

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อินเวอร์ทเพนดูลัม

INVERTED PENDULUM



โดย

นายชวลิต ศรีณยุคปต์ 39014118

นายสงกรานต์ ศรีปัญญา 39014535

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...36852
วัน, เดือน, ปี... 29 ส.ค. 2548

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง


อินเวอร์ทเพนดูลัม

INVERTED PENDULUM

ผู้จัดทำ

นายชวลิต ศรีณขุปต์

นายสงกรานต์ ศรีปัญญา



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินเวอร์ทเพนดูลัม

INVERTED PENDULUM

โดย

นายชวลิต ศรีณยุปต์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 39014118

นายสงกรานต์ ศรีปัญญา

รหัสประจำตัวนักศึกษา 39014535

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาาระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแบบสองข้อต่อ ที่จะทำให้อินเวอร์ทเพนดูลัมทรงตัวได้อย่างสมดุล โดยการทำการหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ และจำลองการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับสเตท โดยวิธีกำหนดตำแหน่งโพล สำหรับระบบควบคุมตามเวลาจริง และทำการประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง โดยใช้เอนโคเดอร์ในการวัดตำแหน่งมุมของอินเวอร์ทเพนดูลัม และทำการควบคุมระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ABSTRACT

In this project, we study about two-link inverted pendulum system and control algorithms to control the vertical balance of rotational inverted pendulum. At first the mathematical model of the system had been defined so the response of the system could be simulated. In real time domain system, state feedback controller of this system was designed by pole assignment method. The system was distributed using encoders to detect the angle of the pendulum, and the system is controlled by computer.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี ก็เพราะได้รับความเมตตาจาก อาจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้แก่ผู้จัดทำ รุ่นที่ นวเทพ ชนาพรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือในการจัดทำโครงสร้างทางกลศาสตร์ของโครงงาน รุ่นที่ สุภาภา นามประดิษฐ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและแก้ไขปัญหา ผู้จัดทำขอกราบขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ของผู้จัดทำที่ได้อุปการะผู้จัดทำ และเป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และคอยช่วยเหลือผู้จัดทำมาโดยตลอด ขอขอบคุณน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้ ตลอดจนขอขอบคุณทุกท่านที่เคยให้ความช่วยเหลือแก่ผู้จัดทำ

ผู้จัดทำ

นายชวลิต ศรันนยุคต์

นายสงกรานต์ ศรีปัญญา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	i
กิตติกรรมประกาศ.....	ii
สารบัญ.....	iii
สารบัญรูปภาพ.....	v
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1-1 ความเป็นมาของโครงการ.....	2
1-2 วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการ.....	2
1-3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ.....	2
1-4 เนื้อหาที่จะกล่าวในปริญญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุม.....	3
2-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัม.....	3
2-2 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตท.....	10
2-3 ระบบควบคุมสเตทแบบมีอินพุทอ้างอิง.....	13
บทที่ 3 ส่วนประกอบของระบบ.....	15
3-1 แผนผังรวมของระบบ.....	15
3-2 คอมพิวเตอร์ และการควบคุม.....	15
3-3 การ์ดอินเตอร์เฟส.....	16
3-4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	20
3-5 เอน โคเดอร์.....	23
3-6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	24
3-7 โครงสร้างทางกลศาสตร์.....	25
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	28
4-1 การหาพารามิเตอร์ของระบบ.....	28
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ปัญหา.....	32
5-1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	32
5-2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	32
5-3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	35
ภาคผนวก ก สมการของลากรานจ์.....	36
ก-1 โคออดิเนตแบบทั่วไป.....	36
ก-2 แรงแบบทั่วไป.....	38
ก-3 แรงแบบทั่วไปสำหรับระบบอนุพันธ์.....	39
ก-4 สมการของลากรานจ์.....	40
ก-5 การประยุกต์สมการของลากรานจ์ไปใช้ในบางกรณี.....	43
ภาคผนวก ข โมเดลทางคณิตศาสตร์ของดีซี มอเตอร์.....	44
ภาคผนวก ค การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง IBM PC ISA BUS.....	48
ค-1 การจัดหาและลักษณะของ IBM ISA BUS.....	49
ภาคผนวก ง ข้อมูลอุปกรณ์.....	51

สารบัญรูปภาพและตาราง

บทที่ 1	หน้า
รูป 1-1 แสดงโครงสร้างของระบบ.....	1
บทที่ 2	
รูป 2-1 แสดงแรงที่กระทำต่อระบบ.....	3
รูป 2-2 แสดงระบบควบคุมลูปวงเปิด.....	10
รูป 2-3 แสดงระบบควบคุมแบบลูปวงปิด เมื่อ $u(t) = -Kx(t)$	10
รูป 2-4 แสดงระบบควบคุมแบบมีอินพุทอ้างอิง.....	14
บทที่ 3	
รูป 3.1 แสดงแผนผังรวมของระบบ.....	15
ตาราง 3-1 แสดงตัวอย่างการกำหนดระดับลอจิกให้กับแอดเดรส.....	17
รูป 3-2 แสดงการตั้งค่าของสวิทช์ให้ตรงตามแอดเดรสที่ตั้งไว้.....	17
รูป 3-3 แสดงวงจรคาร์คินเตอร์เฟส	19
รูป 3-4 แสดงวงจรควบคุมแรงดันมอเตอร์กระแสตรงส่วนที่ 1.....	20
รูป 3-5 แสดงวงจรควบคุมแรงดันมอเตอร์กระแสตรงส่วนที่ 2.....	21
รูป 3-6 แสดงวงจรกำเนิดแรงดัน 50 โวลท์	21
รูป 3-7 แสดงภาพโดยรวมของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรง และ วงจรกำเนิดแรงดัน.....	22
รูป 3-8 แสดงสัญญาณที่ได้จากเอน โคเดอร์.....	23
รูป 3-9 แสดงโคอะแกรมสถานะสัญญาณที่ได้จากเอน โคเดอร์.....	24
บทที่ 4	
บทที่ 5	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
รูป ข-1 แสดงโมเดลของดีซี มอเตอร์ แบบฟิลด์แยกกระตุ้น.....	44
รูป ข-2 แสดงบล็อกโคอะแกรมของดีซี มอเตอร์.....	45
ภาคผนวก ค	
รูป ค-1 แสดง IBM ISA BUS.....	48

ภาคผนวก ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

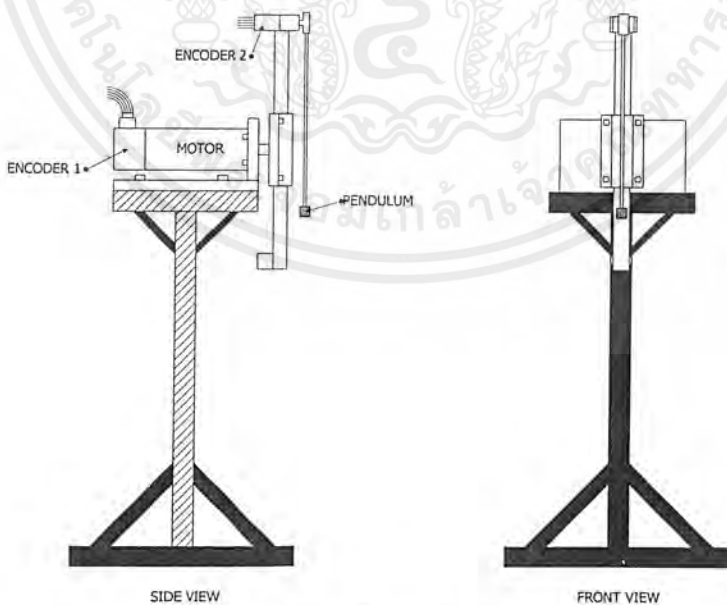
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เป็นการควบคุมเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม ชุดควบคุมก้านเพนดูลัม (Pendulum) บนแกน เป็นการควบคุมระบบพลศาสตร์ (Dynamic) แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear System) แบบหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้การควบคุมแบบป้อนกลับอัตโนมัติในการควบคุมจากระบบเดิมที่ไม่เสถียร ให้ระบบนั้นเสถียรได้

ระบบดังกล่าวประกอบด้วยแกนท่อนล่างซึ่งยึดติดกับตัวมอเตอร์ และก้านลูกตุ้ม ซึ่งก้านลูกตุ้มสามารถเคลื่อนที่ในแกนหมุนได้ในแกนเดียว สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของก้านลูกตุ้มทำได้โดยการควบคุมการหมุนของแกนท่อนล่าง

สำหรับเป้าหมายของการควบคุมระบบ ก็ต้องการควบคุมก้านลูกตุ้มให้หยุดนิ่งตั้งตรงอยู่ในแนวตั้งเป็นแนวเดียวกับแกนท่อนล่าง



รูป 1-1 แสดงโครงสร้างของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการ

- 1) ศึกษาทฤษฎีของการควบคุมเสถียรภาพ ภายใต้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ
- 2) นำความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และทฤษฎีคอนโทรลพื้นฐานมาใช้ในการศึกษา และประยุกต์ใช้งาน

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

การศึกษาและจัดทำโครงการเริ่มต้นตั้งแต่ การศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยใช้สมการของลากรานจ์ (Lagrange's Equation) หลังจากนั้นทำการประมาณค่าระบบซึ่งไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นระบบเชิงเส้น โดยการสร้างเงื่อนไขในการประมาณค่าระบบ และการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's Series) เพื่อลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ระบบ จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ (Feedback Gain) โดยวิธีการกำหนดโพล (Pole Assignment Method) จากนั้นทำการออกแบบระบบพร้อมทั้งประกอบขึ้นเป็นระบบจริง และทำการทดลองในส่วนต่าง ๆ ของระบบ หาผลสรุปและวิเคราะห์ผล โดยเป้าหมายของการศึกษาคั้งนี้คือ สามารถควบคุมก้านลูกตุ้มให้ตั้งตรงได้ โดยให้สถานะสุดท้ายของก้านลูกตุ้มหยุดนิ่ง และแขนท่อนล่างเคลื่อนที่น้อยที่สุด

1.4 เนื้อหาที่จะกล่าวในปริญญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ในบทที่ 2 จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ พร้อมทั้งทฤษฎีในการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตทโดยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล ในบทที่ 3 จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบระบบจริง และส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบ ทั้งในแนวความคิดและเหตุผล ในบทที่ 4 เป็นส่วนผลที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ และผลการจำลองการควบคุมระบบ ส่วนในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายจะสรุปผล และวิจารณ์ผลการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางในการแก้ไขในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

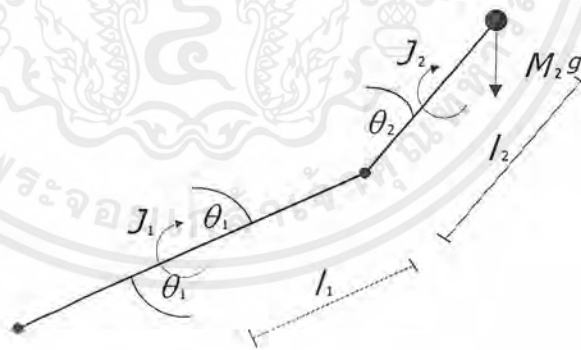
บทที่ 2

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมโดยทั่วไปจำเป็นต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของระบบ เพื่อให้สามารถออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ทฤษฎีการควบคุม การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใด ๆ ทำได้โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ต้องการควบคุม และตัวแปรที่ควบคุมได้โดยตรง

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมระบบใด ๆ ก็ได้หลายวิธี แต่ไม่มีวิธีใดที่ดีที่สุดเสมอสำหรับทุกระบบ การเลือกใช้ตัวควบคุมแบบใดขึ้นอยู่กับตัวระบบ ซึ่งไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีในการออกแบบตัวควบคุมแบบสแตทป้อนกลับ โดยใช้วิธีกำหนดตำแหน่งโพลสำหรับระบบควบคุมตามเวลาจริง

2-1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัม



รูป 2-1 แสดงแรงที่กระทำต่อระบบ

การหารูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของระบบสามารถใช้การประยุกต์สมการการเคลื่อนที่ของลากรางจ์ได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลากรางจ์กำหนดให้สมการของลากรางจ์ เป็น

$$L = T - V \quad (2-1)$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์ (Kinetic energy)

V คือ พลังงานศักย์ (Potential energy)

จากรูป 2-1 กำหนดให้

M_i มวลของลูกตุ้มที่ i (Kg)

J_i โมเมนต์ความเฉื่อยรอบจุดศูนย์กลางที่ i

θ_i มุมของแขนที่ i (rad)

C_i ความเสียดทานความหนืดที่ข้อต่อ i

τ ทอร์ก ที่ให้แก่วัดข้อต่อ (N.m)

g ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

D_i พลังงานจาก วิกอสฟริกชัน (Viscosity Friction) ที่ข้อต่อ i

เราจะได้ว่า

ที่ข้อต่อที่ 1

$$T_1 = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2-2)$$

$$U_1 = 0 \quad (2-3)$$

$$D_1 = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2-4)$$

ที่ข้อต่อที่ 2

$$T_2 = \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 \left[\left(\frac{d}{dt} (L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2) \right)^2 + \left(\frac{d}{dt} (L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2) \right)^2 \right]$$

(2-5)

$$U_2 = M_2 g [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2] \quad (2-6)$$

$$D_2 = \frac{1}{2} C_2 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 \quad (2-7)$$

ดังนั้นผลรวมของพลังงานจลน์, พลังงานศักย์ และพลังงานจากวิกอสฟริกชัน ได้เป็น

$$T = T_1 + T_2 \quad (2-8)$$

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 [(L_1 \dot{\theta}_1)^2 + (L_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2 L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)]$$

(2-9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U = U_1 + U_2 \quad (2-10)$$

$$U = M_2 g [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2] \quad (2-11)$$

$$D = D_1 + D_2 \quad (2-12)$$

$$D = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} C_2 (\dot{\theta}_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \quad (2-13)$$

แทนค่าต่าง ๆ นี้ลงในสมการของลากรางจ์ เพื่อแสดงสมการของการเคลื่อนที่
สมการซึ่งขึ้นกับทิศทาง θ_1

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_1} + \frac{\partial U}{\partial \theta_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} = \tau \quad (2-14)$$

สมการซึ่งขึ้นกับทิศทาง θ_2

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} + \frac{\partial U}{\partial \theta_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_2} = 0 \quad (2-15)$$

เมื่อแทนค่า T, U และ D ลงไปในสมการจะได้

สมการการซึ่งขึ้นกับทิศทาง θ_1

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [J_1 \dot{\theta}_1 + M_2 L_1 \dot{\theta}_1 + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] - [-2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)] \\ + [-M_2 g L_1 \sin \theta_1] + [C_1 \dot{\theta}_1 - C_2 \dot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_1] = \tau \end{aligned} \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + M_2 L_1 \ddot{\theta}_1 + 2L_1 L_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - M_2 g L_1 \sin \theta_1 + C_1 \dot{\theta}_1 - C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_1 = \tau \end{aligned}$$

(2-17)

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + M_2 L_1 \ddot{\theta}_1 + 2L_1 L_2 \ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - M_2 g L_1 \sin \theta_1 \\ + C_1 \dot{\theta}_1 - C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_1 = \tau \end{aligned} \quad (2-18)$$

สมการการซึ่งขึ้นกับทิศทาง θ_2

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [J_2 \dot{\theta}_2 + M_2 L_2 \dot{\theta}_2 + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2)] - [2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)] \\ + [-M_2 g L_2 \sin \theta_2] + [C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_1] = 0 \end{aligned} \quad (2-19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + M_2 L_2 \ddot{\theta}_2 + 2L_1 L_2 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - 2L_1 L_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) - M_2 g L_2 \sin \theta_2 + C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_1 = 0 \quad (2-20)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปของ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (2-21)$$

จะได้เมตริกดังนี้

$$M(q) = \begin{bmatrix} J_1 + M_2 L_1 & 2L_1 L_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ 2L_1 L_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) & J_2 + M_2 L_2 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 2L_1 L_2 \dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + C_1 \dot{\theta}_1 + C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_2 \\ -2L_1 L_2 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1 - \theta_2) + C_2 \dot{\theta}_2 - C_2 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -M_2 g L_1 \sin \theta_1 \\ -M_2 g L_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (2-24)$$

จากสมการของระบบไม่เชิงเส้น จะได้

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)), \quad \forall t \geq 0 \quad (2-25)$$

ถ้าจุดสมมูลย์ (x_e) ที่เราต้องการ

$$x_e = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

จะได้

$$f(t, x_e, u(t)) = 0 \quad (2-27)$$

ตรงตามเงื่อนไขเสถียรภาพ

ทำการประมาณค่าสเตตโดยการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์

จาก อนุกรมเทย์เลอร์ $f(x)$ เป็น อนุกรมอนันต์ ใด ๆ

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left. \frac{d^n f(x)}{dx^n} \right|_{x=x_0} (x-x_0)^n \quad (2-28)$$

โดย x_0 คือ จุดสมมูลย์ (ในระบบนี้ที่มี จุดสมมูลย์ $x_e = 0$)

