียกระบบนี้คือระบบที่เปลี่ยนตามเวลา (Time-varying system) ถ้าสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) เป็นสมการเชิงเส้น ดังนั้นเราสามารถเขียน State equation และ Output equation ได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \tag{2.5}$$

$$y(t) = C(t)x(t) + D(t)u(t) \tag{2.6}$$

โดยที่ $A(t)$ คือ State matrix $B(t)$ คือ input matrix $C(t)$ คือ Output matrix และ $D(t)$ คือ Transmission matrix จากสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) เราสามารถเขียน block diagram การทำงานของแบบจำลองปริภูมิสเตต ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.7 block diagram ของระบบควบคุมที่แสดงอยู่ในปริภูมิสเตต

2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นถ่ายโอน กับสมการปริภูมิสเตต

การศึกษาการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบจากสมการปริภูมิสเตต เราพิจารณาระบบซึ่งมีฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s)$$

และระบบอาจเขียนแสดงในรูปแบบของปริภูมิสเตต ได้ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2.7}$$

$$y = Cx + Du \tag{2.8}$$

โดยที่

x = state vector

x = derivative of the state vector with respect to time

y = output vector

u = input or control vector

A = system matrix

B = input matrix

C = output matrix

D = feed-forward matrix

สมการที่ (2.7) เรียกว่า state equation และสมการที่ (2.8) เรียกว่า output equation ซึ่ง 2 สมการนี้ สามารถที่จะแทนด้วย block diagram ได้ตามรูปที่ 2.7

เมื่อเราทำ Laplace transform สมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.8) จะได้

$$sX(s) - x(0) = AX(s) + BU(s) \tag{2.9}$$

$$Y(s) = CX(s) + DU(s) \tag{2.10}$$

และเมื่อให้เงื่อนไขเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ เราได้

$$sX(s) - AX(s) = BU(s) \tag{2.11}$$

หรือ $$(sI - A)X(s) = BU(s) \tag{2.12}$$

โดยนำ $(sI - A)^{-1}$ คูณเข้าไปทั้งสองข้าง ซึ่งเราจะได้

$$X(s) = (sI - A)^{-1} BU(s) \tag{2.13}$$

แทนค่า $X(s)$ ลงสมการ(2.10)

$$Y(s) = C(sI - A)^{-1} BU(s) + DU(s) \tag{2.14}$$

จัดรูปสมการใหม่ ได้ดังนี้

$$Y(s) = \left[C(sI - A)^{-1} B + D \right] U(s) \tag{2.15}$$

เราจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชั่นถ่ายโอน ที่แสดงอยู่ในรูปของปริภูมิสเตต ได้ดังนี้

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1} B + D = G(s) \tag{2.16}$$

2.3 การออกแบบระบบควบคุมทาง State space

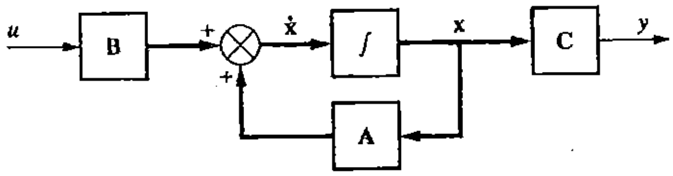
ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เขียนอยู่ในรูป state space ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมทาง State space นั้นมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี pole placement

2.3.1 การออกแบบระบบควบคุมทาง State space โดยวิธี pole placement

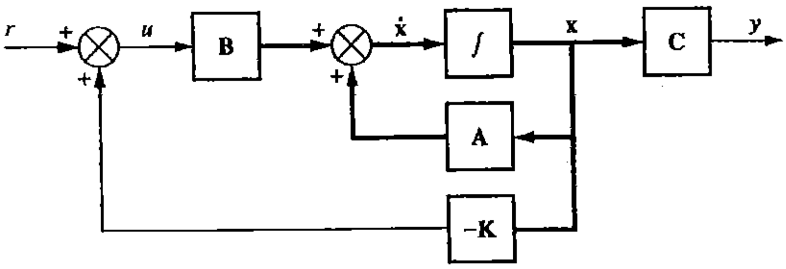
เริ่มต้นพิจารณาระบบที่มีสมการในรูปแบบ state space ดังนี้

$$\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + Bu$$
$$y = C\bar{x}$$

โดย block diagram ของระบบนี้สามารถแสดงได้ในรูป (a) ส่วนรูป (b) เป็นรูปที่แสดง block diagram ของระบบควบคุมทาง state space ที่ไม่มีตัวประมาณค่า(state observer)



(a)



(b)

จากรูปจะเห็นว่าตัวสเตตทุกตัวจะถูกดึงป้อนกลับผ่าน gain K ไปยัง input ของระบบ u ดังนั้นจะได้ว่า

$$u = -K\bar{x}$$

โดยที่

$$K = [k_1, k_2, \ldots, k_n]$$

และจาก block diagram ในรูป (b) จะได้ state equation ของระบบควบคุมนี้เป็น

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + Bu = A\vec{x} + B(-K\vec{x} + r) = (A - BK)\vec{x} + Br$$
$$y = C\vec{x}$$

และจะได้สมการ characteristic equation ของระบบปิดนี้เป็น

$$|sI - (A - BK)| = 0$$

2.3.2 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมโดยวิธี pole placement ที่ plant ของระบบแสดงอยู่ในรูป phase-variable

การออกแบบระบบควบคุมโดยวิธี pole placement ที่ plant ของระบบแสดงอยู่ในรูป phase-variable มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หาแบบจำลอง plant ของระบบในรูปแบบ state space ที่แสดงอยู่ในรูป phase-variable
2. สมมติชั่วคราวก่อนว่าคำสั่งInputอ้างอิง r เป็น 0
3. ดึงตัวสเตตทุกตัวป้อนกลับผ่าน gain K ไปที่ input u ซึ่งจะได้กฎการควบคุมของระบบเป็น $u = -K\vec{x}$
4. หาสมการ characteristic equation ของระบบปิดที่ได้ในข้อ 3.
5. หาตำแหน่ง pole ทั้งหมดของระบบจากข้อมูลการตอบสนองต่อเวลาที่ต้องการ แล้วนำ pole ทั้งหมดที่ได้มาหาสมการ characteristic equation
6. นำสัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของสมการ characteristic equation ที่ได้ในข้อ 4 และ 5 มาเทียบกันเพื่อหาค่า gain k_i

