

การศึกษาระบบไม่มีเสถียรภาพ

A Study on Unstable System



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 62012
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2549

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
1

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาระบบ ไม่มีเสถียรภาพ
A Study on Unstable System

ผู้จัดทำ นางสาวชัชวราภรณ์ สมัยสงค์ 44010098
นางสาวศิริพร ประสิทธิ์มีสมใจ 44010486



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ

A study on unstable system

โดย

นางสาวชัชววรรณ สมัยสงค์

นางสาวศิริพร ประสิทธิ์มีสมใจ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์จกมล งามวิวิทย์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำการศึกษาขั้นตอนการออกแบบ โครงสร้าง แล้วหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ และสร้างอินเวอร์สเฟนดูลัมบนรถสองล้อขึ้น เพื่อจุดมุ่งหมายในการศึกษาถึงระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ และนำความรู้ด้านการหาตัวควบคุมมาปรับปรุงให้ระบบมีเสถียรภาพ ควบคุมมุมของแกนอินเวอร์สเฟนดูลัมให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

ขั้นตอนของการศึกษาประกอบด้วย การศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ออกแบบโครงสร้างทางกลศาสตร์ของระบบแล้วหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ นำแบบจำลองที่ได้มาทำการประมาณค่าพารามิเตอร์บางตัว ทำการประมาณค่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีลิเนียร์ไรซ์ (Linearize) แล้วทำการออกแบบตัวควบคุมระบบแบบป้อนกลับและแบบประมาณค่าสถานะท้ายที่สุดทำการทดลองจริงโดยเปรียบเทียบกับผลการจำลองระบบ

ABSTRACT

This thesis presents the study implementation a design of structure find mathematical model of system and built two wheels on invert pendulum for object is a study on unstable system and use knowledge about controller modify for stable system until control angle of invert pendulum.

This project is has been conducted as in the following step. First the model has been implemented. A study on mathematical model. Design structures of system and find mathematical model of system. Some parameter of mathematical model can be estimated. For simplicity, the linear mathematical model of two wheels on invert pendulum is then approximated by the linearize technique. The next, design controller by feedback method and state observer method. The experimental results and simulation are compared.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ก็เพราะได้รับความเมตตาจาก อาจารย์ยงกล งามวิวิทย์ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์คอน อิศรากร และอาจารย์ถาวร เบญจนราษฎร์ ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้จัดทำตลอดมา และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ผู้จัดทำ ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย ตลอดจนอำนวยความสะดวก ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้นผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ของผู้จัดทำที่ได้อุปการะผู้จัดทำ และเป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำตลอดมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด ขอขอบคุณพี่ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่เคยให้ความช่วยเหลือแก่ผู้จัดทำ

ผู้จัดทำ

นางสาวชัชวราภรณ์ สมัยสงค์

นางสาวศิริพร ประสิทธิ์มีสมใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
กิตติกรรมประกาศ	ii
สารบัญ	iii
สารบัญภาพ	v
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 วิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	4
2.2 คีชีมอเตอร์	7
2.3 พัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM)	11
2.4 ออปติคัลเอ็นโค้ด (optical encoder)	12
2.6 โพล (pole)	14
2.7 ซีโร่ (zero)	15
2.8 ปริภูมิสเตต (State-Space)	15
2.9 การออกแบบด้วยการวางตำแหน่งโพล (Pole Placement)	15
2.10 การออกแบบระบบควบคุมแบบเรกูลเตอร์กำลังสองเชิงเส้น (The Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR))	19
2.11 การประมาณค่า (State Observer)	21
บทที่ 3 การออกแบบและโครงสร้างของรถ	26
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถอินเวอร์ทเพนดูลัม	26
3.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	27
3.3 หลักการในการควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัม	33
บทที่ 4 การทดลอง	34
4.1 ตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ประมาณให้เป็นเชิงเส้นไว้แล้ว	36
4.3 ทดลองออกแบบระบบควบคุม	37
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	41
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	41
5.2 ปัญหาที่พบในโครงการ	41
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต	41
ภาคผนวก ก ชุดคำสั่งการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยโปรแกรมภาษาซี	42
ภาคผนวก ข เอกสารอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ E6C2C1101	50
ภาคผนวก ค เอกสารอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ E6B2-CWZ6C	61
หนังสืออ้างอิง	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อ	4
2.2 Schemetid diagram ของดีซีมอเตอร์แบบ field terminal	7
2.3 แสดงของดีซีมอเตอร์ Schematic diagram แบบ armature controlled	9
2.4 curve ของแรงบิด-ความเร็วของดีซีมอเตอร์	11
2.5 แสดงลักษณะช่องสัญญาณA ช่องสัญญาณB และช่องสัญญาณINDEX บนแผ่นงานหมุน	13
2.6 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณA ตามช่องสัญญาณB อยู่ 1/4 เท่า	13
2.7 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณA นำช่องสัญญาณB อยู่ 1/4 เท่า	13
2.8 (ก) แสดงลักษณะงานหมุนของแอมป์ โซลูตเอ็น โค้ดเคอร์แบบ ไบนารี โค้ด	14
2.8 (ข) แสดงสัญญาณที่ได้จากแต่ละบิตแอมป์ โซลูตเอ็น โค้ดเคอร์แบบ ไบนารี โค้ด	14
2.9 (ก) แสดงลักษณะงานหมุนของแอมป์ โซลูตเอ็น โค้ดเคอร์แบบเกรย์ โค้ด	14
2.9 (ข) แสดงสัญญาณที่ได้จากแต่ละบิตแอมป์ โซลูตเอ็น โค้ดเคอร์แบบเกรย์ โค้ด	14
2.10 แสดงบล็อสคโคอะแกรมของการประมาณค่าสเตรตแบบลดอันดับ	25
3.1 แบบจำลองโครงสร้างทางกลของรถอินเวอร์ทเพนดูลัม	26
3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมโดยรวมของระบบ	33
4.1 ผลตอบสนองตำแหน่งของเพนดูลัมของระบบวงเปิดที่ทดลองได้จากโครงสร้างทางกลของรถ	35
4.2 ผลตอบสนองระบบวงเปิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองของโครงสร้างทางกล	36
4.3 แสดงผลตอบสนองมุมของอินเวอร์ทเพนดูลัมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการประมาณเชิงเส้นแล้ว	37
4.4 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองกับระบบจริง	39

บทที่ 1

บทนำ

ระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อเพื่อรักษาเสถียรภาพของแขนเพนดูลัมให้ตั้งขึ้น เป็นระบบที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการศึกษาระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ ซึ่งโดยธรรมชาติของระบบ เพนดูลัมนั้นคือเมื่อปล่อยเพนดูลัมไว้แขนของเพนดูลัมจะตกมาอยู่ด้านล่าง ในการศึกษาระบบจะต้อง อาศัยความรู้ทางด้านกลศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อาศัยความรู้ทางด้านไฟฟ้า เพราะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการส่งกำลังและการเชื่อมต่อการควบคุมกับคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ตรวจวัด สัญญาณ และที่สำคัญที่สุดคือความรู้ในเรื่องระบบควบคุม ซึ่งในโครงการนี้จะสนใจใช้วิธีการควบคุม สมัยใหม่(Modern Control)

1.1 ความเป็นมา

ระบบควบคุมถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือระบบควบคุมวงเปิด และระบบควบคุมวงปิด

- ระบบควบคุมวงเปิด โดยที่ระบบที่ต้องการจะปรับแต่งจะถูกปรับแต่งจนกว่าผลต่างระหว่าง ค่าเอาต์พุตที่ต้องการกับค่าเอาต์พุตที่ออกจากระบบควบคุมจะมีค่าน้อยแต่ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่ บ้าง ตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมตำแหน่งสเตปปีงมอเตอร์ เครื่องซักผ้า และเครื่องตากผ้าอัตโนมัติ

- ระบบควบคุมวงปิด จะมีการวัดค่าเอาต์พุตของระบบที่ต้องการกลับมาเปรียบเทียบกับค่าที่ ต้องการเพื่อหาความแตกต่างมาคำนวณเพื่อปรับค่าตัวแปรควบคุมจนค่าความแตกต่างนี้ลดลงเรื่อยๆ จนค่าเป็นศูนย์ ตัวอย่างเช่น การควบคุมอุณหภูมิภายในห้อง

ซึ่งผลตอบสนองของระบบจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ ระบบที่มีเสถียรภาพ (Stable System) และ ระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable System) โดยโครงการนี้สนใจเลือกระบบควบคุมการทรงตัวของอิน เวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อซึ่งเป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพมาศึกษา เพื่อทำการควบคุมให้แขนเพนดูลัม สามารถตั้งขึ้นมาได้

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเข้าใจถึงระบบที่ไม่มีเสถียรภาพให้มากขึ้น

1.2.2 นำความรู้ทางด้านระบบควบคุมไปประยุกต์ใช้งานและแก้ไขปัญหของเสถียรภาพของระบบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและหาตัวสถานะป้อนกลับ(state feedback) เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพอย่างที่ต้องการ จากนั้นทำการทดสอบกับแบบจำลองของระบบในคอมพิวเตอร์ เมื่อผลออกมาเป็นไปตามต้องการจึงนำไปทดลองใช้กับควบคุมตัวจริง โดยการควบคุมระบบจริงนั้นจะใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวกลางในการรับค่าสถานะปัจจุบันของระบบและทำการประมวลผลส่งค่าป้อนกลับไปควบคุมตัวจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ระบบของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อ ที่ศึกษาประกอบด้วย 2 ส่วน

- โครงสร้าง (Plant)
- ระบบควบคุม (Control)

โดยส่วนของโครงสร้างแบ่งออกเป็น การศึกษาและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดีไซน์มอเตอร์ วงจรควบคุมดีไซน์มอเตอร์พัลส์วิดท์โมดูเลชัน อุปกรณ์ตรวจสอบสัญญาณอปติคัลเอ็นโคเดอร์ และส่วนของระบบควบคุมแบ่งออกเป็น ปริภูมิสเตต (State Space) การออกแบบด้วยการวางโพล (Pole Placement) การออกแบบควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมตำแหน่งของอินเวอร์ทเพนดูลัม การประมาณค่าสเตรต



รูปที่ 2.1 แสดง โครงสร้างของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 วิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษามี 2 วิธีดังนี้

- วิธีนิวตันเนียน (Newtonian)
- วิธีลากรางเจียน (Lagrangian Method)

วิธีนิวตันเนียน (Newtonian)

เป็นการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน และการหาโมเมนตัม ซึ่งกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันมีหลักการดังนี้

- 1) วัตถุจะคงสภาพการหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงถ้า ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ
- 2) ความเร่งของวัตถุแปรผันตรงกับแรงลัพธ์ที่กระทำกับวัตถุ และมีทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ
- 3) เมื่อมีแรงกระทำต่อวัตถุจะมีแรงปฏิกิริยาขนาดเท่ากัน แต่มีทิศทางตรงข้ามกระทำตอบจากวัตถุเสมอ

เนื่องจากระบบนี้มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเคลื่อนที่และแบบหมุน จึงต้องนำโมเมนตัมของแรงมาพิจารณาด้วย โมเมนตัมของแรงคือ โมเมนตัมของแรงใดๆรอบจุดๆหนึ่ง (หรือรอบแกนที่ตั้งฉากกับจุดนั้น) มีค่าเท่ากับ แรงคูณระยะทางที่ตั้งฉากจากจุดหรือแกนนั้น ไปยังแนวแรง แรงที่กระทำกับวัตถุแบ่งเป็นสองชนิดใหญ่ ๆ คือ

- 1) แรงภายนอก (External force) หมายถึงแรงที่กระทำภายนอกวัตถุ
- 2) แรงภายใน (Internal force) หมายถึงแรงที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ หรือแรงระหว่างส่วนต่างๆของโครงสร้าง อันเป็นผลเนื่องมาจากแรงภายนอกที่กระทำกับวัตถุ หรือ โครงสร้างนั้น

ขั้นตอนในการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิธีนิวตันมักเป็นการแก้ปัญหาทางสมดุล จะต้องใช้ Free body diagram เสมอ เพราะเป็นการแสดงให้เห็นว่าส่วนที่ต้องการวิเคราะห์นั้นมีแรงและโมเมนตัมอะไรบ้างมากระทำแล้วจึงใช้หลักการคณิตศาสตร์ในการแก้สมการสมดุล การวาด Free body diagram มีขั้นตอนดังนี้

1) แยกพิจารณาแต่ชิ้นส่วนและโครงสร้างของวัตถุ ที่ต้องการวิเคราะห์ออกมาวาดเป็นเค้าโครงต่างหาก

2) ใส่แรงและโมเมนต์ทั้งหมดที่กระทำต่อส่วนที่แยกอิสระเท่านั้น ตามตำแหน่งต่างๆด้วยเวกเตอร์ที่แสดงทั้งขนาดและทิศทางที่ถูกต้องสำหรับแรงที่รู้ค่า ส่วนแรงที่ไม่รู้ค่าและทิศทางให้แสดงด้วยเวกเตอร์ที่แทนขนาดด้วยอักษรในทิศทางที่คาดว่าถูกต้อง

3) ส่วนใดที่แยกออกจากจุดยึดเดิม จะต้องมีแรงปฏิกิริยาในทิศทางตามลักษณะของจุดยึดนั้น ส่วนใดที่ตัดผ่านเนื้อวัตถุหรือ โครงสร้างต้องมีแรงกระทำที่ผิวสัมผัสที่ต้องผ่านนั้น โดยถือว่าเป็นแรงภายนอกของส่วนอิสระที่แยกมานี้

วิธีการลากรางเจียน (Lagrangian Method)

พลังงานศักย์และพลังงานจลน์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันพิกัดทั่วไป ดังนี้

$$U = U(q_i)$$

$$T = T(\dot{q}_i)$$

เมื่อ U คือ พลังงานศักย์ (Potential Energy) เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับ q_i

T คือ พลังงานจลน์ (Kinetic energy) เป็นฟังก์ชันขึ้นอยู่กับ \dot{q}_i

q_i คือ พิกัดทั่วไป เช่น การกระจัด (X) ความสูง (h) การกระจัดเชิงมุม (θ)

โดยการอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน “ผลรวมของแรงเท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่ง” และกฎทรงพลังงานที่ในทางอุดมคติที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้น “พลังงานรวมของระบบจะมีค่าคงที่เสมอ” เราสามารถพิสูจน์จนได้สมการลากรางเจียน ออกมาเป็นดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

โดยที่

$$L = T - U$$

.....(2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

ซึ่ง Q_i คือ แรงที่กระทำจากภายนอกในพิกัดทั่วไป

ในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกมากระทำ $Q_i = 0$ ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = 0 \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

กรณีที่ระบบพลศาสตร์เกิดการสูญเสียพลังงานของระบบ พลังงานสูญเสียของระบบจะเป็นฟังก์ชันของความเร็วซึ่งเป็นพลังงานสูญเสียของระบบ นั่นคือ

$$D = D(\dot{q}_i) = \frac{1}{2} c \dot{q}_i^2 \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

และสมการลากรางเจียนที่มีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นในระบบ คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i$$

ในหนึ่งระบบสามารถตั้งสมการลากรางเจียนขึ้นมาก็สมการนั้นขึ้นอยู่กับว่าในระบบสามารถกำหนดได้ที่พิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

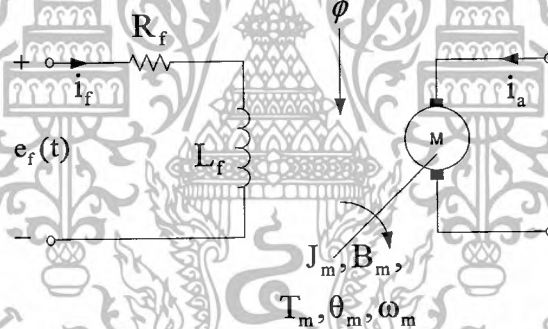
2.2 ดีซีมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์สามารถจำแนกสามารถจำแนกออกเป็น 3 แบบ คือ

- แบบ series-excited
- แบบ shunt-excited
- แบบ separately-excited

แต่อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะของดีซีมอเตอร์สองแบบแรกไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานในระบบควบคุมนั้นจึงนิยมใช้แบบที่สามมากดีซีมอเตอร์แบบ separately-excited สามารถแยกออกได้เป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับชนิดของการควบคุมที่กระทำต่อ field terminal หรือ armature terminal ของมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์แบบ field terminal



รูปที่ 2.2 Schemetic diagram ของดีซีมอเตอร์แบบ field terminal

ในการวิเคราะห์ห้ระบบเชิงเส้นนั้นจะต้องตั้งสมมติฐานดังนี้

1. กระแส armature มีค่าคงที่ ; $i_a = I_a$
2. air gap flux เป็นสัดส่วนกับกระแส field ; นั่นคือ

$$\phi(t) = K_f i_f(t) \tag{2.7}$$

3. แรงบิดที่เกิดจากมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับ air gap flux และกระแส armature ; นั่นคือ

$$T_m(t) = K_m I_a \phi(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(2.8)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ K_m เป็นค่าคงที่

แทนสมการ (2.7) ลงใน (2.8) จะได้ว่า

$$T_m(t) = K_m K_f I_a i_f(t) \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

ถ้ากำหนดให้

$$K_i = K_m K_f I_a \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

โดยที่ K_i เป็นค่าคงที่ของแรงบิดแล้ว สมการที่ (3) เขียนใหม่ได้ว่า

$$T_m(t) = K_i i_f(t) \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

จากรูปที่ 2.2

$$L_f \frac{di_f(t)}{dt} + R_f i_f(t) = e_f(t) \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) = T_m(t) \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_m(t) \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

โดยการแทนค่าที่เหมาะสมและใช้การแปลงลาปลาซ transfer function ระหว่างระยะ
แทนที่ของมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะเป็นดังนี้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_f(s)} = \frac{K_i}{L_f J_m s^3 + (R_f J_m + B_m L_f) s^2 + R_a B_m s} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

หรือ

$$\frac{\theta_m(s)}{E_f(s)} = \frac{K_i}{R_a b_m s (1 + \tau_m s) (1 + \tau_f s)} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

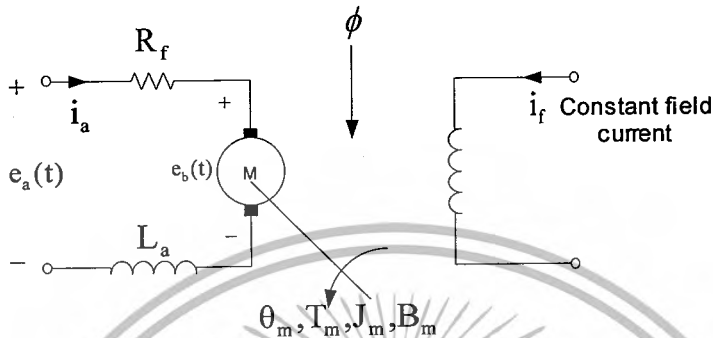
โดยที่ $\tau_m = \frac{J_m}{B_m}$ = mechanical time constant ของมอเตอร์