กรณีที่ $f(x)$ เป็นฟังก์ชันหลายตัวแปรจะได้

$$f(x_1, \dots, x_n) = f(x_{10}, \dots, x_{n0}) + \left[(x_1 - x_{10}) \frac{\partial}{\partial x_1} + \dots + (x_n - x_{n0}) \frac{\partial}{\partial x_n} \right] f(x_1, \dots, x_n) \Big|_{x_i=x_{i0}} \\ + \frac{1}{2!} \left[(x_1 - x_{10}) \frac{\partial}{\partial x_1} + \dots + (x_n - x_{n0}) \frac{\partial}{\partial x_n} \right]^2 f(x_1, \dots, x_n) \Big|_{x_i=x_{i0}} + \dots \quad (2-29)$$

ในที่นี้เราจะประมาณค่าสเทตเพียงแค่ อันดับ 1 โดย อันดับ มากกว่านี้เราจะให้เป็น high order และประมาณค่าให้เป็นศูนย์ไป

จะได้

$$M(q) = M(\theta) = M_0 + M_1 \theta_1 + M_2 \theta_2 \quad (2-30)$$

$$C(q, \dot{q}) = C(\theta, \dot{\theta}) = C_0 + C_1 \theta_1 + C_2 \theta_2 + C_3 \dot{\theta}_1 + C_4 \dot{\theta}_1 \quad (2-31)$$

$$G(q) = G(\theta) = G_0 + G_1 \theta_1 + G_2 \theta_2 \quad (2-32)$$

จะได้สเทตออกมาดังนี้

$$M_0 = \begin{bmatrix} J_1 + M_2 L_1 & 2L_1 L_2 \\ 2L_1 L_2 & J_2 + M_2 L_2 \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

$$M_1 = M_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

$$C_0 = C_1 = C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 \\ -C_2 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_4 = \begin{bmatrix} -C_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

$$G_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} -M_2gL_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_2gL_2 \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

เมื่อนำมาเขียนในรูปของสมการ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (2-41)$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} J_1 + M_2L_1 & 2L_1L_2 \\ 2L_1L_2 & J_2 + M_2L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (C_1 + C_2)\dot{\theta}_1 - C_2\dot{\theta}_2 \\ -C_2\dot{\theta}_1 + C_2\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_2gL_1\theta_1 \\ -M_2gL_2\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

หรือจัดสมการใหม่ในรูปของ

$$\overline{M}\ddot{q} + \overline{C}\dot{q} + \overline{G}q = \tau \quad (2-43)$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} J_1 + M_2L_1 & 2L_1L_2 \\ 2L_1L_2 & J_2 + M_2L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M_2gL_1 & 0 \\ 0 & -M_2gL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

ให้

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} J_1 + M_2L_1 & 2L_1L_2 \\ 2L_1L_2 & J_2 + M_2L_2 \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} -M_2gL_1 & 0 \\ 0 & -M_2gL_2 \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

$$\bar{\tau} = \begin{bmatrix} \tau \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-48)$$

จัดสมการใหม่ได้เป็น

$$\bar{M}\dot{q} + \bar{C}q + \bar{G}q = \bar{\tau} \quad (2-49)$$

ดังนั้นเราจะได้

$$\dot{q} = \bar{M}^{-1}[\bar{\tau} - \bar{C}q - \bar{G}q] \quad (2-50)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} q_1 + \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} q_2 + \begin{bmatrix} a_3 \\ b_3 \end{bmatrix} \dot{q}_1 + \begin{bmatrix} a_4 \\ b_4 \end{bmatrix} \dot{q}_2 + \begin{bmatrix} a_5 \\ b_5 \end{bmatrix} \quad (2-51)$$

เราสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการสเตท

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2-52)$$

$$y = Cx \quad (2-53)$$

เมื่อให้

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

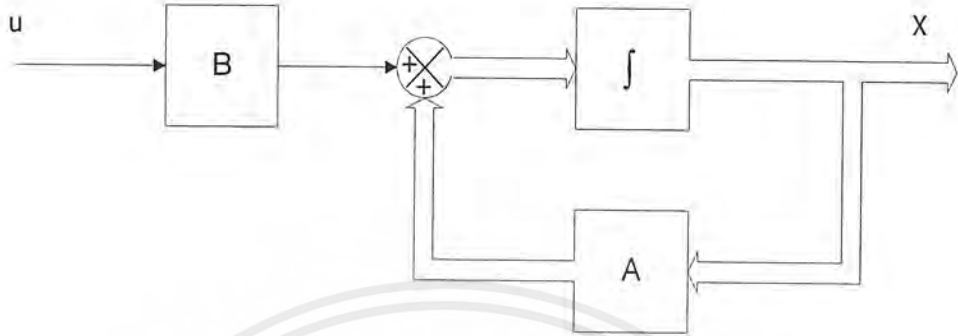
ได้ดังนี้

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_5 \\ b_5 \end{bmatrix} u \quad (2-55)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (2-56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2-2 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตต



รูป 2-2 แสดงระบบควบคุมลูปวงเปิด

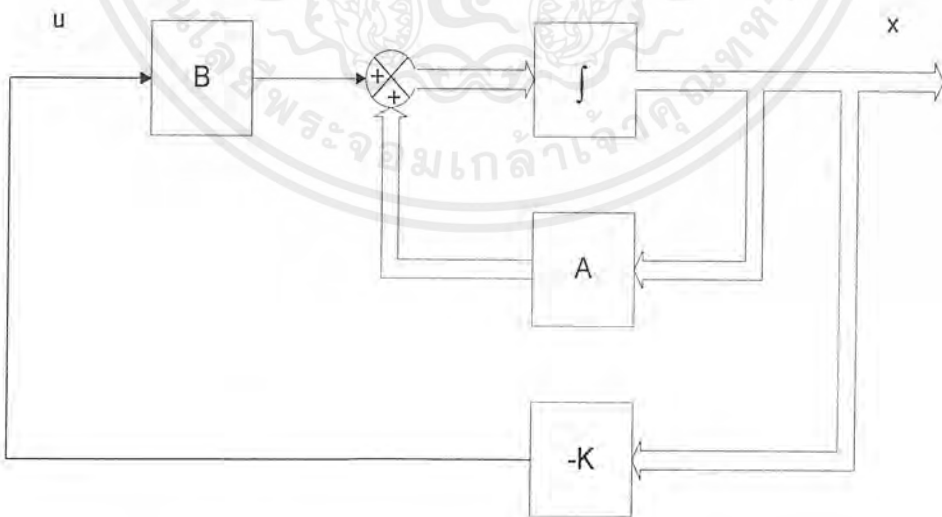
พิจารณารูป 2-2 สอดคล้องกับสมการ

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2-57)$$

กำหนดรูปแบบสัญญาณควบคุม $u(t)$ โดยสมการ

$$u(t) = -Kx(t) \quad (2-58)$$

เมื่อ K เป็นเมตริกซ์เกนป้อนกลับสเตต (State Feedback Gain Matrix) จากการกำหนดสมการ (2-58) ได้ดังรูป



รูป 2-3 แสดงระบบควบคุมแบบลูปวงปิด เมื่อ $u(t) = -Kx(t)$

จากรูป 2-3 ได้สมการสเตตดังนี้

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (2-59)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2-59) เราสามารถหาผลเฉลยของสมการได้เป็น

$$x(t) = e^{(A-BK)t} x(0) \quad (2-60)$$

เลือกเมตริกซ์ K ที่ให้ค่าเจาะจง (Eigen value) ของ $(A - BK)$ เป็นโพลของระบบควบคุมวงปิด (Close-loop Pole) $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ ที่ต้องการ โดยเงื่อนไขที่จำเป็นและเพียงพอสำหรับกำหนดตำแหน่งโพลใด ๆ ได้ตามต้องการ คือ ระบบสมการสเตท (2-57) จะต้องควบคุมได้โดยสมบูรณ์
ได้ว่า

$$\text{rank} \begin{bmatrix} B & AB & A^2 B & \dots & A^{n-1} B \end{bmatrix} = n \quad (2-61)$$

ต่อไปจะพิสูจน์เงื่อนไขพอเพียง คือ พิสูจน์ว่าหากระบบควบคุมสเตทได้โดยสมบูรณ์แล้ว จะสามารถหาเมตริกซ์ K ที่ทำให้ค่าเจาะจงของ $(A - BK)$ ตามต้องการ คือ $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$

สมการคุณลักษณะของระบบเปิด (2-57) คือ

$$|sI - A| = s^n + a_n s^{n-1} + a_{n-1} s^{n-2} + \dots + a_1 = 0 \quad (2-62)$$

กำหนดเมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix)

$$T = MW \quad (2-63)$$

เมื่อ

$$M = \begin{bmatrix} B & AB & A^2 B & \dots & A^{n-1} B \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2-64)$$

และ

$$W = \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & \dots & \dots & a_n & 1 \\ a_3 & a_4 & \dots & \dots & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-65)$$

จากระบบเดิม

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

$$y = Cx$$

แปลงให้อยู่ในรูปควบคุมได้ (Controllable Canonical Form) โดยกำหนดเงื่อนไขสำหรับการแปลง

$$x = T\bar{x} \quad (2-66)$$

แทนสมการ (2-66) ลงในสมการ (2-52) และ (2-53) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{\tilde{x}} = T^{-1}AT\tilde{x} + T^{-1}Bu \quad (2-67)$$

$$y = CT\tilde{x} \quad (2-68)$$

จากสมการ (2-67) และ (2-68) ได้ว่า

$$\tilde{A} = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & \dots & \dots & -a_{n-1} & -a_n \end{bmatrix} \quad (2-69)$$

$$T^{-1}B = \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-70)$$

และ

$$CT = \tilde{C} = [\tilde{c}_1 \quad \tilde{c}_2 \quad \dots \quad \tilde{c}_n] \quad (2-71)$$

กำหนดให้

$$\tilde{K} = KT = [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n] \quad (2-72)$$

ดังนั้น

$$\tilde{B}\tilde{K} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \delta_1 & \delta_2 & \dots & \dots & \delta_n \end{bmatrix} \quad (2-73)$$

จากสมการคุณลักษณะ (Characteristic Equation) ของทั้งสองระบบ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
|sI - A + BK| &= |sI - \tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K}| \\
&= \left| sI - \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 & \cdot & \cdot & -a_{n-1} & -a_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \delta_1 & \delta_2 & \cdot & \cdot & \cdot & \delta_n \end{bmatrix} \right| \\
&= s^n + (a_n + \delta_n)s^{n-1} + \dots + (a_1 + \delta_1) \tag{2-74}
\end{aligned}$$

สมการคุณลักษณะซึ่งเป็นไปตามโพลของระบบควบคุมวงปิดที่ถูกกำหนดใหม่ คือ

$$\begin{aligned}
|sI - A + BK| &= (s - \mu_1)(s - \mu_2)\dots(s - \mu_n) \\
&= s^n + \alpha_n s^{n-1} + \dots + \alpha_1 \tag{2-75}
\end{aligned}$$

จากสมการ (2-74) และ (2-75) เทียบสัมประสิทธิ์ของตัวแปร s ได้

$$\begin{aligned}
\alpha_1 &= a_1 + \delta_1 \\
&\vdots \\
&\vdots \\
\alpha_n &= a_n + \delta_n \tag{2-76}
\end{aligned}$$

ดังนั้น จากสมการ (2-76) จะได้

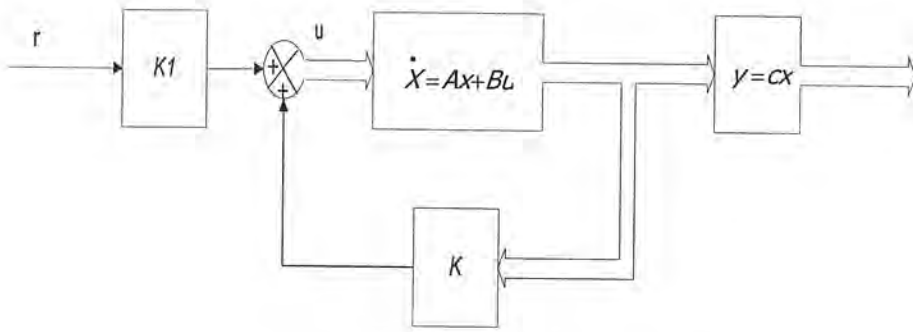
$$\begin{aligned}
K &= \tilde{K}T^{-1} \\
&= [\delta_1 \quad \delta_2 \quad \cdot \quad \cdot \quad \delta_n]T^{-1} \\
&= [\alpha_1 - a_1 \quad \dots \quad \alpha_n - a_n]T^{-1} \tag{2-77}
\end{aligned}$$

2-3 ระบบควบคุมสเตตแบบมีอินพุตอ้างอิง

จากสมการสเตต

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

$$y(t) = Cx(t)$$



รูป 2-4 แสดงระบบควบคุมแบบมีอินพุทอ้างอิง

จากรูป 2-4 สัญญาณควบคุม $u(t)$ กำหนดโดย

$$u(t) = k_1 r(t) - Kx(t) \quad (2-78)$$

จากสมการ (2-78) และ (2-52) ได้

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Bk_1 r(t) \quad (2-79)$$

กำหนดให้ $r(t)$ เป็นอินพุทอ้างอิงมีค่าคงที่ (Step Function)

จากสมการ (2-79) เมื่อเวลา $t \rightarrow \infty$

$$\dot{x}(\infty) = (A - BK)x(\infty) + Bk_1 r(\infty) \quad (2-80)$$

เนื่องจาก $r(t)$ เป็นค่าคงที่ นำสมการ (2-79) ลบสมการ (2-80) จะได้

$$\dot{x}(t) - \dot{x}(\infty) = (A - BK)(x(t) - x(\infty)) \quad (2-81)$$

กำหนดให้

$$e(t) = x(t) - x(\infty) \quad (2-82)$$

จะได้

$$\dot{e}(t) = (a - BK)e(t) \quad (2-83)$$

ผลเฉลยของสมการจะได้

$$e(t) = e^{(A-BK)t} e(0) \quad (2-84)$$

พิจารณาสมการคุณลักษณะของระบบดังกล่าว

$$|sI - A + BK| = 0 \quad (2-85)$$

จากสมการ (2-85) พิจารณาได้ว่าสมการคุณลักษณะของระบบที่มีการป้อนกลับแบบมีอินพุทอ้างอิง

และไม่มีอินพุทอ้างอิงนั้นเหมือนกัน และพิจารณาจากสมการ (2-84) แสดงให้เห็นได้ว่า การมีอินพุท

อ้างอิงนั้นทำให้เราสามารถกำจัดข้อผิดพลาด (Steady State Error) ทำให้เอาท์พุทของระบบเข้าสู่ค่าที่

กำหนดไว้ (Setpoint) ได้อย่างถูกต้อง โดยไม่มีผลต่อเสถียรภาพ

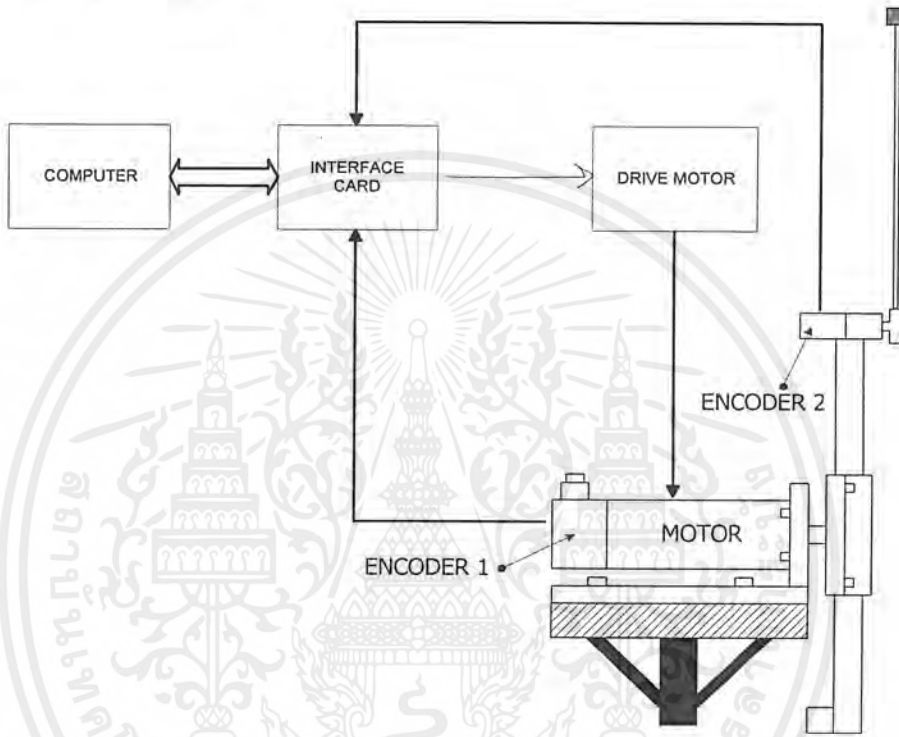
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ส่วนประกอบของระบบ