จากขั้นตอนตามที่กล่าวมานี้ สามารถแสดงการหาค่า gain k_i ที่ plant ของระบบแสดงอยู่ในรูป phase-variable ได้ดังนี้

plant ของระบบอยู่ในรูป phase-variable โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 1 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & & . & & . \\ . & . & . & & . & & . \\ . & . & . & & . & & . \\ -a_o & -a_1 & -a_2 & . & . & . & -a_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ . \\ 1 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & . & . & . & c_n \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้สมการ characteristic equation เป็น

$$s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \ldots + a_1 s + a_o = 0$$

ต่อมาเมื่อทำการดึงตัวสเตตทุกตัวป้อนกลับผ่าน gain K ไปที่ input u จะได้กฎการควบคุมของระบบเป็น

$$u = -K\vec{x}$$

โดยที่

$$K = [k_1, k_2, \ldots, k_n]$$

และจะเรียกค่า k_i ว่า phase variable feedback gains

จากสมการที่ (4) จะได้เมตริกระบบ $(A - BK)$ ของระบบปิดเป็น

$$A - BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & 0 & 1 & . & . & . & 0 \\ . & . & . & & . & & . \\ . & . & . & & . & & . \\ . & . & . & & . & & . \\ -(a_o + k_1) & -(a_1 + k_2) & -(a_2 + k_3) & . & . & . & -(a_{n-1} + k_n) \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้สมการ characteristic equation ของระบบปิดเป็น

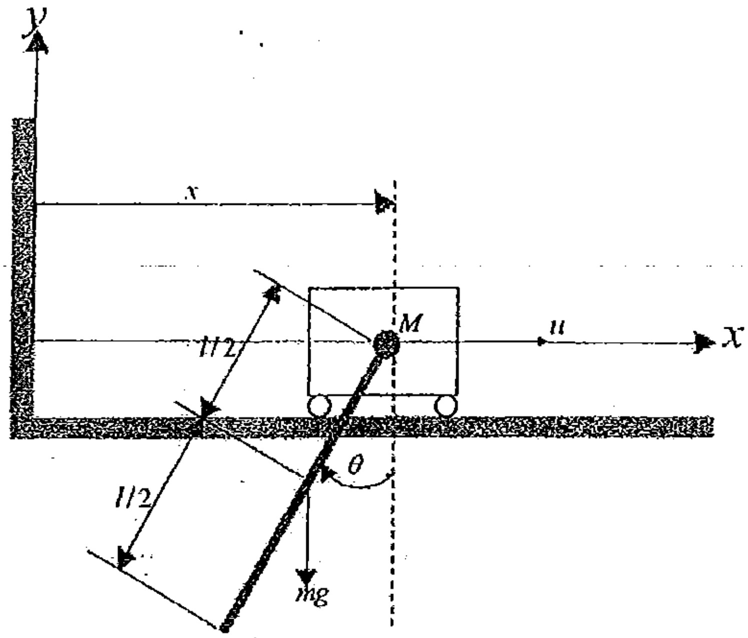
$$|sI - (A - BK)| = s^n + (a_{n-1} + k_n)s^{n-1} + \ldots + (a_1 + k_2)s + (a_o + k_1) = 0$$

บทที่ 3

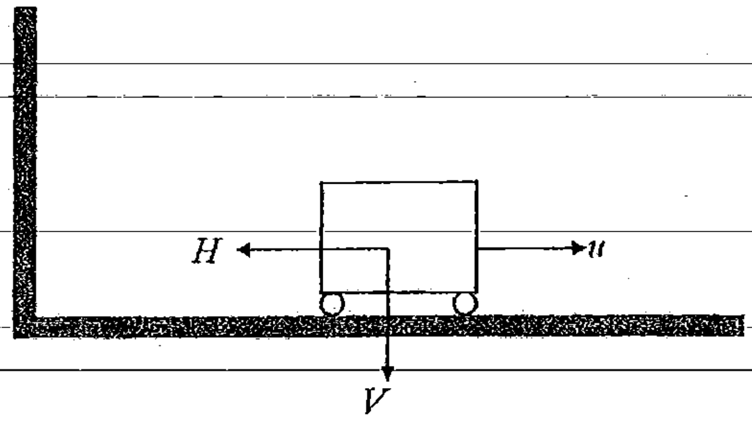
การวิเคราะห์ระบบกลไกของเครน

3.1 การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเครน

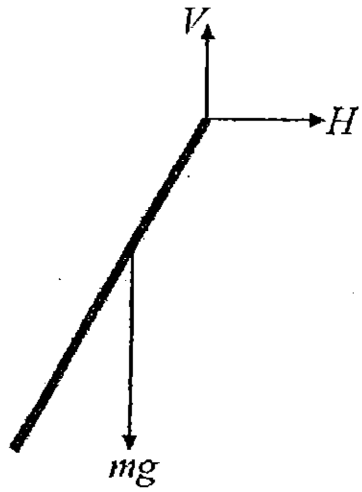
การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการศึกษาระบบควบคุมเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของระบบได้อย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงลักษณะการทำงานของเครนสามารถแบ่งได้หลายส่วนด้วยกัน ในที่นี้จะพิจารณาในส่วนที่เครนยกภาระขึ้นมาแล้วและเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของเครน



รูปที่ 3.2 Free body diagram ของตัวรถ



รูปที่ 3.3 Free body diagram ของ Pendulum

จากตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่กำหนดในรูป ถ้าให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแท่งเหล็กเป็น (x_G, y_G) แล้วจะได้

$$x_G = x - \frac{1}{2}\sin\theta$$

$$y_G = -\frac{1}{2}\cos\theta$$

เนื่องจากเราต้องการที่จะควบคุมให้ก้านไม้อยู่ในแนวดิ่ง ดังนั้นจึงถือว่า θ มีค่าน้อยมาก ซึ่งจะทำให้ $\sin\theta \approx \theta$ และ $\cos\theta \approx 1$ ดังนั้นสมการตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของก้านไม้จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$x_G = x - \frac{1}{2}\theta$$

$$y_G = -\frac{1}{2}$$

จาก free – body diagram สามารถแยกวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบได้ดังนี้

- การหมุนของแท่งเหล็กรอบจุดศูนย์กลางมวล

จาก free – body diagram ของแท่งเหล็กเมื่อคิดโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางมวลแล้วจะได้สมการการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$H\left(\frac{l\cos\theta}{2}\right) - V\left(\frac{l\sin\theta}{2}\right) = J_G\ddot{\theta}$$

โดยที่ $J_G = \frac{1}{2}ml^2$ และเนื่องจากมุม θ ที่กำลังพิจารณามีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการนี้จึงสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{Hl}{2} - \frac{Vl\theta}{2} = \frac{1}{12}ml^2\ddot{\theta} \qquad (3.1)$$

- การเคลื่อนที่ในแนวราบของแท่งเหล็ก

จาก free – body diagram ของแท่งเหล็กเมื่อพิจารณาแรงในแนวราบแล้วจะได้สมการการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$H = m\frac{d^2}{dt^2}\left(x - \frac{l\theta}{2}\right)$$

$$H = m\left(\ddot{x} - \frac{l}{2}\ddot{\theta}\right) \qquad (3.2)$$

- การเคลื่อนที่ในแนวดิ่งของแท่งเหล็ก

จาก free – body diagram ของแท่งเหล็กเมื่อพิจารณาแรงในแนวดิ่งแล้วจะได้สมการการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$mg - V = m\frac{d^2}{dt^2}\left(-\frac{l}{2}\right) = 0$$

$$V = mg \qquad (3.3)$$

- การเคลื่อนที่ในแนวราบของตัวรถ

จาก free – body diagram ของตัวรถเมื่อพิจารณาแรงในแนวราบแล้วจะได้สมการการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$u - H = M\ddot{x} \qquad (3.4)$$

เมื่อทำการแทนในสมการที่ (3.2)ลงในสมการที่ (3.4) แล้วจะได้ผลออกมาเป็นดังนี้

$$(M+m)\ddot{x} - \frac{ml}{2}\ddot{\theta} = u \qquad (3.5)$$

และเมื่อทำการแทนสมการที่ (3.2)และ (3.3) ลงในสมการที่ (3.1) แล้วจะได้ผลออกมาเป็นดังนี้

$$2l\ddot{\theta} - 3\ddot{x} = -3g\theta \qquad (3.6)$$

สมการที่ (3.5) และ (3.6) สมการที่จะดัดแปลงและเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$(4Ml + ml)\ddot{\theta} = -6(M+m)g\theta + 6u \qquad (3.7)$$

$$(4M + m)\ddot{x} = 4u - 3mg\theta \qquad (3.8)$$

สมการที่ (3.5) และ (3.6) ที่ได้นี้นำมากำหนดแทนเป็นตัวแปร state ได้ดังนี้

$$x_1 = \theta$$
$$x_2 = \dot{x}_1$$
$$x_3 = x$$
$$x_4 = \dot{x}_3$$

จากตัวแปร state ที่กำหนดแทนนี้สามารถนำมาเขียนได้ใหม่เป็น

$$\dot{x}_1 = x_2$$
$$\dot{x}_2 = -\frac{6(M+m)g}{4Ml+ml}x_1 + \frac{6}{4Ml+ml}u$$
$$\dot{x}_3 = x_4$$
$$\dot{x}_4 = -\frac{3mg}{4M+m}x_1 + \frac{4}{4M+m}u$$

เนื่องจากตัวแปรที่เราต้องการควบคุมคือ x และ θ ดังนั้น output ของระบบจึงเป็น

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ x \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะใช้ state equation และ output equation เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\dfrac{6(M+m)g}{4Ml+ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{3mg}{4M+m} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{6}{4Ml+ml} \\ 0 \\ \dfrac{4}{4M+m} \end{bmatrix} u$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $y_1 = \theta$, $y_3 = x$

จากค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากระบบจริงที่สร้างขึ้นมาซึ่งสามารแสดงได้ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบกลไกของเครน

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ปริมาณ
M	มวลของตัวรถ	1.5 kg.
m	มวลของภาระ	1.0 kg.
l	ความยาวเชือกของเครน	2.0 m
g	แรงโน้มถ่วง	9.81 m/s^2

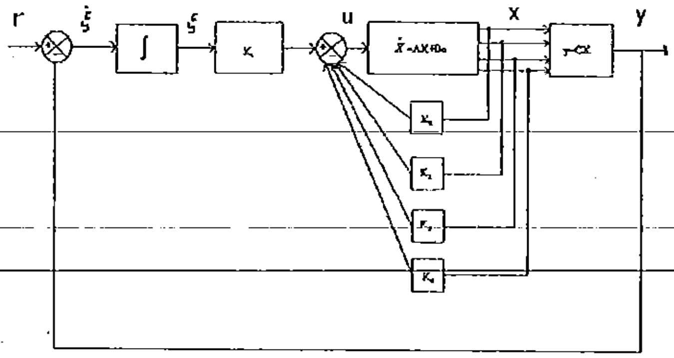
แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆในสมการ state equation และ output equation แล้วจะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -10.5107 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.2042 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4285 \\ 0 \\ 0.5714 \end{bmatrix} u$$

3.2 การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครนทาง State space

ปัญหาการควบคุมการทำงานของระบบกลไกของเครนเป็นปัญหาแบบการติดตามค่าอ้างอิง (Tracking Problem) เพื่อให้ผลตอบสนองลู่เข้าสู่ค่าอ้างอิงที่ตั้งไว้โดยมีค่าผิดพลาดและมีการแกว่งน้อยที่สุด ใน Project นี้ได้เลือกใช้การกลับสถานะ (State Feedback) ร่วมกับตัวควบคุมปริพันธ์ (Integrator) และ $\dot{\xi} = r - y$