$\tau_f = \frac{J_m}{R_m}$ = field time constant ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีซีมอเตอร์แบบ armature controlled

$$T_m(t) = K_i i_a(t) \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.3 แสดงของดีซีมอเตอร์ Schematic diagram แบบ armature controlled

โดยที่ K_i เป็นฟังก์ชันของ air gap flux ซึ่งเป็นค่าคงที่ในกรณีนี้สำหรับในกรณีของมอเตอร์ที่ใช้แม่เหล็กถาวรก็เช่นเดียวกัน คือ ϕ จะมีค่าคงที่ด้วย นอกจากนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะเป็นสัดส่วนกับความเร็วมอเตอร์

$$e_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = K_b \omega_m(t) \tag{2.18}$$

และจากรูปที่ 2.2

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) = e_a(t) \tag{2.19}$$

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) = K_i i_a(t) \tag{2.20}$$

และ

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_m(t) \tag{2.21}$$

โดยการแทนค่าที่เหมาะสมและใช้การแปลงลาปลาซ transfer function ระหว่างระยะแทนที่ของมอเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าอินพุตจะเป็นดังนี้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (K_b K_i + R_a B_m) s} \tag{2.22}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีซีมอเตอร์แบบ field terminal นั้นจะเป็นระบบแบบ open loop แต่ดีซีมอเตอร์แบบ armature controlled จะมี loop ป้อนกลับในตัวเองซึ่งเกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ ในทางกายภาพนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจะแสดงถึงสัญญาณป้อนกลับซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าลบของความเร็วของมอเตอร์ ดังสมการ (15) จะเห็นได้ว่าแรงค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ K_b เป็นเทอมที่ถูกเพิ่มให้กับเทอมของค่าความต้านทานและสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ดังนั้นผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับจึงมีความหมายว่าเป็นค่าความเสียดทานทางไฟฟ้า (electrical friction) ซึ่งจะปรับปรุงเสถียรภาพของมอเตอร์ให้ดีขึ้น

ค่าของ K_i และ K_b จะมีความสัมพันธ์กันด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่ง ในที่นี้ค่าของกำลังงานเชิงกลที่เกิดขึ้นใน armature ของมอเตอร์คือ

$$\begin{aligned} P &= e_b(t)i_a(t) \quad \text{watt} \\ &= \frac{e_a(t)i_a(t)}{746} \quad \text{hp} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.23)$$

แทนค่าสมการ (11) และสมการ (12) ลงในสมการ (17) จะได้ว่า

$$P = \frac{K_b T_m(t) d\theta_m(t)}{746 K_i dt} \quad \text{hp} \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

กำลังงานนี้มีค่าเท่ากับกำลังงานเชิงกล

$$P = \frac{T_m(t) d\theta_m(t)}{550 dt} \quad \text{hp} \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

เทียบสมการ (18) กับสมการ (19) จะพบว่า K_i และ K_b มีความสัมพันธ์กันดังนี้

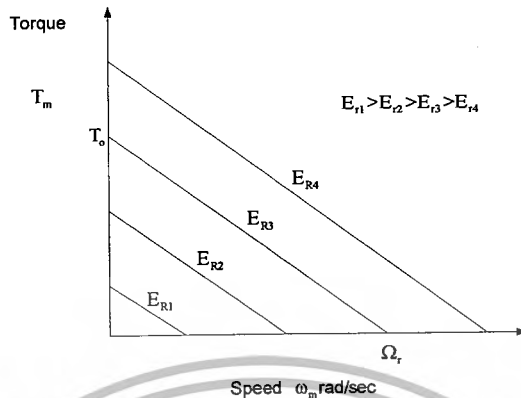
$$K_i = 0.737 K_b \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าคงที่ของมอเตอร์ได้จาก curve ของแรงบิด-ความเร็ว ดังรูปที่ 3 แสดงถึงรูปทั่วไปของ curve ของแรงบิด-ความเร็ว ของดีซีมอเตอร์เมื่อแรงดันไฟฟ้าป้อนให้มีความต่าง ๆ กัน E_r ในที่นี้คือ rated voltage เมื่อไม่มี load, $T_m(t)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ และความเร็วจะถูกกำหนดได้จากจุดตัดบนแกนนอนสำหรับค่าต่าง ๆ ของแรงดันไฟฟ้าเพื่อป้อนให้ ดังนั้นค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ K_b จะหาได้จาก

$$K_b = \frac{E_r}{\Omega_r} \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ในกรณีนี้แรงดันไฟฟ้าและความเร็วเชิงมุมจะเป็นค่า rated voltage



รูปที่ 2.4 curve ของแรงบิด-ความเร็วของดีซีมอเตอร์

เมื่อมอเตอร์ถูกทำให้หยุด blocked-rotor torque ที่ rate voltage จะแทนด้วย $T_o(t)$ กำหนดให้

$$k = \frac{\text{block - rotor torque at rate voltage}}{\text{rate voltage}} = \frac{T_o(t)}{E_r} \dots\dots\dots(2.28)$$

และ

$$T_o(t) = K_i i(t) = \frac{K_i}{R_a} E_r \dots\dots\dots(2.29)$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของแรงบิดจึงหาได้จากสมการ (2.28) และสมการ (2.29) นั่นคือ

$$K_i = kR_a \dots\dots\dots(2.30)$$

2.3 พัลส์วิดท์โมดูเลชัน(PWM)

วิธีหนึ่งที่จะแก้ปัญหาการสูญเสียพลังงานคือใช้แอมพลิไฟควมมอเตอร์โดยการเปลี่ยนแปลง Duty Cycle ของโวลต์เตจที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ "สวิทซ์ซึ่งแอมพลิไฟ" ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วต่างๆ โดยมีแรงบิดสูงอยู่โดยไม่สิ้นเปลืองพลังงานเหมือนพอลิเมอร์แอมพลิไฟ

สวิทซ์ซึ่งแอมพลิไฟที่ทรานซิสเตอร์แอมพลิไฟจะทำหน้าที่คล้าย สวิทซ์ เมื่อทรานซิสเตอร์นำกระแส โวลต์เตจตกคร่อมตัวมันจะน้อยมากจนตัดทิ้งได้ แต่เมื่อมันหยุดนำกระแส โวลต์เตจที่ตก

คร่อมตัวมันจะมีค่ามากเข้าใกล้ V_{cc} และมีกระแสไหลผ่านน้อยมากจนถือว่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้

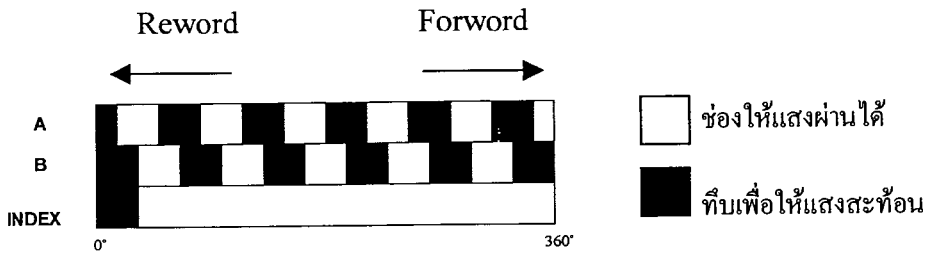
กล่าวนี้การสูญเสียในเอาท์พุททรานซิสเตอร์จึงมีค่าต่ำระบบสวิทช์ซึ่งสามารถสร้างได้หลายวิธี มีทฤษฎีง่ายทฤษฎีหนึ่งในการทำให้แอมพลิไฟเออร์ซึ่งด้วยความถี่ที่คงที่และสามารถแปรค่าของ on และ off ของพัลส์ได้ตามต้องการแอมพลิไฟเออร์ชนิดนี้เรียกว่าพัลส์วิดท์โมดูเรเตอร์(PWM) แอมพลิไฟเออร์ซึ่งถ้าสามารถออกแบบให้แปรค่าได้ทั้งค่าพัลส์ และความถี่แล้วก่อให้เกิดประโยชน์ในการควบคุมรักษาระดับกระแสสูงๆได้ แต่อาจเกิดออสซิลเลทหรือทำให้เกิดเสียงรบกวนที่ความถี่รีโซแนนท์ ดังนั้นจึงได้เลือกแอมพลิไฟเออร์แบบ PWM ที่มีความถี่คงที่มาใช้ในโครงการนี้

2.4 ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์ (optical encoder)

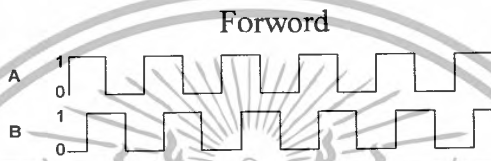
ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์ คือ เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดระยะขจัดที่ให้ระยะการขจัดเชิงเส้นหรือการขจัดเชิงมุมมีค่าแปรผันไปตามการส่งผ่านแสงจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งส่วนใหญ่ใช้ LED(light emitting diod) ผ่านจานหมุนที่ถูกเจาะให้เป็นร่องเพื่อให้แสงสามารถผ่านไปยังตัวรับแสง ดังนั้นตัวตรวจจับแสงจึงให้สัญญาณพัลส์เอาท์พุทออกมาตามจำนวนของลำแสงที่ได้รับ เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์นี้เป็นสัญญาณแบบดิจิตอลจึงเหมาะที่จะใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์และระบบดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. อินคริเมนทอลเอ็นโค้ดเดอร์(incremental encoder)

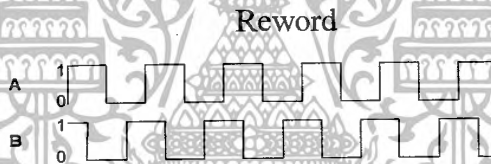
- จะประกอบด้วยช่องสัญญาณสองทั้งหมดสามแถวคือ A B และ INDEX
- โดยช่องสัญญาณ A และช่องสัญญาณ B โดยทั่วไปถูกสร้างให้มีเฟสต่างกัน $1/4$ เท่าดังรูปที่ 1 ทำให้สามารถทราบทิศทางการหมุนได้จากการที่ช่องสัญญาณ A นำหรือตามช่องสัญญาณ B
- จากรูปที่ 2 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณ A ตามช่องสัญญาณ B อยู่ $1/4$ เท่า จากรูปที่ 3 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณ A นำช่องสัญญาณ B อยู่ $1/4$ เท่า
 - ส่วนช่องสัญญาณ INDEX ถูกสร้างให้มีเพียง 1 พัลส์ เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยทั่วไปจะอ้างอิงที่ 0° ดังรูปที่ 1
 - การใช้งานอินคริเมนทอลเอ็นโค้ดเจอร์จำเป็นต้องใช้ร่วมกับตัวนับ(counter) เพราะสัญญาณที่ส่งออกมาจากทุกช่องสัญญาณจะให้ค่าเพียง 0 กับ 1 เท่านั้น
 - ความละเอียดในการวัดขึ้นอยู่กับจำนวนร่องของแต่ละช่องสัญญาณ



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะช่องสัญญาณA ช่องสัญญาณB และช่องสัญญาณINDEX บนแผ่นจานหมุน

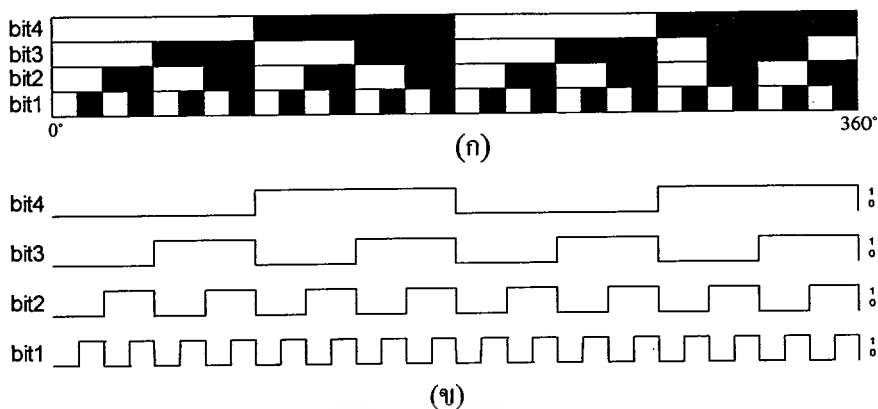


รูปที่ 2.6 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณA ตามช่องสัญญาณB อยู่ 1/4 เท่า

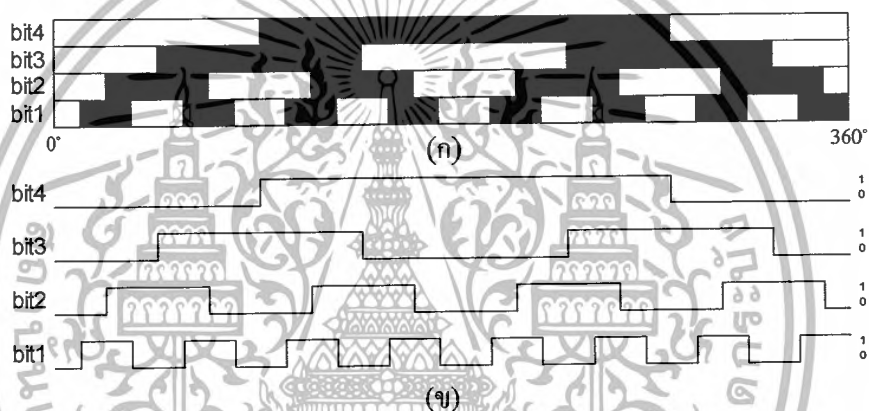


รูปที่ 2.7 แสดงสัญญาณที่ได้จากช่องสัญญาณA นำช่องสัญญาณB อยู่ 1/4 เท่า

2. แอ็บโซลูตเอ็นโค้ดเดอร์(absolute encoder) ลักษณะการเจาะแต่ละช่องสัญญาณจะมีความกว้างไม่เท่ากันโดยความกว้างของช่องสัญญาณถัดไปจะกว้างเป็นสองเท่าของช่องสัญญาณก่อนหน้า หากว่าเอ็นโค้ดเดอร์มีจำนวนช่องสัญญาณเท่ากับ n จะมีค่าความละเอียด(resolution) เท่ากับ $360^\circ / 2^n$ แอ็บโซลูตเอ็นโค้ดเดอร์มีลายบนแผ่นจานหมุน 2 ลักษณะ คือ แอ็บโซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบไบนารีโค้ด(binary code) และแอ็บโซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบเกรย์โค้ด(Gray code)



รูปที่ 2.8 (ก) แสดงลักษณะงานหมุนของแบริบ โซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบไบนารีโค้ด
 (ข) แสดงสัญญาณที่ได้จากแต่ละบิตแบริบ โซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบไบนารีโค้ด



รูปที่ 2.9 (ก) แสดงลักษณะงานหมุนของแบริบ โซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบเกรย์โค้ด
 (ข) แสดงสัญญาณที่ได้จากแต่ละบิตแบริบ โซลูตเอ็นโค้ดเดอร์แบบเกรย์โค้ด

2.6 โพล (pole)

คือ ค่าที่บ่งบอกถึงเสถียรภาพของระบบถ้าค่าโพลอยู่บนแกนจินตภาพ ระบบจะเกิดเสถียรภาพวิกฤตมีผลตอบสนองเร็วแต่จะ เกิดการแกว่ง(oscillation) ในบางครั้งค่าโพลจะอยู่ทางซ้ายของแกนจินตภาพระบบจะมีเสถียรภาพ(stable) โดยถ้ายังอยู่ใกล้แกนจินตภาพจะมีผลตอบสนองเร็วแต่ค่าโอเวอร์ชูทจะมาก ถ้าค่าpoleอยู่ทางขวาของแกนจินตภาพ ระบบจะไม่มีเสถียรภาพ(unstable) ในกรณีที่ค่าโพลบางตัวอยู่บนแกนจินตภาพ(แต่ต้องไม่มีโพลซ้ำกัน) และที่เหลืออยู่ทางซ้ายมือของแกนจินตภาพ ระบบจะมาจินาลีสเตเบิล

2.7 ซีโร่ (zero)

คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความเร็วของผลตอบสนองของระบบ ถ้าไม่มีซีโร่แต่มีโพล ผลตอบสนองจะช้า ในการเพิ่มซีโร่ จะช่วยให้ผลตอบสนองเร็วขึ้น แต่จะเกิดโอเวอร์ชูมมาก ยิ่งซีโร่ใกล้จุดกำเนิดมีผลตอบสนอง

2.8 ปริภูมิสแตต (State-Space)

ในการบรรยายสมการเชิงอนุพันธ์ทั่วไปนั้นสามารถบรรยายหรือเขียนอยู่ในรูปแบบของกลุ่มของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งได้ ตัวแปรของสมการเชิงอนุพันธ์นั้นเรียกว่าตัวแปรสถานะหรือสแตต ซึ่งถ้าแก้สมการของกลุ่มสมการเชิงอนุพันธ์นั้นแล้วผลลัพธ์ก็สามารถจะแสดงอยู่ในปริภูมิ(space) ซึ่งมีตัวแปรเหล่านั้นเป็นของปริภูมิ ความคิดในการบรรยายสมการเชิงอนุพันธ์ในรูปแบบของปริภูมิสแตต (state-space) นี้ก่อให้เกิดวิธีการใหม่ ๆ ในการออกแบบระบบควบคุมซึ่งเป็นพื้นฐานของการออกแบบระบบควบคุมที่เรียกว่าการควบคุมสมัยใหม่ (modern control)

ข้อดีของการออกแบบโดยวิธีปริภูมิสแตต (state-space) นี้จะเหมาะสมมากเมื่อระบบมีความซับซ้อนคือมีอันดับของสมการเชิงอนุพันธ์มีค่าสูง หรืออาจมีหลายอินพุทและหลายเอาต์พุท

2.9 การออกแบบด้วยการวางตำแหน่งโพล (Pole Placement)

การออกแบบด้วยการวางตำแหน่งโพลคล้ายคลึงกับการออกแบบด้วยวิธีการของโลคัสของราก (Root Locus) จุดประสงค์คือป้อนกลับตัวแปรเพื่อให้โพลทั้งหมดของระบบอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ในตอนนี้สมมติว่าตัวแปรทั้งหมดสามารถวัดเพื่อป้อนกลับได้ ระบบที่จะพิจารณาจะเป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลาที่อธิบายได้ด้วยสมการ

$$\text{กระบวนการ} \quad \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad \dots\dots\dots(2.31)$$

$$\text{โดยที่} \quad \begin{aligned} \dot{x} & \text{ เป็นตัวแปรสแตต} \\ u(t) & \text{ เป็นตัวแปรควบคุม} \end{aligned}$$

วิธีมีข้อจำกัดอยู่ที่เฉพาะกรณีที่มีสัญญาณเข้าตัวเดียวและสัญญาณออกตัวเดียวเท่านั้น