3.1 แผนผังรวมของระบบ



รูป 3.1 แผนผังรวมของระบบ

ระบบควบคุมประกอบด้วย แกนลูกค้อนยึดติดกับแขนท่อนล่างซึ่งยึดติดกับมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมการหมุนของแขนท่อนล่าง โดยควบคุมผ่านวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ และมีเอนโคเดอร์ 2 ตัว คอยตรวจวัดทิศทางและการหมุนของมอเตอร์และแกนลูกค้อน และมีคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ในการควบคุมระบบ โดยติดต่อระบบผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟส

3.2 คอมพิวเตอร์ และการควบคุม

การเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมระบบมีวิธีที่ใช้กันอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ ลักษณะแรก เอาสมการสเตตต่อเนื่องมาเขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมระบบ โดยใช้ระบบแบบตามเวลาจริง (Real-Time Control) แต่ทั้งนี้เราจะต้องเขียนโปรแกรมสำหรับการควบคุมให้รัดกุม ทำงานอย่างเอกสารถือเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วกว่า และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้จะต้องมีความเร็วสูงพอ โดยเครื่องที่ใช้ต้องเร็วพอจนทำให้คาบการสุ่มค่ามาคำนวณ ณ เวลาต่าง ๆ มีค่าน้อยมากจนสามารถใช้สมการสเตตต่อเนื่องมาใช้ในการคำนวณได้ ส่วนการควบคุมอีกลักษณะหนึ่งเราจะทำการแปลงสมการสเตตต่อเนื่องให้เป็นสมการสเตตดิสครีตก่อนแล้วจึงนำมาเขียนเป็นโปรแกรม เพื่อใช้ในการควบคุมการหมุนมอเตอร์ต่อไป

เพื่อความสะดวกกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการควบคุม เราจะเลือกวิธีการควบคุมตามเวลาจริง โดยคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นรุ่น Pentium ความเร็ว 166 MHz คาบเวลาที่ใช้ในการสุ่มข้อมูลเท่ากับ 0.005 วินาที ซึ่งพอเพียงที่จะประมาณให้เป็นการควบคุมแบบตามเวลาจริงได้ โดยเมื่อได้สมการสเตตที่จะนำมาใช้ได้มาจากกาคำนวณหาแบบทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 2 และการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบเพื่อนำมาแทนค่าในสมการสเตตที่หามาได้ จากนั้นนำมาหาค่าเกนป้อนกลับ แล้วนำไปเขียนโปรแกรมด้วยภาษาซีเพื่อหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการควบคุม ณ เวลาต่าง ๆ

การรับส่งสัญญาณอินพุต และเอาต์พุตนั้นรับส่งผ่านการ์ดอินเตอร์เฟสซึ่งต่อกับอุปกรณ์อินพุต เอาต์พุตต่าง ๆ สัญญาณอินพุต ได้แก่ สัญญาณที่มาจากเอนโคเดอร์ทั้ง 2 ตัว และสัญญาณเอาต์พุต ได้แก่ ค่าแรงดันซึ่งส่งไปเพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ สำหรับการสุ่มสัญญาณนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ 89C51 เป็นตัวสร้างสัญญาณคาบ 0.005 วินาที เพื่อใช้ในการสุ่มค่าสัญญาณและนำสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อสร้างจังหวะให้เกิดคาบการสุ่มสัญญาณต่อไป

3.3 การ์ดอินเตอร์เฟส

การ์ดอินเตอร์เฟสเป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลอินพุต เอาต์พุต เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมต่อไป การ์ดอินเตอร์เฟส ประกอบด้วยส่วนประกอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.3.1 วงจรถอดรหัสพอร์ต

ตำแหน่งของพอร์ตบนการ์ดอินเตอร์เฟสจะใช้ IC 74HC688, 74HC138, 74HC32 และ ดิฟสวิทช์ เป็นตัวกำหนดรหัสพอร์ตตามความต้องการของผู้ใช้ เราสามารถที่จะกำหนดเบอร์พอร์ตโดยการกำหนดระดับลอจิกให้กับตำแหน่งใด ๆ โดยใช้ สวิตช์ ซึ่งหาก เปิดสวิตช์ ระดับลอจิกจะเป็นหนึ่ง และ ปิดสวิตช์ ระดับลอจิกจะเป็น ศูนย์

ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการกำหนดตำแหน่งพอร์ตให้เป็น 300 H เราสามารถที่จะทำได้ดังนี้
คือ

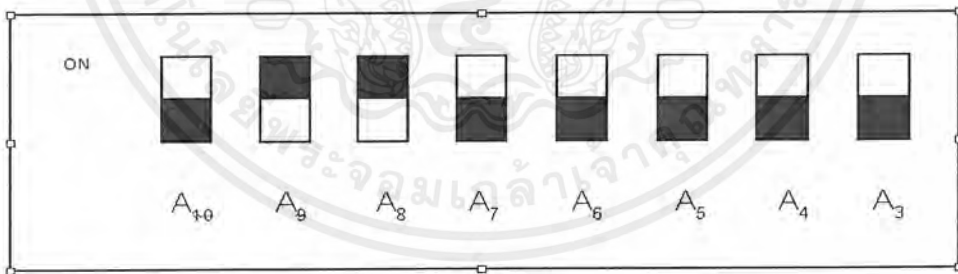
- 1) กำหนดระดับลอจิกให้กับ แอดเดรส ต่าง ๆ ให้เท่ากับ 300 คือ

A11	A10	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0
X	0	1	1	0	0	0	0	0	x	x	x
3			0				0				

ตาราง 3-1 แสดงตัวอย่างการกำหนดระดับลอจิกให้กับแอดเดรส

จะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งพอร์ต 300H เราต้องให้ลอจิก 1 กับแอดเดรส A8,A9 และต้องให้ลอจิก 0 กับแอดเดรส A3, A4, A5, A6, A7 และ A10 (ซึ่ง A3 – A10 ถูกต่อไว้กับ ดิพสวิทช์) ส่วน A0 – A2 นั้นถูกถอดรหัสด้วย IC 74HC138

- 2) เช็ท สวิตช์ เพื่อกำหนดลอจิกให้ตำแหน่งแอดเดรสตามข้อ 1



รูป 3-2 แสดงการตั้งค่าของสวิตช์ให้ตรงตามแอดเดรสที่ตั้งไว้

3.3.2 พอร์ตขนาน

ในการ์ดอินเตอร์เฟสมีส่วนที่เป็นทั้งอินพุทพอร์ต และเอาต์พุทพอร์ต โดยที่อินพุทพอร์ตจะใช้ IC 74HC254 ในการรับข้อมูลจากเอนโคเดอร์ทั้ง 2 ตัว โดยตัวแรกจะให้ข้อมูลเข้ามาใน 13 บิต เนื่องจากว่าเอนโคเดอร์ทัวนี้มีควมละเอียด 2000 พัลซ์ต่อรอบ เมื่อนำไปผ่านไมโครคอนโทรเลอร์ซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงสถานะทั้งหมดอยู่ 4 สถานะ ทำให้วัดค่าได้ถึง 8000 พัลซ์ต่อรอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตัวที่สองมีความละเอียด 1000 พัลส์ต่อรอบ เมื่อผ่านไมโครคอนโทรเลอร์ ทำให้วัดค่าได้ 4000 พัลส์ต่อรอบ จึงให้ข้อมูลเข้ามา 12 บิต รวมข้อมูลที่เข้ามาทั้งหมดเป็น 25 บิต ดังนั้นจึงต้องใช้ IC 74HC245 ทั้งหมด 4 ตัว ในส่วนที่เป็นอินพุทพอร์ต และเอาท์พุทพอร์ตจะใช้ IC74HC374 ทั้งหมด 3 ตัว ประกอบด้วยชุดแรกจะใช้ 8 บิต ที่ใช้ในการส่งข้อมูลเพื่อกำหนดค่าทอร์คของมอเตอร์ 7 บิต และกำหนดทิศทางอีก 1 บิต ชุดที่สองใช้ 8 บิต ในการกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาที่จะใช้กับสัญญาณการสุ่มค่าข้อมูล และชุดที่ 3 ใช้ 4 บิต ในการเลือก (Enable) หรือ ไม่เลือก (Disable) ไมโครคอนโทรเลอร์

3.3.3 ไมโครคอนโทรเลอร์

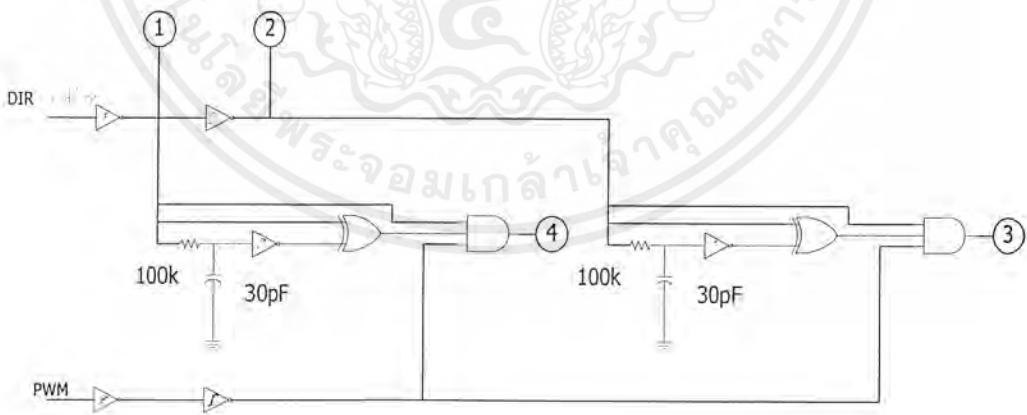
ในส่วนของไมโครคอนโทรเลอร์ จะเป็นส่วนที่ใช้ในการประมวลสัญญาณอินพุทที่เข้ามา และเอาท์พุทที่จะออกไปควบคุมระบบ โดยจะใช้ไมโครคอนโทรเลอร์ 89C51 จำนวน 2 ตัว ในการรับสัญญาณเฟส A และเฟส B ที่เข้ามาจากเอนโคเดอร์ทั้ง 2 ตัว เพื่อทำการประมวลผลทิศทางการหมุนจากสัญญาณที่รับเข้ามาว่ามีการหมุนไปในทิศทางใด และหมุนไปเป็นมุมเท่าไร ส่วนไมโครคอนโทรเลอร์ 89C51 อีก 2 ตัว จะใช้ทำหน้าที่ในส่วนเอาท์พุท คือ รับสัญญาณมาจากสายส่งข้อมูลนำไปประมวลผลแล้วส่งค่าออกไป โดยตัวหนึ่งทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณ PWM ออกไปในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ และอีกหนึ่งตัวทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาเพื่อเป็นฐานเวลาในการทำงานของคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการสุ่มค่าสัญญาณข้อมูล

3.4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์

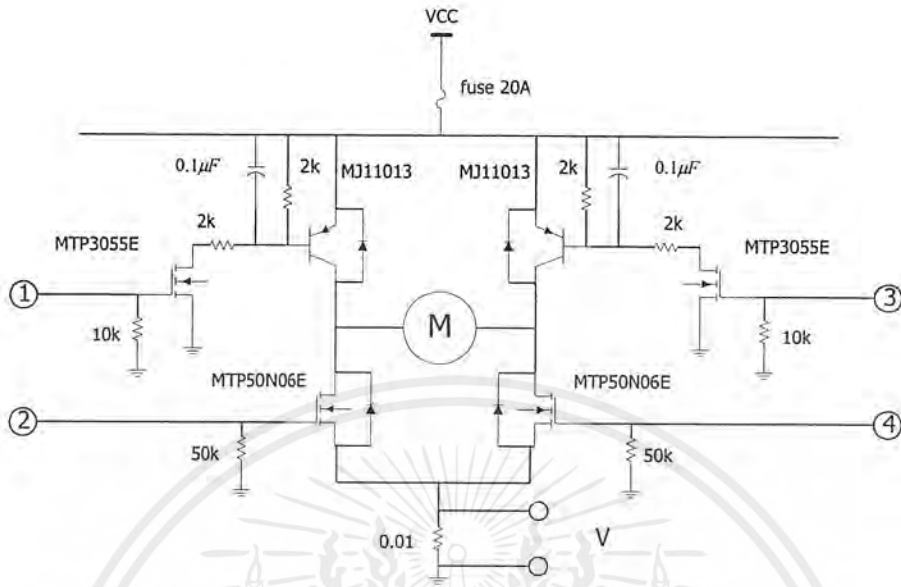
3.4.1 วงจรควบคุมแรงดันมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรง มีขนาด 500W, 85V, 7.6A, 2500 rpm โดยเป็นมอเตอร์ที่ไม่มีเกียร์บล็อก เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้น เพราะมอเตอร์จะต้องหมุนกลับไปกลับมา และเนื่องจากเราต้องควบคุมมอเตอร์ให้หมุนกลับไปกลับมาอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เราจึงใช้อุปกรณ์พวก มอสเฟต ซึ่งสามารถทำงานในลักษณะนี้ได้ดี โดยระบบจะใช้แรงดันไฟตรง 50V ระบบจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนทิศทางการหมุนอย่างรวดเร็วตลอดเวลา โดยเราจะใช้แหล่งจ่ายไฟบวกกับกราวด์ (จะไม่ใช้ไฟลบ) จึงใช้การต่อวงจรในลักษณะ H-Bridge

การทำงานของวงจร คือ วงจรจะมีขาสัญญาณอินพุตอยู่ 2 ขา คือ ขากำหนดทิศทาง (Direction) และ ขากำหนดความเร็ว (PWM) ภายในวงจรประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนที่รับสัญญาณ จากขากำหนดทิศทาง และ ขากำหนดความเร็ว มาจากการดีคิโอดิเตอร์เฟส ซึ่งส่วนนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่เข้ามาทั้งสองให้เป็นสัญญาณที่จะไปขับ มอสเฟต ทั้ง 4 ตัว เพื่อกำหนดทิศทางของกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ และแรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมมอเตอร์ และยังมีส่วนที่ทำหน้าที่หน่วงเวลาสัญญาณเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ส่วนที่สองเป็นวงจรส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง และความเร็วตามที่ต้องการ



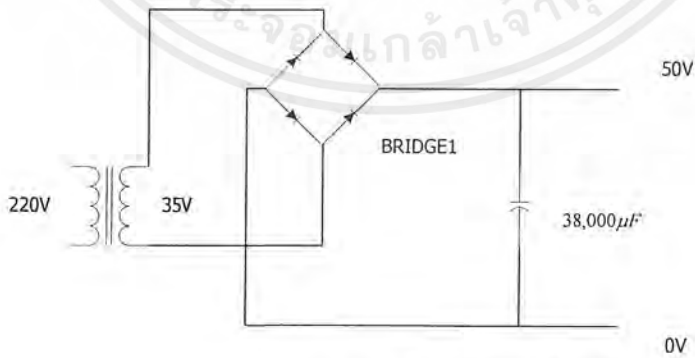
รูป 3-4 แสดงวงจรควบคุมแรงดันมอเตอร์กระแสตรงส่วนที่หนึ่ง



รูป 3-5 แสดงวงจรควบคุมแรงดันมอเตอร์กระแสตรงส่วนที่สอง

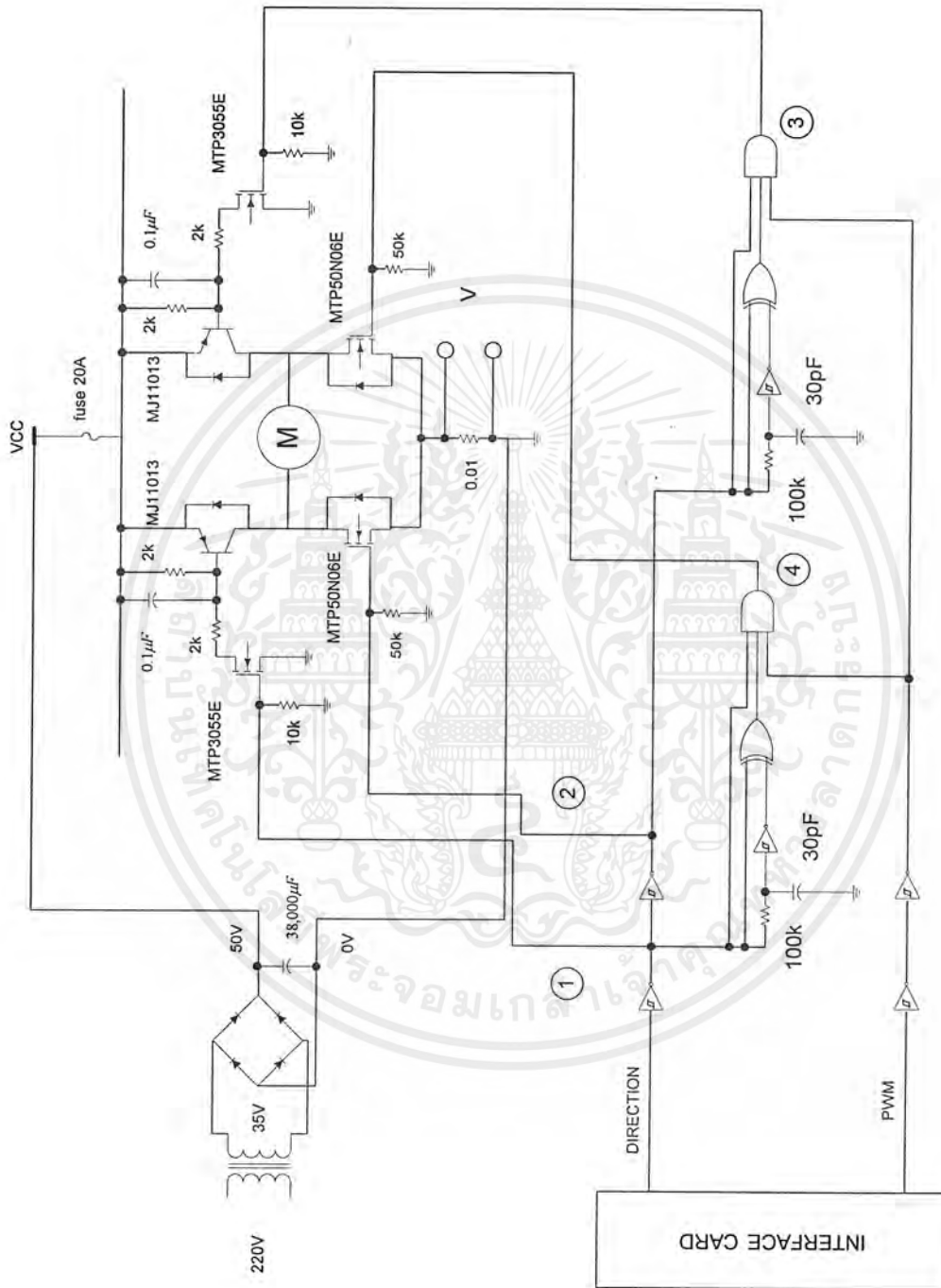
3.4.2 วงจรกำเนิดแรงดัน 50 โวลต์

สำหรับมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้สามารถรับแรงดันสูงสุดได้ที่ 85 โวลต์ แต่สำหรับการทำงานในที่นี้เราเลือกที่จะจ่ายแรงดันให้มอเตอร์เป็นขนาด 50 โวลต์ โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงไฟกระแสสลับที่ใช้ตามบ้าน 220 โวลต์ 50 Hz ให้เป็นแรงดันตรง 50 โวลต์