ในการออกแบบระบบควบคุมทาง State space ของระบบเครนสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.4 ระบบควบคุมทาง State space ของระบบเครน

โดยที่

u = สัญญาณควบคุม (Input)

y = สัญญาณ Output

ξ = สัญญาณ Out put ที่ออกจากตัว Integrator

r = Reference input

ขั้นตอนแรกโดยเราจะกำหนด

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -10.5107 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.2042 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0.4285 \\ 0 \\ 0.5714 \end{bmatrix} \qquad C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

จาก Block diagram จะได้ว่า

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.9}$$

$$y = Cx \tag{3.10}$$

$$u = -kx + k_I\xi \tag{3.11}$$

$$\dot{\xi} = r - y = r - Cx \tag{3.12}$$

จากสมการที่ (3.9) ถึง (3.12) สามารถนำมาแสดงเป็น State space ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) \\ \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} r(t) \tag{3.13}$$

และจะได้การตอบสนองของระบบในสภาวะคงตัวเป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(\infty) \\ \dot{\xi}(\infty) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(\infty) \\ \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} u(\infty) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) \tag{3.14}$$

ถ้าให้ r(t) เป็นแบบ Unit step input แล้วจะได้ว่า $r(\infty) = r(t) = 1$ ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (3.13) ไปลบออกจากสมการที่ (3.14) แล้วจะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}(t) - \bar{x}(\infty) \\ \dot{\xi}(t) - \dot{\xi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) - \bar{x}(\infty) \\ \xi(t) - \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{x}(t) - \bar{x}(\infty) \\ \xi(t) - \xi(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \end{bmatrix} r(\infty) - r(\infty) \tag{3.15}$$

ถ้ากำหนดให้

$$x(t) - x(\infty) = x_e(t)$$

$$\xi(t) - \xi(\infty) = \xi_e(t)$$

$$u(t) - u(\infty) = u_e(t)$$

ดังนั้นเมื่อนำไปแทนลงในสมการที่ (3.15) แล้วจะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}}_e(t) \\ \dot{\xi}_e(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} u_e(t) \tag{3.16}$$

โดยที่

$$u_e(t) = -k\bar{x}_e(t) + k_I \xi_e(t)$$

และถ้าให้ $\bar{e}\ (t)$ แทนเวกเตอร์ของ Error ซึ่งมีค่าเป็น

$$\bar{e}\ (t) = \begin{bmatrix} x_e(t) \\ \xi_e(t) \end{bmatrix}$$

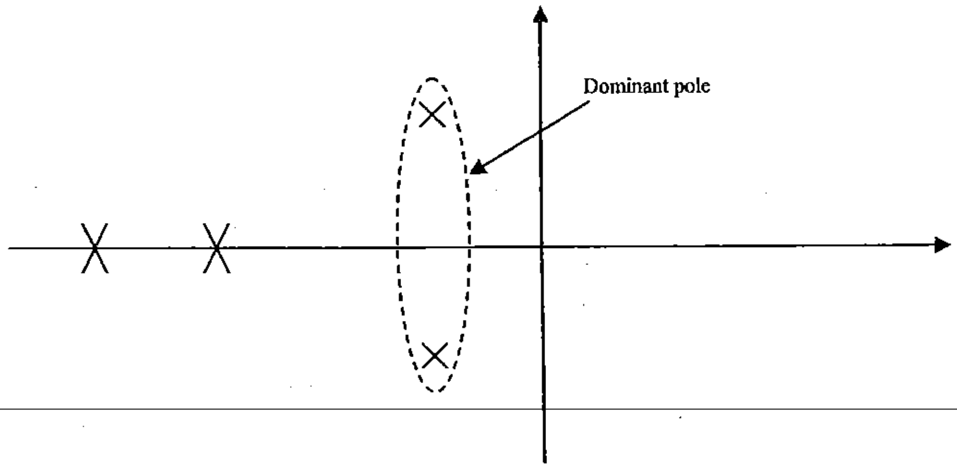
ดังนั้นสมการที่ (3.16) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{\bar{e}} = (\hat{\mathbf{A}} - \hat{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{K}})\bar{e} \qquad (3.17)$$

โดยที่

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \qquad \hat{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \hat{K} = \begin{bmatrix} K & -k_I \end{bmatrix}$$

ซึ่งค่า K และค่า k_I นั้นสามารถหาได้จากค่า Eigen values ที่ต้องการของเมตริก $\hat{A} - \hat{B}\hat{K}$ (หรือค่า Pole ของระบบปิดที่ต้องการ) ซึ่งในที่นี้เรากำหนดตำแหน่ง pole ซึ่งโดยทั่วไปจะเลือกกำหนดให้อยู่บนแกนจริงทางด้านลบโดยให้มีตำแหน่งไกลจาก dominant pole ประมาณ 5 เท่า ซึ่งสำหรับในหัวข้อนี้เมื่อพิจารณาดูจะเห็นว่าระบบนี้เป็นระบบขั้นที่ 4 ดังนั้นตำแหน่ง pole ที่ต้องการวางจึงต้องมี 4 ตำแหน่งตามที่แสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.5 ตำแหน่ง pole ของระบบ

เพื่อให้การตอบสนองของระบบลู่เข้าค่า steady state อย่างรวดเร็วดังนั้นจึงเลือกกำหนดสมรรถนะการตอบสนองของระบบเป็นดังนี้

1. Percent overshoot 8.9 %
2. Setting time 0.7 วินาที

จากสมรรถนะที่กำหนดนี้สามารถคำนวณค่า Dominant pole ได้เป็น

จากสมการ Percent overshoot (PO) $= 100e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$