สิ่งรบกวน ระบบในทางปฏิบัติจะมีสิ่งรบกวนซึ่งทำให้สัญญาณออกของระบบเปลี่ยนแปลงไปในแบบจำลองของระบบ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการแทนที่สิ่งรบกวนด้วยสแตตสถานะที่เริ่มต้น

ต่อไปจะกล่าวถึงการควบคุมระบบซึ่งมีสิ่งรบกวนที่สามารถแทนที่ได้ด้วยสภาวะเริ่มต้น และวิธีการพยายามนำสแตตหรือสัญญาณเอาต์พุตที่ไม่เป็นไปตามต้องการ ให้นำสแตตหรือสัญญาณเอาต์พุตเข้าสู่ค่าที่ต้องการ ซึ่งค่าที่ต้องการอาจเป็นศูนย์ หรืออาจเป็นค่าคงตัว

การควบคุมที่เป็นไปได้ เนื่องจากต้องการการป้อนกลับและได้สมมติว่าสามารถวัดสแตตทุกตัวได้ โดยเลือกสัญญาณควบคุมเป็น

$$u(t) = -Kx(t) \dots\dots\dots(2.32)$$

เมื่อ $K = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_3]$ คือ เวกเตอร์อัตราขยายของสัญญาณป้อนกลับที่ต้องการทราบ

วิธีการออกแบบสำหรับระบบเชิงเส้นที่มีอันดับต่ำ (น้อยกว่า 3)

ขั้นตอนการออกแบบ มีดังนี้

ระบบ $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ จาก (2.31)

กฎของการควบคุม $u(t) = -Kx(t)$ จาก (2.32)

ระบบป้อนกลับ $\dot{x}(t) = (A-BK)x(t) = A_f x(t) \dots\dots\dots(2.33)$

สมการลักษณะเฉพาะของระบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|sI-A| = |sI-A+BK| = 0$$

สมการลักษณะเฉพาะที่ต้องการ

$$(s+\mu_1)(s+\mu_2) \dots (s+\mu_n) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.34)$$

เมื่อ μ คือ โพลที่ต้องการเมื่อมีการป้อนกลับแล้ว

เทียบสัมประสิทธิ์ (4) และ(5) จะได้ n สมการ n ตัวจะได้ สมาชิกทั้งของเมทริกซ์ K

วิธีการออกแบบโดยใช้สูตรของแอกเคอร์มันน์

(Ackermann's formular)

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีสัญญาณเข้าหนึ่งตัวและสัญญาณออกหนึ่งตัว

$$G(s) = \frac{b_n s^{n-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n} \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการสแตตให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ (controllable canonical form) ได้เป็น

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \dots & -a_1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad \dots\dots\dots(2.36)$$

$$y(t) = [b_m \quad b_{m-1} \quad b_{m-2} \quad \dots \quad b_1] x(t) \quad \dots\dots\dots(2.37)$$

กฎการควบคุม $u(t) = -Kx(t)$ จาก (2)
 $= -[k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n] x(t) = [\delta_n \quad \delta_{n-1} \quad \dots \quad \delta_1] x(t)$

ได้เมตริกของระบบวงปิด (A - BK) โดยที่พจน์ BK เขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BK = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [\delta_n \ \delta_{n-1} \ \dots \ \delta_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \cdot \\ \delta_n & \delta_{n-1} & \dots & \delta_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.38)$$

ดังนั้นเมทริกซ์ของระบบวงรอบปิด $A_f = A-BK$ เขียนได้เป็น

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \cdot \\ -a_n - \delta_n & -a_{n-1} - \delta_{n-1} & -a_{n-2} - \delta_{n-2} & \dots & -a_1 - \delta_1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.39)$$

เมทริกซ์ เป็นรูปแบบมาตรฐานของรูปแบบ controllable canonical form ดังนั้นมีสมการลักษณะเฉพาะเป็น

$$|sI-A+BK| = s^n + (a_1 + \delta_1)s^{n-1} + \dots + (a_{n-1} + \delta_{n-1})s + (a_n + \delta_n) = 0$$

สมการลักษณะเฉพาะของระบบวงปิดที่ต้องการ

$$\Delta(s) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n = 0 \dots\dots\dots(2.40)$$

เทียบสัมประสิทธิ์ (11) และ(12) จะได้

$$\alpha_i = a_i + \delta_i \quad ; \quad i=1,2,\dots,n \dots\dots\dots(2.41)$$

สมการ(13) เป็นผลลัพธ์ของการออกแบบ โดยการวางตำแหน่งโพลสำหรับระบบ SISO แต่ระบบจะต้องอยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ซึ่งไม่ใช่รูปแบบโดยทั่วไปซึ่งหาได้จากระบบกายภาพ

ขั้นตอนการออกแบบ มีดังนี้

1. ตรวจสอบว่าเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้หรือไม่ ถ้าสามารถควบคุมได้ให้ทำขั้นตอนต่อไป

2. สร้างสมการลักษณะเฉพาะของเมทริกซ์ A

$$|sI-A| = s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_{n-1} s + a_n$$

3. หาเมทริกซ์การแปลง Q ที่จะแปลงระบบให้อยู่ในรูปแบบ controllable canonical form

ซึ่ง

$$Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $q_{n,i} = Aq_{n,i+1} + a_i q_n$; $i=1,2,\dots,(n-1)$

และ $q_n = B$

4. สร้างสมการลักษณะเฉพาะจากค่าเฉพาะที่กำหนด $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$
 $(s+\mu_1)(s+\mu_2) \dots (s+\mu_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n$

5. เมทริกซ์ขยายของอัตราป้อนกลับ K หาได้จาก

$$K = [\alpha_n - a_n \mid \alpha_{n-1} - a_{n-1} \mid \dots \mid \alpha_2 - a_2 \mid \alpha_1 - a_1] Q^{-1} \dots\dots\dots(2.42)$$

ดังนั้นสูตรของแอกเคอร์มันน์อาศัยการแปลงคล้าย ซึ่งจะแปลงระบบใด ๆ เป็นรูปแบบ controllable canonical form และหาอัตราขยายจากสมการ (14) ค่าอัตราขยายที่ถูกแปลงกลับ เพื่อให้นำไปใช้ได้กับระบบเดิม

ถ้าให้ $\Delta(A) = A^n + a_1 A^{n-1} + \dots + a_n I$

สูตรของแอกเคอร์มันน์ คือ

$$K = [0 \dots 0 \ 1] [B \ AB \ \dots \ A_{n-1}B]^{-1} \Delta(A) \dots\dots\dots(2.43)$$

สมการหลักสำหรับการหาตัวผกผันของเมทริกซ์ความควบคุมได้ Q ได้โดยการเมทริกซ์แนวนอน d^T จาก

$$d^T Q = [0 \dots 0 \ 1] \dots\dots\dots(2.44)$$

และ $K = d^T \Delta(A) \dots\dots\dots(2.45)$

2.10 การออกแบบระบบควบคุมแบบเรกูเลเตอร์กำลังสองเชิงเส้น (The Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR))

การออกแบบควบคุมแบบเรกูเลเตอร์กำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Regulator (LQR)) นี้จะต้องการออกแบบระบบควบคุมซึ่งจะทำให้ฟังก์ชันครรชนีสมรรถนะ (performance index (PI)) ที่มีรูปแบบตามสมการ มีค่าน้อยที่สุด (minimization) สมการฟังก์ชันครรชนีสมรรถนะ (PI) สามารถเขียนได้ดังนี้

ครรชนีสมรรถนะ

$$J = \int_0^{\infty} [\rho z^2(t) + u^2(t)] dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับระบบ

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

โดยที่ค่า ρ ในที่นี้จะเป็ค่าแฟกเตอร์น้ำหนัก (weighting factor) ที่ผู้ออกแบบจะเป็นผู้เลือก และสามารถแสดงได้ว่าสมการควบคุมจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$u = -Kx$$

โดยที่ค่าอัตราขยาย K สามารถหาได้ ค่าโพลของระบบปิดที่ดีที่สุดที่ให้ในระบบควบคุมจะเป็นส่วนของโพลที่มีเสถียรภาพของสมการ

$$1 + \rho G_0(-s)G_0(s) = 0$$

โดย G_0 คือ สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเปิด

$$G_0(s) = \frac{c(s)}{r(s)} = C(sI - A)^{-1}B = \frac{N(s)}{D(s)}$$

ขั้นตอนในการออกแบบก็คือเลือกค่าเมทริกซ์ C ที่จะเป็นตัวกำหนดค่าผิดพลาดในการติดตาม (tracking error) หลังจากนั้นก็เลือกแฟกเตอร์น้ำหนัก (weighting factor) ρ ซึ่งจะเป็นตัวบอกถึงน้ำหนักความสำคัญระหว่างค่าผิดพลาดในการติดตาม (tracking error) กับสัญญาณควบคุม สิ่งหนึ่งที่ต้องจำไว้ก็คือค่าสัญญาณเอาต์พุต (y) นี้ไม่จำเป็นที่จะต้องหมายถึงสัญญาณเอาต์พุตที่วัดมาที่ใช้สำหรับการปิดวงรอบควบคุม

จากสมการรูตโลกัสแบบสมมาตร

$$1 + \rho \frac{N(-s)N(s)}{D(-s)D(s)} = 0$$

เราสามารถสร้างแผนภาพรูตโลกัสโดยใช้ค่าโพลและซีโรของระบบเปิด และเนื่องจากระบบจะสมมาตรกับแกนจินตภาพดังนั้นเราก็สามารถเขียนรูตโลกัสอีกด้านหนึ่งของแกนจินตภาพได้โดยการทำสำเนาแบบกระจก (mirror) ของเส้นรูตโลกัสที่อยู่ทางด้านซ้ายมือเทียบกับแกนจินตภาพนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การประมาณค่า (State Observer)

ส่วนมากแล้วการวัดข้อมูลจากสเตตหรือวัดสัญญาณสเตตทุกสเตตจะเป็นไปได้ค่อนข้างยากหรือในระบบบางระบบถึงแม้จะวัดได้ก็ตามแต่ก็อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายค่อนข้างมาก โดยเฉพาะระบบที่มีอันดับสูง หรือระบบที่ต้องการตัวตรวจรู้(sensor) พิเศษที่ใช้ในการวัด ดังนั้นจึงใช้วิธีการประมาณค่าสเตต(state observer) ซึ่งจะมีทั้งแบบอันดับเต็ม(full-order state observer) และแบบลดอันดับ(reduce-order state observer) ตัวประมาณค่าแบบอันดับเต็มคือการประมาณค่าสเตตทุกตัวใหม่หมด โดยนำข้อมูลของสัญญาณของสเตตบางตัวที่สามารถวัดได้นั้นมาใช้ในการประมาณค่าสเตต(\hat{x}) ทุกตัวใหม่หมด ส่วนตัวประมาณค่าแบบลดอันดับก็คือการสร้างตัวประมาณค่าสเตตโดยใช้ข้อมูลของสัญญาณของสเตตที่วัดได้มาใช้ในการประมาณค่าสัญญาณสเตต(\hat{x}) โดยเฉพาะสเตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น

ตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม

(Full-order State Observer)

การออกแบบตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม (full-order state observer) นี้จะทำการประมาณสเตตทุกตัวใหม่หมด จากข้อมูลของสัญญาณเอาต์พุตบางตัวที่วัดได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการจะควบคุมมีรูปแบบดังนี้

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

โดยที่ \hat{x} ให้แทนตัวสเตตที่เป็นค่าประมาณของสเตต $x(t)$ สมการจะถือเป็นสมการของตัวประมาณค่าสเตตก็ได้

เราจะกำหนดค่าผิดพลาดของการประมาณค่าสเตตได้ดังนี้

$$\tilde{x} = x - \hat{x}$$

ดังนั้นจะได้สมการพลวัตของสัญญาณผิดพลาดคือ

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x}$$

และเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) คือ

$$\tilde{x}(0) = x(0) - \hat{x}(0)$$

จะเห็นว่าค่าผิดพลาดของการประมาณค่านี้จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเมตริกซ์ A หรือระบบมีเสถียรภาพ แต่อัตราที่สัญญาณผิดพลาดนี้มีค่าเป็นศูนย์ไม่สามารถควบคุมได้ ซึ่งจะมีอัตราเดียวกับค่าคงตัวทางเวลา(time constant)ของระบบ และจะเห็นว่าถ้าอัตราความเร็วนี้เป็นอัตราความเร็ว

ที่ยอมรับได้ ระบบนี้จะเป็นระบบเปิดคือไม่ต้องการตัวควบคุม(controller)รวมทั้งไม่ต้องการตัวประมาณค่าสแตต(state observer)ด้วย

พิจารณาตัวประมาณค่าสแตต(state observer)รูปแบบใหม่ซึ่งจะมีส่วนที่เป็นส่วนป้อนกลับ(feedback)ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu + K_e(y - C\hat{x})$$

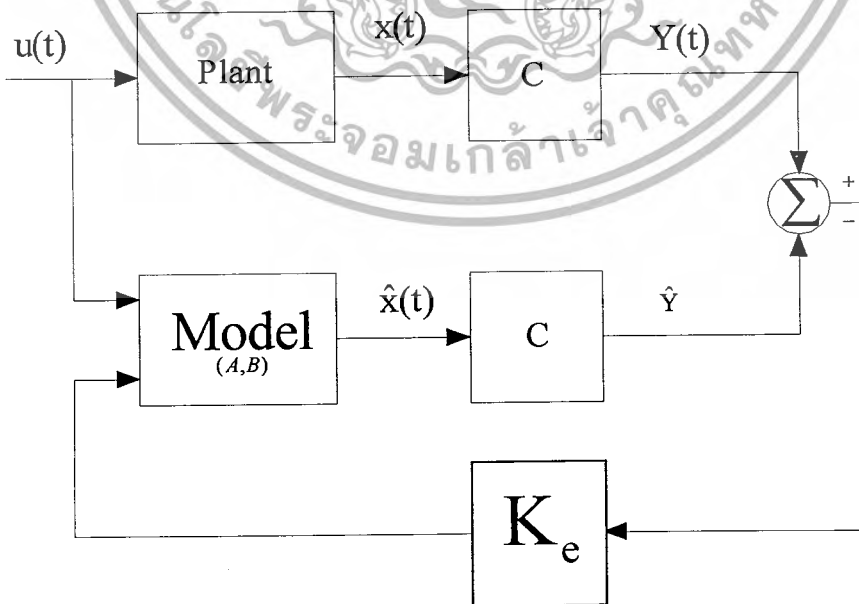
โดยที่ K_e เป็นค่าอัตราขยายของตัวประมาณค่าสแตต และจะมีรูปแบบดังนี้

$$K_e = [K_{e1} \quad K_{e2} \quad \dots \quad K_{en}]'$$

เป้าหมายในการออกแบบตัวประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็ม (full-order state observer) นี้คือการหาค่าอัตราขยาย K_e เพื่อให้ตัวประมาณค่าสแตตสามารถแปรค่าสแตตของระบบได้ในช่วงเวลาที่เรากำหนด ซึ่งก็คืออัตราความเร็วที่สัญญาณผิดพลาดจะมีค่าเป็นศูนย์ สามารถเขียนสมการไดนามิกของสัญญาณผิดพลาดได้คือ

$$\dot{\tilde{x}} = (A - K_e C)\tilde{x} + G_1 w$$

โดยที่ w นั้นเป็นสัญญาณรบกวน หรือ disturbance input



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์โดยคณะกรรมการการประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็ม
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการลักษณะเฉพาะเขียนได้ดังนี้คือ

$$\det[sI - (A - K_e C)] = 0$$

ดังนั้นเราจึงต้องเลือกค่าอัตราขยาย K_e เพื่อให้สมการมีเสถียรภาพและมีความเร็วพอสมควรในการที่สัญญาณความผิดพลาดจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งก็หมายความว่าสัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสแตตจริง โดยเลือกค่าอัตราขยายของตัวประมาณค่าสแตตเพื่อให้ค่าโพลของตัวประมาณค่าสแตตนั้นอยู่บนแกนจริง (real axis) และอยู่ทางด้านซ้ายมือของโพลของระบบปิด และถ้าสัญญาณรบกวน (disturbance) มีค่าเป็นศูนย์ จะเห็นว่าสัญญาณประมาณ $\hat{x}(t)$ จะมีค่าเท่ากับสัญญาณสแตต $x(t)$ ของระบบที่ต้องการจะควบคุมและไม่ขึ้นกับฟังก์ชันอินพุต $u(t)$

การเลือกค่าอัตราขยาย K_e สำหรับตัวประมาณค่าสแตต (state observer) นี้จะมีวิธีการเดียวกับการเลือกค่าอัตราขยาย K ในกรณีของการออกแบบตัวควบคุมแบบ การวางตำแหน่ง (Pole Placement) โดยที่จะเลือกตำแหน่งของโพลหรือรากของสมการลักษณะเฉพาะ ให้อยู่ตรงตำแหน่งที่จะทำให้ระบบมีการตอบสนองตามที่ต้องการ ดังนั้นจะได้สมการลักษณะของตัวประมาณค่านี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโพลหรือรากของสมการดังนี้

ถ้าตำแหน่งของรากของสมการลักษณะเฉพาะของตัวประมาณค่า คือ

$$s_i = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$$

ดังนั้นสมการลักษณะเฉพาะของตัวประมาณค่าจะเขียนได้ว่า

$$\alpha_e(s) = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n)$$

ค่าอัตราขยาย K_e สามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์

ตัวประมาณค่าสแตตแบบลดอันดับ

(Reduce-order State Observer)

ใช้ประมาณค่าเฉพาะสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น โดยใช้ข้อมูลจากสแตตที่เราสามารถวัดได้ ซึ่งจะเรียกตัวประมาณค่าแบบนี้ว่าตัวประมาณค่าสแตตแบบลดอันดับ แต่ถ้าสัญญาณที่วัดได้มีสัญญาณรบกวน (noise) ด้วย การทำหรือการสร้างตัวประมาณค่าสแตตแบบเต็มอันดับ (full-order state observer) จะช่วยในการกรองสัญญาณรบกวนนั้นออกไปได้

สมมติว่าเรามีสเตต x_a เป็นสเตตที่สามารถวัดได้ และสเตต x_b เป็นสเตตที่ไม่สามารถวัดได้ และเป็นสเตตที่ต้องการสร้างตัวประมาณค่า ต้องแบ่งสมการออกเป็น ส่วนที่วัดได้และส่วนที่วัดไม่ได้ดังนี้