รูป 3-6 แสดงวงจรกำเนิดแรงดัน 50 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



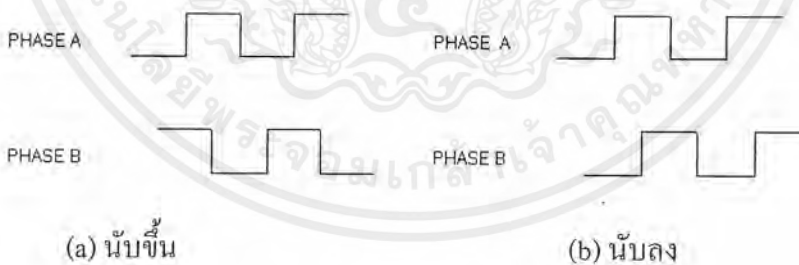
รูป 3-7 แสดงภาพโดยรวมของวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรง และวงจรกำเนิดแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เอนโคเดอร์

เอนโคเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่แปรผันตรงกับการหมุนของเฟลา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการรับรู้ความเร็วของเฟลาในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ หรือ การรับรู้ตำแหน่งโดยการนับจำนวนพัลส์ได้ เอนโคเดอร์ที่ใช้ตัวแรกมีความละเอียด 2000 พัลส์/รอบ ตัวที่สองมีความละเอียด 1000 พัลส์/รอบ เพราะฉะนั้นการเปลี่ยนแปลง 1 พัลส์ จะเท่ากับ $360/2000 = 0.18$ องศา สำหรับ เอนโคเดอร์ ตัวแรก และ $360/1000 = 0.36$ องศา สำหรับเอนโคเดอร์ตัวที่สอง แต่เนื่องจากเราสามารถเขียนโปรแกรมให้มีการนับทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนสถานะของเฟส A และ B ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 4 สถานะ ทำให้สามารถวัดได้ละเอียดขึ้น 4 เท่าจากเดิม

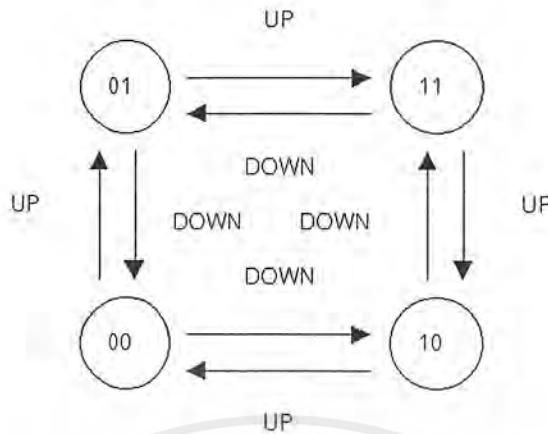
สำหรับขาสัญญาณที่ต้องต่อให้กับเอนโคเดอร์ตัวนี้ จะมี 4 ขาคือ ขาไฟเลี้ยง 5V, ขากราวด์, ขาเอาต์พุต A และ B ซึ่งขา A และ B จะมีเอาต์พุตเป็นพัลส์ที่มีขนาดต่ำ เวลาใช้งานจะต้องมีการต่อกับตัวต้านทาน และ ไฟเลี้ยง 5V เพื่อดึงสัญญาณ (pull up) ส่วนการใช้งาน จะดูการนำ และการตามของพัลส์ที่ได้จากขาทั้งสองนี้ เป็นการตรวจสอบทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ดังนั้น เราจึงนำขาทั้งสองขานี้มาต่อป้อนให้กับวงจรนับ เพื่อการควบคุมการนับขึ้น และ นับลงได้ การต่อวงจรในส่วนนี้ เราจำเป็นต้องทราบการทำงานของเอนโคเดอร์แบบเพิ่มค่า (increment) ซึ่งจะให้เอาต์พุตออกมาเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยม 2 สัญญาณ คือเฟส A และ เฟส B โดยตัวตรวจวัด ให้ค่าเฟสทั้งสองต่างกัน 90 องศา เพื่อใช้บอกทิศทางการหมุน



รูป 3-8 แสดงสัญญาณที่ได้จากเอนโคเดอร์

จากรูป 3-8 เราสามารถนำมาเขียนเป็น ไดอะแกรมสถานะ (State diagram) เพื่อวิเคราะห์ ออกมาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3-9 แสดงไดอะแกรมสถานะสัญญาณที่ได้จากเอนโคเดอร์

3.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นทรานสดิวเซอร์ (Transducer) แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณสมบัติพิเศษ คือแรงบิดของเพลา (Shaft) ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์มเจอร์ (Armature Current) แรงบิดของเพลาของมอเตอร์เป็นผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลา และกระแสเท่ากับ

$$\tau = K \phi I \quad (3-1)$$

เมื่อ

- τ คือ แรงบิดของเพลา ($N.m$)
- ϕ คือ เส้นแรงสนามแม่เหล็ก (wb)
- I คือ กระแส (A)
- K คือ ค่าคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดโวลต์เตตตกคร่อมตัวมันเอง และโวลต์เตตนี้จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลาของมอเตอร์ และต้านการไหลของกระแส ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตตย้อนกลับนี้ และความเร็วของเพลาของมอเตอร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = K \phi \omega \quad (3-2)$$

เมื่อ

E คือ โวลต์เตตยอนกลับ emf (V)

ω คือ ความเร็วของมอเตอร์ (rad/s)

สมการ (3-1) และ (3-2) แสดงถึงหลักการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สาเหตุที่เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพราะควบคุมง่าย วงจรควบคุมไม่ซับซ้อน ข้อเสียของมอเตอร์กระแสตรง คือต้องการการบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ประเภทอื่น ๆ เพราะมอเตอร์กระแสตรงมีแปรงถ่านเป็นส่วนประกอบ ซึ่งมีการสึกหรอได้

3.7 โครงสร้างทางกลศาสตร์

ระบบควบคุมอินเวอร์เพนดูลัมที่เลือกทำในโครงงานนี้ เป็นอินเวอร์เพนดูลัมแบบหมุน สาเหตุที่เลือกเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ใช้พื้นที่ในการทำงานน้อย ระบบดังกล่าวในระหว่างทำงาน ต้องมีการเคลื่อนที่แบบหมุนอย่างรวดเร็ว ต้องสามารถทนแรงบิดจากมอเตอร์ได้ และต้องมีความเที่ยงตรงสูง วัสดุที่เลือกใช้ในส่วนที่ต้องรับแรงบิดจากมอเตอร์จึงใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้า และใช้เครื่องกัด (Milling Machine) ในการสร้างชิ้นงาน ส่วนวัสดุชิ้นอื่นจะใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ไม่โค้งงอ และไม่หักง่าย

3.7.1 โครงสร้างจับยึด และฐาน

โครงสร้างจับยึด และฐาน ต้องจับยึดมอเตอร์ และ โครงสร้างของระบบเข้าด้วยกันอย่างมั่นคง ไม่ให้คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเดิม โดยเฉพาะเมื่อมีแรงบิดจากตัวมอเตอร์ ตัวฐานต้องมีความมั่นคง แข็งแรง และมีน้ำหนักมากพอที่จะทำให้โครงสร้างทรงตัวอยู่ได้ในขณะที่ระบบทำงานอยู่ โดยโครงสร้างจับยึดที่ใช้ทำมาจากเหล็กเชื่อมเข้ารูปทำเป็นฐานรองวางมอเตอร์ ส่วนตัวฐานมอเตอร์ทำมาจากเหล็กตันกัดเข้ารูปประกอบเป็นรูปตัวแอล และยึดติดกับมอเตอร์ด้วยน็อต 4 ตัวทางด้านหน้าของมอเตอร์ โดยเหล็กตันรูปตัวแอลจะถูกกัดเป็นช่องเพื่อให้เพลลาของมอเตอร์สามารถยื่นออกไปได้

3.7.2 คัปปลิงของมอเตอร์

ใช้ในการจับยึดเพลลาของมอเตอร์ให้ต่อเข้ากับระบบ โดยคัปปลิงในส่วนของมอเตอร์นี้ ต้องเป็นส่วนที่มีโครงสร้างแข็งแรง เพราะต้องเป็นจุดที่รับแรงบิดจากเพลลาของมอเตอร์ เราจึงเลือกใช้เหล็กตันกัดเข้ารูปมาเป็นอุปกรณ์ โดยในส่วนนี้ประกอบด้วย 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะเป็นตัวยึดเข้ากับเพลลาของมอเตอร์ และมีการยึดด้วยตัวหนอน (Setserv) เพื่อให้จับยึดมั่นคงขึ้น ส่วนชั้นที่สองจะทำหน้าที่ยึดแขนของระบบเข้ากับคัปปลิงชั้นแรกและยึดติดคัปปลิงทั้งสองชั้นเข้ากันด้วยน็อต 4 ตัว

3.7.3 แขนของระบบ

ในส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็นแขนรองรับก้านลูกตุ้ม โดยลักษณะที่ออกแบบต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา แต่แข็งแรง ไม่หัก ไม่โค้งงอ และไม่เสียรูปทรงเมื่อมีการหมุน หรือรับแรงบิดจากมอเตอร์ วัสดุที่เลือกใช้จึงเป็นแท่งอะลูมิเนียมกลาง สาเหตุที่ต้องให้ส่วนนี้มีน้ำหนักเบา เพราะเราต้องการให้ชิ้นงานมีน้ำหนักน้อยที่สุด และที่สำคัญคือ เมื่อชิ้นงานมีน้ำหนักเบาแรงบิดที่มอเตอร์จำเป็นต้องส่งมาเพื่อควบคุมระบบจะมีค่าน้อยลงด้วย แต่มีข้อเสียคือ ในสมการของระบบในบทที่ 2 เราพิสูจน์มาจากกรณีที่แขนของระบบเป็นลักษณะแท่งตันทำให้สมการที่เกิดขึ้น และค่าพารามิเตอร์บางอย่างมีการผิดพลาดได้

3.7.4 คัปปลิงและเบรริงของก้านลูกตุ้ม

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ยึดต่อแขนของระบบให้เข้ากับก้านลูกตุ้ม และยังมีหน้าที่รองรับเอนโคเดอร์ที่ติดตั้งเพื่อวัดการหมุนของก้านลูกตุ้มที่ตำแหน่งนี้ด้วย ในส่วนนี้จุดที่สำคัญอยู่ที่เพลลาที่ทำหน้าที่ยึดแขนของระบบเข้ากับก้านลูกตุ้ม และเพลลาของเอนโคเดอร์ ต้องอยู่ตรงในแนวเดียวกัน และหมุนตามกันโดยไม่มีการหน่วง หรือแรงบิดเกิดขึ้น เพราะเป็นส่วนที่สำคัญต่อการวัดค่าการหมุนของก้านลูกตุ้มกลับมา เพราะถ้าไม่เป็นตามที่กล่าวไปข้างต้น ค่าการหมุนที่อ่านเข้ามาได้จะไม่ตรงกับความเป็นจริง และอาจเป็นผลให้ไม่สามารถควบคุมระบบได้

3.7.5 ตั๋วถ่วงน้ำหนัก

ส่วนนี้จะอยู่ที่ปลายอีกข้างหนึ่งของแขนของระบบ ทำหน้าที่ในการถ่วงให้ระบบขณะที่ยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีก้านลูกตุ้มสมดุลเท่ากันทั้งสองข้าง เพื่อทำหน้าที่หักล้างโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจากแขน และส่วนคัปปลิง , แบริ่ง ก้านลูกตุ้ม ให้หมดไป เพื่อเป็นการง่ายต่อการตั้งสมการของระบบ โดยน้ำหนักของตุ้มถ่วงนี้จะมีน้ำหนักเท่ากับชุดของคัปปลิง , แบริ่งของก้านลูกตุ้ม และเอนโคเดอร์รวมกัน

3.7.6 ก้านลูกตุ้ม

ก้านลูกตุ้มที่เราเลือกใช้เป็นแท่งอลูมิเนียมตัน ซึ่งมีน้ำหนักเบา ไม่โค้งงอ และไม่หักง่ายสาเหตุที่เลือกใช้ลักษณะนี้เพราะเราต้องการที่จะไม่พิจารณาน้ำหนักของก้านลูกตุ้ม โดยพยายามทำให้ก้านมีน้ำหนักน้อยที่สุดเพื่อที่จะตัดทิ้งออกจากสมการได้ แต่จากการที่เราเลือกก้านเป็นอลูมิเนียมตันนี้มีข้อเสียคือ ยังมีน้ำหนักมากอยู่พอสมควรทำให้มีผลต่อการควบคุมระบบ

3.7.7 ลูกตุ้ม

ลูกตุ้มที่เราเลือกใช้เป็นแท่งอะลูมิเนียมตัน กัดให้เป็นรูป เพื่อใช้ในการถ่วงน้ำหนักที่ปลายก้านลูกตุ้ม และเป็นก้อนน้ำหนักที่นำเข้ามาคิดในสมการของระบบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้เราจะทำการหาค่าพารามิเตอร์คุณลักษณะของระบบเพื่อให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่สมบูรณ์ จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุม สำหรับควบคุมระบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตของระบบกับแรงบิด (torque) ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะนำไปใช้เป็นพารามิเตอร์ในการควบคุมระบบต่อไป

4.1 การหาพารามิเตอร์ของระบบ

4.1.1 โมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่ 1 (J_1) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของข้อต่อ (b_1)

ความยาวแขนนับจากจุดหมุนถึงข้อต่อลูกตุ้ม (l_1) = 300 mm

น้ำหนักแกน (m) = 1.648 kg

J_1 = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของส่วนแกน + ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

$$\text{ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของส่วนแกน } J_a = \frac{1}{12} m(b^2 + l^2) \quad (4-1)$$

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J_m) คำนวณได้ดังนี้

จากสมการมอเตอร์กระแสตรง (DC motor)

$$J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = \tau \quad (4-2)$$

ให้สถานะเริ่มต้น $\theta(0) = 0$ และ $\dot{\theta}(0) = 0$ แล้วทำการแปลงลาปลาซ

$$Js^2\Theta(s) + bs\Theta(s) = \tau(s) \quad (4-3)$$

จาก (4-3) เขียนได้เป็น

$$\dot{\Theta}(s) = \frac{\tau(s)}{Js + b} \quad (4-4)$$

เมื่อให้

$$\tau(s) = T * U(s) \quad (4-5)$$

จะได้

$$\dot{\Theta}(s) = \frac{T * U(s)}{Js + b}$$

$$= \frac{T/b}{(J/b)s + 1} * U(s) \quad (4-6)$$

ดังนั้นเมื่อเราทำการป้อนแรงบิดคงที่ค่าหนึ่ง (Step Torque) ให้กับมอเตอร์ แล้วนำกราฟ ณ ช่วงเริ่มหมุนจากการทดลองมาเปรียบเทียบ (fit curve) กับกราฟที่ได้จากการเขียนแบบของสมการ (4-6) ที่ค่า J และ b ที่เหมาะสม (โดยการทดลองเปลี่ยนค่าทั้งสองแล้วนำมาเขียนแบบจนได้ค่าใกล้เคียง) ก็สามารหาค่าของ J และ b