แทนค่า $8.9 = 100e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}}$

จะได้ $\xi = 0.61$

และสมการ Setting time (t_s) $= \dfrac{-\ln(0.02\sqrt{1-\xi^2}}{\xi\omega_n}$

แทนค่า $0.7 = \dfrac{-\ln(0.02\sqrt{1-(0.61)^2}}{(0.61)\omega_n}$

จะได้ $\omega_n = 9.7435$

จากระบบขั้น 2 ซึ่งมีรูปแบบสมการโดยทั่วไปเป็น

$$S^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2 = 0 \qquad (3.18)$$

เมื่อแทนค่า $\xi =$ และ $\omega_n =$ ลงในสมการที่ (3.18) จะได้

$$S^2 + 11.887S + 94.9357 = 0 \qquad (3.19)$$

ดังนั้นเมื่อแก้สมการได้ Dominant pole เป็น

$$\mu_1 = -5.9435 + 7.7207i$$

$$\mu_2 = -5.9435 - 7.7207i$$

ส่วนตำแหน่ง pole ที่เหลืออีก 2 ค่านั้นจะเลือกให้มีตำแหน่งไกลจาก dominant pole ประมาณ 5 เท่า และจะให้ pole ทั้งสองมีค่าซ้ำกัน ดังนั้นจะได้ค่า pole ทั้งสองเป็น

$$\mu_3 = -29.5$$

$$\mu_4 = -29.5$$

เมื่อทราบตำแหน่ง Pole ของระบบปิดที่ต้องการแล้วต่อมาก็สามารถหาค่า gain K โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ช่วย

จากโปรแกรม Matlab จะได้ค่า gain K ออกมาเป็น

$$K = [-2233.7 \quad -489.2 \quad 1965.1 \quad 379.3]$$

ดังนั้นจากสมการของระบบปิด

$$\dot{\bar{x}} = (A - BK)\bar{x} + Br$$
$$y = C\bar{x}$$

เมื่อทำการแทนค่าจะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 946.62975 & 209.6222 & -842.0453 & -162.5300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1272.1319 & 279.5288 & -1122.8581 & -216.7320 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4285 \\ 0 \\ 0.5714 \end{bmatrix} r$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

ทำการตรวจสอบค่า steady state ของระบบปิด เนื่องจากระบบนี้มี 1 input แต่มี 2 output ดังนั้นเพื่อวิเคราะห์ค่าค่า steady state จึงต้องหาค่า transfer function $Y_1(s)/R(s)$ และ $Y_3(s)/R(s)$ โดยอาศัยโปรแกรม Matlab ช่วยจะได้ค่า transfer function ออกมาเป็น

$$\frac{Y_1(s)}{R(s)} = \frac{0.4286s^2}{s^4 + 71s^3 + 1667s^2 + 15946s + 82617}$$

$$\frac{Y_3(s)}{R(s)} = \frac{0.5714s^2 - 4.2043}{s^4 + 71s^3 + 1667s^2 + 15946s + 82617}$$

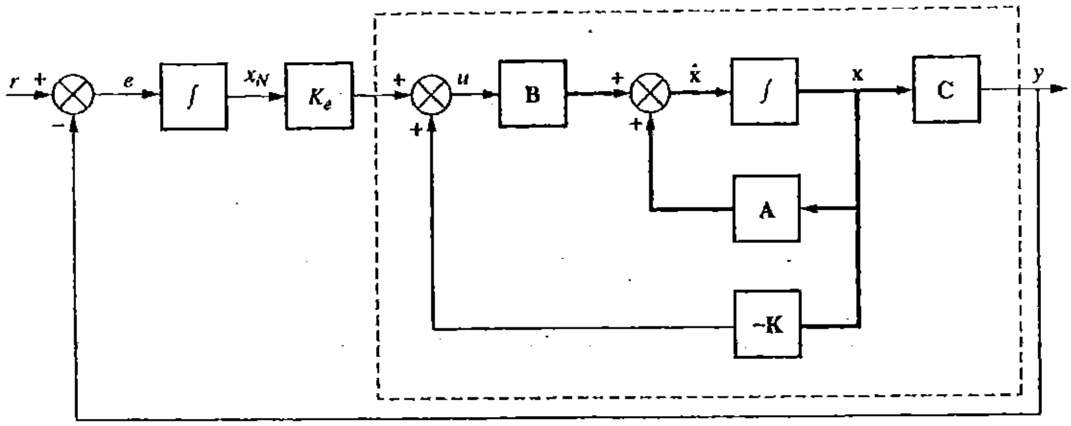
ถ้า $R(s)$ เป็นแบบ unit step function โดยอาศัยทฤษฎี final value จะได้ค่า steady state error ในแต่ละกรณีออกมาเป็น

$$y_1(\infty)=\lim_{s\to 0}\left[\frac{0.4286s^2}{s^4+71s^3+1667s^2+15946s+82617}\right]=0$$

$$y_3(\infty)=\lim_{s\to 0}\left[\frac{0.5714s^2-4.2043}{s^4+71s^3+1667s^2+15946s+82617}\right]=-5.08\times 10^{-5}$$

จากค่า steady state ที่ได้นั้นจะเห็นว่าค่า steady state ของ y_1 นั้นเป็นไปตามต้องการแล้วแต่ค่า steady state ของ y_3 นั้นยังไม่เป็นไปตามต้องการ(ในที่นี้ต้องเท่ากับ 1) ดังนั้นเพื่อแก้ค่า steady state error ของ y_3 ในขั้นตอนต่อไปจึงต้องใส่ I-control เข้าไปในระบบแล้วทำการออกแบบระบบใหม่ทั้งหมด

ทำการใส่ I-control เข้าไปในระบบควบคุมแล้วทำการออกแบบระบบใหม่ทั้งหมด ซึ่งเมื่อใส่ I-control เข้าไปในระบบควบคุมแล้วจะได้ block diagram ตามที่แสดงในรูปด้านล่าง