สมการระบบ

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

$$y = Cx$$

แบ่งส่วนที่วัดได้และส่วนที่วัดไม่ได้ดังนี้

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

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix}$$

สามารถเขียนสมการพลวัตของระบบในส่วนที่ไม่สามารถวัดได้ดังนี้

$$\dot{x}_b = A_{bb}x_b + A_{ba}x_a + B_b u$$

สมการพลวัตของระบบในส่วนที่สามารถวัดได้เป็นดังนี้

$$\dot{x}_a = A_{aa}x_a + A_{ab}x_b + B_a u$$

เนื่องจาก $y = x_a$ แทนในสมการจะได้ว่า

$$\dot{y} - A_{aa}y - B_a u = A_{ab}x_b$$

สามารถสร้างตัวประมาณค่าสเตตแบบลดอันดับได้ด้วยวิธีการเดียวกับการสร้างตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม โดยแทนเมทริกซ์คงตัวของระบบดังนี้คือ

$$x \leftarrow x_b$$

$$A \leftarrow A_{bb}$$

$$Bu \leftarrow A_{ba}y + B_b u$$

$$y \leftarrow \dot{y} - A_{aa}y - B_a u$$

$$C \leftarrow A_{ab}$$

ดังนั้นเขียนระบบของตัวประมาณค่าสเตตแบบลดอันดับได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดสัญญาณผิดพลาดของตัวประมาณค่าสเตตคือ

$$\tilde{x}_b = x_b - \hat{x}_b$$

เขียนสมการของตัวประมาณค่าในรูปของความผิดพลาดของการประมาณค่าสเตต(erroe state) ได้

$$\dot{\tilde{x}}_b = (A_{bb} - K_e A_{ab}) \tilde{x}_b$$

สมการลักษณะเฉพาะเขียนได้ดังนี้

$$\det[sI - (A_{bb} - K_e A_{ab})] = 0$$

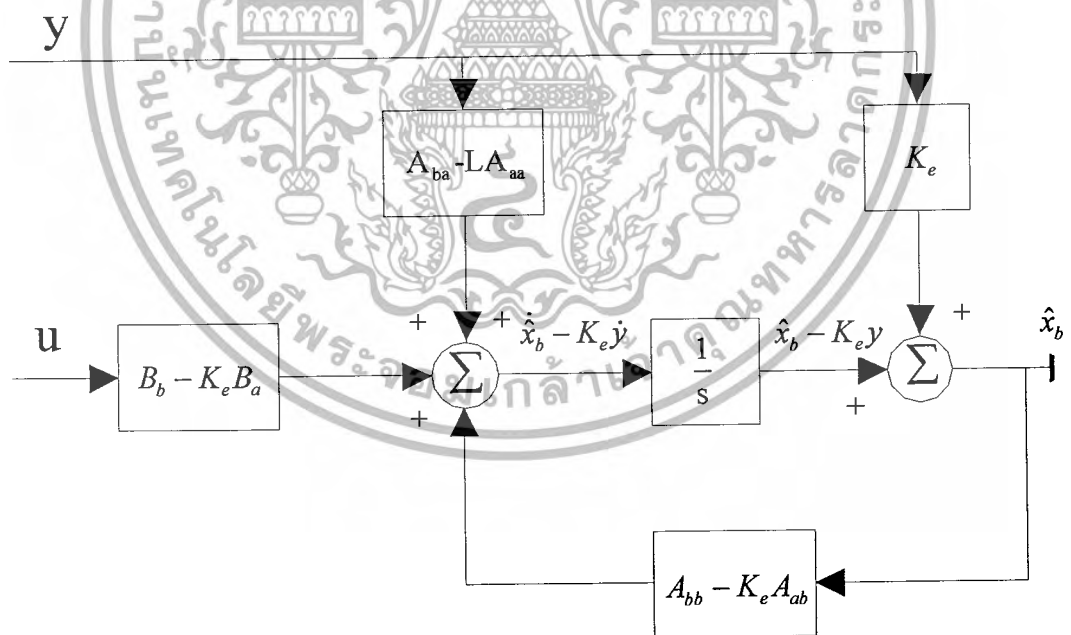
แต่ในการทำอนุพันธ์ของสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนด้วยจะเป็นการขยายสัญญาณรบกวน ดังนั้นในการกำหนดตัวสเตตต้องทำการควบคุมใหม่คือ

$$x_c = \hat{x}_b - K_e y$$

เขียนใหม่ได้

$$\dot{\tilde{x}}_c = (A_{bb} - K_e A_{ab}) \tilde{x}_b + (A_{ba} - K_e A_{aa}) y + (B_b - K_e B_a) u$$

เขียนเป็นแผนภาพบล็อกได้ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการประมาณค่าสเตตแบบลดอันดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและโครงสร้างของรถ

3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถอินเวอร์ทเพนดูลัม

โครงสร้างของรถคือ เป็นรถสองล้อที่ยึดอยู่บนแกนเพลาดียวกัน ยึดมอเตอร์ไว้ด้านบนของรถและใช้สายพานเป็นตัวส่งกำลังให้กับล้อ โดยมีอัตราทดของล้อต่อมอเตอร์ (η) เท่ากับ 2 ในส่วนของเซนเซอร์ติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์เซนเซอร์ทั้งไว้ด้านบนของรถเช่นเดียวกับมอเตอร์ โดยเอ็นโค้ดเดอร์ตัวแรกใช้วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของล้อ (ϕ) แกนของเอ็นโค้ดเดอร์ตัวนี้จะต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์โดยตรง เอ็นโค้ดเดอร์ตัวที่สองจะใช้วัดมุมเอียงของตัวรถ (θ) โดยจะติดไม้วัดมุมไว้ที่ปลายของแรนเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 3.1 แบบจำลองของรถอินเวอร์ทเพนดูลัม

สัญลักษณ์ต่างๆ แทนตัวแปร มีดังต่อไปนี้

ϕ = มุมของแกนอินเวอร์ทเพนดูลัมเทียบกับแกนอ้างอิง (แกน Y) เป็นค่าที่สามารถวัดได้จากเซนเซอร์

β = มุมที่ตำแหน่งอ้างอิงของล้อเทียบกับแนวแกนของอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งเป็นค่าที่สามารถวัดได้จากเซนเซอร์

θ = มุมที่ตำแหน่งอ้างอิงของล้อเทียบกับแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- s_1 = การกระจัดจากจุดอ้างอิง(0) ถึงคัมอินเวิร์ตเพนคูล์มในแนวแกนX
 s_2 = การกระจัดจากจุดอ้างอิง(0) ถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวแกนX
 z_1 = การกระจัดจากจุดอ้างอิง(0) ถึงคัมอินเวิร์ตเพนคูล์มในแนวแกนY
 z_2 = การกระจัดจากจุดอ้างอิง(0) ถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวแกนY

การติดตั้งเซนเซอร์จะทำให้ทราบ ϕ และ β แต่ค่าที่นำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมคือ ϕ กับ θ ดังนั้นจึงต้องหาค่า θ จากความสัมพันธ์ $\phi = \theta - \beta$

3.2 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สิ่งที่ได้กล่าวไปแล้วว่าวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีนิวโตเนียน และวิธีลากรางเจียน แต่เนื่องในการศึกษาวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งสองวิธีพบว่าวิธีนิวโตเนียนมีความยุ่งยากซับซ้อนในการแก้สมการมาก จึงได้นำวิธีลากรางเจียนมาใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีลากรางเจียน มีดังนี้

กำหนดให้สัญลักษณ์ต่อไปนี้แสดงค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ

- M_b = มวลของคัมอินเวิร์ตเพนคูล์ม
 M_w = มวลของล้อ
 l = ความยาวของแกนอินเวิร์ตเพนคูล์ม
 r = ความยาวของล้อรถ
 I_b = Moment of inertia ของอินเวิร์ตเพนคูล์ม
 I_w = Moment of inertia ของล้อรถ
 η = อัตราทดของเกียร์
 τ = ค่าคงที่อัตราส่วนของทอร์กต่อกระแสของมอเตอร์
 i = ค่าที่จ่ายให้กลับมอเตอร์

เนื่องจากสิ่งที่เราต้องการคือ การควบคุม ϕ ให้มีค่าน้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ให้ได้ จึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อระบบทั้งหมด ซึ่งก็คือ ϕ และ θ

จากรูปที่ 3.1 เราสามารถเขียนสมการพลังงานของระบบได้ดังนี้

สมการของพลังงานจลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = M_w gr + m_b gl \cos(\theta - \beta) \dots\dots\dots(3.1)$$

สมการพลังงานศักย์ที่หาจากฟังก์ชันเชิงเส้น

$$T = \frac{1}{2} M_w (\dot{s}_2^2 + \dot{z}_2^2) + \frac{1}{2} M_b (\dot{s}_1^2 + \dot{z}_1^2) + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_b (\dot{\theta} - \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2} I_m \eta^2 \dot{\beta}^2$$

สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้วโดยที่แทนค่าเหล่านี้

$s_2 = r\theta$	differential →	$\dot{s}_2 = r\dot{\theta}$
$z_2 = r$		$\dot{z}_2 = 0$
$s_1 = r\theta + l \sin \phi$		$\dot{s}_1 = r\dot{\theta} + l \cos \phi$
$z_1 = r + l \cos \phi$		$\dot{z}_1 = -l \sin \phi$

สมการพลังงานศักย์อยู่ในรูปฟังก์ชันเชิงมุม

$$T = \frac{1}{2} M_w r \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} M_b \left[r \dot{\theta}^2 + 2lr\dot{\theta}(\dot{\theta} - \dot{\beta}) \cos(\theta - \beta) + (\dot{\theta} - \dot{\beta})^2 l^2 \right] + \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_b (\dot{\theta} - \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2} I_m \eta^2 \dot{\beta}^2 \dots\dots\dots(3.2)$$

พลังงานสูญเสียของระบบ

$$D = \frac{1}{2} (\mu_s \dot{\beta}^2 + \mu_g \dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.3)$$

ในระบบนี้มีสมการลากรางเจียน 2 สมการ โดยสมการ(4) มีพิกัดทั่วไปคือ β และสมการ(5) มีพิกัดทั่วไปคือ θ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} + \frac{\partial U}{\partial \beta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\beta}} = Q_\beta \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \theta} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} = Q_\theta \dots\dots\dots(3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $Q_\beta = \eta \tau i$
 $Q_\theta = 0$

เมื่อ η คือ อัตราส่วนระหว่างมอเตอร์กับล้อ
 τ คือ ค่าคงที่ของมอเตอร์

จากสมการ (1) (2) (3) จะได้

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = (M_b + M_w)r^2\dot{\theta} + M_b lr(\dot{\theta} - \dot{\beta})\cos(\theta - \beta) + M_b lr\dot{\theta}\cos(\theta - \beta) + M_b l^2(\dot{\theta} - \dot{\beta}) + I_w\dot{\theta} + I_b(\dot{\theta} - \dot{\beta}) \quad ; \phi = \theta - \beta, \quad \dot{\phi} = \dot{\theta} - \dot{\beta}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} = (M_b + M_w)r^2\dot{\theta} + M_b lr\dot{\phi}\cos\phi + M_b lr\dot{\theta}\cos\phi + M_b l^2\dot{\phi} + I_w\dot{\theta} + I_b\dot{\phi}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}}\right) = \ddot{\theta}[(M_w + M_b)r^2 + M_b lr + I_w] + \dot{\phi}[M_b lr\cos\phi + M_b l^2 + I_b] - M_b lr\dot{\phi}(\dot{\phi} - \dot{\theta})\sin\phi \dots\dots\dots(3.6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = -M_b lr\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\phi \dots\dots\dots(3.7)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = -M_b g l \sin\phi \dots\dots\dots(3.8)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}} = \mu_g \dot{\theta} \dots\dots\dots(3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = -M_b l r \dot{\theta} \cos(\theta - \beta) - M_b l^2 (\dot{\theta} - \dot{\beta}) + I_m \eta^2 \dot{\beta}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) = -M_b l r \ddot{\theta} \cos(\theta - \beta) + M_b l r \dot{\theta} (\dot{\theta} - \dot{\beta}) \sin(\theta - \beta) - M_b l^2 (\ddot{\theta} - \ddot{\beta}) - I_b (\ddot{\theta} - \ddot{\beta}) + I_m \eta^2 (\ddot{\theta} - \ddot{\beta}) \quad ; \quad \phi = \theta - \beta, \quad \dot{\phi} = \dot{\theta} - \dot{\beta}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) = \ddot{\theta} [I_m \eta^2 - M_b l r \cos \phi] - \ddot{\phi} [M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2] - M_b l r \dot{\theta} \dot{\phi} \sin \phi \dots\dots\dots(3.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \beta} = M_b l r \dot{\theta} \dot{\phi} \sin \phi \dots\dots\dots(3.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \beta} = M_b g l \sin \phi \dots\dots\dots(3.12)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\beta}} = \mu_s \dot{\beta} \dots\dots\dots(3.13)$$

นำสมการพลังงาน(3.6), (3.7), (3.8), (3.9) แทนในสมการ Lagrangian (3.4) ได้ดังนี้

$$\ddot{\theta} [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] = M_b g l \sin \phi - \mu_s \dot{\theta} - \ddot{\phi} [M_b l r \cos \phi + M_b l^2 + I_b] + M_b l r \dot{\phi} [(\dot{\phi} - \dot{\theta}) \sin \phi - \dot{\theta} \cos \phi] \dots\dots\dots(3.14)$$

นำสมการพลังงาน(3.10), (3.11), (3.12), (3.13) แทนในสมการ Lagrangian (3.5) ได้ดังนี้

$$\ddot{\phi} [M_b l^2 + I_b + I_m] = \ddot{\theta} [I_m \eta^2 - M_b l r \cos \phi] + M_b l \sin \phi + \mu_s \dot{\theta} - \mu_s \dot{\phi} - \eta \tau_i \dots\dots\dots(3.15)$$

เพื่อทดสอบว่า สมการ(14) (15) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ถูกต้อง จึงต้องนำสมการ(14) (15) ไปทดลอง symmulink ในโปรแกรมMatLAB จะแสดงในบทที่ 4 เรื่องการทดลอง

เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการ(3.14) (3.15) เป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการยากต่อการสร้างระบบควบคุม ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าให้เป็นระบบที่มีความเป็นเชิงเส้น โดยการประมาณค่า ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi &= 0 \\ \dot{\phi} &= 0 \\ \sin \phi &= \phi \\ \cos \phi &= 1 \end{aligned}$$

แทนลงในสมการ(3.14), (3.15) จะได้

$$\ddot{\theta}[(M_w + M_b)r^2 + M_b l r + I_w] = -\ddot{\phi}[M_b l r + M_b l^2 + I_b] + M_b g l \phi - \mu_g \dot{\theta} \quad \text{.....(3.16)}$$

$$\ddot{\phi}[M_b l^2 + I_b + I_m] = \ddot{\theta}[I_m r^2 - M_b g l] + M_b g l \phi + \mu_s \dot{\theta} - \mu_s \dot{\phi} - \eta \tau_i \quad \text{.....(3.17)}$$

ในบทที่ 4 ได้แสดงการทดลอง symmulink สมการ(16)และ(17)ในโปรแกรมMatLAB

จากสมการ (16) (17) สามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปปริภูมิสแตต เพื่อนำไปวิเคราะห์ระบบเปิด และหาตัวควบคุมระบบป้อนกลับต่อไป สมการปริภูมิสแตตสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix} i$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

เมื่อ i คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ เป็นอินพุตของระบบ

y_1 และ y_2 เป็นเอาต์พุตของระบบคือ θ และ ϕ

$\theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}$ เป็นตัวกำหนดสถานะของระบบ

ค่าคงที่ในสมการปริภูมิสแตต เป็นดังนี้

$$a_{22} = \frac{-\mu_s (M_b l r + M_b l^2 + I_b) - \mu_g (M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2)}{(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w + [(Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]]}$$

$$a_{23} = \frac{M_b g l (M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) - M_b g l (M_b l r + M_b l^2 + I_b)}{(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w + [(Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]]}$$

$$a_{24} = \frac{\mu_s (M_b l r + M_b l^2 + I_b)}{(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w + [(Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]]}$$

$$a_{42} = \frac{\mu_g (M_b l r - I_m \eta^2) + \mu_s [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w]}{[(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] + (Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]}$$

$$a_{43} = \frac{M_b g l [I_m \eta^2 + (M_w + M_b) r^2 + I_w]}{[(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] + (Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]}$$

$$a_{44} = \frac{-\mu_s [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w]}{[(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] + (Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]}$$

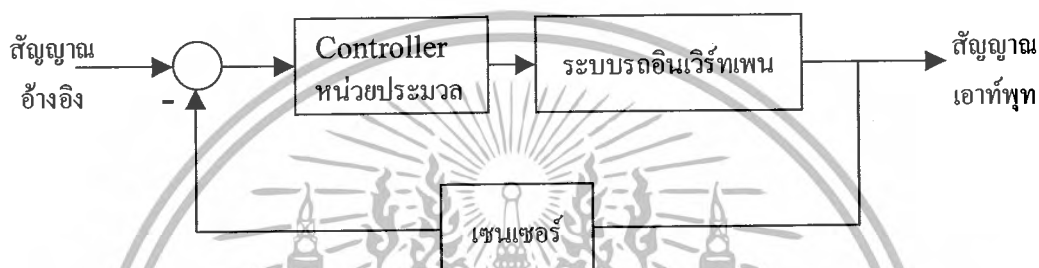
$$b_2 = \frac{\eta \tau (M_b l r + M_b l^2 + I_b)}{[(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] + (Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]}$$

$$b_4 = \frac{\eta \tau [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w]}{[(M_b l^2 + I_b + I_m \eta^2) [(M_w + M_b) r^2 + M_b l r + I_w] + (Im \eta^2 - M_b l r)(M_b l r + M_b l^2 + I_b)]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 หลักการในการควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัม

หลักการในการควบคุมรถอินเวอร์ทเพนดูลัมให้แขนของอินเวอร์ทเพนดูลัมเคลื่อนที่อยู่ในการมุมที่ต้องการ จะต้องควบคุมมอเตอร์เพื่อควบคุมให้ล้อเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการเพื่อควบคุมให้มุมของแขนอินเวอร์ทเพนดูลัมเคลื่อนที่สู่มุมที่อ้างอิงไว้ การควบคุมการเคลื่อนที่ดังกล่าว เกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของ คอมพิวเตอร์ ชุดควบคุมมอเตอร์และเซนเซอร์ โดยเซนเซอร์จะทำการวัดสัญญาณแล้วป้อนค่าของมุม นำค่ามุมที่ได้มาคำนวณและสร้างสัญญาณควบคุมมาทำการควบคุมให้ระบบเคลื่อนที่ให้ได้ค่ามุมของมุมเป็นไปอย่างที่เราต้องการ โดยไม่มีค่าผิดพลาดหรือค่าผิดพลาดน้อยที่สุด การทำงานโดยรวมของระบบควบคุมแสดงดังรูป



รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมโดยรวมของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