4.1.2 โมเมนต์ความเฉื่อยของก้านลูกตุ้ม (J_2) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของข้อต่อ (b_2)

ความยาวก้านลูกตุ้ม (l_2) = 300 mm

น้ำหนักลูกตุ้ม $m_p = 0.015$ kg

เมื่อเราบิดแขนท่อนแรก แล้วปล่อยให้แขนท่อนที่สองแกว่งอย่างอิสระ จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$(\theta_1 = 180^\circ, \dot{\theta}_1 = 0, \theta_2(0) = 90^\circ)$$

จาก

$$T = T_1 + T_2$$

$$T = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 [(L_1 \dot{\theta}_1)^2 + (L_2 \dot{\theta}_2)^2 + 2L_1 L_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)] \quad (4-7)$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$U = M_2 g [L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos \theta_2] \quad (4-8)$$

$$D = D_1 + D_2$$

$$D = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} C_2 (\dot{\theta}_2^2 - 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_1^2) \quad (4-9)$$

แทนค่าความสัมพันธ์ข้างต้นลงไปนสมการจะได้

$$T = \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_2 (L_2 \dot{\theta}_2)^2 \quad (4-10)$$

$$U = M_2 g [L_2 \cos \theta_2 - L_1] \quad (4-11)$$

$$D = \frac{1}{2} C_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (4-12)$$

แทนค่าลงในสมการลากรางจ์ซึ่งขึ้นกับทิศทาง θ_2

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_2} + \frac{\partial U}{\partial \theta_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_2} - \tau = 0 \quad (4-13)$$

จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [J_2 \dot{\theta}_2 + M_2 L_2^2 \dot{\theta}_2] + C_2 \dot{\theta}_2 - M_2 g L_2 \sin \theta_2 &= \tau \\ (J_2 + M_2 L_2^2) \ddot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_2 - M_2 g L_2 \sin \theta_2 &= \tau \end{aligned} \quad (4-14)$$

จากการกระจายอนุกรมเทเลอร์ของฟังก์ชัน $\sin(\theta_2)$ จะได้

$$\sin(\theta_2) = \theta_2 - \frac{\theta_2^3}{3!} + \frac{\theta_2^5}{5!} - \frac{\theta_2^7}{7!} + \dots \quad (4-15)$$

โดยการประมาณการกระจายอันดับหนึ่ง ดังนั้นได้

$$\sin(\theta_2) = \theta_2 \quad (4-16)$$

จากสมการ (4-14) จะได้

$$(J_2 + M_2 L_2^2) \ddot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_2 - M_2 g L_2 \theta_2 = \tau \quad (4-17)$$

ให้

$$W = J_2 + M_2 L_2^2 \quad (4-18)$$

$$V = -M_2 g L_2 \quad (4-19)$$

จากสมการ (4-17) จะได้

$$\begin{aligned} W \ddot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_2 + V \theta_2 &= \tau \\ \ddot{\theta}_2 + \frac{C_2}{W} \dot{\theta}_2 + \frac{V}{W} \theta_2 &= \frac{\tau}{W} \end{aligned} \quad (4-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อใช้ค่าแรก และให้ค่าที่สองแวงโดยอิสระ $\theta_2(0) = 0.7854, \dot{\theta}_2(0) = 0$ และ $\tau = 0$
นำสมการ (4-20) ไปแปลงลาปลาซจะได้

$$\left[s^2 \Theta_2(s) - s\theta_2(0) - \dot{\theta}_2(0) \right] + \frac{C_2}{W} [s\Theta_2(s) - \theta_2(0)] + \frac{V}{W} \Theta_2(s) = 0$$

$$\left[s^2 + \frac{C_2}{W}s + \frac{V}{W} \right] \Theta_2(s) = \left[s + \frac{C_2}{W} \right] \theta_2(0)$$

$$\Theta_2(s) = \frac{\left[s + \frac{C_2}{W} \right]}{\left[s^2 + \frac{C_2}{W}s + \frac{V}{W} \right]} \theta_2(0) \quad (4-21)$$

ให้

$$A = \frac{-\frac{C_2}{W} + \sqrt{\left(\frac{C_2}{W}\right)^2 - 4\left(\frac{V}{W}\right)}}{2} \quad (4-22)$$

$$B = \frac{-\frac{C_2}{W} - \sqrt{\left(\frac{C_2}{W}\right)^2 - 4\left(\frac{V}{W}\right)}}{2} \quad (4-23)$$

จากสมการ (4-21) จะได้

$$\Theta_2(s) = \left[\frac{\left(A + \frac{C_2}{W} \right) / (A - B)}{s - A} + \frac{\left(B + \frac{C_2}{W} \right) / (B - A)}{s - B} \right] \theta_2(0) \quad (4-24)$$

ใช้ Matlab ในการเขียนแบบหาค่า C_2 และ J_2 ออกมา

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ปัญหา

5-1 สรุปผลการดำเนินงาน

สำหรับด้านอุปกรณ์ โครงสร้างทางกลประกอบขึ้นเป็นที่เรียบร้อย จากการทดสอบสามารถใช้ได้โดยสมบูรณ์ วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ สามารถใช้งานได้ และให้ผลอย่างถูกต้องการดีอินเทอร์เฟสสามารถรับอินพุต ส่งเอาต์พุต และกำหนดคาบเวลาการสุ่มได้อย่างสมบูรณ์

สำหรับโปรแกรมการควบคุมยังไม่เป็นที่เรียบร้อย เพราะยังไม่สามารถพัฒนาโปรแกรมให้ติดต่อกับระบบได้จึงทำให้ไม่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบได้ และไม่สามารถที่จะควบคุมระบบได้

5-2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1) ในส่วนของโครงสร้างทางกล โครงสร้างที่ออกแบบมานั้นยังมีน้ำหนักมากเกินไป ทำให้ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้าย และในส่วนที่เป็นคัปปลิงระหว่างแขนของระบบกับก้านลูกตุ้ม เวลาที่เกิดการหมุนยังมีแรงด้านการหมุนเกิดขึ้นอยู่ เนื่องจากว่าขนาดเพลลาของเอนโคเดอร์เล็กกว่าขนาดของคัปปลิงเล็กน้อย และก้านลูกตุ้มที่เลือกเอาอะลูมิเนียมทาสวทึบที่มาจากก้านธนูมาเป็นอุปกรณ์นั้นยังมีน้ำหนักมากเกินไปกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นควรที่จะออกแบบโครงสร้างและจัดทำให้ดีขึ้น โดยต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ อุปกรณ์ที่มีอยู่ และสมการทางคณิตศาสตร์ที่เรากำหนดขึ้นมา โดยต้องให้ทุกอย่างสอดคล้องกัน

2) วงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์ที่จัดทำขึ้นควรจะเป็นวงจรควบคุมกระแส เพื่อที่จะให้สอดคล้องกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้ เพราะจากสมการจะมีพจน์ของทอร์ค ซึ่งจากสมการของมอเตอร์ทอร์คแปรผันโดยตรงตามกระแส ดังนั้นการที่เราจะควบคุมทอร์คซึ่งเป็นอินพุตให้ระบบนั้น เราจึงต้องควบคุมกระแสได้ก่อน ซึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนวงจรให้เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์โดยกระแส หรือใช้วงจรวัดค่าโวลท์เตจที่เกิดขึ้นแล้วทำการคำนวณเปลี่ยนค่าเป็นกระแสเพื่อนำไปควบคุมต่อไป

3) ในส่วนของระบบที่เป็นสัญญาณดิจิทัลมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในบางครั้ง ซึ่งอาจ

ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการควบคุมได้ ทำการแก้ไขได้โดยแยกกราฟของสัญญาณอนาลอกกับสัญญาณดิจิตอลออกจากกัน โดยใช้สัญญาณแสง หรืออาจจะเดินกราฟคี่ในใหญ่บนวงจร และใช้สายสัญญาณที่มีชิลด์ รวมทั้งใช้ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัมมาต่อที่ไอซีดิจิตอลแต่ละตัว และใช้ตาข่ายลวดหุ้มมอเตอร์เอาไว้ พร้อมทั้งต่อกราฟจะช่วยลดสัญญาณรบกวนลงได้

5-3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

- 1) เปลี่ยนโมเดลในการควบคุมเป็นรูปแบบที่น่าสนใจรูปแบบอื่น เช่น อินเวอร์ทเพนดูลัมแบบเคลื่อนที่ หรือการเปลี่ยนแนวแกนหมุน หรือให้มีแนวแกนหมุนหลายแนว
- 2) นำอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบลักษณะใหม่ๆ เช่น ในส่วนวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรการ์ดอินเตอร์เฟซสำเร็จรูปมาใช้ จะได้มีเวลาในการพัฒนาโปรแกรม และระบบควบคุมมากขึ้น
- 3) เพิ่มความสามารถของระบบให้มากขึ้น เช่น เปลี่ยนจุดสมดุลให้อยู่จุดอื่น หรือตามที่ผู้ควบคุมกำหนด มีการเพิ่มการห้วยง้านลูกคัมขึ้นมาจากโดยอัตโนมัติ
- 4) เปลี่ยนตัวควบคุมไปใช้ตัวควบคุมแบบอื่นซึ่งมีการพัฒนาขึ้น มีความสามารถมากขึ้น ซึ่งมีตัวควบคุมที่น่าสนใจอยู่มากมาย โดยอาจจะใช้โมเดลของระบบเดิม หรือมีการเปลี่ยนโมเดลใหม่ให้ดูน่าสนใจมากขึ้น

หนังสืออ้างอิง

- (1) กนิษฐา วิจิตรเมฆทอง, ณัฐพล พากเพียร, นวเทพ ชนาพรธม, ปรินญาณีพนธ์เรื่อง “อินเวอร์ทเพนดูลัม” ปีการศึกษา 2541 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- (2) ฐาปนา นามประดิษฐ์, มงคลชน ศรีอมร, ปรินญาณีพนธ์เรื่อง “ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน” ปีการศึกษา 2541 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- (3) ถาวร เบญจนาสุทธี, ธรรม เจนวิญวัต, ปรินญาณีพนธ์เรื่อง “อินเวอร์ทเพนดูลัม” ปีการศึกษา 2538 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- (4) วีระศักดิ์ กวีวิเชียร, ชีระบุท สุวรรณประทีป, สมาน เจริญกิจพูนผล, “กลศาสตร์วิศวกรรม ภาคพลศาสตร์ (Dynamic)”, บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2537
- (5) โยธิน เปรมปราณีรัชต์, “วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2526
- (6) M.W.Spong, “The Swing Up Control Problem For The Acrobot”, 1995 IEEE Control Systems, pp.49-55, February, 1995
- (7) M.W.Spong, “Robot Dynamics and Control”, Wiley, 1989
- (8) Ogata K., “Modern Control Systems”, Englewood Cliffs, N.J.:prentice Hall ,Inc ,1995
- (9) Ogata K., “Discrete-Time Control Systems”, Englewood Cliffs , N.J.:prentice Hall ,Inc ,1995



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

สมการของลากรานจ์

วิธีการซึ่งใช้หาสมการของการเคลื่อนที่ในแบบพลศาสตร์ นอกจากเราจะใช้วิธีการตามแบบนิวตันแล้ว ยังคงมีวิธีอื่น ๆ อีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และควรแก่การศึกษา คือ วิธีการของนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ ลากรานจ์ (Joseph Louis Lagrange) ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้

ก-1 โคออดิเนตแบบทั่วไป

สิ่งแรกตามวิธีการหาสมการการเคลื่อนที่แบบลากรานจ์ เราจะต้องรู้จักโคออดิเนตแบบทั่วไปเสียก่อน เราทราบแล้วว่าเมื่ออนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่ในสเปซ เราระบุโคออดิเนตได้ 3 โคออดิเนต โดยอาจจะอยู่ในลักษณะของพิกัดคาร์ทีเซียน (cartesian) , พิกัดทรงกลม (spherical) , หรือพิกัดทรงกระบอก (cylindrical) หรือตามความเป็นจริง เราอาจกำหนดตัวสัญลักษณ์ใด ๆ ขึ้น 3 ตัว สำหรับแสดงตำแหน่งของอนุภาค

กรณีที่อนุภาคเคลื่อนที่ในปริภูมิ 2 มิติ หรือในระนาบ เราใช้เพียง 2 โคออดิเนต สำหรับแสดงตำแหน่งของอนุภาค หรือถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ในมิติเดียว เช่นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง เราต้องการเพียงโคออดิเนตเท่านั้น สำหรับแสดงตำแหน่งอนุภาค

ในกรณีของระบบอนุภาคที่มีอนุภาคทั้งหมด N อนุภาค เราอาจใช้ $3N$ โคออดิเนต สำหรับแสดงตำแหน่งของอนุภาคทั้งหมดนี้ เพื่อเป็นโครงสร้างของระบบ อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่าระบบที่มี N อนุภาค จะต้องใช้ $3N$ โคออดิเนตเสมอไป เพราะในบางกรณีระบบอนุภาคนี้อาจเป็นการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ หรือมิติเดียวก็เป็นไปได้ ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างของระบบนี้อาจใช้น้อยกว่า $3N$ โคออดิเนต

สำหรับกรณีทั่วไป ถ้าเราให้ n เป็นจำนวน โคออดิเนตที่น้อยที่สุดที่แสดงถึงโครงสร้างของระบบที่กำหนดให้ใด ๆ เรากำหนดโคออดิเนตเหล่านี้ด้วยสัญลักษณ์

$$q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$$

เราเรียกว่าเป็นโคออดิเนตแบบทั่วไปและเรียก n ว่าเป็นจำนวนดีกรีแห่งความอิสระ (degrees of freedom) ของระบบนี้ และโคออดิเนตแบบทั่วไปใด ๆ (q_k) ที่กำหนดนี้อาจเป็นมุมหรือระยะทางก็ได้

ถ้าจำนวนโคออดิเนตซึ่งแสดงโครงสร้างของระบบมีมากกว่า N และแต่ละโคออดิเนตสามารถแปรผันได้อย่างอิสระ เราเรียกระบบนี้ว่าระบบโฮโมโนมิก (homonomic) ในระบบนี้ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนโคออดิเนตแบบทั่วไปเท่ากับ n จำนวนดีกรีแห่งความอิสระก็เท่ากับ n เช่นกัน ในทางตรงกันข้ามคือระบบนอนโฮโมโนมิก (non-homonomic) ระบบนี้โคออดิเนตไม่สามารถแปรผันอย่างอิสระได้ทั้งหมด และจำนวนดีกรีแห่งความอิสระน้อยกว่าค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนโคออดิเนตหรือน้อยกว่า n ตัวอย่างเช่น การกลิ้งของทรงกลมบนระนาบ เราต้องการ 5 โคออดิเนตสำหรับแสดงโครงสร้างของระบบ โดยมี 2 โคออดิเนตแสดงตำแหน่งของทรงกลม และ 3 โคออดิเนตสำหรับแสดงตำแหน่งเวลาทรงกลมหมุน โคออดิเนตเหล่านี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระได้หมด มีเพียง 2 โคออดิเนตเท่านั้นที่เปลี่ยนเมื่อทรงกลมนี้กลิ้ง ซึ่งแตกต่างกับระบบการเคลื่อนที่แบบโฮโมโนมิก ดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในที่นี้ เราจะพิจารณาเพียงกรณีของโฮโมโนมิกเท่านั้น

ในระบบที่มีอนุภาคเพียงอนุภาคเดียว เราสามารถอธิบายคาร์ทีเซียนโคออดิเนตในลักษณะฟังก์ชันของโคออดิเนตแบบทั่วไปได้ คือ

1-มิติ : มีดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับ 1

$$x = x(q)$$

2-มิติ : มีดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับ 2

$$x = x(q_1, q_2)$$

$$y = y(q_1, q_2)$$

3-มิติ : มีดีกรีแห่งความอิสระเท่ากับ 3

$$x = x(q_1, q_2, q_3)$$

$$y = y(q_1, q_2, q_3)$$

ถ้าเราสมมติให้ q 's ใดๆ เปลี่ยนจากค่าเริ่มต้น ณ (q_1, q_2, \dots) ไปยังค่าใกล้เคียง $q_1 + \delta q_1, q_2 + \delta q_2, \dots$ และสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงในคาร์ทีเซียนโคออดิเนต คือ

$$\delta x = \frac{\partial x}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial x}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots$$

$$\delta y = \frac{\partial y}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial y}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots$$

เมื่อ $\frac{\partial x}{\partial q_1}, \frac{\partial x}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial y}{\partial q_1}, \frac{\partial y}{\partial q_2}, \dots$ เป็นฟังก์ชันของ q 's ตัวอย่างในกรณีนี้ เช่นการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคในระนาบ ถ้าเรากำหนดให้พิกัดโคออดิเนต (polar coordinate) ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไปคือ

$$q_1 = r, q_2 = \theta$$

แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = x(r, \theta) = r \cos \theta$$

$$y = y(r, \theta) = r \sin \theta$$

และ

$$\delta x = \frac{\partial x}{\partial r} \delta r + \frac{\partial x}{\partial \theta} \delta \theta = \cos \theta \delta r - r \sin \theta \delta \theta$$

$$\delta y = \frac{\partial y}{\partial r} \delta r + \frac{\partial y}{\partial \theta} \delta \theta = \sin \theta \delta r + r \cos \theta \delta \theta$$