รูปที่ 3.6 block diagram

โดยในที่นี้ output y ใน block diagram คือ y_3(สาเหตุที่เป็น y_3 ก็เพราะว่าเราต้องการแก้ค่า steady state error ของ y_3) ดังนั้นจากรูปจะได้ state equation และ output equation ออกมาเป็น

$$\dot{\bar{x}}=A\bar{x}+Bu$$
$$\dot{x}_N=-C\bar{x}+r$$
$$y=C\bar{x}$$

หรือแสดงอยู่ในรูปของเมตริกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & [0] \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} [0] \\ 1 \end{bmatrix} r$$

$$y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสำหรับตัวอย่างนี้เมื่อทำการแทนค่าจะได้ผลออกมาเป็น

$$\dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\dfrac{6(M+m)g}{4Ml+ml} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\dfrac{3mg}{4M+m} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{6}{4Ml+ml} \\ 0 \\ \dfrac{4}{4M+m} \end{bmatrix} u$$

$$\dot{x}_N = -[0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]\bar{x} + r$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]\bar{x}$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{6(M+m)g}{4Ml+ml} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\dfrac{3mg}{4M+m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{6}{4Ml+ml} \\ 0 \\ \dfrac{4}{4M+m} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$
\mathrm{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\dfrac{6(M+m)g}{4Ml+ml} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\dfrac{3mg}{4M+m} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathrm{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dfrac{6}{4Ml+ml} \\ 0 \\ \dfrac{4}{4M+m} \\ 0 \end{bmatrix}
$$

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

เนื่องจากตอนนี้ order ของระบบเพิ่มขึ้นมาเป็น 5 ดังนั้น pole ที่ต้องการจะวางนั้นจะต้องมี 5 ตัวโดยจะเลือกให้ dominant pole นั้นเหมือนกับที่เลือกกำหนดในขั้นตอนที่ 2 และ pole ที่เหลืออยู่อีก 3 ตัวก็จะเลือกให้มีค่าซ้ำกันเหมือนกับกรณีแรกดังนั้นจะได้ค่าตำแหน่ง pole ที่ต้องการทั้งหมดเป็น

$$\mu_1 = -5.9435 + 7.7207i$$
$$\mu_2 = -5.9435 - 7.7207i$$
$$\mu_3 = -29.5$$
$$\mu_4 = -29.5$$
$$\mu_5 = -29.5$$

เมื่อทราบค่า pole ที่ต้องการแล้วเราสามารถใช้โปแกรม MATLAB เพื่อหาค่า Feedback gain matrix **K** และ gain ของ I-control $\mathbf{K_e}$ ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$K = \begin{bmatrix} -166640 & 84640 & 131540 & -63300 \end{bmatrix}$$
$$K_e = 579690$$

ดังนั้นจะได้สมการ state space ของระบบปิดที่มี I-control เป็น

$$
\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A - BK) & \mathbf{B}K_e \\ -\mathbf{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ 1 \end{bmatrix} r
$$

$$
y = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix}
$$

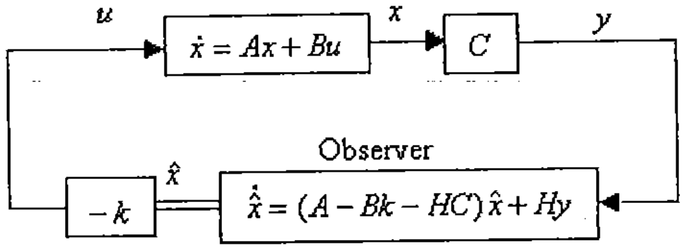
แทนค่า

$$\begin{bmatrix} \dot{\bar{x}} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 71395 & -36268 & -56364 & 27124 & 248397 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 95214 & -48363 & -75162 & 36169 & 331234 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [0] \\ 1 \end{bmatrix} r$$

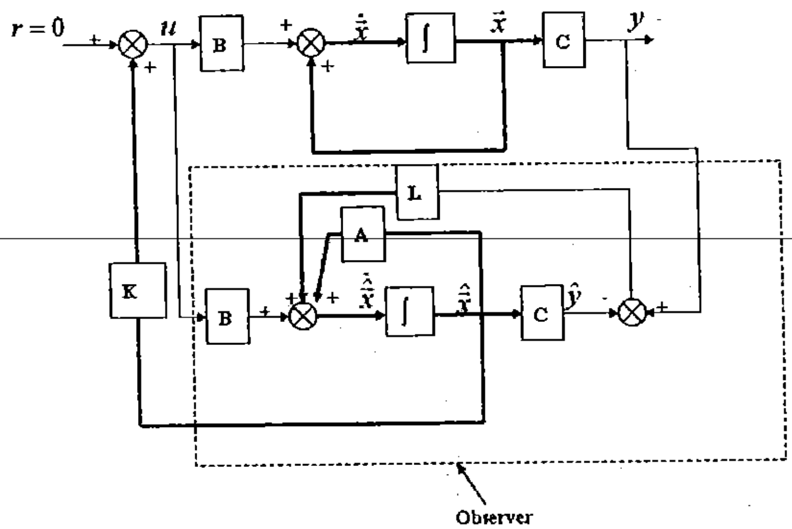
$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ x_N \end{bmatrix}$$

3.3 ออกแบบตัว Observer (ตัวประมาณค่า)

เนื่องจากในการออกแบบจริงในการสร้างแบบจำลองระบบเครนจำเป็นที่จะต้องมีตัวจับสัญญาณหลายตัวแต่เราไม่มีตัวจับสัญญาณเป็นจำนวนมาก แต่เราสามารถที่จะประมาณค่าของตัวจับสัญญาณนั้นๆได้โดยการติดตั้ง Observer ลงใน State space ซึ่งมีวิธีการคำนวณหาค่าดังนี้



ในระบบหัวข้อนี้เมื่อใส่ตัว Observer เข้าไปแล้วสามารถแสดงในรูปด้านล่าง



ถ้า $y = x_1$ ดังนั้นสมการ state equation ของ plant จะเป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -10.5107 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -4.2042 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.4285 \\ 0 \\ 0.5714 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