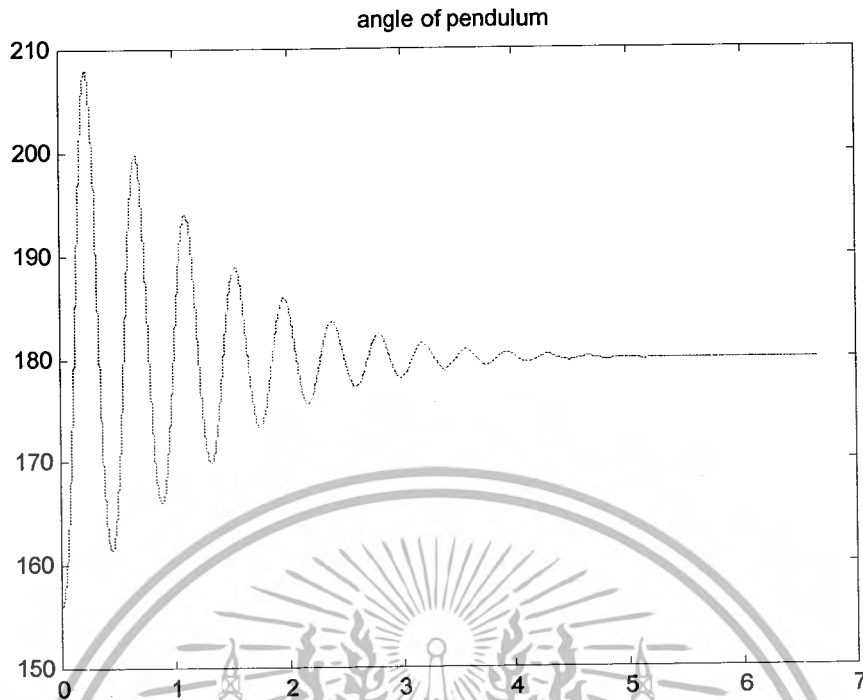
บทที่ 4

การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองเชิงวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาถึงผลตอบสนองของระบบโดยสิ่งที่สนใจคือมุมของแขนเพนดูลัม (ϕ) จากนั้นนำผลตอบสนองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองหาผลตอบสนองของโครงสร้างทางกลที่สร้างไว้แล้ว เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่รู้ค่าโดยสมมุติค่าพารามิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในสมการได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ปรับค่าพารามิเตอร์ไปเรื่อย จนกระทั่งได้ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คล้ายระบบจริงมากที่สุด จากนั้นทำการประมาณให้เป็นเชิงเส้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบมีหรือไม่มีเสถียรภาพ แล้วจึงทำการหาตัวควบคุมระบบแบบพีไอดีแล้วนำระบบควบคุมมาตรวจสอบผลการทดลองว่าสามารถควบคุมระบบจริงได้หรือไม่

4.1 การทดลองระบบวงเปิดเปรียบเทียบมุมของเพนดูลัม

นำโครงสร้างทางกลมาทดลองหาผลตอบสนองของตำแหน่งเพนดูลัมโดยให้อินพุตซึ่งก็คือแรงดันเป็นศูนย์ แล้วปล่อยให้เพนดูลัมถ่วงลง ณ ตำแหน่งของเพนดูลัม (ϕ) เท่ากับ 213.65 องศา และตำแหน่งของล้อ (θ) เท่ากับ 0 องศา ผลการทดลองดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองตำแหน่งของเพนดูลัมของระบบวงเปิด
ที่ทดลองได้จากโครงสร้างทางกลของรถ

จากผลการทดลองผลตอบสนองของโครงสร้างทางกลจะเห็นว่าระบบจะแกว่งมากในช่วงแรกแต่จะสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที สุ่มค่าพารามิเตอร์แล้วนำไปแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วใช้ฟังก์ชันซิมูลิงค์ (Simulink) ในโปรแกรมเมทแลป (Matlab) จำลองผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จนกว่าผลตอบสนองที่ได้จะใกล้เคียงกับผลตอบสนองของโครงสร้างทางกล ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ให้ผลตอบสนองใกล้เคียงกับโครงสร้างทางกลแสดงดังรูปที่ 4.2 ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดง ดังนี้

$$M_b = 1.8 \text{ กิโลกรัม}$$

$$M_w = 0.41535 \text{ กิโลกรัม}$$

$$l = 0.08325 \text{ เมตร}$$

$$r = 0.03 \text{ เมตร}$$

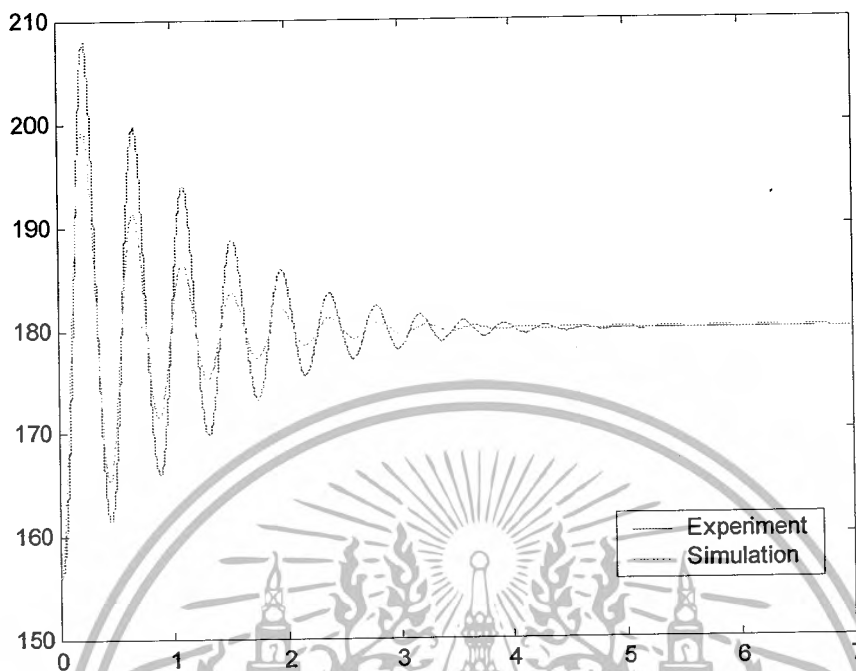
$$I_b = 0.0009$$

$$I_w = 1.5 \times 10^{-6}$$

$$\eta = 1.5$$

$$\tau = 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

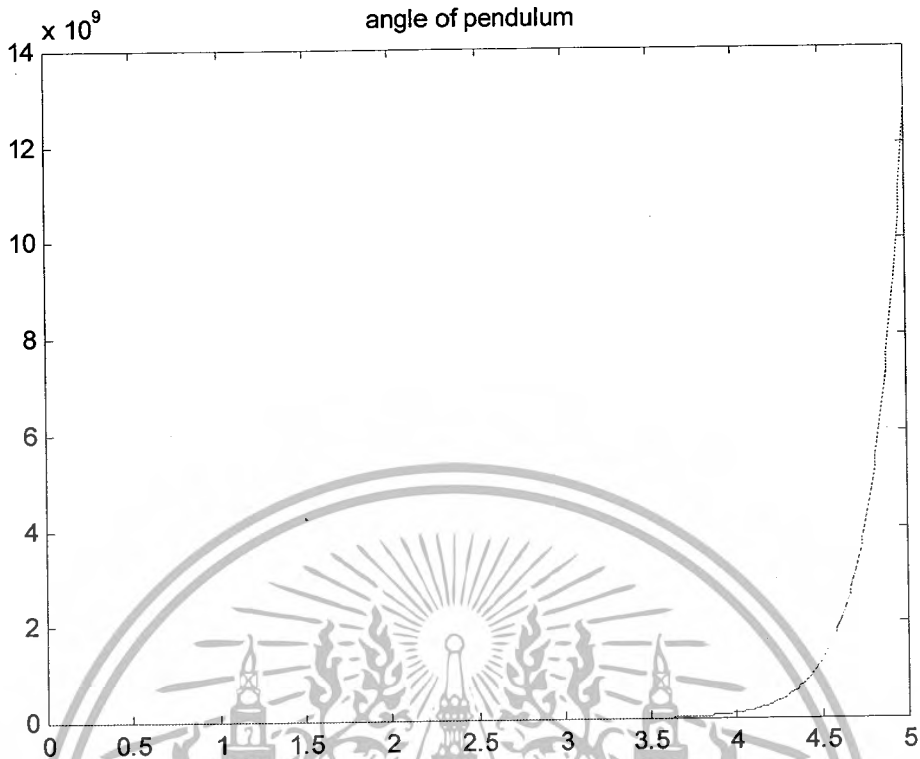


รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองของระบบวงเปิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
เปรียบเทียบกับผลการทดลองของโครงสร้างทางกล

จากรูปที่ 4.2 จะสังเกตได้ว่าผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกับผลตอบสนองของระบบที่ได้มาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถสองล้อ จึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ทำการสุ่มมาใช้แทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

4.2 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ประมาณให้เป็นเชิงเส้นไว้แล้ว

นำสมการ(3.16) และ (3.17) ซึ่งเป็นสมการที่ได้ทำการประมาณเป็นเชิงเส้นไว้แล้วมาทำซิมูลิงค์ (simulink) โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (Matlab) และใส่ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองหาในหัวข้อที่ 4.1 โดยใส่ค่าเริ่มต้นของอินเวอร์ทเพนดูลัม (ϕ) เป็น 90 องศาได้ผลการผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงผลตอบสนองของอินเวอร์ทเพนดูลัมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการประมาณเชิงเส้นแล้ว

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าค่าทั้งสองจะถู้ออกจากตำแหน่ง 0° แสดงว่าระบบนี้ไม่มีความเสถียรภาพ

4.3 ทดลองออกแบบระบบควบคุม

หาฟังก์ชันถ่ายโอนและนำฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ไปใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี นำผลตอบสนองของระบบมาหาฟังก์ชันถ่ายโอน โดยใช้โปรแกรมเมทแลป ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็นดังนี้

$$G(z) = \frac{0.0004986s}{s^4 - 2.108s^3 + 1.334s^2 - 0.3214s + 0.09521}$$

ต่อมาทำการต่อระบบวงปิดโดยอาศัยตัวควบคุมแบบพี (P : Proportional) แล้วปรับค่าอัตราขยาย K_p จนผลตอบสนองที่ได้เกิดการแกว่งคงที่ ณ จุดนี้ทำให้เกิดเสถียรภาพวิกฤต (Marginally Stable) นำค่าที่ได้เป็นค่าอัตราขยายวิกฤต K_{cr} (Critical Gain) เป็น 100 และเมื่อสังเกตคาบการ

เอกสารนี้เป็แกว่งวิกฤต P_{cr} (Critical Period) จะ ได้ 40 นำค่าที่ได้ไปแทนค่าหาค่าของตัวควบคุม

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

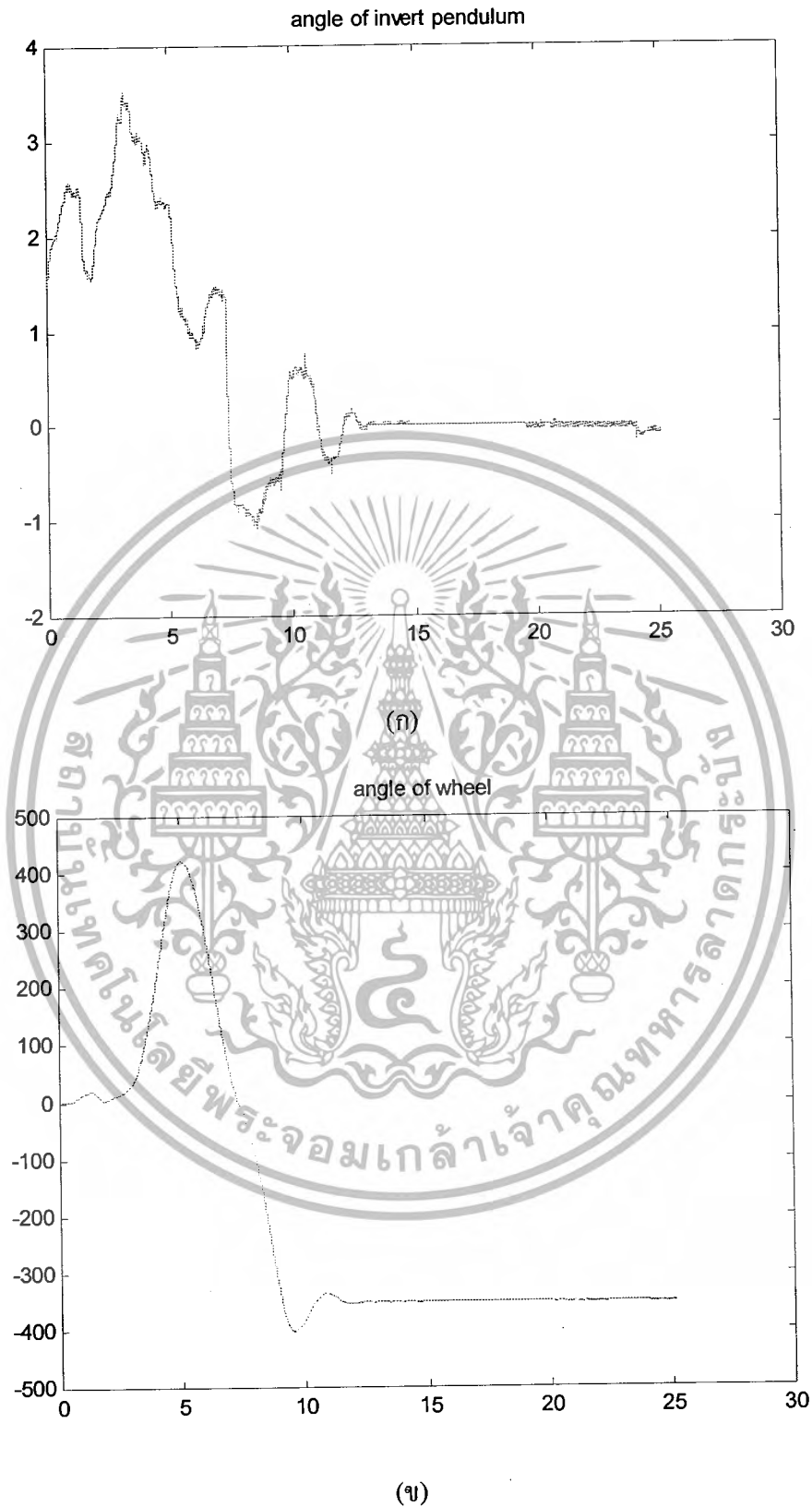
$$K_p = 0.6K_{cr} = (0.6)(100) = 60$$

$$T_d = 0.125P_{cr} = (0.125)(40) = 5$$

เขียน โปรแกรมควบคุมด้วยโปรแกรมบอร์แลนซี 5.02 เพื่อใช้ควบคุมระบบจริงโดยโปรแกรมจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ส่วนแรกคือ ส่วนที่ทำหน้าที่ติดต่อกับการ์ดแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัลเพื่อรับค่าสัญญาณป้อนกลับจากเอ็นโค้ดเดอร์เข้าคอมพิวเตอร์ ส่วนที่สองคือ ส่วนตัวควบคุมซึ่งจะทำหน้าที่คำนวณค่าอินพุตที่เหมาะสมเพื่อป้อนให้กับระบบในส่วนนี้จะนำเอาค่าตัวควบคุมที่หามาได้นำมาใช้ ส่วนที่สาม คือ ส่วนติดต่อกับการ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาลอกเพื่อส่งสัญญาณอินพุตที่ได้จากการคำนวณเพื่อไปควบคุมระบบจริง รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองที่ได้ทำการควบคุมกับระบบจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองกับระบบจริง

(ก) มุมของตัวอินเวอร์ทเพนดูลัม (ข) มุมของล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่ได้จะเห็นว่าผลตอบสนองของอินเวอร์ทเพนคูล์มจะเกิดการแกว่งก่อนแล้วจึงเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่าศูนย์ และลึจะหมุนไปจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงตัวก็จะหยุดอยู่กับที่ จึงสรุปได้ว่า สามารถใช้ตัวควบคุมแบบนี้ควบคุมระบบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ออกแบบระบบ ทำการแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้ระบบ ทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่สมบูรณ์และได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี จากนั้นใช้โปรแกรมแมทแล็บทำการจำลองผลการควบคุมระบบว่าสามารถควบคุมระบบให้กับเข้าสู่สภาวะคงตัวได้

สำหรับด้าน โครงสร้างทางกลศาสตร์ของระบบได้ ได้ประกอบขึ้นเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากการทดสอบจริงสามารถใช้วัดผลตอบสนองของระบบได้ อุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของเพนคูล์ม และล้อสามารถทำงานได้

ทางด้าน โปรแกรมควบคุมสามารถเชื่อมต่อกับระบบได้ โดยสามารถทำการทดลองควบคุมระบบได้ โดยระบบจริงสามารถเข้าสู่สภาวะคงตัวได้

5.2 ปัญหาที่พบในโครงการ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้มีความไม่เป็นเชิงเส้นและยังไม่ทราบค่าพารามิเตอร์หลายค่า จึงทำให้ต้องทำการสุ่มค่าพารามิเตอร์หลายค่าทำให้ระบบที่ได้ต่างกับการทดลองกับระบบจริง ต่อมาได้ทำการประมาณค่าระบบให้เป็นเชิงเส้นที่สถานะเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น

ในการสร้าง โครงสร้างวัสดุที่ใช้ควรมีน้ำหนักเบาและเครื่องมือที่ใช้ควรมีประสิทธิภาพในการกลึง, กัดและเจาะที่แม่นยำ จะทำให้ไม่ต้องแก้ไขโครงสร้างบ่อย

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

พัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับมุมของเพนคูล์มและล้อให้มีประสิทธิภาพมีความแม่นยำในการวัดสัญญาณ รวมทั้งสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ สามารถพัฒนาโครงสร้างทางกลศาสตร์ให้มีคุณภาพและสวยงามมากขึ้น พัฒนาการใช้ตัวควบคุมแบบอื่น ๆ ในการควบคุมระบบได้

ภาคผนวก ก

ชุดคำสั่งการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยโปรแกรมภาษาซี

```
=====
=====
```

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

Console application for C language

Copyright 2001 Interface Corporation. All rights reserved.

```
=====
=====
```

```
#include <stdio.h> // for enoder
#include <bios.h> // for enoder
#include <conio.h> // for enoder

#include <stdlib.h> // for D to A
#include <string.h> // for D to A
#include <time.h> // for D to A
#include <dos.h> // for D to A
#include <process.h> // for D to A
#include <math.h> // for D to A

#include "DA.H" // for D to A
#include "GETBAR.H" // for enoder

void interrupt (*oldIrq3)(void);
void interrupt countToggle(void);

#define drive_port 0x378 // Number of drive port
#define file_out "c:\\data.m" // open file (name is final.m)

#define cls(l); { short i; for(i=l; j<25; i++) lineclr(i); } // for D to A
#define Locate(x,y) printf("\x1b[%d;%dH", (y)+1, (x)+1) // for D to A
#define lineclr(l)printf("\x1b[s\x1b[%d;1H\x1b[OK\x1b[u", l+1) // for D to A
#define range DA_10V // for D to A

#define IRQ3 0x0B /* IRQ3 address */

PCI_CONFIG PciData; // for enoder

DASMPCHREQ SmpIchReq[2]; // for D to A
DABOARDSPEC BoardSpec; // for D to A
HANDLE OpenBoard(void); // for D to A
void INITIAL_DTOA(void); // for D to A
void CLOSE_DTOA(void); // for D to A
```

```
int hexout = 2047;
```

```
float volt = 0.0;
```

```
WORD DaData[1];
```

```
int swith = 1;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int key = 0;
long count = 0;
float time_r = 0.0;
HANDLE hDevice;