โดยที่ให้การเปลี่ยนแปลงของ x และ y สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ ใน r และ θ

ถ้าเราพิจารณากรณีของระบบที่มีอนุภาคจำนวนมาก โดยให้ระบบอนุภาคนี้มีดีกรีแห่งความเป็นอิสระเป็น n และเป็นจำนวนของ โคออดิเนตแบบทั่วไปด้วย ดังนั้น โคออดิเนตแบบทั่วไปคือ

$$q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$$

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจาก (q_1, q_2, \dots, q_n) ไปยังค่าใกล้เคียง

$(q_1 + \delta q_1, q_2 + \delta q_2, \dots, q_n + \delta q_n)$ แสดงถึงว่าอนุภาค i ใด ๆ เคลื่อนที่จากตำแหน่ง (x_i, y_i, z_i)

ไปยังตำแหน่งใกล้เคียง $(x_i + \delta x_i, y_i + \delta y_i, z_i + \delta z_i)$ เมื่อ

$$\delta x_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \delta q_k$$

$$\delta y_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial y_i}{\partial q_k} \delta q_k$$

$$\delta z_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial z_i}{\partial q_k} \delta q_k$$

(ก-1)

ซึ่ง $\frac{\partial x_i}{\partial q_k}, \frac{\partial y_i}{\partial q_k}, \frac{\partial z_i}{\partial q_k}$ เป็นฟังก์ชันของ q 's ใด ๆ ตัวห้อย k แสดงถึงจำนวนของ โคออดิเนต

แบบทั่วไป หรือจำนวนดีกรีแห่งความอิสระ โดยที่ q 's เป็น โคออดิเนตแบบทั่วไปใด ๆ ส่วนตัวห้อย

i

แสดงถึงจำนวน โคออดิเนตในพิกัดฉาก (rectangular) ดังนั้นสำหรับอนุภาคที่มี N อนุภาค ค่าของ i

จึงมีค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$

ก-2 แรงแบบทั่วไป

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นระยะขจัด $d\vec{r}$ ด้วยแรง \vec{F} งานในช่วงนี้ (δW) ซึ่งเกิดจากแรง \vec{F} หาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta W = \vec{F} d\vec{r} = F_x dx + F_y dy + F_z dz$$

หรือถ้าเราอธิบาย δW ตามวิธีการในหัวข้อที่ 1 เราได้

$$\delta W = \sum_i F_i dx_i \quad (\text{ก-2})$$

สูตรของสมการ (ก-2) ใช้ได้ทั้งในกรณีของอนุภาคเดี่ยวและระบบอนุภาค อนุภาคเดี่ยวค่าของ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง 3 ส่วนระบบอนุภาค ค่าของ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$

$$\begin{aligned} \delta W &= \sum_i \left(F_i \sum_k \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \delta q_k \right) \\ &= \sum_i \left(\sum_k F_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \delta q_k \right) \end{aligned}$$

โดยการสลับค่าของ \sum_i กับ \sum_k จะได้

$$\delta W = \sum_k \left(F_i \sum_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \delta q_k \right) \quad (\text{ก-3})$$

สมการ (ก-3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\delta W = \sum_k Q_k \delta q_k \quad (\text{ก-4})$$

เมื่อ

$$Q_k = \sum_i \left(F_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) \quad (\text{ก-5})$$

ค่าของ Q_k ซึ่งอธิบายตามสมการ (ก-5) เรียกว่า แรงแบบทั่วไป ซึ่งแสดงในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป q_k ถ้าผลคูณของ $Q_k \delta q_k$ เป็นงานแล้ว Q_k คือแรง และ q_k คือระยะทาง หรือถ้า Q_k เป็นทอร์กแล้ว q_k ก็จะเป็นมุม

การหาค่าของปริมาณ Q_k ทุก ๆ แรงแบบทั่วไป Q_k สามารถคำนวณได้โดยตรงตามความเป็นจริง กล่าวคือถ้า $Q_k \delta q_k$ เป็นงานของระบบ Q_k ก็คือแรงภายนอกใด ๆ เมื่อโคออดิเนต q_k เปลี่ยนไป δq_k ตัวอย่างเช่น งานของวัตถุเกร็งแข็ง งานนี้เป็นงานที่เกิดจากแรงภายนอกเมื่อวัตถุหมุนไปเป็นมุม $\delta\theta$ รอบแกนที่กำหนด $L_\theta \delta\theta$ เมื่อ L_θ เป็นขนาดโมเมนต์ของแรงทั้งหมด ในกรณีตัวอย่างนี้ L_θ คือแรงแบบทั่วไป และ θ คือโคออดิเนตแบบทั่วไป

ก-3 แรงแบบทั่วไปสำหรับระบบอนุภาค

เราทราบแล้วว่าหากพิจารณาในพิกัดจาก แรงที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่สำหรับระบบอนุภาค กำหนดได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_i = -\frac{\partial V}{\partial x_i} \quad (\text{ก-6})$$

เมื่อ V เป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ (potential energy function) จากสมการ (ก-5) ดังนั้นแรงแบบทั่วไปสำหรับระบบอนุภาคคือ

$$Q_k = -\left(\sum_i \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right)$$

$$Q_k = -\frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (\text{ก-7})$$

ตัวอย่างเช่นถ้าให้โพลาร์โคออดิเนต $q_1 = r, q_2 = \theta$ แล้วแรงแบบทั่วไป $Q_r = -\partial V / \partial r$; $Q_\theta = -\partial V / \partial \theta$ และถ้า V เป็นฟังก์ชันของ r เพียงอย่างเดียว (กรณีของแรงผ่านศูนย์กลาง) แล้ว $Q_\theta = 0$

ก-4 สมการของลากรางจ์

การหาสมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเคลื่อนที่ ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป เราเริ่มด้วยสมการ

$$F_i = m_i \ddot{x}_i$$

แล้วเราพยายามเขียนสมการของการเคลื่อนที่นี้ ให้อยู่ในเทอมของ q 's โดยตรง ก่อนอื่นเราต้องพิจารณาในเรื่องพื้นฐานเกี่ยวกับพลังงาน เพื่อคำนวณหาพลังงานจลน์ในเทอมของคาร์ทีเซียนโคออดิเนต แล้วอธิบายในลักษณะฟังก์ชันของโคออดิเนตแบบทั่วไป ซึ่งหาพลังงานจลน์ T ของระบบ N อนุภาค คือ

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2)$$

หรือเขียนแบบง่าย ๆ เป็น

$$T = \sum_{i=1}^{3N} m_i \dot{x}_i^2 \quad (\text{ก-8})$$

เมื่อคาร์ทีเซียนโคออดิเนต x_i เป็นฟังก์ชันของโคออดิเนตแบบทั่วไป q_k และเป็นอนุพันธ์ของเวลากว่าคือ

$$x_i = x_i(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \quad (\text{ก-9})$$

ดังนั้น เมื่อเราดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (ก-9) จะได้

$$\dot{x}_i = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_k} \dot{q}_k + \frac{\partial x_i}{\partial t} \right) \quad (\text{ก-10})$$

ในที่นี้ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$, N เป็นจำนวนอนุภาคของระบบ, k เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง n และ n เป็นจำนวนโคออดิเนตแบบทั่วไปหรือจำนวนดีกรีแห่งความอิสระของระบบ

จากการอธิบายค่า $\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k}$ ในสมการ (ก-10) เราได้

$$\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \quad (\text{ก-11})$$

โดยการคูณสมการ (ก-11) กับ \dot{x}_i แล้วดิฟเฟอเรนเชียลเทียบกับเวลา t

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k} \right) &= \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) \\ &= \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + \dot{x}_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial q_k} \end{aligned}$$

หรือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial (1/2 \dot{x}_i^2)}{\partial \dot{q}_k} \right) = \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + \frac{\partial (1/2 \dot{x}_i^2)}{\partial q_k}$$

เมื่อเอา m_i คูณตลอดสมการ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial (1/2 m_i \dot{x}_i^2)}{\partial \dot{q}_k} \right) = m_i \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + \frac{\partial (1/2 m_i \dot{x}_i^2)}{\partial q_k}$$

โดยการใส่ \sum_i ตลอดแล้วแทนค่า T จากสมการ (ก-8) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) &= \sum_i \left(m_i \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_k} \\ &= \sum_i \left(F_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right) + \frac{\partial T}{\partial q_k} \end{aligned}$$

จากนิยามของแรงแบบทั่วไป สมการ (ก-5) ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q_k + \frac{\partial T}{\partial q_k} \quad (\text{ก-12})$$

สมการ (ก-12) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเคลื่อนที่ใน โคออดิเนตแบบทั่วไป ซึ่งเรารู้จักในชื่อของ “ สมการการเคลื่อนที่ของลากรานจ์ “

ในกรณีเป็นการเคลื่อนที่ของระบบอนุรักษ์ ซึ่งค่าของแรงแบบทั่วไป Q_k เป็นไปตามสมการ (ก-7) ดังนั้น สมการของลากรานจ์เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (\text{ก-13})$$

เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ กำหนดให้ฟังก์ชันของลากรานจ์เป็น

$$L = T - V \quad (\text{ก-14})$$

เมื่อ T และ V อธิบายในเทอมของ โคออดิเนตแบบทั่วไป และสมการ (ก-14) เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k}$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k}$$

ดังนั้นเมื่อ $V = V(q)$ และ $\frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k} = 0$ แล้ว

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k}$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{\partial T}{\partial q_k} - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (\text{ก-15})$$

จากการแทนค่าสมการ (ก-15) ในสมการ (ก-13) ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของลากรานจ์ในกรณีระบบอนุรักษ์ คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_k} \quad (\text{ก-16})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีของระบบไม่อนุรักษ์ กล่าวคือแรงทั่วไป Q_k ไม่เป็นไปตามสมการ (ก-7) ให้ปริมาณ Q'_k เป็นปริมาณส่วนที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น

$$Q'_k = Q_k - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (\text{ก-17})$$

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของลากรางจ์ในกรณีระบบไม่อนุรักษ์ได้เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q'_k + \frac{\partial L}{\partial q_k} \quad (\text{ก-18})$$

ตัวอย่างของแรงแบบทั่วไป Q'_k เช่นแรงเสียดทาน เป็นต้น

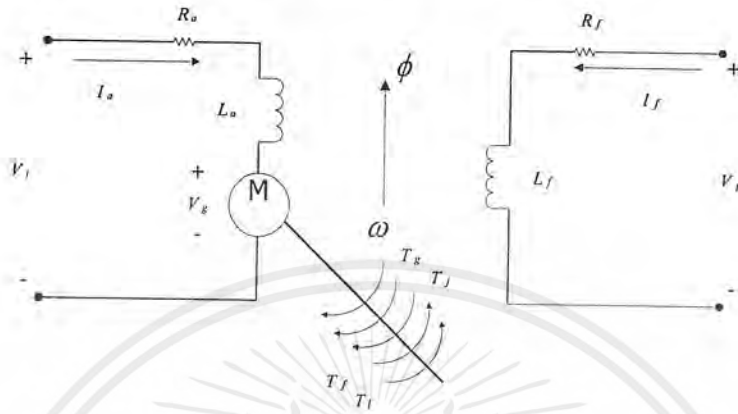
ก-5 การประยุกต์สมการของลากรางจ์ไปใช้ในบางกรณี

การใช้สมการลากรางจ์ หาสมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเคลื่อนที่สำหรับระบบใด ๆ นั้น เรามีหลักเกณฑ์โดยทั่วไปดังนี้

- 1) การกำหนด โคออดิเนตแบบทั่วไปที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างของระบบ
- 2) หาค่าพลังงานจลน์ T ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป
- 3) ถ้าเป็นระบบอนุรักษ์ ให้หาค่าพลังงานศักย์ V ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป ถ้าไม่ใช่ระบบอนุรักษ์ ให้หาค่าของแรงแบบทั่วไปในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป
- 4) สมการของลากรางจ์ที่จะมาประยุกต์ใช้คือสมการ (ก-12) , (ก-16) และ (ก-18)

ภาคผนวก ข

โมเดลทางคณิตศาสตร์ของดีซี มอเตอร์



รูป ข-1 แสดงโมเดลของดีซี มอเตอร์ แบบฟิสิกส์แยกกระตุ่น

หาจากกฎของอาเมเจอร์

$$V_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_g(t) \quad (\text{ข-1})$$

โดย

$$V_g(t) = K\phi(t)\omega(t) \quad (\text{ข-2})$$

ถ้าให้กระแสฟิสิกส์มีค่าคงที่ เมื่อไม่คิดผลจากอาร์เมเจอร์ (Armature Reaction) แล้วจะได้

$$V_g(t) = K_e \omega(t) \quad (\text{ข-3})$$

$$T_g(t) = K_t i_a(t) \quad (\text{ข-4})$$

$$P_g(t) = T_g(t)\omega(t) \quad (\text{ข-5})$$

โดย

R_a คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์

L_a คือ อินдукแตนซ์ของอาร์เมเจอร์

V_g คือ โวลต์เตจย้อนกลับ

R_f คือ ความต้านทานของฟิสิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L_f	คือ อินдукแตนซ์ของฟิลด์
ϕ	คือ ช่องว่างอากาศของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก
ω	คือ ความเร็วของเพลอาอาร์เมเจอร์
T_g	คือ แรงบิดที่พัฒนาขึ้นในมอเตอร์
T_f	คือ แรงบิดเสียดทานของมอเตอร์
T_j	คือ แรงเฉื่อยของมอเตอร์
T_l	คือ แรงบิดโหลดบนเพลามอเตอร์

สมการแรงบิดของมอเตอร์คือ

$$T_g(t) = T_f(t) + T_l(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (9-6)$$

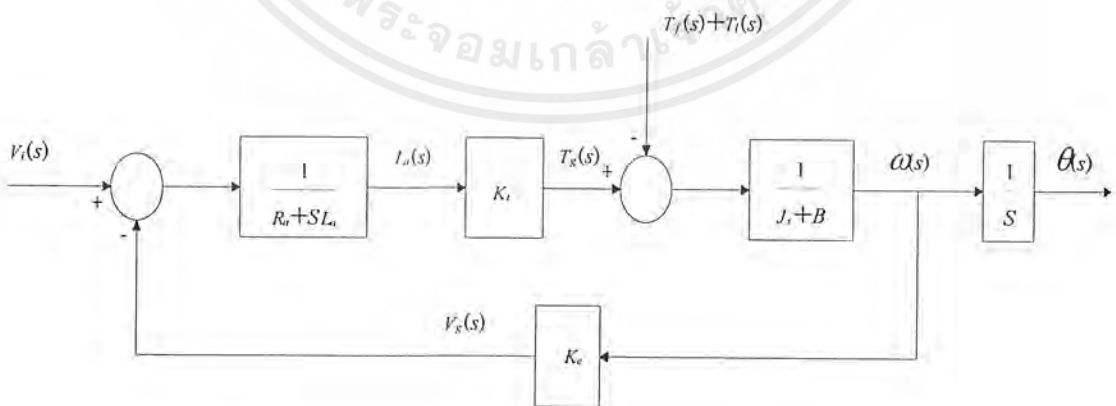
จากสมการ (ข-1), (ข-3), (ข-4) และ (ข-6) ใ้ลาปลาซทรานฟอร์มทั้งสองข้าง

$$V_i(s) - V_g(s) = (R_a + sL_a)I_a(s) \quad (9-7)$$

$$V_g(s) = K_v \omega(s) \quad (9-8)$$

$$T_g(s) = K_t I_a(s) \quad (9-9)$$

$$T_g(s) - T_f(s) - T_l(s) = (B + sJ)\omega(s) \quad (9-10)$$



รูป ข-2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของดีซี มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป ข-2 จะได้

$$\omega(s) = G_1(s)V_i(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_l(s)] \quad (\text{ข-11})$$

เมื่อ

$$G_1(s) = \frac{\omega(s)}{V_i(s)} \Big|_{T_f(s)+T_l(s)=0} \quad (\text{ข-12})$$

$$G_2(s) = \frac{\omega(s)}{T_f(s) + T_l(s)} \Big|_{V_i(s)=0} \quad (\text{ข-13})$$

จากบล็อกไดอะแกรม จะได้

$$\begin{aligned} G_1(s) &= \frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(Js + B) + K_t K_e} \\ &= \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1} \end{aligned} \quad (\text{ข-14})$$

โดย

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e} \quad (\text{ข-15})$$

$$\alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_t K_e} \quad (\text{ข-16})$$

$$\beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e} \quad (\text{ข-17})$$

ในระบบนี้ถ้าเราสมมติให้ T_f และ T_l เป็นศูนย์

จะได้

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B(1 + \tau_e s)(1 + \tau_m s) + K_t K_e} \quad (\text{ข-18})$$

เมื่อ

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{ค่าคงที่เชิงเวลา (Time Constant) ทางไฟฟ้า} \quad (\text{ข-19})$$

$$\tau_m = \frac{J}{B} \quad \text{ค่าคงที่เชิงเวลา (Time Constant) ทางเชิงกล} \quad (\text{ข-20})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าอินทิกรัลของอาร์เมเจอร์มีน้อย ค่าคงที่เชิงเวลาทางไฟฟ้าสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นจะได้สมการใหม่ คือ

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a (Js + B) + K_t K_e} \quad (๗-21)$$

$$G_1(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad (๗-22)$$

เมื่อ

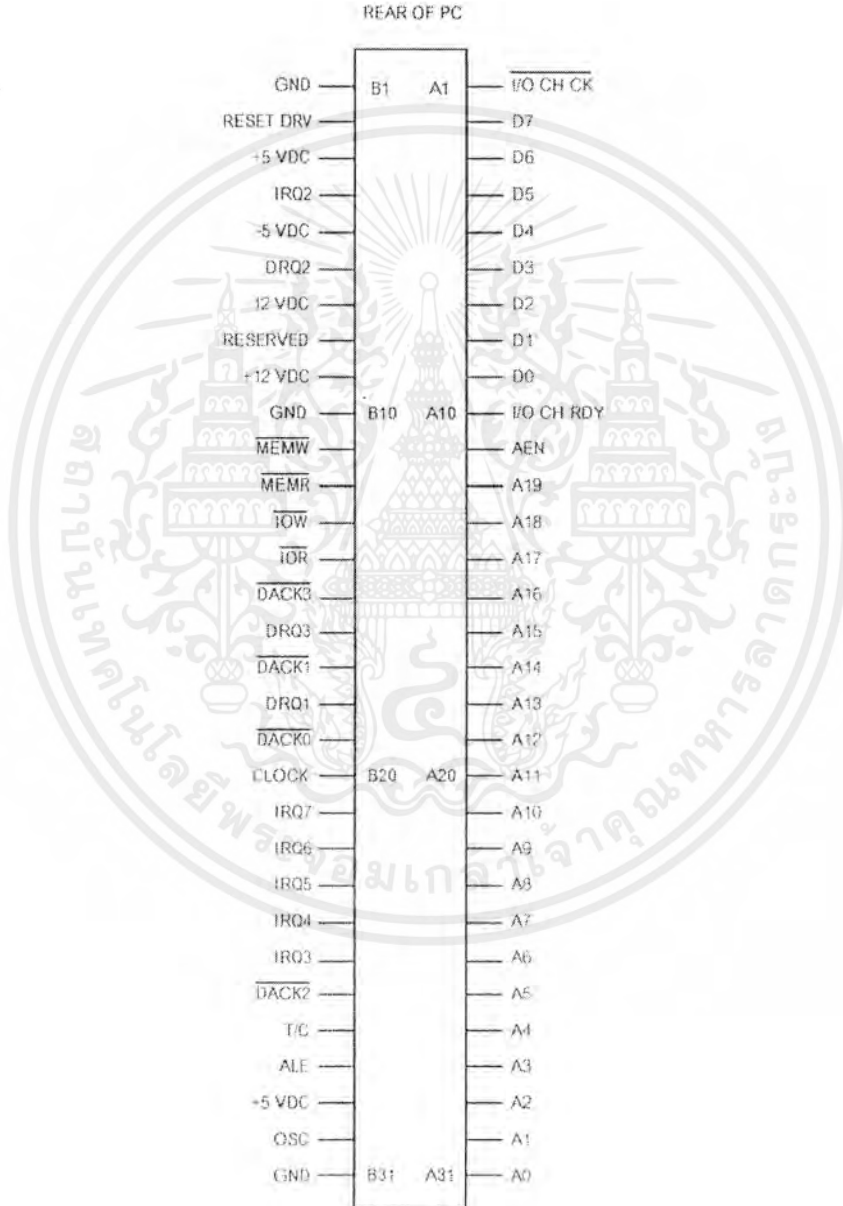
$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e} \quad (๗-23)$$

$$\tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e} \quad (๗-24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง IBM PC ISA BUS



รูป ค-1 แสดง IBM ISA BUS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-1 การจัดหาและลักษณะของ IBM ISA BUS

1) $A_0 - A_{19}$ (Address Bus 0 – 19)

ทำหน้าที่เป็นแอดเดรสของหน่วยความจำ หรืออินพุต เอาท์พุท จำนวนทั้งหมด 20 ขา

2) $D_0 - D_7$ (Data Bus 0 – 7)

ทำหน้าที่เป็นส่วนส่งข้อมูล 2 ทิศทาง คือมีทั้งอินพุต และเอาท์พุท จำนวนทั้งหมด 8 ขา

3) $\overline{MEMR}, \overline{MEMW}, \overline{IOR}$ และ \overline{IOW} (Memory Read, Memory Write, I/O Read, I/O Write)

ทำหน้าที่ควบคุมสัญญาณอ่านและเขียน (Read and Write) เป็นแอกทีฟโลว์ (Active Low)

4) ALE (Address Latch Enable)

เป็นสัญญาณที่ถูกส่งออกไปเพื่อแลตช์ค่าแอดเดรส

5) AEN (Address Enable)

เป็นสัญญาณที่ส่งออกมาจาก DMA (Direct Memory Access) ถ้ามีสัญญาณนี้แสดงว่ามีความต้องการที่จะติดต่อหน่วยความจำ หรือการติดต่ออุปกรณ์ภายนอก โดยส่วนใหญ่จะใช้ในการเลือกพอร์ตอินพุต เอาท์พุท

6) OSC, CLK (Oscillator, Clock)

ออสซิลเลเตอร์เป็นสัญญาณนาฬิกา (Clock Signal) ความเร็วสูง 70 ns/period (14.31818 MHz), สัญญาณนาฬิกามีความถี่เป็นหนึ่งในสามของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ (4.77 MHz)

7) $IRQ2 - IRQ7$ (Interrupt Request 2 – 7)

เป็นขาอินเตอร์รัปต์เรียงความสำคัญ (Priority) สูงสุดถึงต่ำสุด

8) $I/O CH RDY$ (I/O Channel Ready)

เป็นสัญญาณอินพุตที่เข้ามาเพื่อขยายเวลาการติดต่อกับหน่วยความจำ หรืออินพุต เอาท์พุท

9) $I/O CH CK$ (I/O Channel Check)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสัญญาณแอกทีฟโลว์เพื่อบอกให้หน่วยประมวลผลกลางรับรู้เกี่ยวกับการติดต่อกับหน่วยความจำ หรืออินพุท เอาท์พุท

10) *RESET DRV* (Reset Drive)

เป็นสัญญาณที่ใช้ในการรีเซทระบบ

11) *DRQ1 – DRQ3* (DMA Request 1 – 3)

เป็นสัญญาณอินพุทที่ใช้ในการขอติดต่อกับหน่วยความจำ ส่งมาจาก DMA

12) *DACK0 – DACK3* (DMA Acknowledge Signal 0 – 3)

เป็นสัญญาณแอกทีฟโลว์ที่ตอบกลับว่าได้รับสัญญาณการติดต่อกับ DMA

13) *T/C* (Terminal Count)

เป็นสัญญาณพัลส์ที่ใช้นับช่วงช่องสัญญาณ DMA

ภาคผนวก ง

ข้อมูลอุปกรณ์

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

November 1992
Revised April 1999

74VHC138 3-to-8 Decoder/Demultiplexer

74VHC138 3-to-8 Decoder/Demultiplexer

General Description

The VHC138 is an advanced high speed CMOS 3-to-8 decoder/demultiplexer fabricated with silicon gate CMOS technology. It achieves the high speed operation similar to equivalent Bipolar Schottky TTL while maintaining the CMOS low power dissipation.

When the device is enabled, 3 binary select inputs (A_0 , A_1 and A_2) determine which one of the outputs (\bar{O}_0 - \bar{O}_7) will go LOW. When enable input E_3 is held LOW or either \bar{E}_1 or \bar{E}_2 is held HIGH, decoding function is inhibited and all outputs go HIGH. E_3 , \bar{E}_1 and \bar{E}_2 inputs are provided to ease cascade connection and for use as an address decoder for memory systems. An input protection circuit ensures that

0V to 7V can be applied to the input pins without regard to the supply voltage. This device can be used to interface 5V to 3V systems and two supply systems such as battery back up. This circuit prevents device destruction due to mismatched supply and input voltages.

Features

- High Speed: $t_{PD} = 5.7\text{ns}$ (typ) at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Low power dissipation: $I_{CC} = 4\ \mu\text{A}$ (max.) at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- High noise immunity: $V_{NIH} = V_{NIL} = 28\% V_{CC}$ (min.)
- Power down protection provided on all inputs
- Pin and function compatible with 74HC138

Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
74VHC138M	M16A	16-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150" Narrow
74VHC138SJ	M16D	16-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74VHC138MTC	MTC16	16-Lead Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP), JEDEC MO-153, 4.4mm Wide
74VHC138N	N16E	16-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Surface mount packages are also available on Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Logic Symbols

Connection Diagram

Pin Descriptions

Pin Names	Description
A_0 - A_2	Address Inputs
\bar{E}_1 - \bar{E}_2	Enable Inputs
E_3	Enable Input
\bar{O}_0 - \bar{O}_7	Outputs

© 1999 Fairchild Semiconductor Corporation

DS011537.prf

www.fairchildsemi.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

74VHC138

Truth Table

Inputs						Outputs							
\bar{E}_1	\bar{E}_2	E_3	A_0	A_1	A_2	\bar{O}_0	\bar{O}_1	\bar{O}_2	\bar{O}_3	\bar{O}_4	\bar{O}_5	\bar{O}_6	\bar{O}_7
H	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	X	L	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
L	L	H	H	L	L	H	L	H	H	H	H	H	H
L	L	H	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
L	L	H	H	H	L	H	H	H	L	H	H	H	H
L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H
L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H
L	L	H	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

H = HIGH Voltage Level
 L = LOW Voltage Level
 X = Immaterial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage (V_{CC})	-0.5V to +7.0V
DC Input Voltage (V_{IN})	-0.5V to +7.0V
DC Output Voltage (V_{OUT})	-0.5V to $V_{CC} + 0.5V$
Input Diode Current (I_{IK})	-20 mA
Output Diode Current (I_{OK})	±20 mA
DC Output Current (I_{OUT})	±25 mA
DC V_{CC}/GND Current (I_{CC})	±75 mA
Storage Temperature (T_{STG})	-65°C to +150°C
Lead Temperature (T_L) (Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

Supply Voltage (V_{CC})	2.0V to +5.5V
Input Voltage (V_{IN})	0V to +5.5V
Output Voltage (V_{OUT})	0V to V_{CC}
Operating Temperature (T_{OPR})	-40°C to +85°C
Input Rise and Fall Time (t_r, t_f)	
$V_{CC} = 3.3V \pm 0.3V$	0 - 100 ns/V
$V_{CC} = 5.0V \pm 0.5V$	0 - 20 ns/V

Note 1: Absolute Maximum Ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. The databook specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside databook specifications.

Note 2: Unused inputs must be held HIGH or LOW. They may not float.

DC Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ\text{C}$			$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		Units	Conditions	
			Min	Typ	Max	Min	Max			
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage	2.0 3.0 - 5.5	1.50 $0.7 V_{CC}$			1.50 $0.7 V_{CC}$		V		
V_{IL}	LOW Level Input Voltage	2.0 3.0 - 5.5		0.50 $0.3 V_{CC}$		0.50 $0.3 V_{CC}$		V		
V_{OH}	HIGH Level Output Voltage	2.0	1.9	2.0		1.9		V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OH} = -50 \mu\text{A}$
		3.0	2.9	3.0		2.9				
		4.5	4.4	4.5		4.4		V	$I_{OH} = -4 \text{ mA}$ $I_{OH} = -8 \text{ mA}$	
		3.0	2.58			2.48				
4.5	3.94			3.60						
V_{OL}	LOW Level Output Voltage	2.0		0.0	0.1		0.1	V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OL} = 50 \mu\text{A}$
		3.0		0.0	0.1		0.1			
		4.5		0.0	0.1		0.1	V	$I_{OL} = 4 \text{ mA}$ $I_{OL} = 8 \text{ mA}$	
		3.0			0.36		0.44			
4.5			0.36		0.44					
I_{IN}	Input Leakage Current	0 - 5.5			±0.1		±1.0	μA	$V_{IN} = 5.5V$ or GND	
I_{CC}	Quiescent Supply Current	5.5			4.0		40.0	μA	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



November 1992
Revised March 1999

74VHC245

Octal Bidirectional Transceiver with 3-STATE Outputs

General Description

The VHC245 is an advanced high speed CMOS octal bus transceiver fabricated with silicon gate CMOS technology. It achieves high speed operation similar to equivalent Bipolar Schottky TTL while maintaining the CMOS low power dissipation. The VHC245 is intended for bidirectional asynchronous communication between data busses. The direction of data transmission is determined by the level of the T/R input. The enable input can be used to disable the device so that the busses are effectively isolated. All inputs are equipped with protection circuits against static discharge.

Features

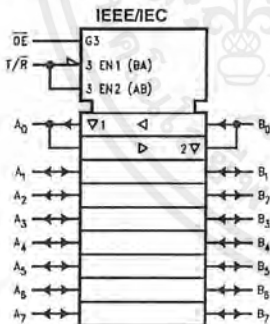
- High Speed: $t_{PD} = 4.0 \text{ ns (typ)}$ at $V_{CC} = 5V$
- High Noise Immunity: $V_{NIH} = V_{NIL} = 28\% V_{CC}$ (Min)
- Power Down Protection is provided on all inputs
- Low Noise: $V_{OLP} = 0.9V$ (typ)
- Low Power Dissipation:
 $I_{CC} = 4 \mu A$ (Max) @ $T_A = 25^\circ C$
- Pin and Function Compatible with 74HC245

Ordering Code:

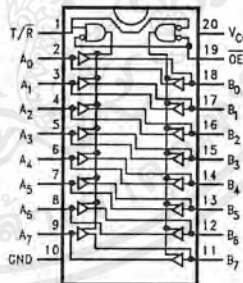
Order Number	Package Number	Package Description
74VHC245M	M20B	20-Lead Small Outline Integrated Package (SOIC), JEDEC MS-013, 0,300" Wide
74VHC245SJ	M20D	20-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74VHC245MTC	MTC20	20-Lead Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP), JEDEC MO-153, 4.4mm Wide
74VHC245N	N20A	20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0,300" Wide

Surface mount packages are also available on Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Logic Symbol



Connection Diagram



Pin Description

Pin Names	Description
\overline{OE}	Output Enable Input
T/R	Transmit/Receive Input
A_0-A_7	Side A Inputs or 3-STATE Outputs
B_0-B_7	Side B Inputs or 3-STATE Outputs

Truth Table

Inputs		Outputs
OE	T/R	
L	L	Bus B Data to Bus A
L	H	Bus A Data to Bus B
H	X	HIGH-Z State

H = HIGH Voltage Level L = LOW Voltage Level X = Immaterial
Any unused bus terminals during HIGH-Z State must be held HIGH or LOW.

74VHC245 Octal Bidirectional Transceiver with 3-STATE Outputs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage (V_{CC})	-0.5V to +7.0V
DC Input Voltage (V_{IN}) ($\overline{T/R}$, \overline{OE})	-0.5V to 7.0V
DC Output Voltage (V_{OUT})	-0.5V to $V_{CC} + 0.5V$
Input Diode Current (I_{IK}) ($\overline{T/R}$, \overline{OE})	-20 mA
Output Diode Current (I_{OK})	± 20 mA
DC Output Current (I_{OUT})	± 25 mA
DC V_{CC}/GND Current (I_{CC})	± 75 mA
Storage Temperature (T_{STG})	-65°C to +150°C
Lead Temperature (T_L) (Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

Supply Voltage (V_{CC})	2.0V to 5.5V
Input Voltage (V_{IN}) ($\overline{T/R}$, \overline{OE})	0V to 5.5V
Output Voltage (V_{OUT})	0V to V_{CC}
Operating Temperature (T_{OPR})	-40°C to +85°C
Input Rise and Fall Time (t_r , t_f) $V_{CC} = 3.3V \pm 0.3V$	0 - 100 ns/V
$V_{CC} = 5.0V \pm 0.5V$	0 - 20 ns/V

Note 1: Absolute Maximum Ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. The databook specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside databook specifications.

Note 2: Unused inputs or I/O pins must be held HIGH or LOW. They may not float.

DC Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ C$			$T_A = -40^\circ C$ to $+85^\circ C$		Units	Conditions
			Min	Typ	Max	Min	Max		
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage	2.0	1.50			1.50		V	
		3.0 - 5.5	$0.7 V_{CC}$			$0.7 V_{CC}$			
V_{IL}	LOW Level Input Voltage	2.0		0.50		0.50		V	
		3.0 - 5.5		$0.3 V_{CC}$		$0.3 V_{CC}$			
V_{OH}	HIGH Level Output Voltage	2.0	1.9	2.0		1.9		V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL} $I_{OH} = -50 \mu A$
		3.0	2.9	3.0		2.9			
		4.5	4.4	4.5		4.4			
		4.5	2.58			2.48			
V_{OL}	LOW Level Output Voltage	2.0		0.0	0.1		0.1	V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL} $I_{OL} = 50 \mu A$
		3.0		0.0	0.1		0.1		
		4.5		0.0	0.1		0.1		
		4.5		0.36		0.44			
I_{OZ}	3-STATE Output Off-State Current	5.5		± 0.25		± 2.5		μA	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND $V_{OUT} = V_{CC}$ or GND $V_{IN} \overline{OE} = V_{IH}$ or V_{IL}
I_{IN} ($\overline{T/R}$, \overline{OE})	Input Leakage Current	0 - 5.5		± 0.1		± 1.0		μA	$V_{IN} = 5.5V$ or GND
I_{CC}	Quiescent Supply Current	5.5		4.0		40.0		μA	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

November 1992
Revised March 1999

74VHC32 Quad 2-Input OR Gate

General Description

The VHC32 is an advanced high speed CMOS 2-Input OR Gate fabricated with silicon gate CMOS technology. It achieves the high speed operation similar to equivalent Bipolar Schottky TTL while maintaining the CMOS low power dissipation.

The internal circuit is composed of 4 stages including buffer output, which provide high noise immunity and stable output. An input protection circuit ensures that 0V to 7V can be applied to the input pins without regard to the supply voltage. This device can be used to interface 5V to 3V systems and two supply systems such as battery back up. This circuit prevents device destruction due to mismatched supply and input voltages.

Features

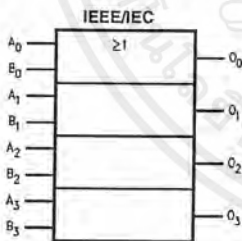
- High Speed:
 $t_{PD} = 3.8 \text{ ns (typ)}$ at $V_{CC} = 5V$
- Low Power Dissipation:
 $I_{CC} = 2 \mu\text{A (Max)}$ at $T_A = 25^\circ\text{C}$
- High Noise Immunity: $V_{NIH} = V_{NIL} = 28\% V_{CC}$ (Min)
- Power down protection is provided on all inputs
- Low Noise: $V_{OLP} = 0.8V$ (Max)
- Pin and Function Compatible with 74HC32

Ordering Code:

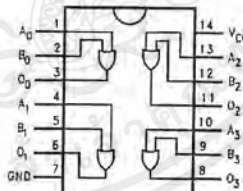
Order Number	Package Number	Package Description
74VHC32M	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-120, 0.150" Narrow
74VHC32SJ	M14D	14-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74VHC32MTC	MTC14	14-Lead Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP), JEDEC MO-153, 4.4mm Wide
74VHC32N	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Surface mount packages are also available on Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Logic Symbol



Connection Diagram



Pin Descriptions

Pin Names	Description
A_n, B_n	Inputs
O_n	Outputs

Truth Table

A	B	O
H	H	H
L	H	H
H	L	H
L	L	L

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage (V_{CC})	-0.5V to +7.0V
DC Input Voltage (V_{IN})	-0.5V to +7.0V
DC Output Voltage (V_{OUT})	-0.5V to $V_{CC} + 0.5V$
Input Diode Current (I_{IK})	-20 mA
Output Diode Current (I_{OK})	± 20 mA
DC Output Current (I_{OUT})	± 25 mA
DC V_{CC} /GND Current (I_{CC})	± 50 mA
Storage Temperature (T_{STG})	-65°C to +150°C
Lead Temperature (T_L) (Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

Supply Voltage (V_{CC})	2.0V to +5.5V
Input Voltage (V_{IN})	0V to +5.5V
Output Voltage (V_{OUT})	0V to V_{CC}
Operating Temperature (T_{OPR})	-40°C to +85°C
Input Rise and Fall Time (t_r, t_f)	$V_{CC} = 3.3V \pm 0.3V$ $V_{CC} = 5.0V \pm 0.5V$
	0 ~ 100 ns/V 0 ~ 20 ns/V

Note 1: Absolute Maximum Ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. The databook specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside databook specifications.

Note 2: Unused inputs must be held HIGH or LOW. They may not float.

DC Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ\text{C}$			$T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$		Units	Conditions
			Min	Typ	Max	Min	Max		
V_{IH}	HIGH Level	2.0	1.50			1.50		V	
	Input Voltage	3.0 - 5.5	$0.7 V_{CC}$			$0.7 V_{CC}$			
V_{IL}	LOW Level	2.0		0.50		0.50		V	
	Input Voltage	3.0 - 5.5		$0.3 V_{CC}$		$0.3 V_{CC}$			
V_{OH}	HIGH Level	2.0	1.9	2.0		1.9		V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}
		3.0	2.9	3.0		2.9			
	4.5	4.4	4.5		4.4		$I_{OH} = -50 \mu\text{A}$		
	3.0	2.58			2.48		$I_{OH} = -4 \text{ mA}$		
V_{OL}	LOW Level	2.0		0.0	0.1		0.1	V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}
		3.0		0.0	0.1		0.1		
	4.5		0.0	0.1		0.1	$I_{OL} = 8 \text{ mA}$		
	3.0			0.36		0.44	$I_{OL} = 4 \text{ mA}$		
I_{IN}	Input Leakage Current	0 - 5.5			± 0.1		± 1.0	μA	$V_{IN} = 5.5V$ or GND
I_{CC}	Quiescent Supply Current	5.5			2.0		20.0	μA	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND

Noise Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		Units	Conditions
			Typ	Limit		
V_{OLP} (Note 3)	Quiet Output Maximum	5.0	0.3	0.8	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
	Dynamic V_{OL}					
V_{OLV} (Note 3)	Quiet Output Minimum	5.0	-0.3	-0.8	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
	Dynamic V_{OL}					
V_{IHD} (Note 3)	Minimum HIGH Level	5.0		3.5	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
V_{ILD} (Note 3)	Maximum LOW Level	5.0		1.5	V	$C_L = 50 \text{ pF}$

Note 3: Parameter guaranteed by design.

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR™

November 1992
Revised April 1999

74VHC374

Octal D-Type Flip-Flop with 3-STATE Outputs

General Description

The VHC374 is an advanced high speed CMOS octal flip-flop with 3-STATE output fabricated with silicon gate CMOS technology. It achieves the high speed operation similar to equivalent Bipolar Schottky TTL while maintaining the CMOS low power dissipation. This 8-bit D-type flip-flop is controlled by a clock input (CP) and an output enable input (OE). When the OE input is HIGH, the eight outputs are in a HIGH impedance state.

An input protection circuit ensures that 0V to 7V can be applied to the input pins without regard to the supply voltage. This device can be used to interface 5V to 3V systems

and two supply systems such as battery back up. This circuit prevents device destruction due to mismatched supply and input voltages.

Features

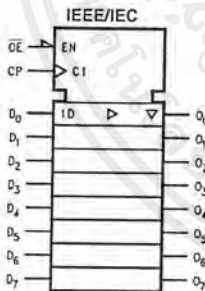
- High Speed: $t_{PD} = 5.4$ ns (typ) at $V_{CC} = 5$ V
- High noise immunity: $V_{NIH} = V_{NIL} = 28\% V_{CC}$ (Min)
- Power down protection is provided on all inputs
- Low power dissipation: $I_{CC} = 4$ μ A (Max) @ $T_A = 25^\circ$ C
- Pin and function compatible with 74HC374

Ordering Code:

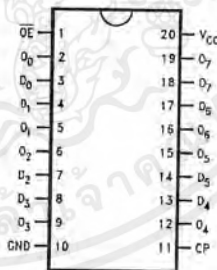
Order Number	Package Number	Package Description
74VHC374M	M20B	20-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-013, 0.300" Wide
74VHC374SJ	M20D	20-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
74VHC374MTC	MTC20	20-Lead Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP), JEDEC MO-153, 4.4mm Wide
74VHC374N	N20A	20-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300" Wide

Surface mount packages are also available on Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

Logic Symbol



Connection Diagram



Pin Descriptions

Pin Names	Description
D_0 - D_7	Data Inputs
CP	Clock Pulse Input
\overline{OE}	3-STATE Output Enable Input
Q_0 - Q_7	3-STATE Outputs

Functional Description

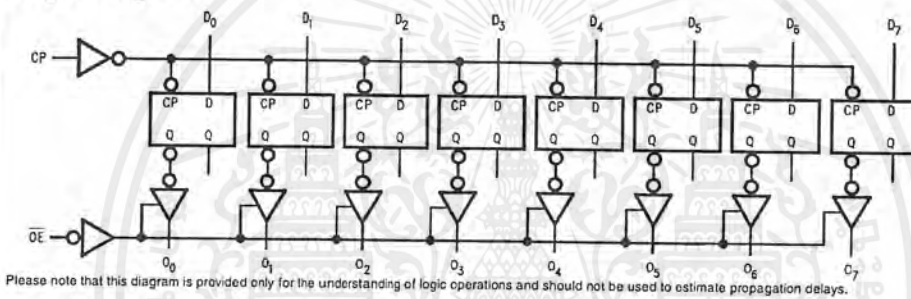
The VHC374 consists of eight edge-triggered flip-flops with individual D-type inputs and 3-STATE true outputs. The buffered clock and buffered Output Enable are common to all flip-flops. The eight flip-flops will store the state of their individual D inputs that meet the setup and hold time requirements on the LOW-to-HIGH Clock (CP) transition. With the Output Enable (\overline{OE}) LOW, the contents of the eight flip-flops are available at the outputs. When the \overline{OE} is HIGH, the outputs go to the high impedance state. Operation of the \overline{OE} input does not affect the state of the flip-flops.

Truth Table

Inputs			Outputs
D_n	CP	\overline{OE}	O_n
H	↗	L	H
L	↗	L	L
X	X	H	Z

H = HIGH Voltage Level
 L = LOW Voltage Level
 X = Immaterial
 Z = High Impedance
 ↗ = LOW-to-HIGH Transition

Logic Diagram



Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage (V_{CC})	-0.5V to +7.0V
DC Input Voltage (V_{IH})	-0.5V to +7.0V
DC Output Voltage (V_{OUT})	-0.5V to $V_{CC} + 0.5V$
Input Diode Current (I_{IK})	-20 mA
Output Diode Current	± 20 mA
DC Output Current (I_{OUT})	± 25 mA
DC V_{CC}/GND Current (I_{CC})	± 75 mA
Storage Temperature (T_{STG})	-65°C to +150°C
Lead Temperature (T_L) (Soldering, 10 seconds)	260°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

Supply Voltage (V_{CC})	2.0V to +5.5V
Input Voltage (V_{IN})	0V to +5.5V
Output Voltage (V_{OUT})	0V to V_{CC}
Operating Temperature (T_{OPR})	-40°C to +85°C
Input Rise and Fall Time (t_r, t_f)	
$V_{CC} = 3.3V \pm 0.3V$	0 ns/V - 100 ns/V
$V_{CC} = 5.0V \pm 0.5V$	0 ns/V - 20 ns/V

Note 1: Absolute Maximum Ratings are values beyond which the device may be damaged or have its useful life impaired. The databook specifications should be met, without exception, to ensure that the system design is reliable over its power supply, temperature, and output/input loading variables. Fairchild does not recommend operation outside databook specifications.

Note 2: Unused inputs must be held HIGH or LOW. They may not float.

DC Electrical Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ\text{C}$			$T_A = -40^\circ\text{C to } +85^\circ\text{C}$		Units	Conditions	
			Min	Typ	Max	Min	Max			
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage	2.0 3.0 - 5.5	1.50			1.50	0.7 V_{CC}	V		
V_{IL}	LOW Level Input Voltage	2.0 3.0 - 5.5			0.50 0.3 V_{CC}		0.50 0.3 V_{CC}	V		
V_{OH}	HIGH Level Output Voltage	2.0	1.9	2.0		1.9		V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OH} = -50 \mu\text{A}$
		3.0	2.9	3.0		2.9				
		4.5	4.4	4.5		4.4		V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OH} = -4 \text{ mA}$ $I_{OH} = -8 \text{ mA}$
		3.0	2.58			2.48				
4.5	3.94			3.80						
V_{OL}	LOW Level Output Voltage	2.0		0.0	0.1		0.1	V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OL} = 50 \mu\text{A}$
		3.0		0.0	0.1		0.1			
		4.5		0.0	0.1		0.1	V	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL}	$I_{OL} = 4 \text{ mA}$ $I_{OL} = 8 \text{ mA}$
		3.0			0.36		0.44			
4.5			0.36		0.44					
I_{OZ}	3-STATE Output Off-State Current	5.5		± 0.25		± 2.5	μA	$V_{IN} = V_{IH}$ or V_{IL} $V_{OUT} = V_{CC}$ or GND		
I_{IN}	Input Leakage Current	0 - 5.5		± 0.1		± 1.0	μA	$V_{IN} = 5.5V$ or GND		
I_{CC}	Quiescent Supply Current	5.5		4.0		40.0	μA	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND		

Noise Characteristics

Symbol	Parameter	V_{CC} (V)	$T_A = 25^\circ\text{C}$		Units	Conditions
			Typ	Limits		
V_{OLP} (Note 3)	Quiet Output Maximum Dynamic V_{OL}	5.0	0.6	0.9	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
V_{OLV} (Note 3)	Quiet Output Minimum Dynamic V_{OL}	5.0	-0.6	-0.9	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
V_{IHD} (Note 3)	Minimum HIGH Level Dynamic Input Voltage	5.0		3.5	V	$C_L = 50 \text{ pF}$
V_{ILD} (Note 3)	Maximum LOW Level Dynamic Input Voltage	5.0		1.5	V	$C_L = 50 \text{ pF}$

Note 3: Parameter guaranteed by design.



March 1998

DM74LS14

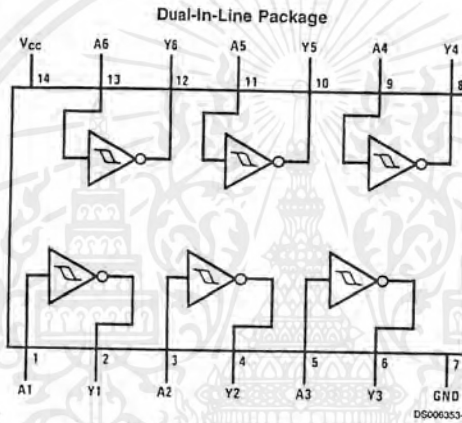
Hex Inverters with Schmitt Trigger Inputs

General Description

This device contains six independent gates each of which performs the logic INVERT function. Each input has hyster-

esis which increases the noise immunity and transforms a slowly changing input signal to a fast changing, jitter free output.

Connection Diagram



Order Number 54LS14DMQB, 54LS14FMQB,
 54LS14LMQB, DM74LS14M or DM74LS14N
 See Package Number E20A, J14A, M14A, N14A or W14B

Function Table

$$Y = \bar{A}$$

Input	Output
A	Y
L	H
H	L

H = High Logic Level
 L = Low Logic Level

DM74LS14 Hex Inverters with Schmitt Trigger Inputs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

Supply Voltage	7V	54LS	-55°C to +125°C
Input Voltage	7V	DM74LS	0°C to +70°C
Operating Free Air Temperature Range		Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	54LS14			DM74LS14			Units
		Min	Nom	Max	Min	Nom	Max	
V _{CC}	Supply Voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V _{T+}	Positive-Going Input Threshold Voltage (Note 2)	1.5	1.6	2.0	1.4	1.6	1.9	V
V _{T-}	Negative-Going Input Threshold Voltage (Note 2)	0.6	0.8	1.1	0.5	0.8	1	V
HYS	Input Hysteresis (Note 2)	0.4	0.8		0.4	0.8		V
I _{OH}	High Level Output Current			-0.4			-0.4	mA
I _{OL}	Low Level Output Current			4			8	mA
T _A	Free Air Operating Temperature	-55		125	0		70	°C

Note 1: The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the "Electrical Characteristics" table are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

Electrical Characteristics

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 3)	Max	Units	
V _I	Input Clamp Voltage	V _{CC} = Min, I _I = -18 mA			-1.5	V	
V _{OH}	High Level Output Voltage	V _{CC} = Min, I _{OH} = Max V _{IL} = Max	54LS DM74	2.5 2.7	3.4 3.4	V	
V _{OL}	Low Level Output Voltage	V _{CC} = Min, I _{OL} = Max V _{IH} = Min V _{CC} = Min, I _{OL} = 4 mA	54LS DM74 DM74		0.25 0.35 0.25	0.4 0.5 0.4	V
I _{T+}	Input Current at Positive-Going Threshold	V _{CC} = 5V, V _I = V _{T+}	DM74		-0.14	mA	
I _{T-}	Input Current at Negative-Going Threshold	V _{CC} = 5V, V _I = V _{T-}	DM74		-0.18	mA	
I _I	Input Current @ Max Input Voltage	V _{CC} = Max, V _I = 7V V _{CC} = Max, V _I = 10.0V	DM74 54LS		0.1	mA	
I _{IH}	High Level Input Current	V _{CC} = Max, V _I = 2.7V			20	μA	
I _{IL}	Low Level Input Current	V _{CC} = Max, V _I = 0.4V			-0.4	mA	
I _{OS}	Short Circuit Output Current	V _{CC} = Max (Note 4)	54LS DM74	-20 -20	-100 -100	mA	
I _{CCH}	Supply Current with Outputs High	V _{CC} = Max		8.6	16	mA	
I _{CCL}	Supply Current with Outputs Low	V _{CC} = Max		12	21	mA	

Note 2: V_{CC} = 5V.

Note 3: All typicals are at V_{CC} = 5V, T_A = 25°C.

Note 4: Not more than one output should be shorted at a time, and the duration should not exceed one second.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้