จาก State space ของระบบนี้ดังนั้นเราจะได้สมการ Characteristic Equation เป็น

$$S^4 - 10.5107 S^2 = 0 \tag{3.20}$$

จากสมการที่ (3.20) สามารถหารากคำตอบของสมการได้เป็น 0, 0, 3.2420, -3.2420

เมื่อนำมาแทนในรูปแบบทั่วไปของ Observer canonical form ก็จะได้รูปแบบเมตริกใหม่เป็น

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.5107 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

หาสมการ Characteristic Equation ของตัวObserver จากสมการ $\dot{\bar{e}}_x = (A - LC)\bar{e}_x$

$$\dot{\hat{\bar{e}}}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 10.5107 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{\bar{e}}_x$$

$$\dot{\hat{\bar{e}}}_x = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 & 0 & 0 \\ 10.5107 - l_2 & 0 & 1 & 0 \\ -l_3 & 0 & 0 & 1 \\ -l_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{\bar{e}}_x$$

ดังนั้นจะได้สมการ Characteristic Equation เป็น

$$\left| S - (A - LC) \right| = S^4 + l_1 S^3 + (l_2 - 10.5107) S^2 + l_3 S + l_4 = 0 \tag{3.21}$$

ต้องหาตำแหน่งของ Pole ของตัว Observer ที่เราต้องการจะวางซึ่งโดยปกติจะออกแบบให้การตอบสนองของตัว Observer ไวกว่า 10 เท่า ของการตอบสนองของระบบปิด ดังนั้นเราจะเลือกตำแหน่งของโพลของตัว Observer ห่างจากโพลของระบบปิดเป็น 10 เท่า เราจะได้

$$S_1 = -59.435 + 77.207i$$
$$S_2 = -59.435 - 77.207i$$
$$S_3 = -590$$
$$S_4 = -590$$

เมื่อได้ค่า Pole ที่ต้องการแล้วต่อมานำค่า Pole นั้นมาหาค่าสมการ Characteristic equation ที่ต้องการดังนี้

$$(S+590)^2[S-(-59.435+77.207i)][S-(-59.435-77.207i)] = 0$$
$$(S+590)^2(s^2+118.87s+9493.44) = 0$$
$$S^4 + 1298.87S^3 + 507860.04S^2 + 52580906S + 3304666464 = 0 \qquad (3.22)$$

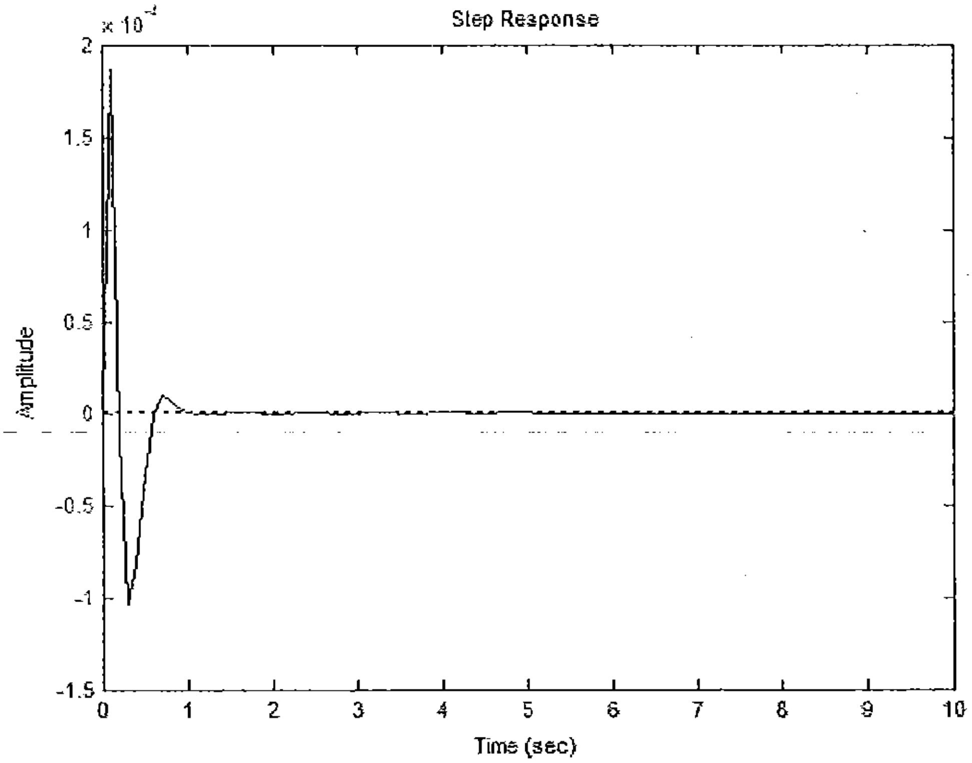
นำค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ Characteristic equation ของสมการที่ (3.21) และ สมการที่ (3.22) มาเทียบกันจะได้