```

```

float f_hat = 0.0;
float fs2 = 1.5 ;
float fc2 = 1.0 ;
float fs1 = 1.5 ;
float fc1 = 1.0 ;

```

```
// parameter of encoder -----
```

```

int adr0,adr1,bus_info = 0.0;
int lByte = 0.0;
int mByte = 0.0;
int hByte = 0.0;
long dwCounter1 = 0.0;
long dwCounter2 = 0.0;
long dwCounter3 = 0.0;
int direction_1 = 0.0;
int direction_2 = 0.0;

```

```
// parameter of controller -----
```

```

float distane = 0.00;
float step_time = 0.001;
float setpoint = 0.00;
float eer = 0.00;
float eer_old = 0.00;
float x = 0.00;
float x_old = 0.00;
float x_dot = 0.00;
float th_1_old = 0.00;
float th_2_old = 0.00;
float th_1 = 0.00;
float th_2 = 0.00;
float th_1_dot = 0.00;
float th_2_dot = 0.00;
float ui_old = 0.00;
float ui = 0.00;
float u = 0.00;

```

```

float th_1_dot_old = 0.00;
int nnn = 1;
int nnn1 = 1;

```

```

int nn = 0.0;
float kk = 0.38;

```

```

float khat_1 = 60.49;
float khat_2 = 11.01;
float khat_3 = -29.15;

```

```
float khat_4 = -17.73;
float khat_5 = 31.39;
float setahat_dot_1=0.00;
```

```
float fihat_dot_1=0.00;
float seta_dot_old=0.00;
float fi_dot_old=0.00;
float setahat_2dot=0.00;
float fihat_2dot=0.00;
```

```
float fi_1_old = 0.00;
    float fi_1 = 0.00;
float fi_1_dot = 0.00;
```

```
float seta_1_old = 0.00;
float seta_1 = 0.00;
float seta_1_dot = 0.00;
float eer_dot = 0.00;
float eer_dot_old = 0.00;
```

```
float k11=50 ;
float k12=10;
float k13=-5 ;
float k14=15;
```

```
float Ti=1;
float Ts=0.001;
```

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

```
int main(void){
```

```
// open file -----
FILE *data_fout;
clrscr();
data_fout = fopen(file_out,"wt+");
fprintf(data_fout,"sm = [\n");
// -----
```

```
// Initial value of Digital to Analog PCI Card (PCI-3345A)-----
    INITIAL_DTOA();
    hDevice = OpenBoard();
    DaGetDeviceInfo(hDevice, &BoardSpec);
    SmplChReq[0].ulChNo = 1;
    SmplChReq[0].ulRange = range;
//-----
```

```
// Initial Encoder PCI Card (PCI-6201E)-----
    PciGetConfigRegEx(1, 0x1147, 6201, 0x1147, 0x0011,&bus_info, &PciData);
```

```

        adr0=PciData.BaseAddresses[0]&0xfffc;
        adr1=PciData.BaseAddresses[1]&0xfffc;
        outp(adr0+0x08,0x06); // time of encoder 1
        outp(adr0+0x09,0x06); // time of encoder 2
        outp(adr0+0x0A,0x06); // time of encoder 3
        outp(adr0+0x0d,0x01); // reset counter
// -----
// ----- START PROGRAM -----
// -----

while( !kbhit())
{

// in data of encoder_2 (th_1) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x01);
    mByte=inp(adr0+0x01);
    hByte=inp(adr0+0x01);
    dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//-----

// in data of encoder_1 (distant) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x00);
    mByte=inp(adr0+0x00);
    hByte=inp(adr0+0x00);
    dwCounter1= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//-----
// Modofly data of encoder_2 (th_1) -----
    if ( dwCounter2 > 0x7ffff )
    {
        dwCounter2 = 0xffff - dwCounter2 ;
    }
    else
    {
        dwCounter2 = dwCounter2*-1 ;
    }
    th_1 = dwCounter2*0.0175*-0.045 ;
//-----
// Modofly data of encoder_1 (Distane) -----

    if ( dwCounter1 > 0x7ffff )
    {
        dwCounter1 = 0xffff - dwCounter1 ;
    }
    else
    {
        dwCounter1 = dwCounter1*-1 ;
    }
    distane = (dwCounter1*0.0175*0.045)/-1.6666 ;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้ใช้เฉพาะในหน่วยงานราชการ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----
printf(" distane : %06IX ", dwCounter1);
printf(" : %3.4lf ", distane);
printf(" th_1 : %3.4lf \n", th_1);

}

th_1_old = th_1;
x_old = distane ;

oldIrq3 = getvect(IRQ3); /* save the old interrupt vector */
setvect(IRQ3, countToggle); /* install the new interrupt handler */
outportb(0x21, ( inportb(0x21) & 0xF7 ) ); /* Unmask (Enable) IRQ3 */

label:
while( key == 1 )
{
// Modofly data of encoder_2 (th_1) -----
    if ( dwCounter2 > 0x7ffff )
    {
        dwCounter2 = 0xffff - dwCounter2 ;
    }
    else
    {
        dwCounter2 = dwCounter2*-1 ;
    }
    th_1 = dwCounter2*0.0175*-0.045 ;
    fi_1=th_1;
//-----
// Modofly data of encoder_1 (Distane) -----
    if ( dwCounter1 > 0x7ffff )
    {
        dwCounter1 = 0xffff - dwCounter1 ;
    }
    else
    {
        dwCounter1 = dwCounter1*-1 ;
    }
    distane = (dwCounter1*0.0175*0.045)/-1.6666 ;
    seta_1=distane;

//-----
// Controler -----
//-----

```

```

    fi_1_dot = (fi_1-fi_1_old)/Ts;
    seta_1_dot = (seta_1-seta_1_old)/Ts;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eer = setpoint -fi_1;

eer_dot = ( eer - eer_old )/step_time ;

if (eer_dot == eer_dot_old)
{
  nnn=nnn+0.8 ;
}
else
{
  eer_dot = eer_dot/nnn ;
  nnn=1 ;
}

eer_dot_old = eer_dot;

volt = 60*eer + 5*eer_dot + 0*(1/2)*(eer+eer_old)*step_time ;

eer_old = eer;

if (seta_1_dot == 0)
{if (volt >= 0)
{
  if (volt == 0)
    f_hat = 0;
  else
    f_hat = fs1 ;
}
else
  f_hat = -fs2;
}
else
{if (seta_1_dot > 0)
  f_hat = fc1 ;
else
  f_hat = -fc2;
}

volt = volt + f_hat ;

//-----
// modify volt output -----
if (volt > 10)
  volt = 10;
if (volt < -10)
  volt = -10;
// out data (volt) -----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        hexout=((volt+10)/20)*4095;
        DaData[0] = hexout;
        DaOutputDA( hDevice, 1, &SmplChReq[0], &DaData[0] );
//-----
// set key off -----
    key = 0;
    count = 0;
//-----
    if ( count <= 0xfffff)
    {
        count = count + 1;
        goto label;
    }
    else
    {
        setvect(IRQ3, oldIrq3);
        outportb(0x21, (inportb(0x21) | 0x08) ); // disable IRQ3

        fprintf(data_fout, "];\n"); // end of file with "]"

        outp(drive_port,0);
        DaClose(hDevice);
        CLOSE_DTOA();
    }
//-----
return(0);
}

//-----
// this ISR should execute each time IRQ3 goes high -----
//-----
void interrupt countToggle(void)
{
    disable();

// in data of encoder_3 (th_2) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x02);
    mByte=inp(adr0+0x02);
    hByte=inp(adr0+0x02);
    dwCounter3= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//-----

// in data of encoder_2 (th_1) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x01);
    mByte=inp(adr0+0x01);
    hByte=inp(adr0+0x01);
    dwCounter2= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);

```

```

// in data of encoder_1 (distant) -----
    outp(adr0+0x0c,0xAA);
    lByte=inp(adr0+0x00);
    mByte=inp(adr0+0x00);
    hByte=inp(adr0+0x00);
    dwCounter1= lByte+(( long)mByte << 8)+(( long)hByte<<16);
//-----

    key = 1;

    outportb(0x20, 0x20);    // send EOI signal
    enable();
}
//----- //
// Function    for D to A    //
//----- //

HANDLE OpenBoard(void)
{
    HANDLE    hDevice;
    hDevice = DaOpen(3345, 0x0001, 0);
    return hDevice;
}
//----- //
void CLOSE_DTOA(void)
{
    char *pString;
    pString = "/R";
    spawnl(P_WAIT,"dadrv.exe",pString,NULL);
}
//----- //
void INITIAL_DTOA(void)
{
    char *pString;
    pString = "/B=1";
    spawnl(P_WAIT,"dadrv.exe",pString,NULL);
}
//----- //

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ E6C2C1101

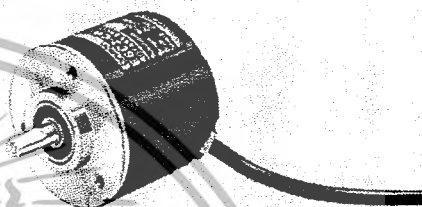
OMRON

Incremental Rotary Encoder

E6C2-C

Industrial Strength Encoder Meets World-Class Standards

- Drip-proof construction
- Shaft withstands heavy loads, 5 kgf radially, 3 kgf thrust (axially)
- Short circuit protection
- Space-saving, A-slant cable protrusion for ease of mounting



Ordering Information

Supply voltage	Output configuration	Resolution (P/R)	Part number
5 to 24 VDC	NPN open collector output	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 1,000, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000	E6C2-CWZ6C
5 to 12 VDC	Voltage output		E6C2-CWZ3E
5 VDC	Line driver output		E6C2-CWZ1X
12 to 24 VDC	PNP open collector output	100, 200, 360, 500, 600, 1,000, 2,000	E6C2-CWZ5B

Note: The power supply for the resolutions of 1,000, 1,200, 1,500, 1,800, and 2,000 is 12 to 24 VDC.

■ ACCESSORIES (ORDER SEPARATELY)

Item	Description	Part number
Coupling	---	E69-C06B
	Incorporates ends different to each other in diameter	E69-C68B
	Metal construction	E69-C06M
Flange	---	E69-FCA
	---	E69-FCA-02
Servo mounting bracket	Provided with the E69-FCA02 flange	E69-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specifications

■ RATINGS/CHARACTERISTICS

Electrical

Item	E6C2-CWZ6C	E6C2-CWZ3E	E6C2-CWZ1X	E6C2-CWZ5B
Power supply voltage	5 to 24 VDC (allowable range: 4.75 to 27.6 VDC)	5 to 12 VDC (allowable range: 4.75 to 13.2 VDC)	5 VDC±5%	12 VDC -10% to 24 VDC +15%
Current consumption (See Note 1.)	80 mA max.	100 mA max.	160 mA max.	100 mA max.
Resolution	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 1,000, 1,200, 1,500, 1,800, 2,000 P/R			100, 200, 360, 500, 600, 1,000, 2,000 P/R
Output phases	A, B, and Z (reversible)		A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z}	A, B, and Z (reversible)
Output configuration	NPN open collector output	Voltage output (NPN output)	Line driver (See Note 2.)	PNP open collector output
Output capacity	Applied voltage: 30 VDC max. I_{sink} : 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (I_{sink} : 35 mA max.)	Output resistance: 2 k Ω (residual voltage: 0.4 V max. I_{sink} : 20 mA max.)	AM26LS31 Output current: High level (I_o): -20 mA Low level (I_o): 20 mA Output voltage: V_o : 2.5 V min. V_s : 0.5 V max.	I_{sink} : 35 mA max. Residual voltage: 0.4 V max. (I_{sink} : 35 mA max.)
Max. response frequency (See Note 3.)	100 kHz			50 kHz
Phase difference on output	90°±45° between A and B (1/4T±1/8T)			
Rise and fall times of output	1 μ s max. (control output voltage: 5 V; load resistance: 1 k Ω ; cable length: 2 m)	1 μ s max. (cable length: 2 m; I_{sink} : 10 mA max.)	0.1 μ s max. (cable length: 2 m; I_o : -20 mA; I_s : 20 mA)	1 μ s max. (cable length: 2 m; I_{sink} : 10 mA max.)
Insulation resistance	100 M Ω min. (at 500 VDC) between carry parts and case			
Dielectric strength	500 VAC, 50/60 Hz for 1 min between carry parts and case			

- Note: 1. An inrush current of approx. 9 A flows for approx. 0.3 ms right after the E6C2-C is turned on.
 2. The line driver output of the E6C2-C is used for data transmission circuitry conforming to RS-422A and ensures long-distance transmission over twisted-pair cable, with quality equivalent to AM26LS31.
 3. The maximum electrical response revolution is determined by the resolution and maximum response frequency as follows:
 Maximum electrical response frequency (rpm) = maximum response frequency/resolution x 60
 This means that the E6C2-C Rotary Encoder will not operate electrically if its revolution exceeds the maximum electrical response revolution.

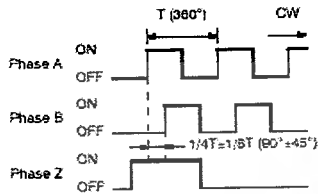
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ TIMING CHARTS

NPN Open Collector Output
E6C2-CWZ6C

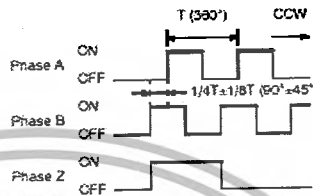
PNP Open Collector Output
E6C2-CWZ5B

Direction or resolution: Clockwise (CW)
(As viewed from the end of the shaft)



Note: Phase A is 1/4 ± 1/8T faster than phase B. The ONs in the above timing chart mean that the output transistor is ON and the OFFs mean that the output transistor is OFF.

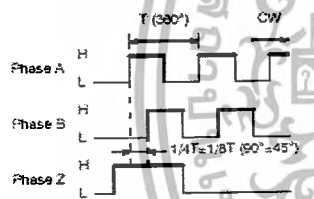
Direction or resolution: Counterclockwise (CCW)
(As viewed from the end of the shaft)



Note: Phase A is 1/4 ± 1/8T slower than phase B

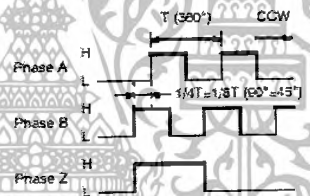
Voltage Output
E6C2-CWZ3E

Direction or resolution: Clockwise (CW)
(As viewed from the end of the shaft)



Note: Phase A is 1/4 ± 1/8T faster than phase B.

Direction or resolution: Counterclockwise (CCW)
(As viewed from the end of the shaft)

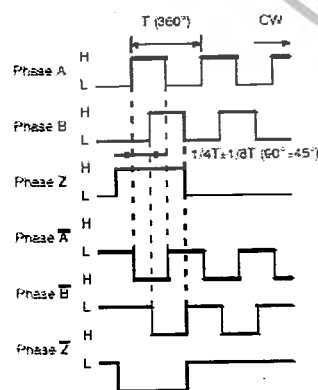


Note: Phase A is 1/4 ± 1/8T slower than phase B.

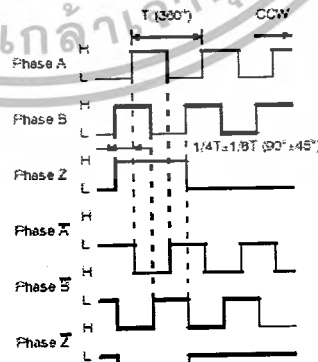
■ LINE DRIVER OUTPUT

E6C2-CWZ1X

Direction or resolution: Clockwise (CW)
(As viewed from the end of the shaft)



Direction or resolution: Counterclockwise (CCW)
(As viewed from the end of the shaft)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL

Item	E6C2-CWZ6C	E6C2-CWZ3E	E6C2-CWZ1X	E6C2-CWZ5B
Shaft loading	Radial	5 kgf (49.0 N) 11.0 lbf		
	Thrust	3 kgf (29.4 N) 6.6 lbf		
Moment of inertia	10 g • cm ² (1 × 10 ⁻⁶ kg • m ²) max.; 3 g • cm ² (3 × 10 ⁻⁷ kg • m ²) max. at 600 P/R max. 6.6 × 10 ³ lb/in .85 × 10			
Starting torque	100 gf • cm (9.8 mN • m) max. (7.2 m ft • lbf)			
Max. permissible revolution	6,000 rpm			
Vibration resistance	10 to 500 Hz, 150 m/s ² (15G) or 2-mm double amplitude for 11 min 3 times each in X, Y, and Z directions			
Shock resistance	1,000 m/s ² (100G) 3 times each in X, Y, and Z directions			
Weight	Approx. 400 g max. (cable length: 2 m) 0.88 lbs			

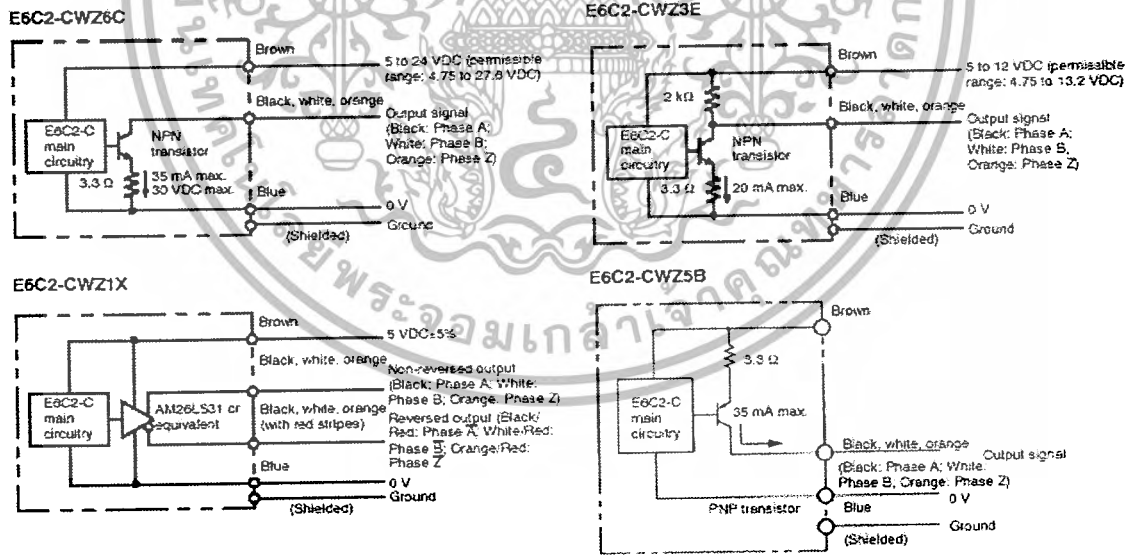
ENVIRONMENTAL

Item	E6C2-CWZ6C	E6C2-CWZ3E	E6C2-CWZ1X	E6C2-CWZ5B
Ambient temperature	Operating	-10°C to 70°C (14°F to 158°F) with no icing		
	Storage	-25°C to 85°C (-13°F to 185°F) with no icing		
Ambient humidity	Operating	35% to 85% (with no condensation)		
Protective circuit	Protection from load short-circuiting and power supply reverse polarity wiring			
Degree of protection	IEC IP64 (JEM IP64f drip-proof) (See Note.)			

Note: The applicable JEM standard is JEM1030 1991.

Operation

OUTPUT CIRCUIT DIAGRAM



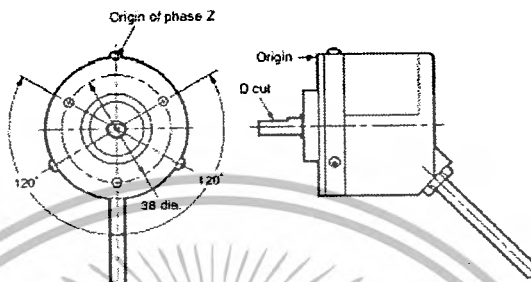
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ OUTPUT PROTECTION CIRCUIT

The E6C2-C with open collector or voltage output incorporates a circuit protecting the E6C2-C from damage resulting from load short-circuiting or wiring the output wrong.

■ ORIGIN INDICATION

It is easy to adjust the position of phase Z with the origin indication function. The illustration below on the left side shows the relationship between phase Z and the origin. Set cut face D to the origin as shown in the illustration on the right.

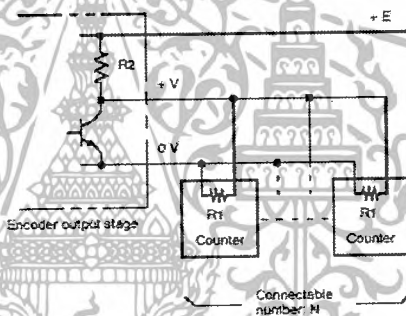


■ INPUT TO MORE THAN ONE COUNTER FROM ENCODER (WITH VOLTAGE OUTPUT)

Use the following formula to obtain the number of counters to be connected to a single E6C2-C Rotary Encoder.

$$\text{Number of counters (N)} = \frac{R1 (E-V)}{V \times R2}$$

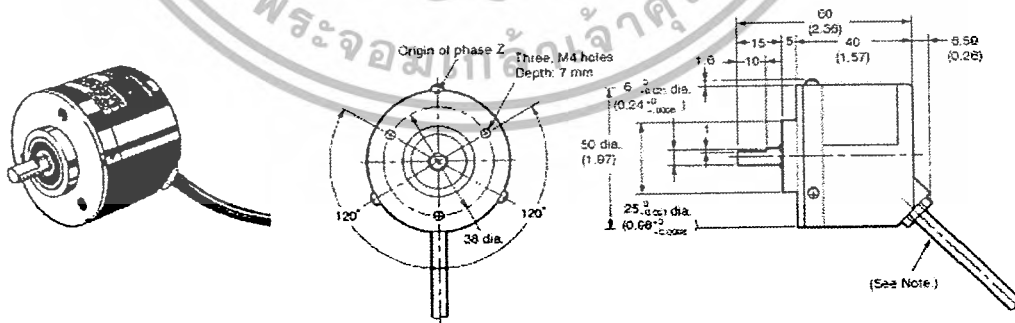
- E: Voltage supplied to Rotary Encoder
- V: Minimum input voltage of the counter
- R2: Output resistance of the Rotary Encoder
- R1: Input resistance of the Rotary Encoder



Dimensions

Unit: mm (inch)

■ E6C2-C



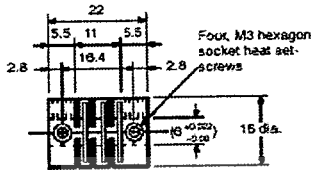
Note: 2-m-long. PVC code. 5-dia. (18/0.12 dia.) five conductors and shield (eight conductors for line driver use)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ ACCESSORIES (ORDER SEPARATELY)

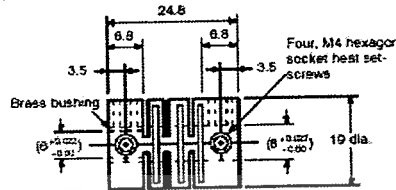
Couplings

E69-C06B



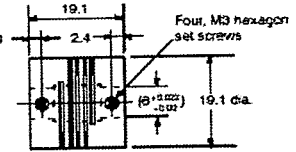
Note: The coupling is made of glass-reinforced PBT.

E69-C68B (With Ends of Different Diameter)



Note: The coupling is made of glass-reinforced PBT.

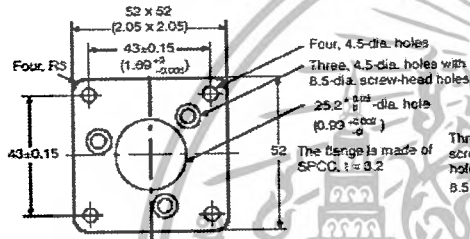
E69-C06M (Metal Construction)



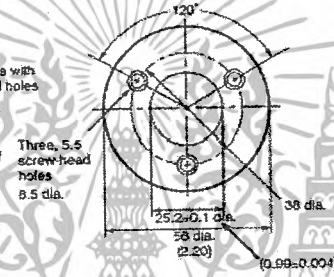
Note: Material: Super duralumin

Flanges

E69-FCA

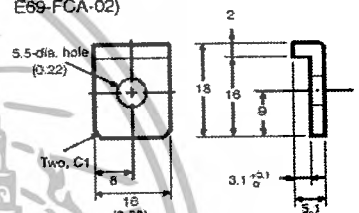


E69-FCA-02

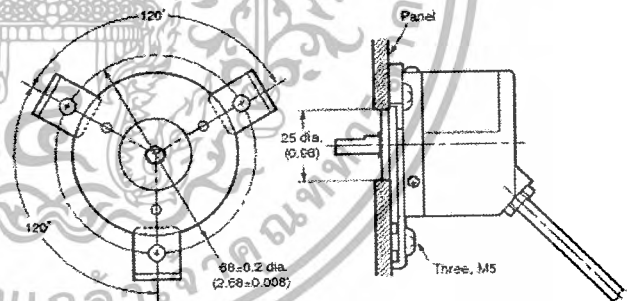


Note: Material: SPCC, l=3.2

Mounting bracket: (A set of three b333rackets provided with tl E69-FCA-02)

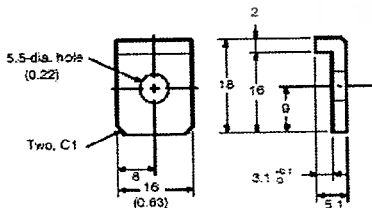


Mounting Dimensions



■ SERVO MOUNTING BRACKET

E69-2 (A Set of Three)



Note: A set of E69-2 servo mounting brackets is provided with the E69-FCA-02 flange.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Installation

■ CONNECTION

E6C2-CWZ6C/-CWZ3E

Color	Terminal
Brown	Power supply (+V _{CC})
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Blue	0 V (common)

Note: Receiver: AM26LS32

E6C2-CWZ1X

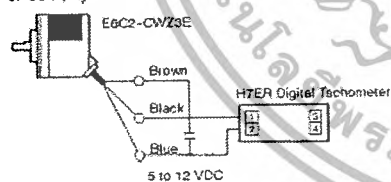
Color	Terminal
Brown	Power supply (+V _{CC})
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Blue/Red stripes	Output phase A
White/Red stripes	Output phase B
Orange/Red stripes	Output phase Z
Blue	0 V (common)

- Note:
1. The shield is not connected to the internal circuits or casing of the E6C2-C.
 2. There is no difference in circuit among phases A, B, and Z.
 3. Connect the GND terminal to 0 V or the ground when the E6C2-C is in normal operation.

Connection Examples

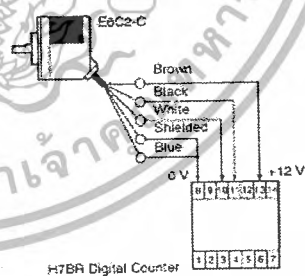
■ H7ER SELF-POWERED TACHOMETER

Applicable Model: E6C2-CWZ3E (with a resolution of 10 or 60 P/R)



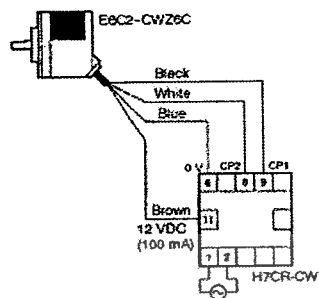
■ H7BR DIGITAL COUNTER

Applicable Model: E6C2-CWZ3E



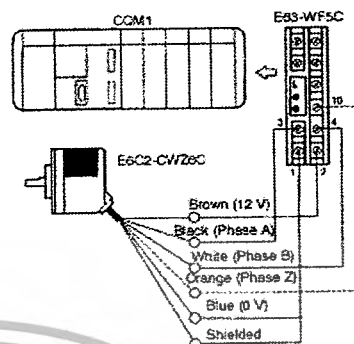
■ H7CR-CW DIGITAL COUNTER

Applicable Model: E6C2-CWZ6C



■ CQM1 PROGRAMMABLE CONTROLLER

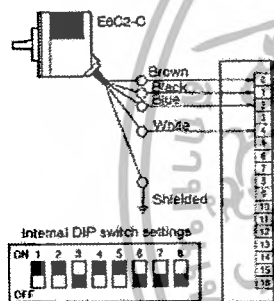
Applicable Model: E6C2-CWZ6C



■ C500-CT001/CT012 HIGH-SPEED COUNTER UNIT

CW and CCW detection (increment/decrement counting)

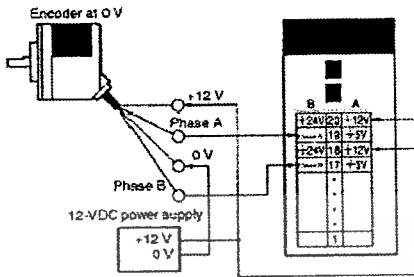
Applicable Model: E6C2-CWZ6C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

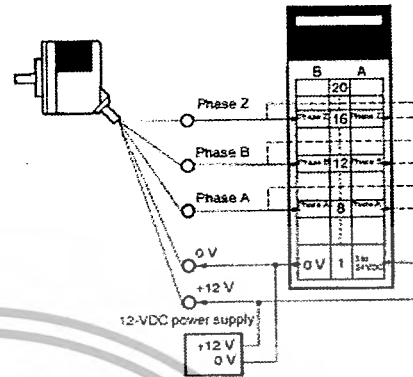
■ C200H-CT HIGH-SPEED COUNTER UNIT

Applicable model: E6C2-CWZ6C
 Typical model: C200H-CT001-V1



Note: Apply the following connections if the power supply to the E6C2-C is 5 or 24 V.
 Phase A and power supply: 5 V to A19 and 24 V to B20
 Phase B and power supply: 5 V to A17 and 24 V to B18

Applicable Model: E6C2-CWZ5B



Note: Apply the following connections if the power supply to the E6C2-C is 12 or 24 V.
 Phase A and power supply: 12 V to A8/B8 and 24 V A9/B9
 Phase B and power supply: 12 V to A12/B12 and 24 V to A13/B13
 Phase Z and power supply: 12 V to A16/B16 and 24 V to A17/B17

■ CQM1-CPU43-EV1 (AS BUILT-IN HIGH-SPEED COUNTER)

The pulse output of the E6C2-C can be directly input into IN04, IN05, and IN06 of the CPU Unit to use these three points as a built-in high-speed counter.

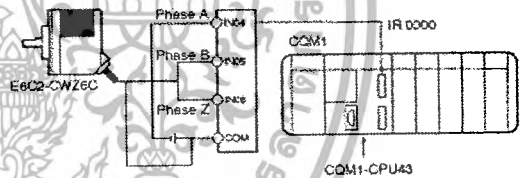
The single-phase response speed is 5 kHz, and the two-phase response speed is 2.5 kHz. The count value is within a range between 0 and 65,535 in increment mode and -32,767 and 32,767 in decrement mode.

The operating mode of the high-speed counter is set with the PC Setup in the DM area.

Count Mode

Up/Down mode	Increment/decrement counter uses phases A and B.
Incrementing mode	Increment counter uses phase A only.
Normal mode	IN04 through IN06 are used for normal input.

Applicable Model: E6C2-CWZ6C



Reset

The present count value can be reset with the soft-reset function or the AND of soft reset and phase Z input.

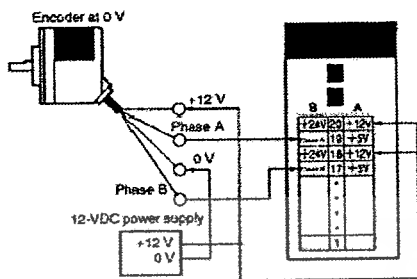
Output

Target value	When the count value reaches the target value, the specified subroutine is executed. A maximum of 16 target values can be set.
Range comparison	When the count value is within the range, the specified subroutine is executed. A maximum of 8 ranges can be set with upper and lower limits.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

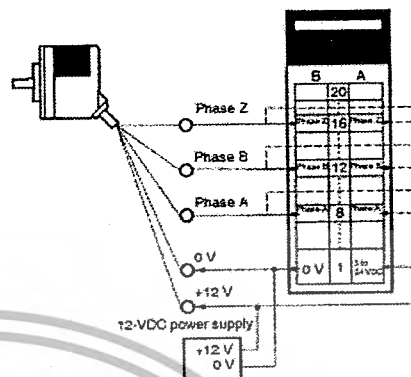
■ C200H-CT□□ HIGH-SPEED COUNTER UNIT

Applicable model: E6C2-CWZ6C
 Typical model: C200H-CT001-V1



Note: Apply the following connections if the power supply to the E6C2-C is 5 or 24 V.
 Phase A and power supply: 5 V to A19 and 24 V to B20
 Phase B and power supply: 5 V to A17 and 24 V to B18

Applicable Model: E6C2-CWZ5B



Note: Apply the following connections if the power supply to the E6C2-C is 12 or 24 V.
 Phase A and power supply: 12 V to A8/B8 and 24 V A9/B9
 Phase B and power supply: 12 V to A12/B12 and 24 V to A13/B13
 Phase Z and power supply: 12 V to A16/B16 and 24 V to A17/B17

■ CQM1-CPU43-EV1 (AS BUILT-IN HIGH-SPEED COUNTER)

The pulse output of the E6C2-C can be directly input into IN04, IN05, and IN06 of the CPU Unit to use these three points as a built-in high-speed counter.

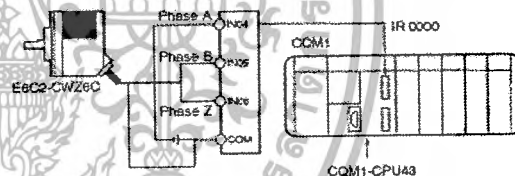
The single-phase response speed is 5 kHz, and the two-phase response speed is 2.5 kHz. The count value is within a range between 0 and 65,535 in increment mode and -32,767 and 32,767 in decrement mode.

The operating mode of the high-speed counter is set with the PC Setup in the DM area.

Count Mode

Up/Down mode	Increment/decrement counter uses phases A and B.
Incrementing mode	Increment counter uses phase A only.
Normal mode	IN04 through IN06 are used for normal input.

Applicable Model: E6C2-CWZ6C



Reset

The present count value can be reset with the soft-reset function or the AND of soft reset and phase Z input.

Output

Target value	When the count value reaches the target value, the specified subroutine is executed. A maximum of 16 target values can be set.
Range comparison	When the count value is within the range, the specified subroutine is executed. A maximum of 8 ranges can be set with upper and lower limits.

Mounting Procedure

1. Insert the shaft into the coupling.
Do not secure the coupling and shaft with screws at this stage.
2. Secure the Rotary Encoder.
Refer to the following table for the maximum insertion length of the shaft into the coupling.

Part number	Maximum insertion length
E69-C06B	5.5 mm (0.22)
E69-C06M	8.5 mm (0.33)

3. Secure the coupling.

Part number	Tightening torque
E69-C06B	2.5 kgf • cm (0.25 N • m) 0.18 ft lbf
E69-C06M	7 kgf • cm (0.7 N • m) 0.52 ft lbf

4. Connect the power and I/O lines.
Be sure to turn off the Rotary Encoder when connecting the lines.
5. Turn on the Rotary Encoder and check the output.

CONNECTING

- When extending the cable, select the type carefully. You must consider the response frequency because the longer the cable is, the more the residual voltage increases due to the resistance of the cable and the capacitance between the wires. As a result, the waveform will be distorted.
- We recommend the line driver output type model if the cable needs to be extended.
- In order to reduce inductive noise, the cable must be as short as possible, especially when the signal is input to an IC.
- Insert a surge absorber between the power supply terminals if a possibility of surge exists.
- A wrong pulse may be generated when the E6C2-C Rotary Encoder is turned on or off. Do not use the connected device for 0.1 s after the E6C2-C Rotary Encoder is turned on and for 0.1 s before the E6C2-C Rotary Encoder is turned off.

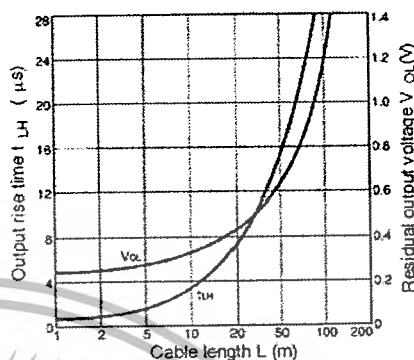
Cable Extension

- The rise time of each output waveform will increase when the cable is extended. This affects the phase difference characteristics of phases A and B.
- The available length of cable varies with the response frequency and noise. It is safer to limit the length of cable to 10 m maximum. If a longer cable of up to 100 m is required, use line driver output.

Note: Recommended cable:

Cross section: 0.2 mm² with spiral shield
 Conductor resistance: 92 Ω/km max. at 20°C
 Insulation resistance: 5 MΩ/km min. at 20°C

- The rise time varies with the resistance of the cable and the type and length of the cable.
- The residual output voltage will increase according to the length of the cable.



Conditions

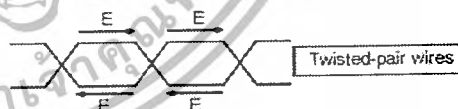
Rotary Encoder: E6C2-CWZ6C
 Load voltage: 5 VDC
 Load resistance: 1 kΩ (The residual output voltages were measured with a load current of 35 mA.)
 Cable: Dedicated cable

PREVENTING MISCOUNTING

- If the operation of the E6C2-C Rotary Encoder is stopped near a signal rising or falling edge, a wrong pulse may be generated, causing the E6C2-C Rotary Encoder to miscount. In this case, use an increment-decrement counter to prevent miscounting.

EXTENSION OF LINE DRIVER OUTPUT

- Be sure to use a twisted-pair cable to extend a line driver cable. Use an RS-422A receiver for the receiver side.
- The twisted-pair wires as shown in the following illustration are suitable for RS-422A signal transmission. Normal mode noise can be eliminated by twisting the wires because the generated electrical forces on the lines cancel each other.



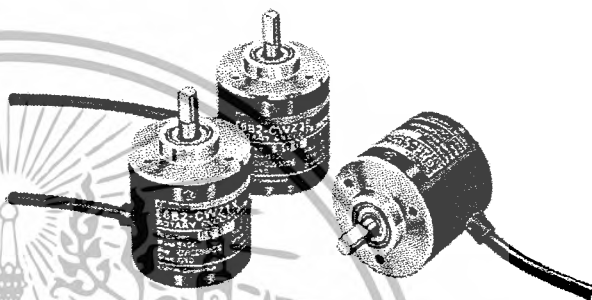
- Be sure the E6C2-C Rotary Encoder is supplied with 5 VDC when a line driver output is used. There will be approximately a 1-V voltage drop if the cable length is 100 m.

ภาคผนวก ค

เอกสารอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ E6B2-CWZ6C

OMRON**Incremental Rotary Encoder****E6B2****General-Purpose Rotary Encoder
Withstands Large Shaft Loads**

- Wide variety of supply voltages and output forms
- Easy-to-adjust zero index (phase Z) with origin indicating function
- High resolution models (2000 pulses per revolution) substantially improves measuring accuracy
- Rugged construction: 6 mm (0.24 inch) diameter shaft with radial load ratings of 3 kgf (21.7 ft•lbs) and axial load rating of 2 kgf (14.5 ft•lbs)
- Protected against short-circuit and reversed connections for highly reliable operation
- Available with Line Driver output



CE

Ordering Information

■ ENCODERS

When ordering, add the resolution (pulses per revolution) between the part number and cable length.
For example, E6B2-CWZ3E 360 P/R 0.5M.

Resolution (pulses per revolution)	Output phases	Output form	Supply voltage	Part number
10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300,	A, B, Z (reversible)	Open collector	5 to 24 VDC	E6B2-CWZ6C □□□P/R 0.5M
360, 400, 500, 600, 1000, 1200,	A, B, Z (reversible)	Voltage	5 to 12 VDC	E6B2-CWZ3E □□□P/R 0.5M
1500, 1800, 2000	A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z} (reversible)	Line driver	5 VDC	E6B2-CWZ1X □□□P/R 0.5M

■ ACCESSORIES

Description	Part number	
Shaft coupler	Fits one 6 mm (0.24 in) and 8 mm (0.32 in) dia. shaft	E69-C68B
	Fits one 6 mm (0.24 in) and 10 mm (0.39 in) dia. shaft	E69-C610B
Mounting flange	E69-FBA	
Mounting bracket, set of three	E69-FBA-02	

■ REPLACEMENT PARTS

Description	Part number
Shaft coupler	Fits two 6 mm (0.24 in) dia. shafts; supplied with each encoder. E69-C06B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Specifications

Part number	E6B2-CWZ3E	E6B2-CWZ6C	E6B2-CWZ1X
Supply voltage	5 VDC -5% to 12 VDC +10%; max. 5% ripple peak-to-peak	12 VDC -10% to 24 VDC +15%; max. 5% ripple	5 VDC ±5%
Current consumption	100 mA max.	80 mA max.	160 mA max.
Resolution (pulses per revolution)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 100, 200, 300, 360, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500, 1800, 2000		
Output phases	A, B, Z (reversible)	A, B, Z (reversible)	A, A, B, B, Z, Z (reversible)
Output form	Voltage output	Open collector output	Line driver output
Output capacity	Output resistance: 2 kΩ Residual voltage: 0.4 V max. Sink current: 20 mA max.	Applied voltage: 30 VDC max. Residual voltage: 0.4 V max. Sink current: 35 mA max.	AM26LS31 Output current: High level: -20 mA Low level: +20 mA Output voltage: High voltage: 2.5 V minimum Low voltage: 0.5 V maximum
Maximum response frequency	100 kHz		
Rotation direction	Reversible, CW + CCW		
Phase difference of output	90° ±45° between A and B, M:AT ±1/9T)		
Output rise and fall times	1 μs max. with cable length: 0.5 m (1.64 ft) sink current: 10 mA max.	1 μs max. with control output voltage: 5 V load resistance: 1 kΩ cable length: 0.5 m (1.64 ft)	0.1 μs max. with cable length: 0.5 m (1.64 ft) output current high: -20 mA output current low: +20 mA
Starting torque	10 g·cm (0.14 oz·inch) max.		
Shaft loading	Radial	3 kgf (21.7 ft·lbs)	
	Axial	2 kgf (14.5 ft·lbs)	
Moment of inertia	10 g·cm ² (0.055 oz·inch ²) max.; 3 g·cm ² (0.0165 oz·inch ²) max. at 600 pulses/revolution		
Maximum rpm	6,000 rpm		
Electrical connection	Prewired with 0.5 m (1.64 ft) length cable		
Weight	Approx. 100 g (3.5 oz) with cable		
Enclosure rating	IEC: IP50 (The E6B2 encoder is not watertight or oil resistant.)		
Ambient temperature	Operating	-10°C to 70°C (14°F to 158°F)	
	Storage	-25°C to 60°C (-13°F to 176°F)	
Ambient humidity	25% to 85% RH		
Vibration resistance	Mechanical durability: 10 to 500 Hz, 15 G or 2-m double amplitude, in X, Y, and Z directions for 11 minutes, three times each		
Shock resistance	Mechanical durability: 1,000 ms ² (approx. 100 G) in X, Y, and Z directions, 3 times each		
Insulation resistance	1,000 MΩ minimum at 500 VDC between current-carrying part and housing		
Dielectric strength	500 VAC, 50/60 Hz for 1 minute between current-carrying part and housing		

Note:

The maximum electrical response revolution is determined by the resolution and maximum response frequency as follows:

Maximum electrical response frequency (rpm) = Maximum response frequency ÷ resolution × 60

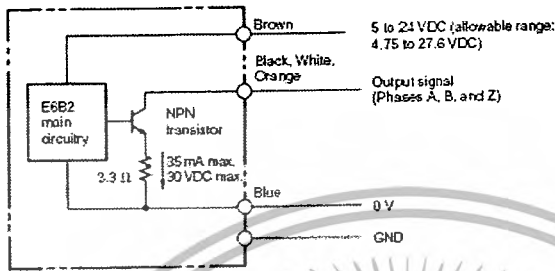
This means that the E6B2 encoder will not operate electrically if its shaft speed exceeds the maximum electrical response revolution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Operation

OUTPUT CIRCUIT DIAGRAMS

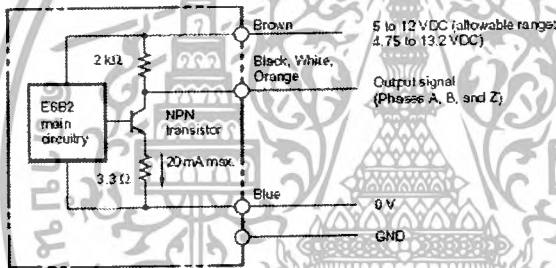
Open Collector Output E6B2-CWZ6C



Wire Color Code
IEC colors are shown.

Color	Terminal
Brown	Power supply (+V)
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Blue	0 V (common)

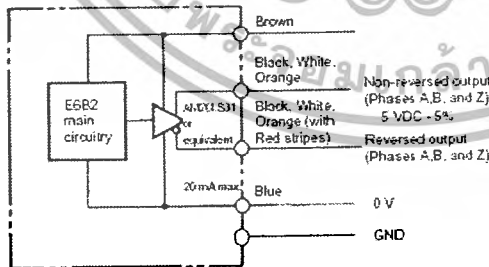
Voltage Output E6B2-CWZ3E



Wire Color Code
IEC colors are shown.

Color	Terminal
Brown	Power supply (+V)
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Blue	0 V (common)

Line Driver Output E6B2-CWZ1X



Wire Color Code
IEC colors are shown.

Color	Terminal
Brown	Power supply (+V)
Black	Output phase A
White	Output phase B
Orange	Output phase Z
Black/red stripes	Output phase A
White/red stripes	Output phase B
Orange/red stripes	Output phase Z
Blue	0 V (common)

Note:
Both open collector and voltage output models of E6B2 have a circuit to prevent damage from a short-circuited load and reversed connection.

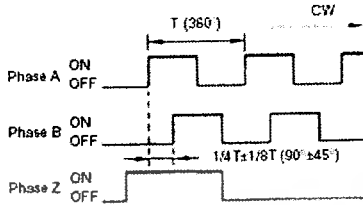
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■ TIMING CHARTS

Open Collector Output E6B2-CWZ6C

Direction of rotation: CW
Clockwise as viewed
from the shaft

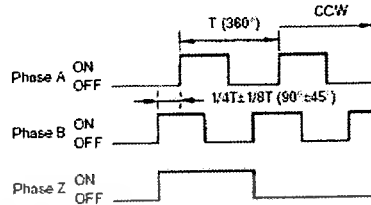
→ CW direction



Note:
Phase A is $1/4T \pm 1/8T$ faster than phase B. The ONs in the above timing chart mean that the output transistor is ON and the OFFs mean that the output transistor is OFF.

Direction of rotation: CCW
Counterclockwise as viewed
from the shaft

→ CCW direction

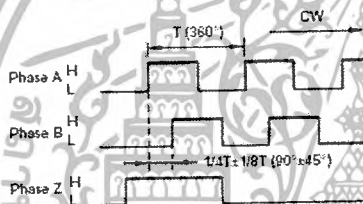


Note: Phase A is $1/4T \pm 1/8T$ slower than phase B.

Voltage Output E6B2-CWZ3E

Direction of rotation: CW
Clockwise as viewed
from the shaft

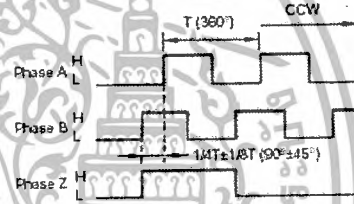
→ CW direction



Note: Phase A is $1/4T \pm 1/8T$ faster than phase B

Direction of rotation: CCW
Counterclockwise as viewed
from the shaft

→ CCW direction

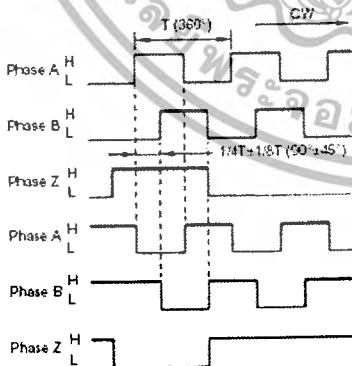


Note: Phase A is $1/4T \pm 1/8T$ slower than phase B.

Line Driver Output E6B2-CWZ1X

Direction of rotation: CW
Clockwise as viewed
from the shaft

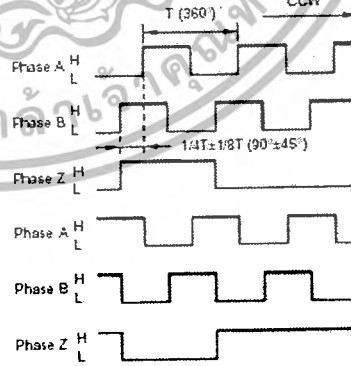
→ CW direction



Note:
The line driver output circuit is an RS-422A data transmission circuit consisting of two balanced output lines. The relationship between the two output lines is on an equal status. This means that if the level of the signal on a line is H, the level of the signal on the other line is L. The noise-resistant line driver output circuit assures high-speed data transmission.

Direction of rotation: CCW
Counterclockwise as viewed
from the shaft

→ CCW direction

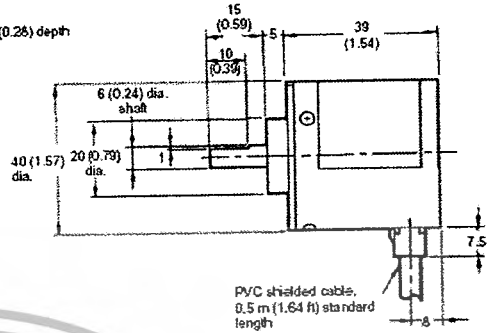
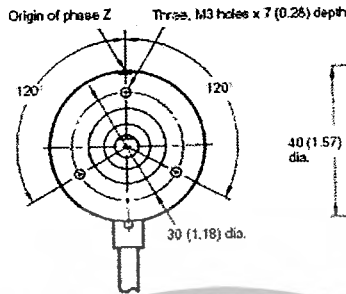
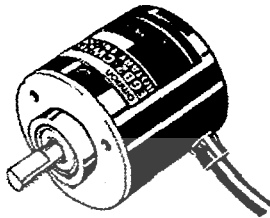


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dimensions

Unit: mm (inch)

ENCODERS

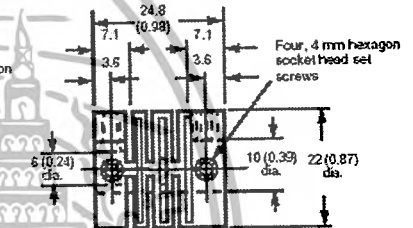
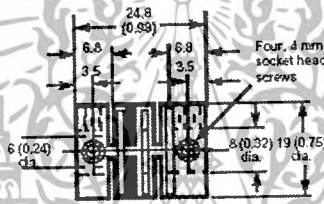
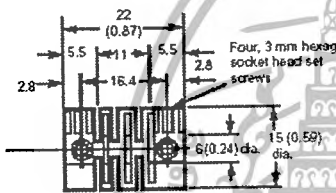


ACCESSORIES

Shaft Coupler E69-C06B (included) for two 6 mm diameter shafts

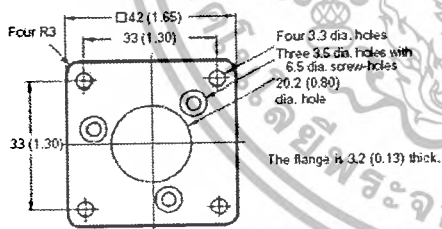
Shaft Coupler E69-C68B for one 6 mm and one 8 mm diameter shaft

Shaft Coupler E69-C610B for one 6 mm and one 10 mm diameter shaft



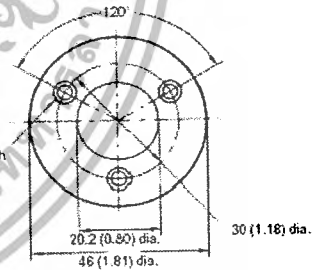
- Note:
1. Material: Glass-filled polybutadiene terephthalate (PBT).
 2. An E69-C06B coupler is supplied with each E6B2 encoder.
 3. Each set screw must be tightened to 2.5 kg-cm (2.17 in-lbs)

Mounting Flange E69-FBA

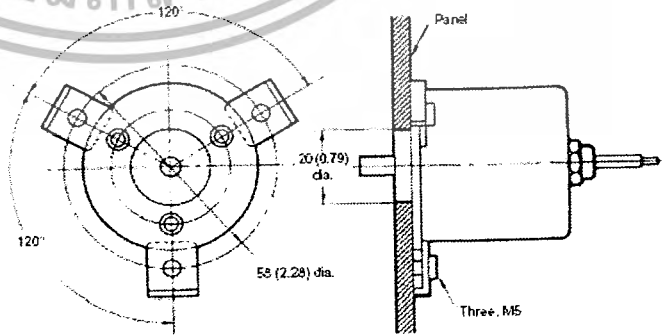
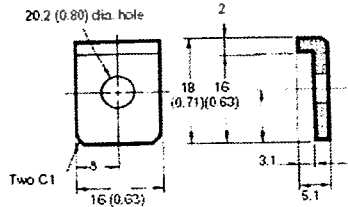


Dimensions with Encoder

Three 3.5 dia. holes with 6.5 dia. countersink



Mounting Bracket E69-FBA-02



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

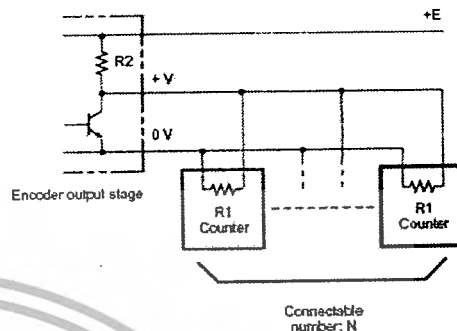
Installation

■ INPUT TO MORE THAN ONE COUNTER FROM ENCODER WITH VOLTAGE OUTPUT

Use the following formula to obtain the number of counters to be connected to a single E6B2

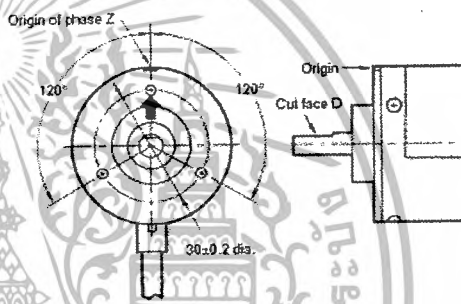
$$\text{Number of counters (N)} = \frac{R1 (E-V)}{V \times R2}$$

- E: Voltage supplied to Rotary Encoder
- V: Minimum input voltage of the counter
- R2: Output resistance of the Rotary Encoder
- R1: Input resistance of the Rotary Encoder



■ ORIGIN INDICATION

It is easy to adjust the position of phase Z with the origin indication function. The following illustration (on the left-hand side) shows the relationship between phase Z and the origin. Set cut face D to the origin as shown in the illustration (on the right-hand side).



■ CONNECTION WITH PERIPHERAL DEVICES

Encoder	E6B2-C1WZ3E	E6B2-CWZ6C	E6B2-CWZ1X
Digital Counter (H7BR, H7CR)	A	A	C
Digital Tachometer (H7ER)	A	A	C
Intelligent Digital Panel Meter (K3TR-NBJJJ)	B	B	C
Line receiver IC	C	C	A
SYSMAC High-speed Counter Module	A	A	A
SYSMAC Position Control Module	B	B	A
TTL, LSTTL	A	A	C
CMOS	A	A	C
Sensor Controller, S3D8	B	A	C
Sensor, Controller, S3D2	A	A	C
Direction Sensor Unit, E63-WF5C	A	A	C

- Legend:
- A: Possible to connect directly in most cases.
 - B: Possible to connect, but an independent power supply or pull-up resistor will be required.
 - C: Impossible to connect.

หนังสืออ้างอิง

- [1] ปิติเขต สุรักษา, “วิศวกรรมระบบควบคุม”, ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2545
- [2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, “การควบคุมระบบพลศาสตร์”, โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] ชวพงษ์ สิงห์แพทย์, “การควบคุมอัตโนมัติ”, สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, 2533
- [4] Katashiko Okata, “Modern Control Engineering” 2th edition, Prentice Hall, 1990
- [5] กิตติ ตีรเศรษฐ, “พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม”, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2545



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้