$$l_1 = 132.7834$$
$$l_2 = 507849.5293$$
$$l_3 = 52580906$$
$$l_4 = 3304666464$$

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

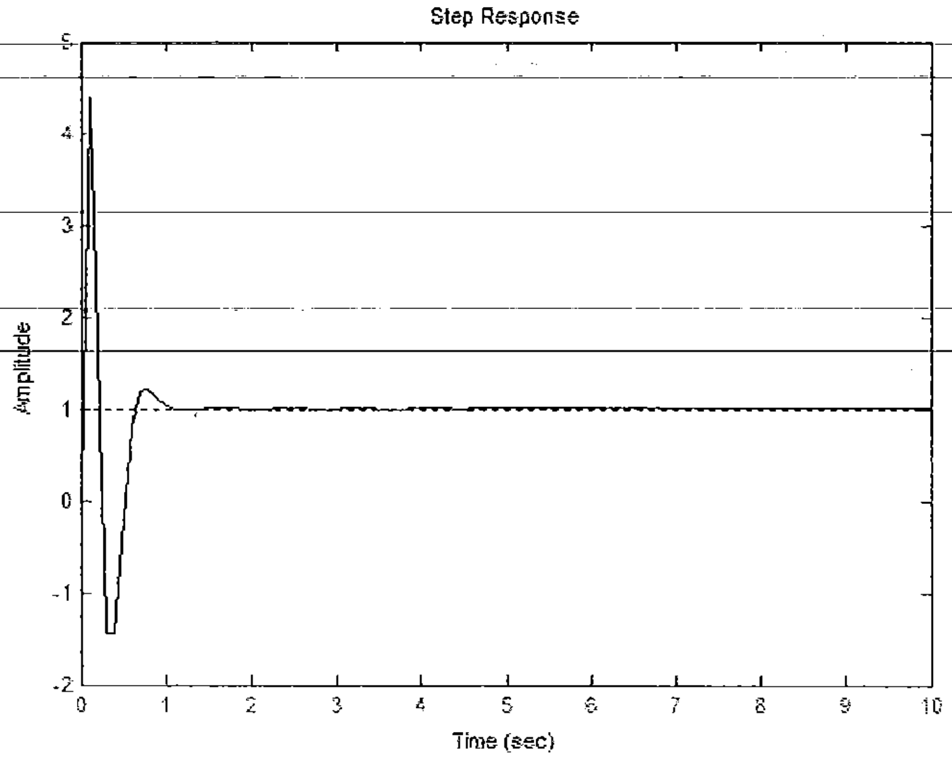
ในบทนี้จะนำระบบควบคุมของระบบที่ออกแบบมาได้ในบทที่ 3 มาทำการทดสอบสมรรถนะในโปรแกรม MATLAB โดยการทดสอบนี้จะเป็นกรณีที่ไม่ใส่ Disturbance ซึ่งจะได้กราฟการตอบสนองออกมาดังนี้



กราฟ 4.1 Step response ของมุมของแท่ง Pendulum

จากกราฟ 4.1 จะเห็นว่ากราฟจะมีการกวัดแกว่งในช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายจะลู่เข้าค่าคงที่ตามที่ตั้งไว้ (ในที่นี้คือ 0) ซึ่งถ้านำมาตีความหมายเป็นการเคลื่อนที่จะได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นสั้นๆ ตัวแท่ง pendulum จะแกว่งและสุดท้ายจะหยุดนิ่งอยู่ในแนวดิ่ง

เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟที่ได้นี้จะเห็นว่ากราฟการตอบสนองนี้มีค่า Percent overshoot เท่ากับ1.85 และ Setting time 1



กราฟ 4.2 Step response ของ ระยะทางของตัวรถ

จากกราฟ 4.2 จะเห็นว่ากราฟจะมีการกวัดแกว่งในช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายจะลู่เข้าค่าคงที่ตามที่ตั้งไว้ (ในที่นี้คือ 1) ซึ่งถ้านำมาตีความหมายเป็นการเคลื่อนที่จะได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นตัวรถจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาและสุดท้ายตัวรถจะมาหยุดอยู่ตรงตำแหน่งที่ต้องการ

เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟที่ได้นี้จะเห็นว่ากราฟการตอบสนองนี้มีค่า Percent overshoot เท่ากับ 4.4 และ Setting time 1

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิเคราะห์

โครงงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบควบคุมให้กับระบบโครงติดรออกยกของ เพื่อให้ตัวรถเครนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการพร้อมกันกับควบคุมไม่ให้แท่ง pendulum เกิดการแกว่ง โดยในที่นี้จะเลือกใช้การควบคุมแบบ state space ซึ่งเมื่อนำระบบควบคุมที่ออกแบบมาได้นั้นไปสร้างแบบจำลองและทดสอบสมรรถนะในโปรแกรม matlab จะพบว่าระบบควบคุมนี้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ตามที่กล่าวมาข้างต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากโครงงานนี้ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของรถเครนและได้ทำการทดลองโดยไม่ใส่ Disturbance ดังนั้นในการนำไปใช้งานจริงจึงควรที่จะใส่ Disturbance เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ควรจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบในหลายๆด้านด้วยไม่ว่าจะเป็น สัญญาณรบกวนแบบอื่นๆ สิ่งแวดล้อมโดยรอบ และบุคลากร เป็นต้น

บรรณานุกรม

[1]Prabha Kundur “Power system and Control”McGraw Hill,1994

[2]รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล “คู่มือการใช้งานMATLABฉบับสมบูรณ์” .
พิมพ์ครั้งที่ 1.กรุงเทพฯ :2543

[3] http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter12.htm

[4] http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter13.htm

[5] http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter14.htm

[6] http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter17.htm

[7] http://www.sut.ac.th/e-texts/Eng/Automatic/chapter18.htm

ประวัติผู้เขียนโครงงาน

ชื่อ นางสาวอนุธิดา หงษ์ศรี

ภูมิลำเนา 281 หมู่ 4 ต. นาบ่อคำ อ. เมือง จ. กำแพงเพชร

ประวัติการศึกษา

-จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนผินสหราษฎร์พัฒนา จ. กำแพงเพชร

-จบชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนหนองกองวิทยาคม จ . กำแพงเพชร

-ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อ นางสาวเบญจวรรณ สุขโรจน์

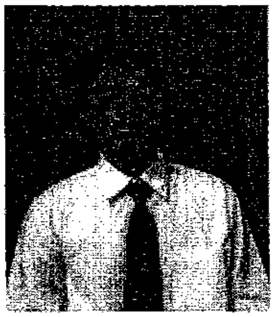
ภูมิลำเนา 7 หมู่ 5 ต.วังแดง อ. ตรอน จ.อุตรดิตถ์

ประวัติการศึกษา

-จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านใหม่เยาวชนฯ จ. อุตรดิตถ์

-จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตรอนตรีสินธ์ จ.อุตรดิตถ์

-ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



ชื่อ นายปฏิเวธ ภัยอย่ามี

ภูมิลำเนา 4/1 หมู่ 1 ต.ซับสมบูรณ์ อ.วิเชียรบุรี จ.เพชรบูรณ์

ประวัติการศึกษา

-จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านซับสมบูรณ์ จ.เพชรบูรณ์

-จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนนิยมศิลป์อนุสรณ์ จ.เพชรบูรณ์

-ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร