

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนแกน BALL AND BEAM CONTROL SYSTEM



โดย
นาย สิทธิศักดิ์ มณีแสง

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 45737
วัน, เดือน, ปี 13 ก.พ. 2546

b.....
i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน
BALL AND BEAM CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

BALL AND BEAM CONTROL SYSTEM

ผู้จัดทำ นายสิทธิศักดิ์ มณีแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

โดย

นายสิทธิศักดิ์ มณีแสง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 41014461

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ถาวร เบญจนาสุทธี

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานโดยใช้กล้องดิจิทัลวีดีโอที่ต่อเข้ากับพอร์ตยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัส (USB) เป็นตัวตรวจจับในการวัดตำแหน่งลูกบอลและส่งไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาวิซชวลเบสิกแล้วส่งข้อมูลออกจากพอร์ตขนานไปควบคุมเสต็ปปีงมอเตอร์ที่ต่อกับคานผ่านทางสายพาน โดยเริ่มจากประกอบโครงสร้างแบบจำลองเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและวัดการตอบสนองของระบบจากแบบจำลอง จากนั้นจึงออกแบบตัวควบคุมพีดีสำหรับระบบควบคุมเวลาดิสครีต โดยปรับแต่งค่าเกน K จากการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคานได้ และมีความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BALL AND BEAM CONTROL SYSTEM

By

Mr. Sitthisak Maneesang

Advisor

Taworn Benjanarasuth

Academic Year: 2001

ABSTRACT

This project is studying the ball and beam control system by using a digital video camera that connected by universal serial bus port for controlling the position of a ball. Video camera sends the data to be computed by computer using Visual Basic language and then sends the control data to parallel port for controlling the stepping motor. Stepping motor is connected to the beam by pulleys. First, the structure of ball and beam control system is constructed and its mathematical model is found. Second, the gain of the PD controller is adjusted for the discrete system. The experimental result shows that the position of the ball can be controlled with 7 percent error.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้และตัวโครงงานนั้น สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความกรุณาเป็นอย่างสูงจากอาจารย์ถาวร เบญจนราษฎร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและยังคอยให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งและรองศาสตราจารย์ ดร. จงกล งามวิวิทย์ ที่ได้ให้ความรู้และข้อคิดเป็นอันมาก และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่ผู้จัดทำ ซึ่งผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ของผู้จัดทำที่ได้ให้การสนับสนุนทุกอย่างและเป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เท็น แจ็ค เบนซ์ ลัก ป็อง โก้ โบ ริน ต้ม ทอม ก้า หิน ปุ่ม น้อย และเพื่อนทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้และคอยช่วยเหลือในการเรียนและเป็นทีปปรึกษา จนทำให้ผู้จัดทำได้ทำงานนี้จนสำเร็จลงได้ ขอขอบคุณน้องๆ ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดี ตลอดจนขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำ

ผู้จัดทำ

นายสิทธิศักดิ์ มณีแสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	i
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญรูปภาพ.....	vii
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการ.....	2
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ.....	2
1.4 เนื้อหาที่จะกล่าวในปริญญานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของระบบควบคุม.....	4
2.2 ทฤษฎีของการประมวลผลภาพ.....	5
2.2.1 การประมวลผลภาพเชิงเลข.....	6
2.2.1.1 การแทนภาพด้วยข้อมูลแบบดิจิทัล.....	6
2.2.1.2 ลักษณะการจัดเก็บข้อมูลภาพดิจิทัล.....	7
2.2.2 สัญญาณข้อมูลภาพจากดิจิทัลวีดีโอ.....	8
2.2.3 ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป.....	9
2.2.3.1 รูปแบบของไฟล์ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป.....	9
2.2.3.2 โครงสร้างของไฟล์ข้อมูลชนิดบิตแมป.....	9
2.2.4 การสร้างภาพไบนารี.....	13
2.2.4.1 การหาค่าเทรชโฮลโดยการกำหนดไว้ล่วงหน้า.....	14
2.2.4.2 การหาค่าเทรชโฮลจากค่ากลาง.....	15
2.2.5 เทคนิคการตามรอยขอบภาพ.....	15
2.3 เสาตีปึงมอเตอร์.....	16
2.3.1 การควบคุมการทำงานของเสาตีปึงมอเตอร์.....	16
2.3.1.1 การกระตุ้นแบบซิงเกิลเฟส.....	16
2.3.1.2 การกระตุ้นแบบสองเฟส.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
2.3.1.3 การกระตุ้นแบบครึ่งเสต็ป.....	17
2.4 พอร์ตขนาน.....	17
2.5 ยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัต.....	18
บทที่ 3 ส่วนประกอบของระบบ.....	19
3.1 แสดงแผนผังรวมของระบบ.....	19
3.2 คอมพิวเตอร์และการควบคุม.....	19
3.3 กล้องดิจิตอลวีดีโอ.....	21
3.3.1 สิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานกล้องวีดีโอ.....	21
3.3.2 คุณสมบัติในกล้องดิจิตอลวีดีโอ.....	22
3.4 เสต็ปโป่งมอเตอร์.....	22
3.4.1 ชนิดของเสต็ปโป่งมอเตอร์.....	22
3.4.2 การทำงานของเสต็ปโป่งมอเตอร์.....	23
3.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก.....	24
3.6 วงจรกำเนิดแรงดัน 12 โวลท์และ 5 โวลท์.....	25
3.7 โครงสร้างทางกลศาสตร์.....	26
3.7.1 ลูกบอลและคาน.....	27
3.7.2 โครงสร้างยึดจับ.....	27
3.7.3 ลูกปืนและสายพานเครื่องจักร.....	28
3.7.4 สายยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัตของกล้องวีดีโอจับภาพ.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	29
4.1 ผลการทดลองในส่วนของโปรแกรม.....	29
4.2 ผลการทดลองในส่วนของโครงสร้างแบบจำลอง.....	31
4.2.1 การติดตั้งเสต็ปโป่งมอเตอร์และทำการทดสอบ.....	31
4.2.2 การติดตั้งคานและทำการทดสอบ.....	32
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์.....	34
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	34
5.2 วิจารณ์การทดลอง.....	34
5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำโครงการ.....	35
5.5 แนวทางการพัฒนาแก้ไข.....	35
หนังสืออ้างอิง.....	36
ภาคผนวก ก แสดงโปรแกรมวิชชวลเบสิก.....	37
ภาคผนวก ข สมการของลากรานจ์.....	47
ภาคผนวก ค วงจรแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอก.....	57



สารบัญรูปรภาพ

หน้า

บทที่ 1

รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของลูกบอลบนคานใน 2 มิติ.....	1
---	---

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 ระบบประมวลผลภาพดิจิทัล.....	5
รูปที่ 2.2 ภาพการส่งสัญญาณวิดีโอ ที่อัตรา 24 เฟรมต่อวินาที.....	9
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของบิตแมปไฟล์.....	10
รูปที่ 2.4 แสดงการเก็บข้อมูลของแต่ละพิกเซล.....	13
รูปที่ 2.5 ภาพแบบ ไบนารีและข้อมูลของแต่ละพิกเซล.....	13

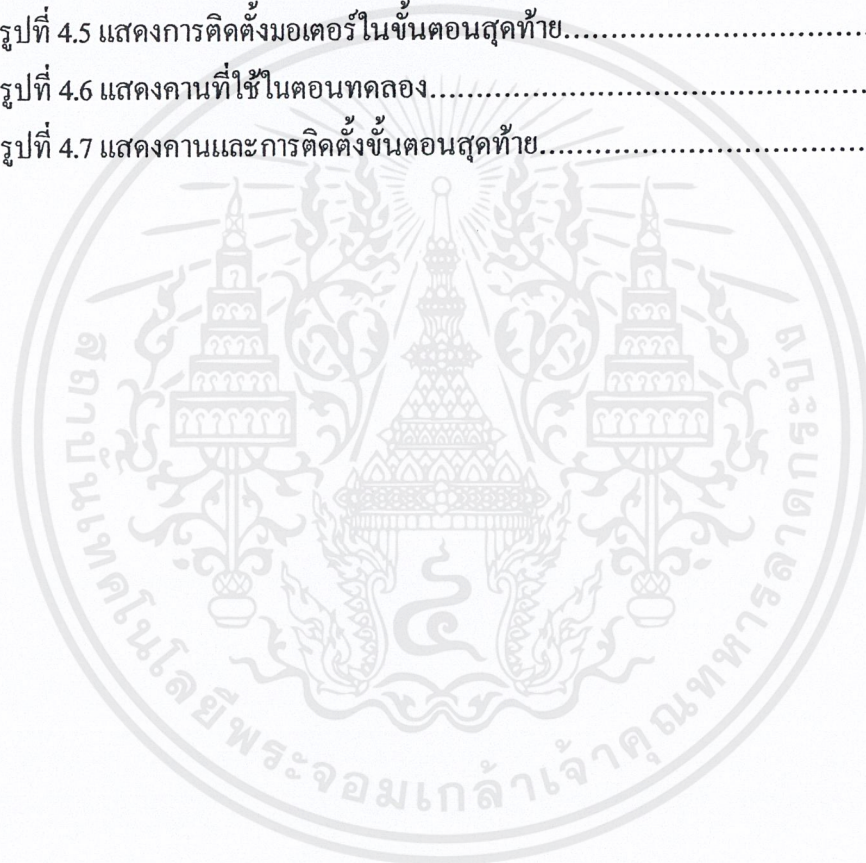
บทที่ 3

รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังรวมของระบบ.....	19
รูปที่ 3.2 โพลีชาร์ตของระบบทั้งหมด.....	20
รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะภายนอกของกล่องดิจิทัลวิดีโอ.....	21
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะภายในของกล่องดิจิทัลวิดีโอ.....	21
รูปที่ 3.5 แสดง โครงสร้างไฮบริดจ์สเต็ปมอเตอร์ที่มีจำนวนสเต็ปต่อรอบเท่ากับ 12....	23
รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเต็ปมอเตอร์แบบเต็มสเต็ปหนึ่งเฟส.....	24
รูปที่ 3.7 แสดงสเต็ปมอเตอร์ที่ใช้.....	24
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก.....	25
รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดแรงดัน 12 โวลต์.....	25
รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดแรงดัน 5 โวลต์.....	25
รูปที่ 3.11 แสดงชิ้นงานทั้งหมดจากมุมมองด้านบน.....	26
รูปที่ 3.12 แสดงชิ้นงานทั้งหมดจากมุมมองด้านข้าง.....	26
รูปที่ 3.13 แสดงลูกบอลที่ใช้วางอยู่บนคาน.....	27
รูปที่ 3.14 แสดง โครงสร้างของชิ้นงาน.....	27
รูปที่ 3.15 แสดงตัวลูกปืนและสายพาน.....	28
รูปที่ 3.16 แสดงหัวต่อของสายพอร์ตยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัส.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 แสดงการนำภาพเข้าไปแสดงในโปรแกรมที่เขียนโดยภาษาวิชวลเบสิก.....	29
รูปที่ 4.2 แสดงการนำภาพไปทำการวิเคราะห์ภาพ.....	30
รูปที่ 4.3 แสดงการเก็บเฉพาะตำแหน่งลูกบอล.....	30
รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ในการทดลอง.....	31
รูปที่ 4.5 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ในขั้นตอนสุดท้าย.....	32
รูปที่ 4.6 แสดงคานที่ใช้ในขั้นตอนทดลอง.....	33
รูปที่ 4.7 แสดงคานและการติดตั้งขั้นตอนสุดท้าย.....	33



บทที่ 1

บทนำ

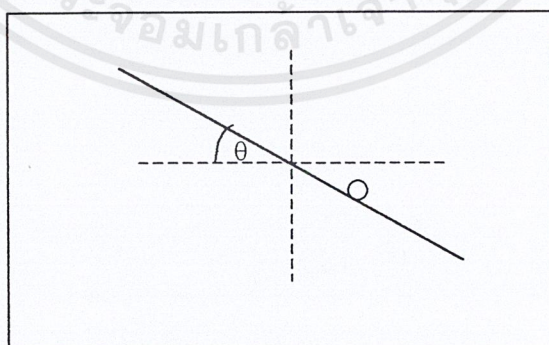
1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในการศึกษาวิชาการระบบควบคุมนั้นจะมีสมการหลายๆ แบบ ซึ่งในการทำโครงการนั้นเราจะนำความรู้ที่ศึกษามาในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การจำลองการตอบสนองของระบบ พร้อมทั้งออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับ โดยทำการประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง และนำมาทดลองจริง

การควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน เป็นการควบคุมระบบพลศาสตร์(dynamic) แบบไม่เป็นเชิงเส้น(non-linear system) แบบหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้การควบคุมแบบป้อนกลับอัตโนมัติในการควบคุมระบบได้ในหลายวิธีทั้งแบบเสตทฟีดแบ็ค(state feedback) แบบพีไอ(PI) แบบพีดี(PD) แบบพีไอดี(PID) และแบบอื่นๆ

ระบบดังกล่าวประกอบด้วย คานรูปตัววี และลูกบอลทรงกลม ซึ่งลูกบอลสามารถเคลื่อนที่ได้ในแกนเดียว โดยการกลิ้งไปมาบนคาน และปราศจากการลื่นไถล สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของลูกบอลทำได้โดยควบคุมการหมุนของคาน

สำหรับเป้าหมายของการควบคุมระบบ คือต้องการควบคุมลูกบอลให้หยุดนิ่งอยู่บนคาน ณ ตำแหน่งใดๆ ก็ได้ตามต้องการ โดยคานมีการเคลื่อนที่น้อยที่สุด ใช้เวลาน้อยที่สุดและมีความผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 1 แสดงแบบจำลองของลูกบอลบนคานใน 2 มิติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการจัดทำโครงการ

- 1) ทำการศึกษาและทดลองสร้างระบบควบคุมซึ่งมีวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์(electronic) เป็นส่วนประกอบและทำการควบคุมระบบ โดยใช้คอมพิวเตอร์(computer) โปรแกรมวิชวลเบสิก(Visual Basic)
- 2) ทำการศึกษาและทดลองการใช้อุปกรณ์วัดต่างๆ ในระบบควบคุม
- 3) ทำการศึกษาทฤษฎีของการควบคุมเสถียรภาพใน ระบบควบคุมเวลาติดครีตและทดลองควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมพีดี ซึ่งออกแบบโดยวิธีกำหนดตำแหน่งโพล(pole) และค่าความผิดพลาด(error) สำหรับการป้อนกลับระยะทาง

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ

การศึกษาและจัดทำโครงการนั้นเริ่มต้นการสร้างแบบจำลองมาแล้วศึกษาเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ หลังจากนั้นทำการประมาณค่าระบบซึ่งไม่เป็นเชิงเส้น ให้เป็นระบบเชิงเส้น โดยการสร้างเงื่อนไขสำหรับการประมาณค่าระบบ จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมพีดี(PD controller) ซึ่งออกแบบจากการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ป้อนกลับมาจากการวัดของกล้องดิจิตอลที่ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับ

โครงการนี้จะต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ(image processing) สำหรับใช้วิเคราะห์ภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอ(video camera) เพื่อให้คอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมรู้ว่าลูกบอลอยู่ที่ตำแหน่งใด และความรู้เกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์(motor) สำหรับใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของคาน(beam) ในการทำโครงการนี้เราได้เขียน โปรแกรมส่งภาพมาจากกล้องได้โดยตรงทำให้เราสามารถนำค่ามาคำนวณได้อย่างรวดเร็วซึ่ง ไม่ต้องมาจับภาพจากหน้าจอเอาไปคำนวณซึ่งให้ผลการตอบสนองที่ช้ากว่า

จากนั้นออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน พร้อมทั้งประกอบขึ้นเป็นระบบจริง ทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบและหาผลสรุปและวิเคราะห์ ซึ่งมีการทดลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ กัน และมีการใช้สายพาน มอเตอร์ และคานที่แตกต่างกันในการทดสอบแบบจำลองที่มี โดยวัตถุประสงค์หลักของการศึกษาปัญหานี้ คือ จะสามารถควบคุมลูกบอลและคานได้อย่างไร โดยให้สถานะสุดท้ายของลูกบอลอยู่นิ่งในแนวระดับ โดยใช้อุปกรณ์

ตรวจจับที่มีความละเอียดค่อนข้างสูง ซึ่งในการเริ่มทำงานจะปรับค่าให้ลูกบอลอยู่ในแนวระดับตรงกึ่งกลางของคาน

1.4 เนื้อหาที่จะกล่าวในปริิญญาณิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปริิญญาณิพนธ์ฉบับนี้ คือ ในบทที่ 2 จะแสดงวิธีคิดและทฤษฎีเบื้องต้น ทั้งการออกแบบระบบควบคุมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และหลักการประมวลผลภาพ รวมถึงหลักการใช้เสต็ปมอเตอร์ว่ามีการทำงานอย่างไร ในบทที่ 3 จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบระบบจริงและส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบอย่างละเอียด รวมถึงวิธีการคิดและเหตุผลที่นำมาใช้ ในบทที่ 4 เป็นส่วนผลที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบด้วยผลการทดลองที่ละขั้นตอนและเปรียบเทียบกับตำแหน่งความคลาดเคลื่อนของระยะทางของลูกบอลในระบบ ส่วนในบทที่ 5 นั้น จะเป็นบทวิจารณ์และสรุปผลการดำเนินการและปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไขรวมไปถึงแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต ในภาคผนวกนั้นก็รวมการเขียนโปรแกรมทั้งหมดที่ใช้คือ โปรแกรมควบคุมลูกบอล โปรแกรมวิเคราะห์ภาพและโปรแกรมส่งรับข้อมูลทางพอร์ตขนาน รวมทั้งการแสดงผลของลากรานจ์(Lagrange) ที่ใช้ในการหาสมการของระบบควบคุมลูกบอลบนคานด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้นของระบบควบคุม

หลักการของระบบควบคุมมีการนำไปประยุกต์ใช้ในชีวิตจริงเป็นจำนวนมาก ซึ่งในที่นี้เราจะยกตัวอย่างมา 1 ระบบ แล้วนำระบบที่เลือกมาทดลองดูว่าระบบที่เราใช้สามารถควบคุมอุปกรณ์ที่อยู่ได้ตามในทฤษฎีหรือไม่

ระบบควบคุมนั้นแบ่งเป็น 2 แบบ คือระบบควบคุมแบบเปิด(open loop) ซึ่งจะไม่มีการป้อนค่าของผลที่ได้ภายหลังนั้นไปควบคุมระบบอีกครั้ง กับระบบควบคุมแบบปิด(close loop) คือมีการป้อนผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต(input) ที่เข้ามา ในการทำโครงการนี้ เราได้เลือกระบบควบคุมแบบปิดที่มีการป้อนกลับเป็นลบ(negative feedback) โดยการหาระยะขจัดจากตำแหน่งอ้างอิงที่กำหนด โดยจะมีอุปกรณ์พื้นฐาน คือ กล้องวิดีโอซึ่งจะส่งข้อมูลเข้าไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก ในการทดลองจำลองระบบควบคุม จากนั้นจะส่งข้อมูลให้มอเตอร์ทำงานเร็วช้า ไปทางซ้ายหรือไปทางขวา

ระบบควบคุมแบบพีดี(PD Controller) เป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเราสามารถประมาณหาสมการในระบบเวลาที่ต่อเนื่องได้ โดยแสดงได้ดังสมการ 1.1

$$U(s) = (K_p + K_d \cdot s)E(s) \quad (1.1)$$

หรือ

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot d(e(t))/dt \quad (1.2)$$

ในการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ในระบบเวลาดีสครีต นั้นเราจะได้สมการของ

$$d(e(t))/dt \text{ เป็น } [e(k) - e(k-1)]/T \quad (1.3)$$

เมื่อ $e(k)$ เป็นค่าความผิดพลาดในปัจจุบัน

$e(k-1)$ เป็นค่าความผิดพลาดในอดีตที่เวลา T วินาทีก่อนการวัดค่าผิดพลาดในปัจจุบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T เป็นช่วงเวลาคู่มัญญาน

ดังนั้นเราจะได้ว่าจากสมการ 1.1 และ 1.2 นั้น สามารถเขียนเป็นสมการในระบบเวลาดีสครีตว่า

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_d \cdot [e(k) - e(k-1)] / T \quad (1.4)$$

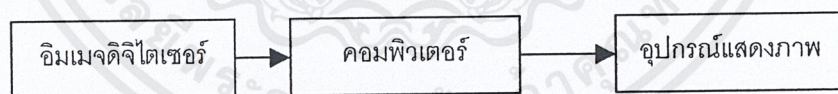
จากสมการที่ 1.4 ที่ได้เราจะนำไปเขียนเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาควบคุมระบบโดยใช้โปรแกรมวิชวลเบสิก

2.2 ทฤษฎีของการประมวลผลภาพ

ในการประมวลผลภาพดิจิทัล(digital image processing) นั้นต้องใช้อุปกรณ์พื้นฐาน 3 ชนิด คือ

- (1) หน่วยประมวลผล (process unit) ได้แก่ คอมพิวเตอร์
- (2) อุปกรณ์อินพุต(input device) ได้แก่ อิมเมจดิจิไตเซอร์(image digitizer)
- (3) อุปกรณ์เอาต์พุต(output device) ได้แก่ อุปกรณ์แสดงภาพ

ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบประมวลผลภาพดิจิทัล

โดยทั่วไปนั้น ข้อมูลภาพยังไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ได้ทันทีเนื่องจากคอมพิวเตอร์ทำงานเกี่ยวกับระบบตัวเลข จึงต้องแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบของตัวเลขก่อน เราเรียกการแปลงนี้ว่าดิจิทัลไลเซชัน(digitization) ดังรูปที่ 2.2 โดยภาพจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆ เรียกว่า พิกเซล(pixel) ซึ่งมีลักษณะเป็นตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยแต่ละพิกเซลจะมีระดับความสว่างและความมืดแตกต่างกัน โดยในแต่ละพิกเซลจะถูกระบุตำแหน่งโดย (x,y)

โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลภาพจะมีความเข้มตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไป แต่ที่ใช้กันมากจะใช้กันที่ค่าระดับความเข้มของจุดภาพเท่ากับ 256 ระดับ ซึ่งจะทำให้ค่าของจุดภาพอยู่ในช่วง 0 – 255 โดยใช้เนื้อที่เก็บข้อมูลขนาด 1 ไบต์ (8 บิต) สำหรับข้อมูล 1 จุดภาพ ($2^8 = 256$) ในกรณีที่ต้องการภาพที่มีความละเอียดของระดับความเข้มสูง ๆ ก็จะต้องการจำนวนบิตสำหรับเก็บข้อมูลมากกว่า 8 บิต อาจจะเป็น 16 หรือ 24 บิต 2^{16} และ 2^{24} ระบบการประมวลผลภาพนั้นจะมีขนาดขึ้นกับความละเอียดของภาพ คือถ้าภาพมีความละเอียดมากก็จะใช้เนื้อที่ความจำของระบบมากในการเก็บข้อมูล

2.2.1 การประมวลผลภาพเชิงเลข

การประมวลผลภาพเชิงตัวเลข หมายถึง การนำภาพที่พบทั่วไปมาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยภาพที่นำมาประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์นี้จะถูกแทนที่ด้วยตัวเลขให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ แต่ภาพที่ได้โดยส่วนมากแล้วจะเป็นภาพที่ได้จากตัวรับสัญญาณ ซึ่งอยู่ในรูปของฟังก์ชัน $f(x,y)$ ที่ต่อเนื่องในระนาบ 2 มิติ โดยจะเป็นสัดส่วนกับความสว่างหรือความเข้มของภาพที่ตำแหน่ง (x,y) ซึ่งเรียกว่าระดับสีเทา(gray level)

2.2.1.1 การแทนภาพด้วยข้อมูลแบบดิจิทัล ภาพข้อมูลแบบดิจิทัล เป็นภาพที่ถูกตัดแปลงมาจากอนาลอก อยู่ในรูปของตัวเลข โดยภาพอนาลอกถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่เล็ก ๆ ที่เรียกว่าพิกเซล ในแต่ละพิกเซลจะถูกระบุตำแหน่งโดย (x,y) และระดับค่าสีเทาของพิกเซล โดยเราสามารถแปลงภาพเป็นข้อมูลแบบดิจิทัลได้โดยมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้

เมื่อเรานำสัญญาณอนาลอกที่ต้องการประมวลผลมาผ่านส่วนที่เรียกว่าดิจิไทเซอร์ (digitizer) ซึ่งมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล อุปกรณ์ส่วนนี้ ได้แก่ กล้องโทรทัศน์ดิจิไทเซอร์ จากนั้นทำการควอนไทซ์(quantizing) เพื่อที่จะประมวลผลสัญญาณด้วยระบบคอมพิวเตอร์ฟังก์ชันของภาพ $f(x,y)$ จะถูกทำให้เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทั้งระนาบของภาพ ซึ่งเราเรียกว่า การสุ่มภาพ(image sampling) ของฟังก์ชันที่ได้เรียกว่า การควอนไทเซชันระดับสีเทา(gray level quantization) ก็จะได้ข้อมูลที่เป็นดิจิทัล

สมมติว่าสัญญาณภาพต่อเนื่อง $f(x,y)$ ถูกดิจิไทซ์ระนาบ x และ y เป็นช่วงเท่า ๆ กัน เราสามารถจัด $f(x,y)$ ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ขนาด $N \times N$ ได้ดังสมการที่ 2.1

$$f(x,y) = \begin{matrix} f(0,0) & f(0,1) & f(0,2)\dots f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & f(1,2)\dots f(1,N-1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & f(N-1,2)\dots f(N-1,N-1) \end{matrix} \quad (2.1)$$

ซึ่งทางขวาของสมการจะเรียกได้ว่า ภาพดิจิทัล และทุก ๆ สมาชิกของเมทริกซ์จะเรียกว่า พิกเซล จากขบวนการสร้างภาพดิจิทัลข้างต้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถทราบขนาดของความละเอียดของภาพ $N \times N$ พิกเซล และจำนวนระดับของเกรย์สเกล(gray scale) ในทางปฏิบัติการทำควอนไทเซชันในระบบภาพดิจิทัล จะมีค่าดังสมการที่ 2.2

$$\text{เมื่อ } B = N \times N \times M \text{ บิต} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} B &= \text{ขนาดของข้อมูลภาพที่เป็นดิจิทัล} \\ G &= \text{จำนวนของเกรย์สเกลที่ต้องใช้ในการเก็บภาพ} \\ M &= \text{จำนวนบิตที่ใช้ในการแทนข้อมูลภาพ 1 พิกเซล} \end{aligned}$$

โดย M สามารถหาได้จาก

$$G = 2^M$$

2.2.1.2 ลักษณะการจัดเก็บข้อมูลภาพดิจิทัล โดยทั่วไปแล้ว ข้อมูลภาพจะมีความเข้มตั้งแต่ 2 ระดับ ขึ้นไป แต่ที่ใช้กันมากจะใช้กันที่ค่าระดับความเข้มของจุดภาพเท่ากับ 256 ระดับ ซึ่งทำให้ค่าของจุดภาพอยู่ในช่วง (0-255) โดยใช้เนื้อที่เก็บข้อมูลภาพขนาด 1 ไบต์ หรือ 8 บิต สำหรับข้อมูล 1 จุดภาพ ($2^8 = 256$) ในกรณีที่ต้องการภาพที่มีความละเอียดของระดับความเข้มสูง ๆ อาจจะต้องการจำนวนบิตสำหรับเก็บข้อมูลมากกว่า 8 บิต อาจเป็น 16 หรือ 24 บิต โดยค่าความเข้มของจุดภาพเท่ากับ 2^4 และ 2^{24} โดยจะแยกให้ชัดเจน ดังนี้

1. ภาพ 2 ระดับ คือ มีเพียงแต่จุดขาวกับจุดดำเท่านั้น โดยแต่ละจุดภาพเป็นข้อมูลขนาด 1 บิต
2. ภาพ 16 ระดับ คือ ในแต่ละจุดภาพจะมีขนาดของข้อมูล 4 บิต ซึ่งทำให้สามารถแสดงได้ 16 ระดับสี หรือ 16 เกรย์สเกล ขึ้นอยู่กับภาพนั้นเป็นภาพสีหรือขาวดำ
3. ภาพ 256 ระดับ คือ ในแต่ละจุดภาพจะมีขนาดของข้อมูล 8 บิต ซึ่งทำให้สามารถแสดงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

256 ระดับสี หรือ 256 เกรย์สเกล ขึ้นอยู่กับภาพนั้นเป็นภาพสีหรือขาวดำ

4. ภาพทิวทัศน์ (true color) คือ ในแต่ละจุดภาพจะมีขนาดของข้อมูล 24 บิตทำให้สามารถแสดงภาพได้เหมือนจริงที่สุด เพราะสามารถแสดงสีได้ถึง 16,777,216 ระดับสี โดยจะแสดงได้แต่ภาพสีเท่านั้น ไม่สามารถแสดงภาพขาวดำได้

การแสดงภาพนี้ใช้วิธีตั้งค่าของแม่สีในตารางสี โดยอาจเลือกสีเป็นแบบ 16 สี จาก 64 สี หรือ 16 สี จาก 262,144 สี หรือ 256 สี จาก 262,144 สี ขึ้นกับโหมดการแสดงผล สำหรับโหมดทิวทัศน์นั้น จะไม่มีการเลือกสี แต่จะแสดงผลโดยการส่งค่าสี RGB ผ่าน D/A ทีละ 8 บิต ออกไป ความแตกต่างของการแสดงภาพสีและขาวดำ คือ ภาพขาวดำจะต้องตั้งสีให้แม่สีทั้งสามมีค่าเท่ากัน เนื่องจาก VGA กำหนดให้แม่สีแต่ละสีใช้ได้เพียง 64 ระดับสีเท่านั้น หากต้องการให้เห็นทั้ง 256 ระดับ ต้องแสดงในโหมดทิวทัศน์ แล้วให้ RGB ที่ค่าเท่ากัน ซึ่งในโหมดนี้ จะสามารถใช้รีจิสเตอร์ได้ 8 บิต สำหรับแต่ละแม่สี

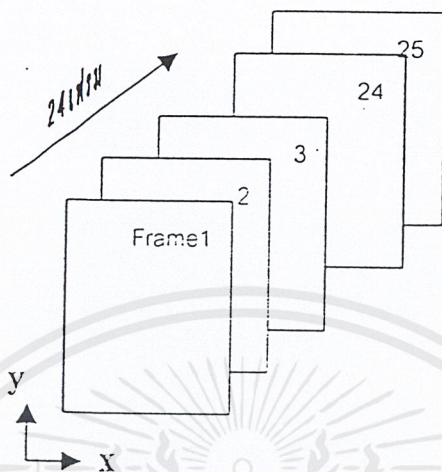
โดยทั่วไปวิธีการประมวลผลภาพเชิงเลขที่ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรู้จักวัตถุภายในภาพได้นั้น แบ่งได้เป็น 2 ระดับด้วยกัน คือ การประมวลผลภาพในระดับต่ำ (low level image processing) และการประมวลผลภาพในระดับสูง (high level image processing) การประมวลผลภาพระดับต่ำจะเป็นการประมวลผลเชิงตัวเลขเกือบหมด เพื่อหาตัวแปรต่างๆ มาอธิบายข้อมูลภาพ โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำตัวแปรเหล่านั้นไปใช้ในการประมวลผลระดับสูงต่อไป ซึ่งในโครงการนี้จะใช้เพียงการประมวลผลภาพระดับต่ำเท่านั้น เนื่องจากต้องการความรวดเร็วในการส่งข้อมูล

การประมวลผลภาพในระดับสูง เป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพในระดับต่ำมาตีความหรือเพื่อส่งให้คอมพิวเตอร์สามารถรู้จักและเข้าใจภาพได้สำหรับความแตกต่างของการประมวลผลภาพระดับต่ำและระดับสูง คือ ข้อมูลที่นำมาใช้ในการประมวลผล โดยที่การประมวลผลภาพในระดับต่ำจะใช้ความสว่างของจุดโดยตรง ส่วนการประมวลผลภาพระดับสูงนั้น ข้อมูลภาพที่นำมาประมวลผลจะถูกแสดงในรูปของสัญลักษณ์ ซึ่งจะแสดงถึงสิ่งต่างๆ ที่อยู่ในภาพ เช่น ขนาด หรือ รูปร่างของวัตถุในภาพ

2.2.2 สัญญาณข้อมูลภาพจากดิจิตอลวิดีโอ

การส่งสัญญาณข้อมูลภาพจากวิดีโอ จะมีลักษณะการส่งที่เป็นลำดับภาพเดี่ยวหรือเฟรม (frame) ที่ฉายต่อเนื่องกันดังรูปที่ 2.2 เช่น ระบบวิดีโอ NTSC จะส่งด้วยอัตราเร็ว 30 เฟรมต่อวินาที โดยดิจิตอลวิดีโอแต่ละเฟรมจะเป็นข้อมูลภาพดิจิตอลในลักษณะของเมตริกซ์ ซึ่งแต่ละจุดจะเรียก

ว่าพิกเซล มีค่าของระดับความเข้มสี โดยทั่วไปจะใช้เกรย์สเกลที่มีค่าตั้งแต่ 0-255 โดย 0 แทนความมืดมากที่สุด และ 255 แทนความสว่างมากที่สุด



รูปที่ 2.2 ภาพการส่งสัญญาณวิดีโอ ที่อัตรา 24 เฟรมต่อวินาที

2.2.3 ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป

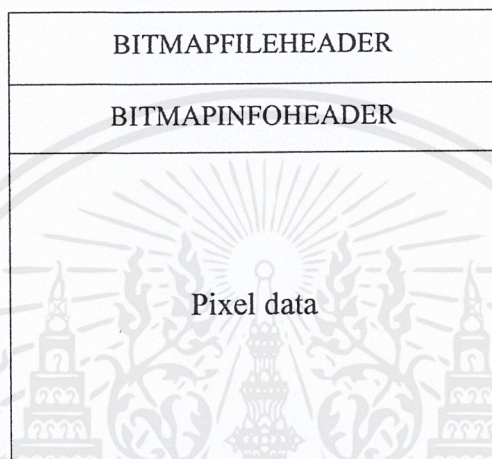
2.2.3.1 รูปแบบของไฟล์ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป รูปแบบของไฟล์ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป(bitmap) เป็นฟอร์แมตของวินโดว์บิตแมป ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับไฟล์กราฟฟิกบนวินโดว์ ซึ่งจะใช้ในการตัดต่อ หรือสำเนาภาพต่าง ๆ ลงบน คลิปบอร์ด(clipboard) เมื่อเวลาจัดเก็บไฟล์ที่มีนามสกุล .BMP ซึ่งเป็นฟอร์แมตที่ยังสามารถใช้เป็นวอลล์เปเปอร์(wallpaper) ได้อีกด้วย

2.2.3.2 โครงสร้างของไฟล์ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป โครงสร้างของไฟล์ข้อมูลภาพชนิดบิตแมป จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. ข้อมูลเฮดเดอร์(header)
2. ข้อมูลจานสี(palette)
3. ข้อมูลภาพ(data)

1. ข้อมูลเฮดเดอร์ คือ ข้อมูลที่อยู่บริเวณส่วนหัวของไฟล์ ซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูลที่บอกรายละเอียดต่าง ๆ ของภาพ เช่น ความกว้าง ความยาวของภาพ จำนวนสี จำนวนบิต ความละเอียดของภาพ

2. ข้อมูลงานสี ค่า เป็นค่าแม่สี RGB แล้วนำไปผสมบนหน้าจอแทน ไฟล์ข้อมูลชนิดบิตแมปมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ บิตแมปไฟล์เฮดเดอร์ (Bitmapfileheader) เป็นส่วนที่บอกข้อมูลของไฟล์ บิตแมปอินโฟ (bitmapinfo) เป็นส่วนที่แสดงขนาดและข้อมูลสีของภาพ ส่วนสุดท้าย คือ พิกเซลค่า (pixel data) เป็นส่วนเก็บข้อมูลแต่ละพิกเซล



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของบิตแมปไฟล์

บิตแมปอินโฟเฮดเดอร์

Byte	Data	Detail
1-2	File Type	Must be ASCII text "BM"
3-6	Size of file	In double word (32-bit integer)
7-10	Reverse for future	Must be zero
11-14	Byte offset to bitmap data	Offset from bitmapfileheader

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลในบิตแมปไฟล์เฮดเดอร์

บิตแมปอินโฟ

โครงสร้างของ บิตแมปอินโฟ เขียนได้เป็นดังนี้

```
typedef struct tagBITMAPINFO { // bmi
    BITMAPINFOHEADER        bmiHeader;
    RGBQUAD                 bmiColors[1];
}BITMAPINFO;
```

บิตแมปอินโฟ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ บิตแมปอินโฟเฮดเดอร์เป็นส่วนที่บอกขนาดและข้อมูลสีของภาพบิตแมป และ อาร์จีบีควอด(RGBQUAD) ซึ่งจะเก็บค่าตารางสีสำหรับเทียบค่าจากค่าสีของแต่ละพิกเซล

บิตแมปอินโฟเฮดเดอร์

โครงสร้างสามารถเขียนได้ดังนี้

```
typedef struct tagBITMAPINFOHEADER { // bmih
    DWORD        biSize;
    LONG         biWidth;
    LONG         biHeight;
    WORD         biPlanes;
    WORD         biBitCount;
    DWORD        biCompression;
    DWORD        biSizeImage;
    LONG         biXiPelsPerMeter;
    LONG         biYiPelsPerMeter;
    DWORD        biClrUsed;
    DWORD        biClrImportant;
}BITMAPINFOHEADER;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแต่ละฟิลด์(field) จะมีความหมายดังนี้

biSize	จำนวน ไบต์ของเฮดเดอร์(Header file)
biWidth, biHeight	บอกขนาดความกว้าง และความยาวของรูปภาพในพิกเซล
biPlanes	เป็น 1 เสมอ
biBitCount	จำนวนบิตต่อ 1 พิกเซล
biCompression	แสดงการบีบอัดข้อมูล
biSizeImage	บอกขนาดของไฟล์
biXiPelsPerMeter	ความยาวแนวนอนในหน่วยพิกเซลต่อเมตร
biYiPelsPerMeter	ความยาวแนวตั้งในหน่วยพิกเซลต่อเมตร
biClrUsed	จำนวนสีในตารางสีที่จะถูกใช้ด้วยค่าพิกเซลในบิตแมป
biClrIMportant	เป็นเลขที่แสดงว่าข้อมูลสีมีความสำคัญในการแสดงผลของบิตแมป ถ้าเป็นเลข 0 แสดงว่าทุกสีมีความสำคัญ

อาร์จีบีควอด

มีโครงสร้างดังนี้

```
typedef struct tagRGBQUAD { // rgbq
    BYTE    rgbBlue;
    BYTE    rgbGreen;
    BYTE    rgbRed;
    BYTE    rgbReserved;
} RGBQUAD;
```

อาร์จีบีควอด จะเป็นโครงสร้างที่แสดงความเข้มของสีแดง เขียว และน้ำเงิน โดยมีความหมายของแต่ละฟิลด์ดังนี้

rgbBlue	แสดงความเข้มของสีน้ำเงิน
rgbGreen	แสดงความเข้มของสีเขียว
rgbRed	แสดงความเข้มของสีแดง
rgbReserved	ต้องมีค่าเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างภาพไบนารี สามารถทำได้โดยใช้เทคนิคการทำเทรชโฮล(thresholding technics) โดยพิจารณาว่าจุดใดควรเป็นจุดขาวหรือจุดดำ จะกระทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างจุดภาพเริ่มต้นกับค่าคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ค่าเทรชโฮล เทคนิคนี้ใช้กันมากในกรณีที่ข้อมูลภาพมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างวัตถุ และพื้นหลัง โดยค่าของจุดภาพใด ๆ ที่มีค่าน้อยกว่าค่าเทรชโฮลจะถูกกำหนดค่าเป็น ค่า 1 (จุดสีดำ) และถ้าค่าของจุดภาพมีค่ามากกว่าค่าเทรชโฮล จะถูกเปลี่ยนให้เป็นค่า 0 (จุดสีขาว) ซึ่งการทำงานสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$b(x,y) = \begin{cases} 1 ; g(x,y) < Thr \\ 0 ; g(x,y) \geq Thr \end{cases} \quad (2.3)$$

$b(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพผลลัพธ์ภาพเป็นไบนารี

$g(x,y)$ คือ ข้อมูลภาพอินพุตที่มีระดับความเข้ม 0 ถึง L ระดับ

Thr คือ ค่าเทรชโฮลเป็นค่าคงที่ระหว่าง 0 ถึง L ระดับ

1 คือ จุดดำ

0 คือ จุดขาว

โดยที่ L คือ ระดับความเข้มของจุดภาพสูงสุด

ในการสร้างภาพไบนารีโดยใช้เทคนิคเทรชโฮลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ได้คมชัดและเหมาะสม สิ่งที่สำคัญที่สุด คือ ค่าเทรชโฮล เนื่องจากถ้าเลือกค่าเทรชโฮลที่ไม่เหมาะสม ภาพที่ได้จะไม่คมชัดและรายละเอียดบางส่วนอาจขาดหายไป ดังนั้นปัญหาการสร้างภาพด้วยวิธีเทรชโฮล คือ ทำอย่างไรจึงสามารถคำนวณหาค่าเทรชโฮลที่เหมาะสมได้

2.2.4.1 การหาค่าเทรชโฮลโดยการกำหนดไว้ล่วงหน้า

การหาค่าเทรชโฮลโดยวิธีการกำหนดล่วงหน้า(preassigned threshold value) นี้ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เป็นการกำหนดค่าเทรชโฮลเองจากผู้ใช้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ใช้ โดยการเลือกค่าคงที่ค่าหนึ่งจะเป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของระดับความเข้มของข้อมูลอินพุต

2.2.4.2 การหาค่าเทรชโธลจากค่ากลาง(midrange threshold value)

การหาวิธีนี้จะพิจารณาจากค่ากลาง โดยอาศัยการคำนวณพื้นฐานทางสถิติ ในการหาค่ากลางหรือค่าเฉลี่ย(mean) มาประยุกต์ ค่าที่ได้จะเป็นค่ากึ่งกลางระหว่างค่าระดับความเข้มสูงสุดกับค่าต่ำสุดของข้อมูลภาพอินพุต สำหรับการหาค่ากึ่งกลางจะแสดงได้ดังสมการที่ 2.4

$$\text{Thr} = \frac{\text{Max}(g(x,y)) + \text{Min}(g(x,y))}{2} \quad (2.4)$$

โดยที่	Thr	ค่าเทรชโธล
	$g(x,y)$	ข้อมูลภาพอินพุตที่มีระดับความเข้ม 0 ถึง L ระดับ
	$\text{Max}(g(x,y))$	ค่าสูงสุดเกรย์สเกลของข้อมูลอินพุต
	$\text{Min}(g(x,y))$	ค่าต่ำสุดเกรย์สเกลของข้อมูลอินพุต

การหาค่าเทรชโธลจากค่าเฉลี่ยเลขคณิต หาได้จากสมการที่ 2.5

$$\text{Thr} = \frac{\sum g_i(x,y)}{N \times N} \quad (2.5)$$

2.2.5 เทคนิคการติดตามรอยขอบภาพ

เทคนิคการติดตามรอยขอบภาพ ถูกนำมาใช้ในการแยกและคัดลอกส่วนของรูปภาพใดๆ ที่อยู่บนรูปใหญ่ ข้อมูลภาพที่จะนำมาประมวลผลด้วยเทคนิคนี้ต้องอยู่ในรูปของข้อมูลไบนารี นั่นคือจุดภาพจะแสดงด้วยรูป 0 กับ 1 เท่านั้น

การทำงานของเทคนิคการติดตามรอยขอบของภาพ เป็นการเดินได้ไปตามขอบระหว่างส่วนที่เป็นรูปภาพ กับส่วนที่เป็นพื้นหลัง โดยจะตรวจกวาดไปทุกๆ พิกเซล โดยจะเริ่มจากจุดมุมซ้ายของภาพ ตรวจกวาดไปในทิศทางจากซ้ายไปขวา และเลื่อนลงจากบนลงล่าง เมื่อตรวจกวาดมาพบจุดใดๆ ที่มีค่าของจุดภาพเป็น 1 ก็จะเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนไหวไปยังจุดถัดไปใหม่โดยมีเงื่อนไขการเคลื่อนที่ ดังนี้

1. ถ้าจุดที่อยู่ปัจจุบันเป็นจุดของภาพ หรือมีค่าของจุดเป็น 1 ให้เลี้ยวซ้ายแล้วก้าวเดินตรงไปข้างหน้ายังจุดถัดไป

2. ถ้าจุดที่อยู่ในปัจจุบันเป็นพื้นเบื้องหลัง หรือมีค่าของจุดเป็น 0 ให้เลื่อนขวาแล้วก้าวเดินตรงไปข้างหน้าไปยังจุดถัดไป

3. การเคลื่อนที่จะสิ้นสุดลง เมื่อจุดที่อยู่ในปัจจุบันเป็นจุดเดียวกันกับจุดเริ่มต้น

ลักษณะการทำงานของเทคนิคการติดตามรอยขอบภาพซึ่งจะแสดงการเคลื่อนที่ไปตามจุดต่าง ๆ ที่เป็นขอบภาพ เริ่มจากจุดที่ถูกแรงงาไว้ซึ่งเป็นจุดของภาพแรกที่ตรวจกวาดตามเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อการเคลื่อนที่วนกลับมาถึงจุดเริ่มต้น ก็จะทราบจุดที่เป็นขอบของ ภาพทั้งหมด ขณะที่เดินได้ขอบนั้นก็จดจำค่าพิกัดไปด้วย เมื่อเดินถึงจุดเดิม ก็นำค่าพิกัดที่น้อยที่สุดและมากที่สุดมากำหนดขอบเขตของขนาดวัตถุเพื่อใช้เปรียบเทียบกันต่อไป

2.3 สเต็ปป์มอเตอร์(steping motor)

สเต็ปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ประเภทหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานมาก ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบในหุ่นยนต์ เครื่องจักรกลที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ต่างก็ใช้สเต็ปป์มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ข้อมูลของการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์พื้นฐาน ดังต่อไปนี้

2.3.1 การควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์

วิธีการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์โดยการกระตุ้นเฟสมี 3 วิธี คือ

2.3.1.1 การกระตุ้นแบบซิงเกิลเฟส(single phase excitation)

เป็นการกระตุ้นแบบเฟสเดียวตามสัญญาณที่ป้อนมาที่ชุดขับสเต็ปป์มอเตอร์ดังนี้

PHASE	PULSE							
A	1	0	0	0	1	0	0	0
B	0	1	0	0	0	1	0	0
C	0	0	1	0	0	0	1	0
D	0	0	0	1	0	0	0	1

2.3.1.2 การกระตุ้นแบบสองเฟส(two phase excitation)

เป็นการกระตุ้นแบบที่ละสองเฟสคู่พร้อมกัน ดังนี้

PHASE	PULSE							
A	1	0	0	1	1	0	0	1
B	1	1	0	0	1	1	0	0
C	0	1	1	0	0	1	1	0
D	0	0	1	1	0	0	0	1

2.3.1.3 การกระตุ้นแบบครึ่งสเตป(half step excitation)

เป็นการกระตุ้นแบบการหมุนของทั้งสองแบบไว้ในแบบเดียวกัน ดังนี้

PHASE	PULSE							
A	1	1	0	0	0	0	0	1
B	0	1	1	1	0	0	0	0
C	0	0	0	1	1	1	0	0
D	0	0	0	0	0	1	1	1

วิธีการกระตุ้นทั้ง 3 แบบนี้จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการกระตุ้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาให้เหมาะสม แบบเฟสเดียวนั้นจะให้ความเที่ยงตรงสูง แต่แรงบิดต่ำ แบบ 2 เฟสจะเที่ยงตรงน้อยกว่าแบบแรก แต่มีแรงบิดที่สูงกว่า และการกระตุ้นแบบครึ่งสเตปจะมีความเที่ยงตรงน้อยมากแต่จะให้แรงบิดสูงที่สุด

2.4 พอร์ตขนาน(parallel port)

เป็นพอร์ตที่ใช้ส่งและรับข้อมูลที่นิยมใช้มากที่สุด พอร์ตขนานจะส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว และสามารถส่งได้หลายสาย และมีความผิดพลาดของสัญญาณน้อยมาก (ในระยะทาง น้อยกว่า 0.66 เมตร) ซึ่งเราสามารถใช้อุปกรณ์ส่งข้อมูลที่มีมากนั้นรับและส่งค่าได้ในพอร์ตเดียว

2.5 ยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัต

เป็นพอร์ตที่มีไว้ใช้รับส่งข้อมูลพอร์ตหนึ่ง ที่มีการส่งข้อมูลที่เร็วมาก (ถ้าเทียบกับพอร์ตอนุกรมและพอร์ตขนานและพอร์ต PS/2) ใช้กับอุปกรณ์ที่ต้องการความเร็วของสัญญาณ มีความผิดพลาดของสัญญาณน้อยมาก (ในระยะทางน้อยกว่า 1000 เมตร) ซึ่งเราใช้ในการส่งสัญญาณจากกล้องดิจิทัลมายังคอมพิวเตอร์

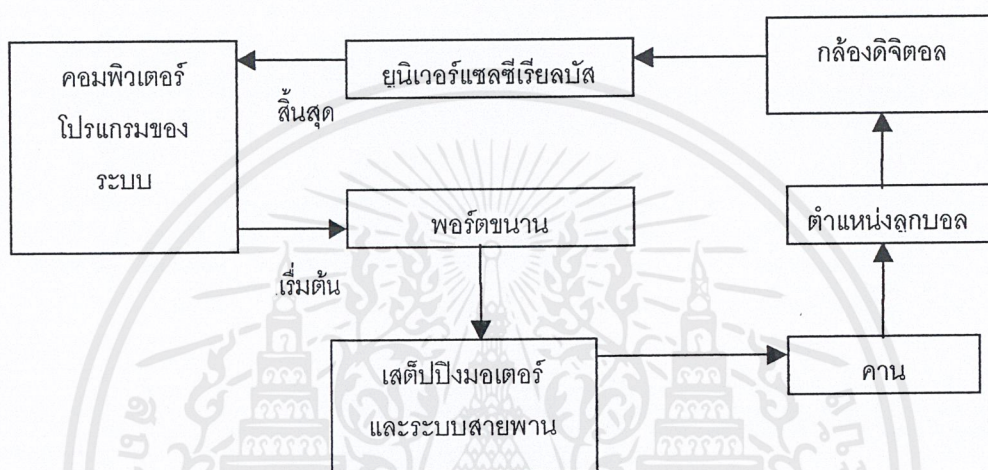


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ส่วนประกอบของระบบ

3.1 แสดงแผนผังรวมของระบบ



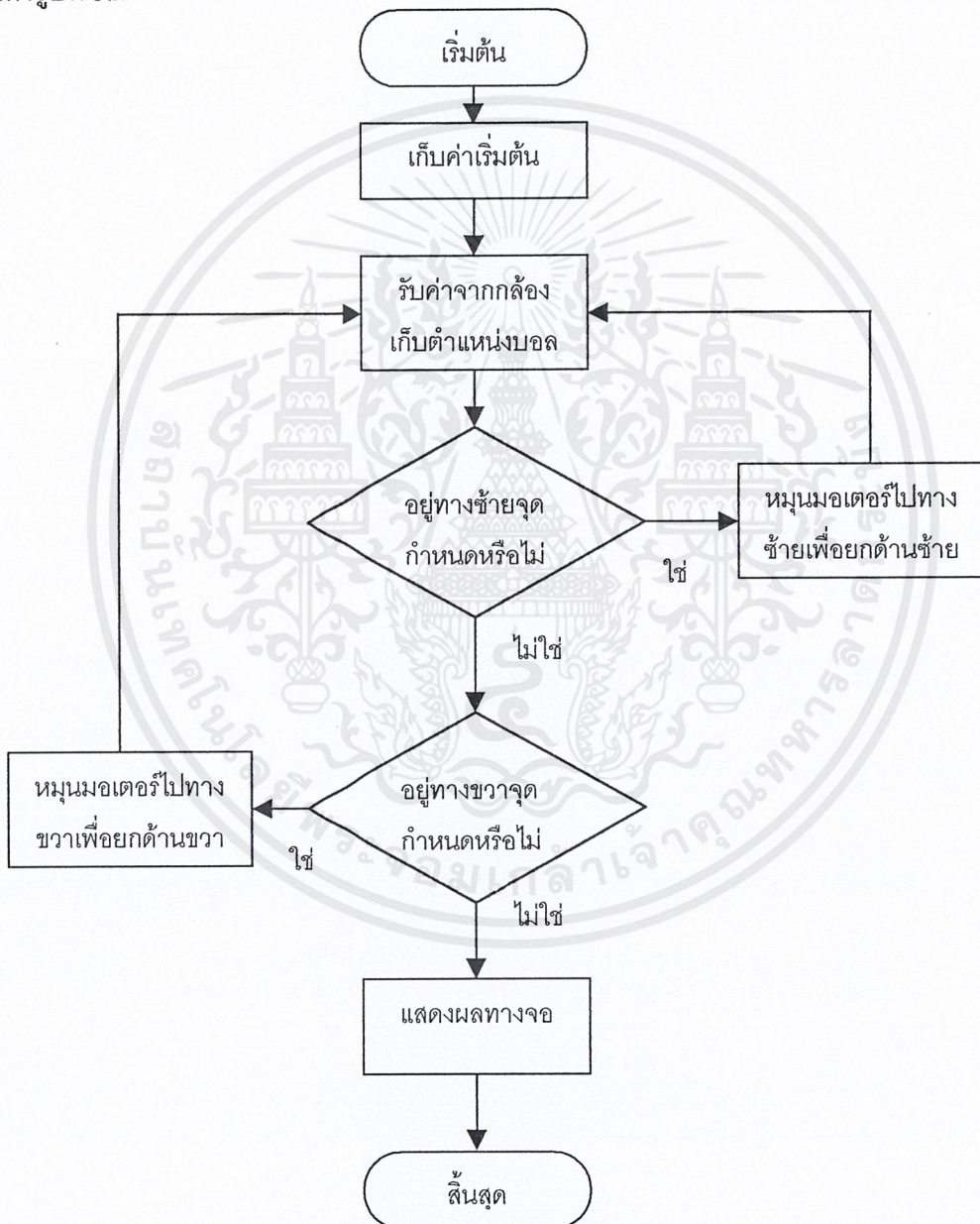
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังรวมของระบบ

ระบบควบคุมประกอบด้วย ไมโครคอมพิวเตอร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สายต่อพอร์ตขนาน สายต่อพอร์ตยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัส กล่องดิจิทัล ลูกบอล เสต็ปมอเตอร์ ระบบสายพาน คานยาว 90 เซนติเมตร ชุดแปลงสัญญาณ ดิจิตอลเป็นอนาลอก(D/A) ชุดกำเนิดแรงดัน 12 โวลต์ และ 5 โวลต์

3.2 คอมพิวเตอร์และการควบคุม

ในการเขียนโปรแกรมควบคุมนั้น เราไม่ได้โปรแกรมแบบตามเวลาจริง(real time control) แต่เราใช้การเขียนโปรแกรมแบบระบบเวลาดีสครีต ซึ่งจำเป็นต้องมีความรัดกุม และทำงานได้รวดเร็ว ซึ่งเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้จะต้องมีความเร็วพอที่จะทำให้คาบการสุ่มสัญญาณ ณ เวลาต่าง ๆ มีค่าการหน่วงเวลาน้อยมากจนไม่มีผลต่อการควบคุมระบบทั้งหมด ซึ่งเราใช้โปรแกรม วิชชวลเบสิก เวอร์ชัน 6.0 ในการเขียนโปรแกรมนี้

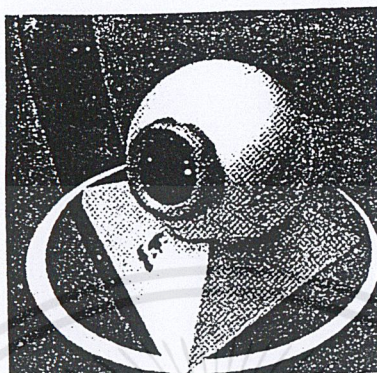
การเขียนโปรแกรมเริ่มจากการเขียนโปรแกรมควบคุมโดยส่งข้อมูลออกทางพอร์ตขนานก่อน แล้วจึงเขียนตัวกำเนิดสัญญาณเวลาหรือไทม์เมอร์เพื่อใช้กำหนดคาบเวลาที่แน่นอน เพื่อให้โปรแกรมมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น แล้วจึงเขียนโปรแกรมวิเคราะห์ประมวลผลภาพเข้ามาต่อเพื่อเป็นระบบปิด ซึ่งข้อมูลภาพที่ป้อนกลับมานั้นเราใช้ความเร็ว 30 ภาพต่อวินาที ซึ่งนับว่ามีความเร็วเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการควบคุมได้ และสามารถเขียนโฟลว์ชาร์ต(flowchart) แสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 3.2



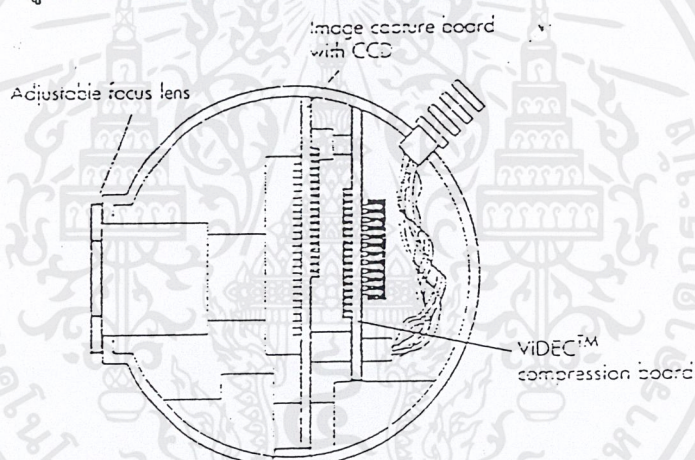
รูปที่ 3.2 โฟลว์ชาร์ตของระบบทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กล้องดิจิทัลวีดีโอ



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะภายนอกของกล้องดิจิทัลวีดีโอ



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะภายในของกล้องดิจิทัลวีดีโอ

3.3.1 สิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานกล้องดิจิทัลวีดีโอ

- เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ทำงานตั้งแต่สัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ 400 เมกะเฮิร์ตขึ้นไป
- โปรแกรมระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์ วินโดวส์ 98
- หน่วยความจำ 128 เมกะไบต์
- โปรแกรมที่ใช้เป็นตัวแปลงสัญญาณของกล้อง
- พอร์ตยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัส
- หน่วยความจำบนฮาร์ดดิส 2 เมกะไบต์ สำหรับโปรแกรมของกล้อง
- หน่วยความจำบนฮาร์ดดิสอย่างน้อย 10 เมกะไบต์ สำหรับทำภาพเคลื่อนไหว
- ไมโครโฟนและซาวนด์การ์ดเพื่อใช้ในการบันทึกแบบวีดีโอที่มีเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 คุณสมบัติในกล้องดิจิทัลวิดีโอ

- ให้ภาพที่มีความละเอียดถึง 640x 480 พิกเซล ในภาพสี 24 บิต
- อัตราการส่งภาพด้วยความเร็วถึง 30 ภาพต่อวินาที
- ต้องการไฟเลี้ยงจากคอมพิวเตอร์ 2 วัตต์
- ปรับโฟกัสได้ตั้งแต่ 1 นิ้วถึงอนันต์

3.4 สเต็ปป์มอเตอร์

สเต็ปป์มอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่เคลื่อนที่เป็นสเต็ป โดยการกระตุ้นด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิทัลอินพุท ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณแบบช่วงเวลาไปเป็นการเคลื่อนที่แบบอนุภาคที่เอาท์พุท

สเต็ปป์มอเตอร์มีขดลวดอยู่หลายขด โดยแต่ละขดถูกควบคุมการจ่ายกระแสโดยสัญญาณเปิด-ปิด ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ได้ครบที่ยังไม่เกิดการเกินกำลัง จนกระทั่งมีการกระตุ้นโดยสัญญาณควบคุมการจ่ายกระแสอีกครั้ง และเนื่องจากสเต็ปป์มอเตอร์สามารถควบคุมตำแหน่งได้โดยการส่งสัญญาณกระตุ้น ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ตัววัดตำแหน่งในการทำงาน ข้อเสียที่สำคัญ คือ มีข้อจำกัด ที่ความเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์กระแสไฟตรง ที่ขนาดเท่ากัน และยังมีภาระสิ้นเปลืองสูงทำให้การเคลื่อนที่ของสเต็ปป์เป็นไปอย่างไม่ราบเรียบ

3.4.1 ชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์

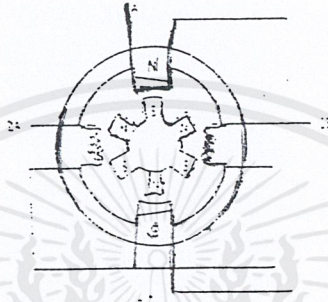
สเต็ปป์มอเตอร์เป็นมอเตอร์ประเภทหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานมาก ไม่ว่าจะเป็นส่วนประกอบในหุ่นยนต์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เราสามารถแบ่งชนิดของสเต็ปป์มอเตอร์ได้เป็น 6 ชนิดตามโครงสร้างพื้นฐานหรือความแตกต่างของรูปแบบของ โรเตอร์ ดังนี้

1. ชนิดวาริเอเบิลรีลักแตนซ์(variable reluctance: VR)
2. ชนิดไฮบริด(hybrid)
3. ชนิดแม่เหล็กถาวร(permanent magnet)
4. ชนิดแรเอิร์ธเพอร์มาเนนต์แม็กเน็ต(rare earth permanent magnet)
5. ชนิดไบโพลาร์(bipolar)
6. ชนิดยูนิโพลาร์(unipolar)

สำหรับโครงงานนี้เราจะใช้แบบยูนิโพลาร์ เนื่องจากหาได้ง่ายและราคาไม่แพง

3.4.2 การทำงานของเสต็ปิงมอเตอร์

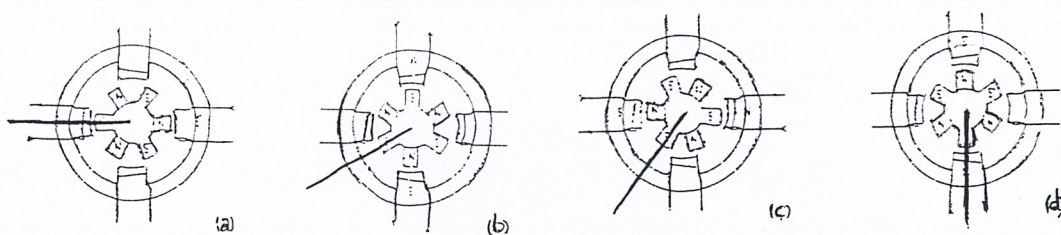
เสต็ปิงมอเตอร์สามารถแบ่งโครงสร้างได้เป็น 2 ส่วน คือ สเตเตอร์ และโรเตอร์ ตัวสเตเตอร์เป็นส่วนที่อยู่กับที่ ประกอบด้วยขดลวดทองแดง ซึ่งพันรอบแกนเหล็ก ส่วนโรเตอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่มีลักษณะเป็นเหล็กทรงกลม และที่ผิวนอกมีลักษณะเป็นซี่กฟัน ซึ่งทำจากแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



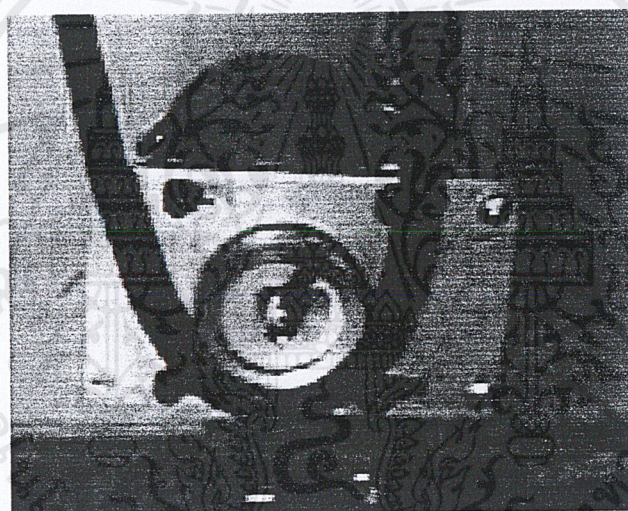
รูปที่ 3.5 แสดง โครงสร้างไฮบริดจ์เสต็ปิงมอเตอร์ที่มีจำนวนเสต็ปต่อรอบเท่ากับ 12

เมื่อยังไม่มีกระแสไหลให้กับขดลวดมอเตอร์ ซิกฟันอันใดอันหนึ่งของโรเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันกับซิกฟันอันใดอันหนึ่งของสเตเตอร์ ทั้งนี้เป็นเพราะแม่เหล็กถาวรที่ตัวของโรเตอร์พยายามที่จะทำให้ค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งที่จุดที่ซิกฟันของทั้งสองตัวตรงกันจะมีค่าความต้านทานทางแม่เหล็กน้อยที่สุด ทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด และจากรูปที่ 3.5 เส้นแรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็ก เหนือ และใต้ขึ้นมา 2 คู่ ทั้งที่ตัวสเตเตอร์ และโรเตอร์ ดังรูป ค่าแรงเครียดที่ทำให้ตัวโรเตอร์อยู่ตำแหน่งนี้ได้เรียกว่าแรงเครียดย้อนกลับ ซึ่งหมายความว่า การที่จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในขณะที่ไม่ได้จ่ายกระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์ จะต้องออกแรงมากกว่าค่าของแรงเครียดย้อนกลับ จึงจะทำให้โรเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ได้ รูปที่ 3.5 นั้นมี 12 ตำแหน่งที่สามารถเกิดแรงเครียดย้อนกลับได้

เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดที่อยู่ในสเตเตอร์คู่ใดคู่หนึ่ง ดังรูปที่ 3.6(a) จะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กเหนือและใต้ที่ซิกฟันของตัวสเตเตอร์ ซึ่งจะดึงดูดซิกฟันของตัวโรเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กที่มีศักย์ต่างกันที่อยู่ใกล้ที่สุดเข้าไป ตำแหน่งนี้เรียกว่า ตำแหน่งคงที่ ของโรเตอร์ จะมีจำนวนตำแหน่งเท่ากับจำนวนซิกฟันของโรเตอร์ และแรงที่จะทำให้โรเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปจากตำแหน่งคงที่ทางระยะ ไลน์นี้เรียกว่า แรงเครียดยึดเหนี่ยว(holding torque)



รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการทำงานของสเต็ปิงมอเตอร์แบบเต็มสเต็ปหนึ่งเฟส

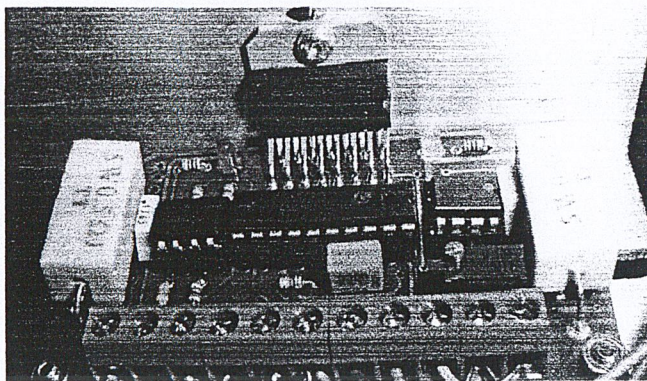


รูปที่ 3.7 แสดงสเต็ปิงมอเตอร์ที่ใช้

3.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกนี้นำมาใช้เพื่อแปลงสัญญาณที่ออกมาจากคอมพิวเตอรื 2 บิต เป็น 4 บิต ต้องการไฟเลี้ยง 5 โวลท์ สามารถรับแรงดันได้ตั้งแต่ 0 – 24 โวลท์ ซึ่งในที่นี้เราจะใช้แรงดัน 12 โวลท์ เนื่องจากได้มีวงจรกำเนิดแรงดันที่ทำไว้ในตอนแรกแล้ว รูปของวงจรแปลงสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.8

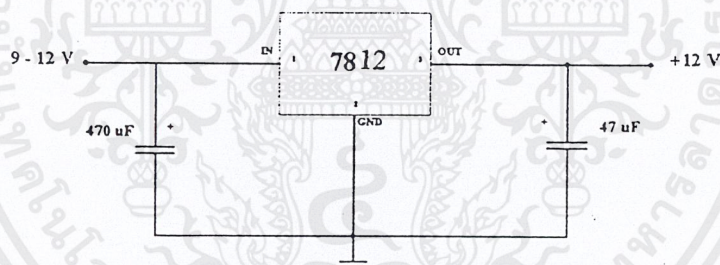
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



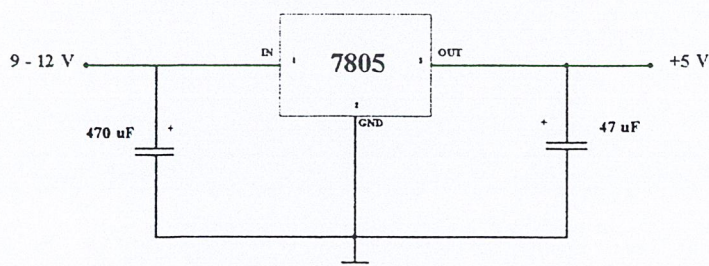
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก

3.6 วงจรกำเนิดแรงดัน 12 โวลต์ และ 5 โวลต์

สำหรับเสต็ปปีงมอเตอร์ ที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของคาน ใช้ไฟกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ดังนั้นจำเป็นต้องสร้างวงจรกำเนิดแรงดันขนาด 12 โวลต์ขึ้นมา โดยแปลงจากไฟฟ้ากระแสสลับที่ใช้ตามบ้าน ขนาด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต โดยใช้วงจรรูปที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 วงจรกำเนิดแรงดัน 12 โวลต์

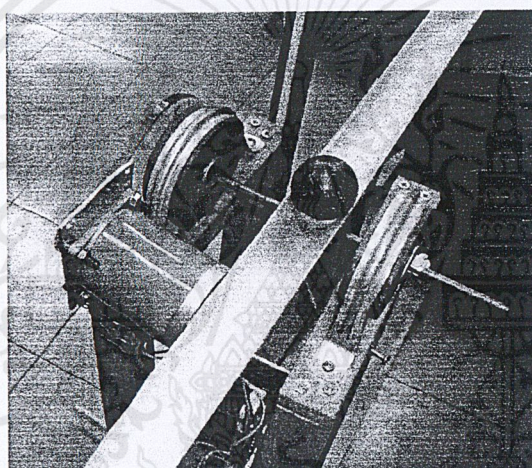


รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดแรงดัน 5 โวลต์

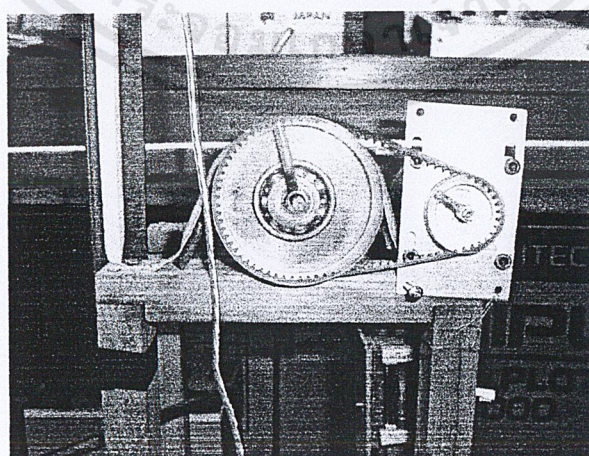
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 โครงสร้างทางกลศาสตร์

ระบบควบคุมลูกบอลบนคานนี้ต้องการความเที่ยงตรงสูง มีการวัดสัญญาณอย่างรวดเร็ว และสามารถทนแรงบิดจากมอเตอร์ได้ จึงใช้ไม้เป็นวัสดุหลักในการทำชิ้นงาน เนื่องจากไม้มีความเหนียวและยืดหยุ่น สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายกว่าเหล็กและพลาสติก นอกจากนี้ยังสามารถประกอบอุปกรณ์ที่ทำจากไม้ได้ง่าย ส่วนคานที่ใช้นั้นมีด้วยกัน 3 ชนิด คือ คานไม้ คานอลูมิเนียมและคานเหล็กซึ่งจะทดลองการเคลื่อนที่ของลูกบอลที่มีต่อคานที่เปลี่ยนไป (หาแรงเสียดทานของแต่ละคาน) แล้วจึงนำคานที่ดีที่สุดมาใช้ รูปที่ 3.11 และ 3.12 จะแสดงชิ้นงานโดยรวม



รูปที่ 3.11 แสดงชิ้นงานทั้งหมดจากมุมมองด้านบน

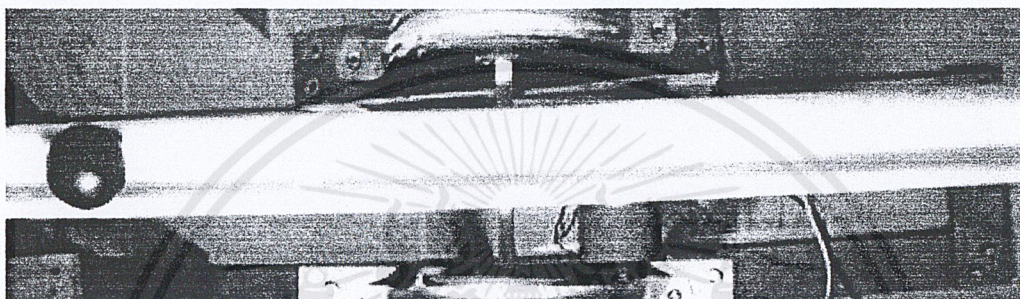


รูปที่ 3.12 แสดงชิ้นงานทั้งหมดจากมุมมองด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.1 ลูกบอลและคาน

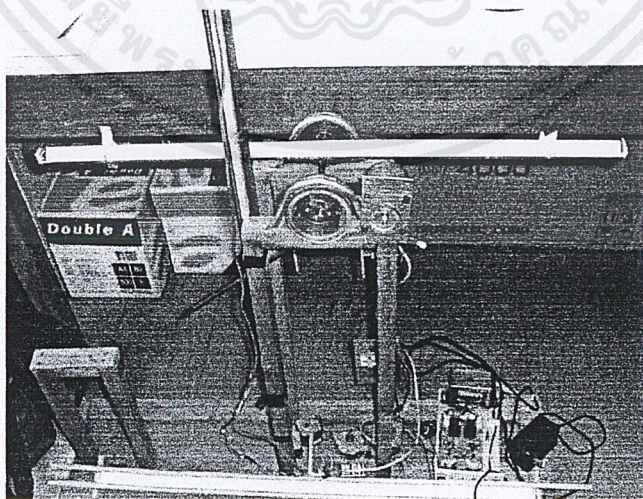
ลูกบอลที่ใช้เป็นลูกปิงปอง นำมาทาสีดำเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพ สามารถกลิ้งบนคานที่ทำเป็นร่องได้อย่างอิสระ ส่วนคานจะเชื่อมติดกับสายพานและวางอยู่บนตลับลูกปืน (bearings) ขนาดใหญ่ ซึ่งคานนี้จะหมุนได้จากการส่งแรงบิดจากมอเตอร์ผ่านมาทางสายพาน ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงลูกบอลที่ใช้วางอยู่บนคาน

3.7.2 โครงสร้างยึดจับ

การต่อโครงสร้าง ต้องมีความแน่นหนา มั่นคง เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเลื่อนไปจากเดิม โดยเฉพาะเมื่อมีแรงบิดจากมอเตอร์ และตัวฐานมีน้ำหนักมากพอจะทำให้โครงสร้างสามารถทรงตัวอยู่ได้ ขณะที่คานหมุนอย่างรวดเร็ว แสดงในรูปที่ 3.14

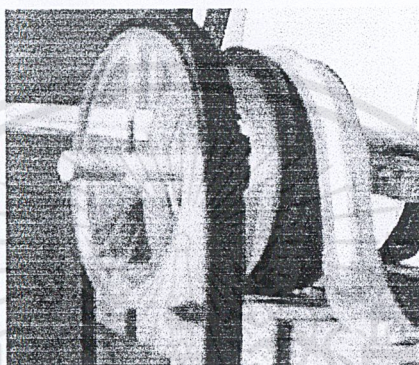


รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 ลูกปืนและสายพานเครื่องจักร

เนื่องจากคานสามารถหมุนอย่างอิสระปราศจากแรงเสียดทาน จึงใช้ตั้บลูกปืนมารองรับคาน จับยึดกับโครงอย่างแข็งแรงด้วยสกรู ส่วนพูลเลย์ที่ใช้นั้นจะมีรัศมีของตัวที่ยึดติดกับคาน มากกว่าตัวที่ยึดกับมอเตอร์เป็น 2 เท่า ทำให้ได้แรงบิดเพิ่มเป็น 2 เท่าดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงตัวลูกปืนและสายพาน

3.7.4 สายยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัตของกล้องวิดีโอจับภาพ

กล้องวิดีโอที่มีสายต่อพอร์ตเป็นแบบยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัต นั้นเป็นของ บริษัท ไทฟ์วิว โรโบแคม(Lifeview Robocam) ซึ่งมีการส่งสัญญาณได้ถึง 30 เฟรมต่อวินาที และมีความผิดพลาดของสัญญาณน้อยมาก



รูปที่ 3.16 แสดงหัวต่อของสายพอร์ตยูนิเวอร์แซลซีเรียลบัต

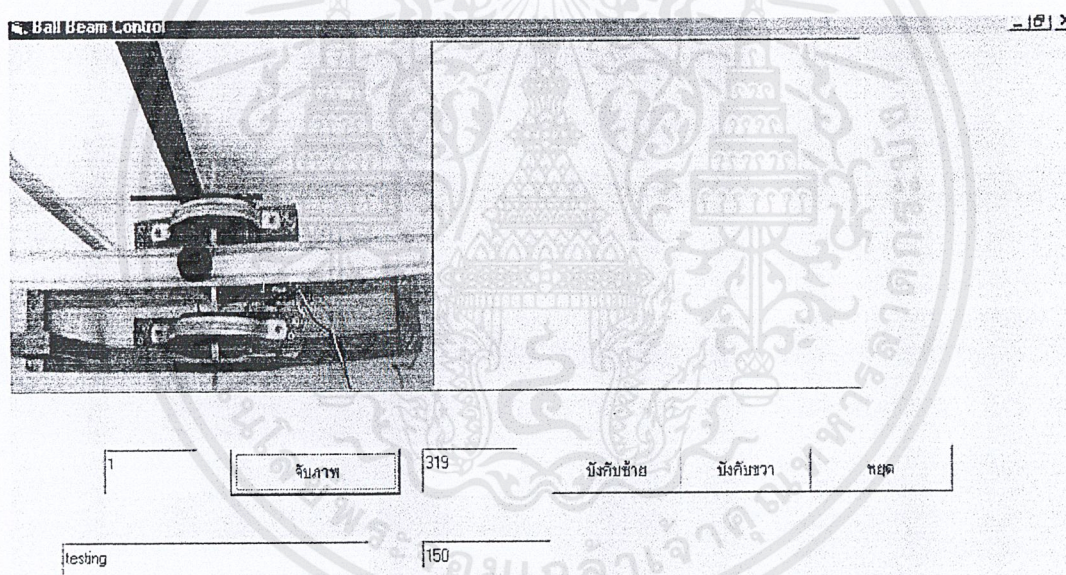
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

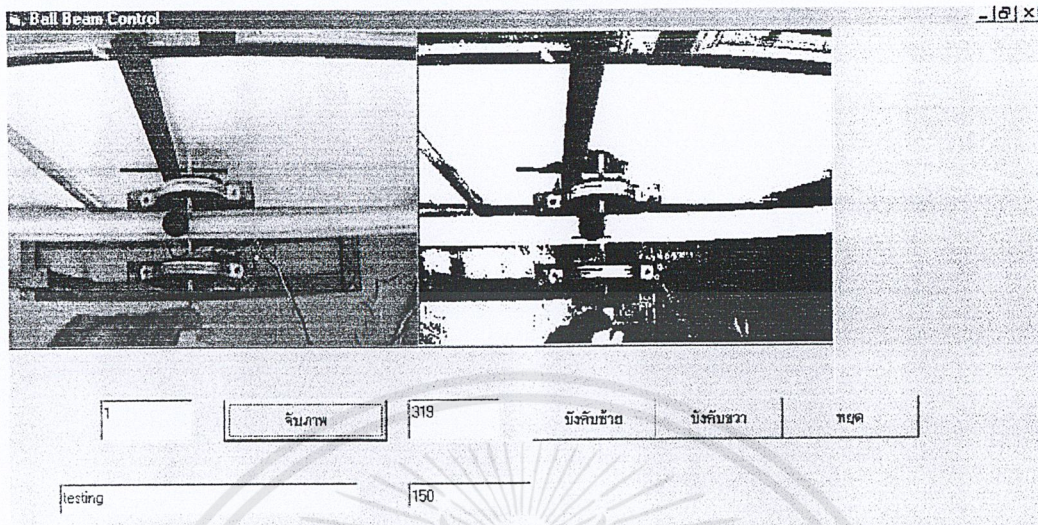
4.1 ผลการทดลองในส่วนของโปรแกรม

หลังจากที่ได้ทำการประกอบชิ้นส่วนของโครงสร้างทางกล(mechanical part)แล้วและได้ทำการเขียนโปรแกรมตามที่ได้ออกแบบโปรแกรมไว้เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ได้ทำการทดลอง และแสดงผลการทดลองที่ คอนโทรลฟอร์ม(control form) ของโปรแกรมวิชวลเบสิก บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงการนำภาพเข้ามาจากกล้องและแสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์



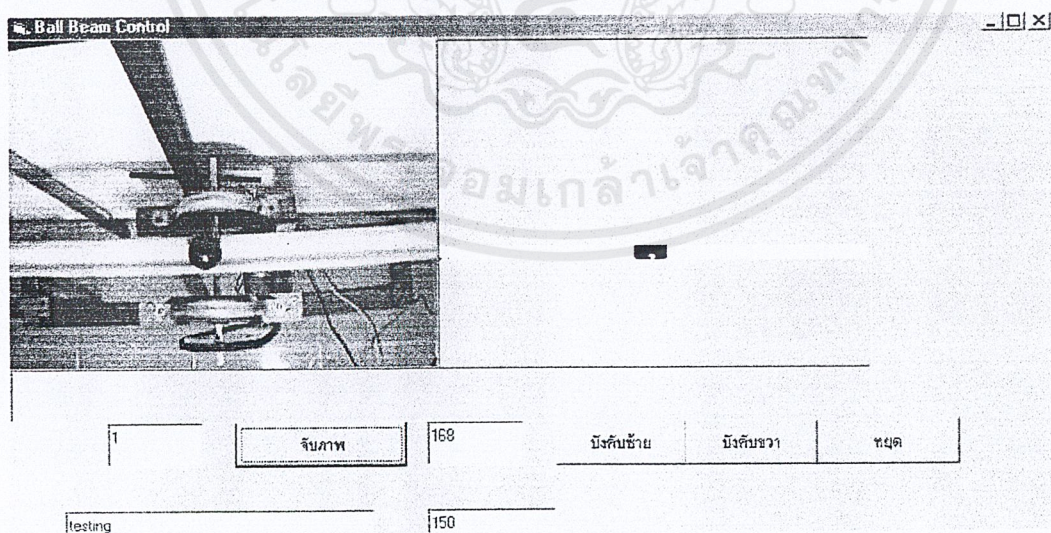
รูปที่ 4.1 แสดงการนำภาพเข้าไปแสดงในโปรแกรมที่เขียนโดยภาษาวิชวลเบสิก

จากนั้นเรานำภาพที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เป็นแกนสี่ต่าง ๆ ซึ่งจะแบ่งเป็น 3 สี คือ แดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งเราทดลองนำสีแดงมาวิเคราะห์เป็นภาพโทนขาวดำ พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือสามารถจำแนกภาพสีอ่อนกับสีเข้มได้อย่างชัดเจน ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการนำภาพไปทำการวิเคราะห์ภาพ

เมื่อเราได้ภาพเป็น 2 โทนซึ่งจะนำไปหาความแตกต่างระหว่างสีที่ต้องการกับที่ไม่ต้องการได้แล้วเราก็จะทำการเลือกเฉพาะส่วนที่เราต้องการไปประมวลผลเนื่องจากเมื่อต้องประมวลผลทั้งภาพจะทำให้เสียเวลามากและไม่สามารถใช้ในการควบคุมได้ โดยเราจะเลือกตำแหน่งแกนอน(y) มา 2 แถวเท่านั้นเพื่อนำไปทำการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการเก็บเฉพาะตำแหน่งลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองในส่วนของโครงสร้างแบบจำลอง

4.2.1 การติดตั้งเสต็ปป์มอเตอร์และทำการทดสอบ

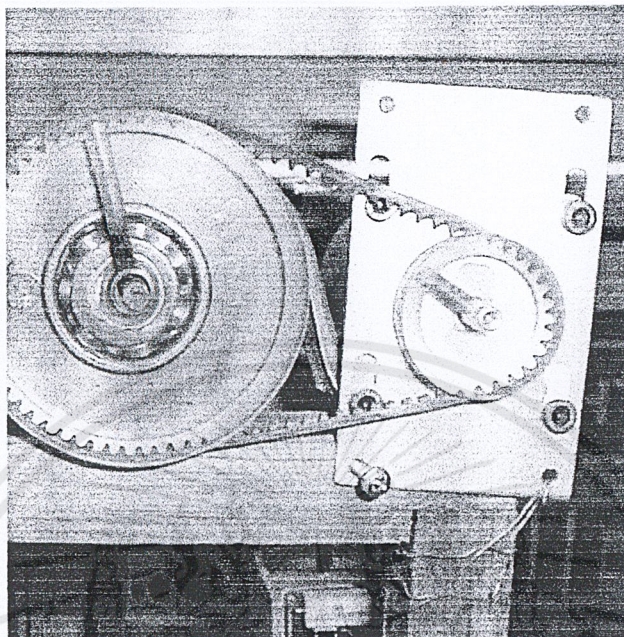
ในการติดตั้งเสต็ปป์มอเตอร์นั้น ในตอนแรกเราใช้สายพานขนาด 28.5 เซนติเมตร ทำให้มีระยะห่างมากซึ่งเกิดแรงเสียดทานย้อนกลับสูงและมีการสั่นเพิ่มขึ้นเพราะระยะทางด้วย จากนั้นเราจึงเปลี่ยนเป็นสายพานขนาด 15 เซนติเมตร ส่วนตัวมอเตอร์เลื่อนเป็น 12 เซนติเมตรและเปลี่ยนตัวพูลเลย์เป็นขนาด 1:1 ซึ่งเราพบว่ามี การสั่นน้อยลง แต่เกิดการหมุนที่องศาสูงเกินไปคือ 1.8 องศาต่อเสต็ปป์ (เดิมใช้พูลเลย์ทนมุม ไปเป็น 0.9 องศาต่อเสต็ปป์) และเร็วเกินไปที่จะควบคุม

จากนั้นเราจึงเปลี่ยนขนาดพูลเลย์เป็นแบบเดิมและตัวมอเตอร์เลื่อนเป็น 10 เซนติเมตร พบว่าการสั่นมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งมอเตอร์อีก 2 ตำแหน่งและมีการควบคุมความเร็วได้แต่ยังมีการสั่นอยู่บ้าง รูปของการติดตั้งเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ในขั้นตอนสุดท้าย

4.2.2 การติดตั้งคานและทำการทดสอบ

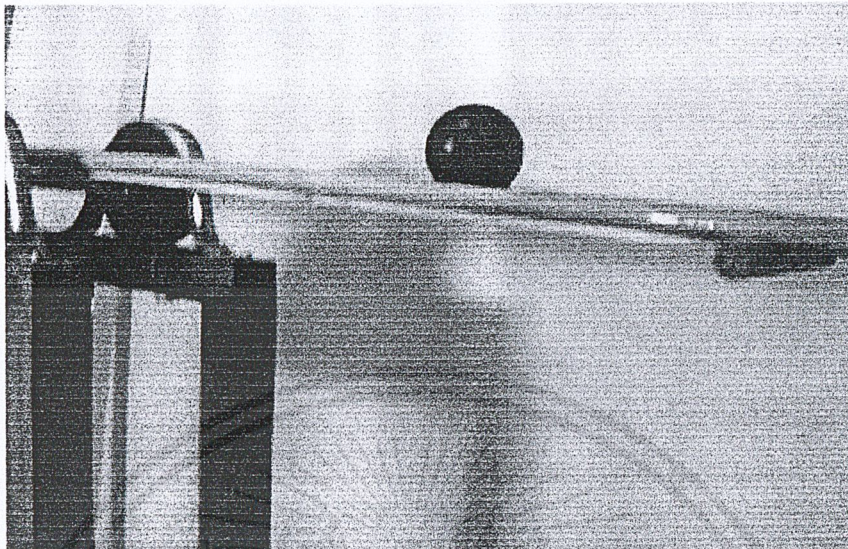
คานเป็นอุปกรณ์ที่มีผลต่อความเร็วของลูกบอลมากที่สุดเนื่องจากเราไม่สามารถเปลี่ยนหา ลูกบอลที่เบากว่านี้ได้ เราจึงทำคานออกมาหลายชนิด เพื่อทดสอบหาคานที่สามารถควบคุมลูกบอล โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ดีที่สุด

ลำดับแรกเราใช้คานเหล็กยาว 1 เมตร มีน้ำหนัก 2.3 กิโลกรัม พบว่าเมื่อเลี้ยงลูกบอลแล้วมีการเหวี่ยงมากเนื่องจากน้ำหนักที่มากและเสตีปึงมอเตอร์ไม่สามารถคอนโทรลคานได้ตามการหมุนต่อเสตีป ลำดับที่สอง เราจึงเปลี่ยนมาใช้คานไม้ ยาว 1 เมตร ซึ่งหนัก 0.4 กิโลกรัม พบว่าสามารถควบคุมได้บ้าง แต่ยังมีการสั่นที่สูงซึ่งมีผลต่อการควบคุมลูกบอลโดยตรง

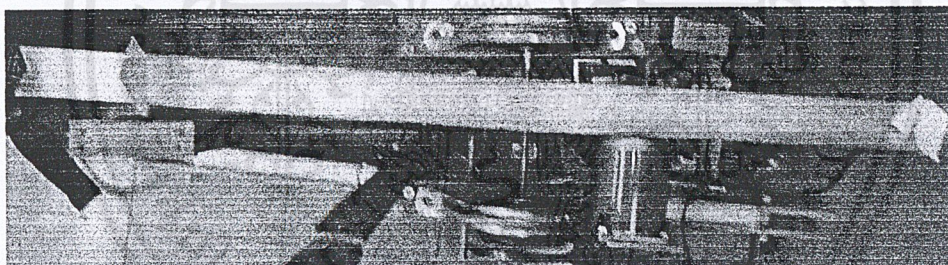
จากนั้นเราจึงเปลี่ยนมาใช้คานอลูมิเนียม ยาว 0.9 เมตร ซึ่งหนัก 0.6 กิโลกรัม พบว่าคานมีการสั่นน้อยลงและสามารถเลี้ยงลูกบอลให้อยู่ตรงกลางได้ เนื่องจากน้ำหนักส่วนใหญ่อยู่ที่เหล็กที่ยึดอลูมิเนียมตอนกลางคาน

ท้ายที่สุดเราจึงทดสอบคานแต่ละคาน โดยใช้เสตีปึงมอเตอร์ โปรแกรมและลูกบอลที่เหมือนกันพบว่าคานที่ทำจากอลูมิเนียมตรงกลางเป็นแกนเหล็กนั้นสามารถควบคุมลูกบอลได้ดีที่สุด ในการนี้เราได้ทำการปรับปรุงคาน ให้มีแรงเสียดทานมากขึ้นด้วยเทปกาวใสด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงคานที่ใช้ในตอนทดลอง



รูปที่ 4.7 แสดงคานและการติดตั้งชั้นตอนสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อทดลองให้ลูกบอลกลิ้งบนคานที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ให้ไปตำแหน่งที่ต้องการแล้วพบว่าควบคุมตำแหน่งได้ แต่ยังมีอาการคลาดเคลื่อนในการเลื่อนลูกบอลเนื่องจากโปรแกรมที่เขียนยังไม่ค่อยดีนัก ทำให้การควบคุมระยะของตำแหน่งมีความผิดพลาดประมาณร้อยละ 7

5.2 วิจารณ์การทดลอง

การทำโครงการนี้ต้องทำการศึกษาความรู้พื้นฐานที่จำเป็นได้แก่การประมวลผลภาพดิจิทัล วิธีการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม การควบคุมการทำงานของสเต็ปมอเตอร์และความรู้ในวงจรการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก ทฤษฎีของระบบควบคุมแบบพีดี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์กับระบบควบคุมแบบอื่นๆ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุปกรณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ได้เป็นอย่างดี

5.3 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ

ได้นำความรู้ที่เรียนมาใช้ เพราะเป็นนำทฤษฎีทางระบบควบคุมมาใช้โดยตรง ทั้งได้ความรู้เกี่ยวกับการประมวลผลภาพดิจิทัลเพราะการส่งข้อมูลกลับนั้นใช้กล้องดิจิทัลวีดีโอ อีกทั้งทำให้เกิดทักษะในการเขียน โปรแกรมภาษาวิซชวลเบสิก ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาษาโปรแกรมอื่นได้อีกมากมาย เช่น ปาสคาล(Pascal.) วิซชวลซี(Visual C) เป็นต้น และได้รับความรู้เกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากการทำวงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์และวงจรไฟเลี้ยงของระบบ อีกทั้งได้ฝึกการแก้ปัญหาทั้งที่เกิดจากการทำงานและปัญหาที่เกิดขึ้นจากปัจจัยภายนอกต่างๆ ทำให้มีการฝึกการวางแผนอย่างเป็นระบบขึ้นและมีวิธีคิดแก้ปัญหาที่ดีขึ้น

5.4 ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำโครงการ

ขาดความรู้และประสบการณ์ในการทำงานนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดและเป็นอุปสรรคในการทำงานมาก เช่น ใช้เวลาศึกษาในการทำการประมวลผลภาพนาน ซึ่งเกิดจากพื้นฐานทางด้านโปรแกรมมีน้อย อีกทั้งยังเกิดปัญหาในการออกแบบโครงสร้างและการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีเช่นการใช้เสต็ปปีงมอเตอร์ที่ไม่ดีเช่น มุมยกต่อเสต็ปมากเกินไปทำให้ต้องเปลืองงบประมาณและเสียเวลาในการทำงานไปมาก ยังมีปัญหาในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบซึ่งต้องหาค่าเกณฑ์ K มาจากการทดลองกับระบบจริง และปัญหาสุดท้ายคือตัวโครงการทำงานได้ไม่สม่ำเสมอและไม่แน่นอนเนื่องจากตัวไอซีมีการค้างค่าที่ส่งเมื่อใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง เพราะคอมพิวเตอร์มีการส่งข้อมูลออกมาตลอดเวลาทำให้เกิดการค้างค่าได้ง่าย

5.5 แนวทางการพัฒนาแก้ไข

ในการทำโครงการนี้ ยังมีข้อผิดพลาดอยู่มากเนื่องด้วยข้อจำกัดของโครงสร้างซึ่งเราสามารถเปลี่ยนเสต็ปปีงมอเตอร์ให้เป็นมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อสามารถรับแรงที่ได้มากซึ่งจะทำให้กำหนดเฟสได้ละเอียดทำให้ความเร็วสามารถปรับเพิ่มขึ้นได้ส่วนทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นเราสามารถเขียนโปรแกรมควบคุมระบบแบบอื่นๆ นอกจากนั้นยังสามารถทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละระบบควบคุม เพื่อหาข้อดีข้อเสียของแต่ละระบบต่อไป

หนังสืออ้างอิง

1. ธนู กังวานใจ, ประชา เทศพานิช , ปรินญาณินพนธ์เรื่อง”การควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน” ปีการศึกษา 2537: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ถาวร เบญจนาสุทธี, สุธรรม เณนิวิชุด, ปรินญาณินพนธ์เรื่อง “อินเวอร์ตเพนดูลัม” ปีการศึกษา 2539: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ชานินทร์ วรรณะ, ประเสริฐ ชิมเจริญ, ปรินญาณินพนธ์เรื่อง “การควบคุมเสถียรภาพของอินเวอร์ตเพนดูลัม” ปีการศึกษา 2541: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
4. มงคลชน ศรีอมร, ฐาปนา นามประดิษฐ์, ปรินญาณินพนธ์เรื่อง “ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน” ปีการศึกษา 2541: คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ก-1 โปรแกรมของระบบควบคุมกับ โปรแกรมประมวลผลภาพ

```

Private Declare Function GetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal x As Long, ByVal y
As Long) As Long
Private Declare Function SetPixel Lib "gdi32" (ByVal hdc As Long, ByVal x As Long, ByVal y
As Long, ByVal crColor As Long) As Long
Dim q As Long
Dim a As Long
Dim b, o As Long
Dim enow, eold, u As Long

Private Sub Command1_Click()
Dim ccolor, x As Long
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim p As Long
Dim m, n As Long
enow = 0
eold = 0
'b = Text2.Text
For i = 0 To 319
For j = 150 To 160
x = I2R_Camera1.GetDataRed(i, j)
If x > 100 Then
ccolor = &HFFFFFF
Else: ccolor = 0
p = i
Text1.Text = p

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataGreen(i, j) * 256
'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataBlue(i, j) * 256 * 256
SetPixel Picture1.hdc, i, j, ccolor
Next j
Next i
o = Text4.Text
enow = o - p
u = enow + 5 * (enow - eold)
eold = enow
If u > 0 Then
'Out &H378, &HA
'For n = 1 To 1000
'm = m + 1
'Next n
'Out &H378, &H8
q = 1
ElseIf u < 0 Then
'Out &H378, &H2
'For n = 1 To 1000
'm = m + 1
'Next n
'Out &H378, &H0
q = 0
Else: q = 2
End If
End Sub

```

Private Sub Command2_Click()

```
q = 2
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

End Sub

Private Sub Command3_Click()

q = 1

End Sub

Private Sub Command4_Click()

q = 0

End Sub

Private Sub Timer1_Timer()

Dim ccolor, x As Long

Dim i As Long

Dim j As Long

Dim p As Long

Dim m, n As Long

enow = 0

eold = 0

b = Text2.Text

For i = 0 To 319

For j = 0 To 239

If q <> 2 Then

x = I2R_Camera1.GetDataRed(i, j)

If x > 100 Then

ccolor = &HFFFFFF

Else: ccolor = 0

p = i

Text1.Text = p

End If

'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataGreen(i, j) * 256

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataBlue(i, j) * 256 * 256
SetPixel Picture1.hdc, i, j, ccolor
End If
Next j
Next i
o = Text4.Text
enow = o - p
u = enow + 5 * (enow - eold)
eold = enow
If u > 0 Then
'Out &H378, &HA
'For n = 1 To 1000
'm = m + 1
'Next n
'Out &H378, &H8
q = 1
Elseif u < 0 Then
'Out &H378, &H2
'For n = 1 To 1000
'm = m + 1
'Next n
'Out &H378, &H0
q = 0
Else: q = 2
End If
If q <> 2 Then
If q = 1 Then
If Timer1.Interval <> 10 Then
Timer1.Interval = 10
Out &H378, &HA

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Text3.Text = "testing"
For n = 1 To 1000
    m = m + 1
Next n
Else
    Timer1.Interval = 20
    Out &H378, &H8
    Text3.Text = "pulseleft"
    For n = 1 To 1000
        m = m + 1
    Next n
End If
End If
End If
If q <> 2 Then
If q = 0 Then
    If Timer1.Interval <> 10 Then
        Timer1.Interval = 10
        Out &H378, &H2
        Text3.Text = "testing"
        For n = 1 To 1000
            m = m + 1
        Next n
    Else
        Timer1.Interval = 20
        Out &H378, &H0
        Text3.Text = "pulseright"
        For n = 1 To 1000
            m = m + 1
        Next n
    End If
End If
End If

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If
End If
End If
If q = 2 Then
  If Timer1.Interval <> 10 Then
    Timer1.Interval = 10
    Out &H378, &H0
    For n = 1 To 1000
      m = m + 1
    Next n
  Else
    Timer1.Interval = 20
    Out &H378, &H0
    For n = 1 To 1000
      m = m + 1
    Next n
  End If
End If
End Sub

```

ก-2 ส่วนของการวิเคราะห์รูปภาพ

```

Dim ccolor, x, i, j, p, m, n As Long
enow = 0
eold = 0
b = Text2.Text
For i = 0 To 319
  For j = 0 To 239
    If q <> 2 Then
      x = I2R_Camera1.GetDataRed(i, j)
      If x > 100 Then

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ccolor = &HFFFFFF
Else: ccolor = 0
    p = i
    Text1.Text = p
End If
'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataGreen(i, j) * 256
'ccolor = ccolor + I2R_Camera1.GetDataBlue(i, j) * 256 * 256
SetPixel Picture1.hdc, i, j, ccolor
End If
Next j
Next i
o = Text4.Text

```

ก-3 ส่วนของการนำภาพไปประมวลผล

```

enow = o - p
u = enow + 5 * (enow - eold)
eold = enow
If u > 0 Then
    Out &H378, &HA
    For n = 1 To 1000
        m = m + 1
    Next n
    Out &H378, &H8
    q = 1
Elseif u < 0 Then
    Out &H378, &H2
    For n = 1 To 1000
        m = m + 1
    Next n

```

```

Out &H378, &H0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

q = 0
Else: q = 2
End If

```

ก-4 โปรแกรมเวลาที่ใช้กำเนิดสัญญาณความถี่คงที่

```

Private Sub Timer1_Timer()
Dim ccolor, x As Long
Dim i As Long
Dim j As Long
Dim p As Long
Dim m, n As Long
enow = 0
eold = 0
b = Text2.Text
For i = 0 To 319
For j = 0 To 239
If q <> 2 Then
x = I2R_Camera1.GetDataRed(i, j)
If x > 100 Then
ccolor = &HFFFFFF
Else: ccolor = 0
p = i
Text1.Text = p
End If
SetPixel Picture1.hdc, i, j, ccolor
End If
Next j
Next i
o = Text4.Text
enow = o - p

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

u = enow + 5 * (enow - eold)

eold = enow

If u > 0 Then
q = 1
Elseif u < 0 Then
q = 0
Else: q = 2
End If

If q <> 2 Then
If q = 1 Then
If Timer1.Interval <> 10 Then
Timer1.Interval = 10
Out &H378, &HA
Text3.Text = "testing"
For n = 1 To 1000
m = m + 1
Next n
Else Timer1.Interval = 20
Out &H378, &H8
Text3.Text = "pulseleft"
For n = 1 To 1000
m = m + 1
Next n
End If
End If
End If

If q <> 2 Then
If q = 0 Then
If Timer1.Interval <> 10 Then Timer1.Interval = 10
Out &H378, &H2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Text3.Text = "testing"
For n = 1 To 1000
    m = m + 1
Next n
Else Timer1.Interval = 20
    Out &H378, &H0
    Text3.Text = "pulseright"
    For n = 1 To 1000
        m = m + 1
    Next n
End If
End If
End If
If q = 2 Then
    If Timer1.Interval < 10 Then
        Timer1.Interval = 10
        Out &H378, &H0
        For n = 1 To 1000
            m = m + 1
        Next n
    Else Timer1.Interval = 20
        Out &H378, &H0
        For n = 1 To 1000
            m = m + 1
        Next n
    End If
End If
End Sub

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

สมการของลากรานจ์

วิธีการซึ่งใช้หาสมการของการเคลื่อนที่ในแบบพลศาสตร์ นอกจากเราจะใช้วิธีการตามแบบของนิวตันแล้ว ยังมีวิธีอื่น ๆ อีก วิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และควรศึกษา คือ วิธีการของนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ชื่อ ลากรานจ์ (Joseph Louis Lagrange) ดังที่จะ ได้กล่าวต่อไปนี้

ข-1 โคออดิเนตแบบทั่วไป

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

กรณีที่อนุภาคเคลื่อนที่ใน 2 มิติ หรือในระนาบ เราใช้เพียง 2 โคออดิเนต สำหรับแสดงตำแหน่งของอนุภาค หรือถ้าอนุภาคเคลื่อนที่ในมิติเดียว เช่น การเคลื่อนที่แบบเส้นตรง เราต้องการเพียงโคออดิเนตเดียวเท่านั้น สำหรับแสดงตำแหน่งของอนุภาค

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

สำหรับกรณีทั่วไป ถ้าเราให้ n เป็นจำนวนโคออดิเนตที่น้อยที่สุดที่แสดงถึงโครงสร้างของระบบที่กำหนดให้ใด ๆ เรากำหนดโคออดิเนตเหล่านี้ด้วยสัญลักษณ์

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

เราเรียกว่า โคออดิเนตแบบทั่วไป และเรียก n ว่า เป็นจำนวนดีกรีแห่งความอิสระ (degrees of freedom) ของระบบนี้ และ โคออดิเนตแบบทั่วไปใด ๆ (q_i) ที่กำหนดขึ้นอาจเป็นมุมหรือระยะทางก็ได้

ถ้าจำนวนโคออดิเนตซึ่งแสดงโครงสร้างของระบบมีมากกว่า N และแต่ละโคออดิเนตสามารถแสดงแปรผันได้อย่างอิสระ เราเรียกระบบนี้ว่าโฮโลโนมิก (holonomic) ในระบบนี้ถ้าจำนวนโคออดิเนตแบบทั่วไปเท่ากับ n จำนวนดิกิริแห่งความอิสระ ก็เท่ากับ n เช่นกัน ในทางตรงกันข้าม คือ ระบบนอนโฮโลโนมิก (non-holonomic) ระบบนี้โคออดิเนตไม่สามารถแปรผันอย่างอิสระได้ทั้งหมด และจำนวนดิกิริแห่งความอิสระน้อยกว่าค่าที่น้อยที่สุดของจำนวนโคออดิเนตหรือน้อยกว่า n ตัวอย่าง เช่น การกลิ้งของทรงกลมบนระนาบ เราต้องการ 5 โคออดิเนตสำหรับแสดงโครงสร้างของระบบ โดยมี 2 โคออดิเนตแสดงตำแหน่งของทรงกลม และ 3 โคออดิเนตสำหรับแสดงตำแหน่งเวลาทรงกลมหมุน โคออดิเนตเหล่านี้ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างอิสระได้ทั้งหมด มีเพียง 2 โคออดิเนตเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทรงกลมนี้กลิ้ง ซึ่งแตกต่างจากระบบการเคลื่อนที่แบบโฮโลโนมิก ดังนั้นในที่นี้เราจะพิจารณาเพียงกรณีของโฮโลโนมิก เท่านั้น

ในระบบที่มีอนุภาคเพียงอนุภาคเดียว เราสามารถอธิบายคาร์ทีเซียนโคออดิเนตในลักษณะฟังก์ชันของโคออดิเนตทั่วไปได้ คือ

1-มิติ :

$$x = x(q)$$

มีดิกิริแห่งความอิสระเท่ากับ 1

2-มิติ :

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

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

มีดิกิริแห่งความอิสระเท่ากับ 2

3-มิติ :

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

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

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

มีดิกิริแห่งความอิสระเท่ากับ 3

ถ้าเราสมมุติให้ q 's ใด ๆ เปลี่ยนจากค่าเริ่มต้น q (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 ตัวอย่างในกรณีนี้เช่นการเคลื่อนที่ของ

อนุภาคในระนาบ ถ้าเรากำหนดให้โพลาร์โคออดิเนต (polar coordinate) ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป คือ

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

แล้ว

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

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

และ

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

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

โดยให้การเปลี่ยนของ x และ y สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงน้อย ๆ ใน r และ θ

ถ้าเราพิจารณากรณีของระบบที่มีอนุภาคจำนวนมาก โดยให้ระบบอนุภาคนี้มีดีกรีแห่งความเป็นอิสระเป็น n และเป็นจำนวนของโคออดิเนตแบบทั่วไปด้วย ดังนั้นโคออดิเนตแบบทั่วไปคือ

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

การเปลี่ยนของโครงสร้างจาก $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ 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

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

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

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

(๗-1)

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 แสดงถึงจำนวนของโคออดิ

เนตแบบทั่วไป หรือจำนวนของดีกรีแห่งความอิสระ โดยที่ q_k เป็นโคออดิเนตแบบทั่วไป ใด ๆ ไปใด ๆ ส่วนตัวห้อย i แสดงถึงจำนวนโคออดิเนตในพิกัดฉาก (rectangular) ดังนั้น สำหรับระบบอนุภาคที่มี N อนุภาค ค่าของ i จึงมีค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$

ข-2 แรงแบบทั่วไป

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ไปเป็นระยะขจัด dr ด้วยแรง \vec{F} งานในช่วงนี้ (δW) ซึ่งเกิดจากแรง \vec{F} หาได้จาก

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

หรือถ้าเราอธิบาย δW ตามวิธีการในหัวข้อ ข-1 เราได้

$$\delta W = \sum_i F_i dx_i \quad (ข-2)$$

สูตรของสมการ (ข-2) ใช้ได้ทั้งกรณีของอนุภาคเดี่ยวและระบบอนุภาค อนุภาคเดี่ยวค่าของ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง 3 ส่วนระบบอนุภาค ค่าของ i เป็นค่าระหว่าง 1 ถึง $3N$

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

โดยการสลับค่าของ \sum_i กับ \sum_k จะได้

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

สมการ (ข-3) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\delta W = \sum_k Q_k \delta q_k \quad (ข-4)$$

เมื่อ

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

ค่าของ Q_k ซึ่งอธิบายตามสมการ (ข-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

การหาค่าปริมาณ Q_k ทุก ๆ แรงแบบทั่วไป Q_k สามารถคำนวณได้โดยตรงจากความเป็จริง กล่าวคือถ้า $Q_k \delta q_k$ เป็นงานของระบบ Q_k ก็คือแรงภายนอกใด ๆ เมื่อโคออดิเนต q_k เปลี่ยนไป δq_k ตัวอย่างเช่น งานของวัตถุแข็งเกร็ง งานนี้เป็นงานที่เกิดจากแรงภายนอกเมื่อวัตถุหมุนไปเป็นมุม $\delta \theta$ รอบแกนที่กำหนด $L_o \delta \theta$ เมื่อ L_o เป็นขนาดของโมเมนต์ของแรงทั้งหมด ในกรณีของตัวอย่างนี้ L_o คือแรงแบบทั่วไป และ คือ θ โคออดิเนตแบบทั่วไป

แรงแบบทั่วไปสำหรับระบบอนุรักษ

เราทราบแล้วว่าหากพิจารณาในพิกัดฉาก แรงที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่สำหรับระบบอนุรักษ กำหนดได้จาก

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

เมื่อ V เป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ (potential energy function) จากสมการ (ข-5) ดังนั้นแรงแบบทั่วไป สำหรับระบบอนุรักษ คือ

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

หรือ

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

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

ข-3 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

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

เมื่อคาร์ทีเซียนโคออดิเนต x_i เป็นฟังก์ชันของโคออดิเนตแบบทั่วไป q_k และเป็นอนุพันธ์ของเวลากว่าคือ

$$\dot{x}_i = x_i(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \quad (\text{ข-9})$$

ดังนั้นเมื่อเราดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (ข-9) จะได้

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

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

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

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

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

$$\frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k} \right) = \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_k} + \dot{x}_i \frac{\partial \dot{x}_i}{\partial \dot{q}_k}$$

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 คูณตลอด

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

โดยการใส่ \sum_i ตลอด แล้วแทนค่า T จากสมการ (ข-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 (ข-5) ดังนั้น

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

สมการ (ข-12) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเคลื่อนที่ในโคออดิเนตแบบทั่วไป ซึ่งเรารู้จักในชื่อของ “สมการการเคลื่อนที่ของลากรานจ์”

ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของระบบอนุรักษ์ ซึ่งค่าของแรงแบบทั่วไป Q_k เป็นไปตามสมการ (ข-7) ดังนั้น สมการการของลากรานจ์ เขียนใหม่ได้เป็น

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

เพื่อความสะดวกในการนำไปใช้ ลากรานจ์กำหนดฟังก์ชันของเขา (Lagrangian function) เป็น

$$L = T - V \quad (\text{ข-14})$$

เมื่อ T และ V อธิบายในเทอมของ โคออดิเนตแบบทั่วไป และสมการ (ข-14) เราเขียนได้เป็น

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

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

จากการแทนค่าสมการ (ข-15) ในสมการ (ข-13) ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของลากรางจ์ในกรณีระบบอนุรักษ์ คือ

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

สำหรับกรณีของระบบไม่อนุรักษ์ กล่าวคือแรงแบบทั่วไป Q_k ไม่เป็นไปตามสมการ (ข-7) ให้ปริมาณ Q'_k เป็นปริมาณส่วนที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น

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

ในทำนองเดียวกัน เราสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของลากรางจ์ในกรณีของระบบไม่อนุรักษ์ได้เป็น

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

ตัวอย่างของแรงแบบทั่วไป Q'_k เช่นแรงเสียดทาน เป็นต้น

ข-4 การประยุกต์สมการของลากรางจ์ไปใช้ในบางกรณี

การใช้สมการของลากรางจ์ หาสมการดิฟเฟอเรนเชียลของการเคลื่อนที่สำหรับระบบใด ๆ นั้น เรามีหลักเกณฑ์โดยทั่วไป ดังนี้

- 1) กำหนดโคออดิเนตแบบทั่วไป ที่เหมาะสมสำหรับ โครงสร้างของระบบ
- 2) หาค่าของพลังงานจลน์ T ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

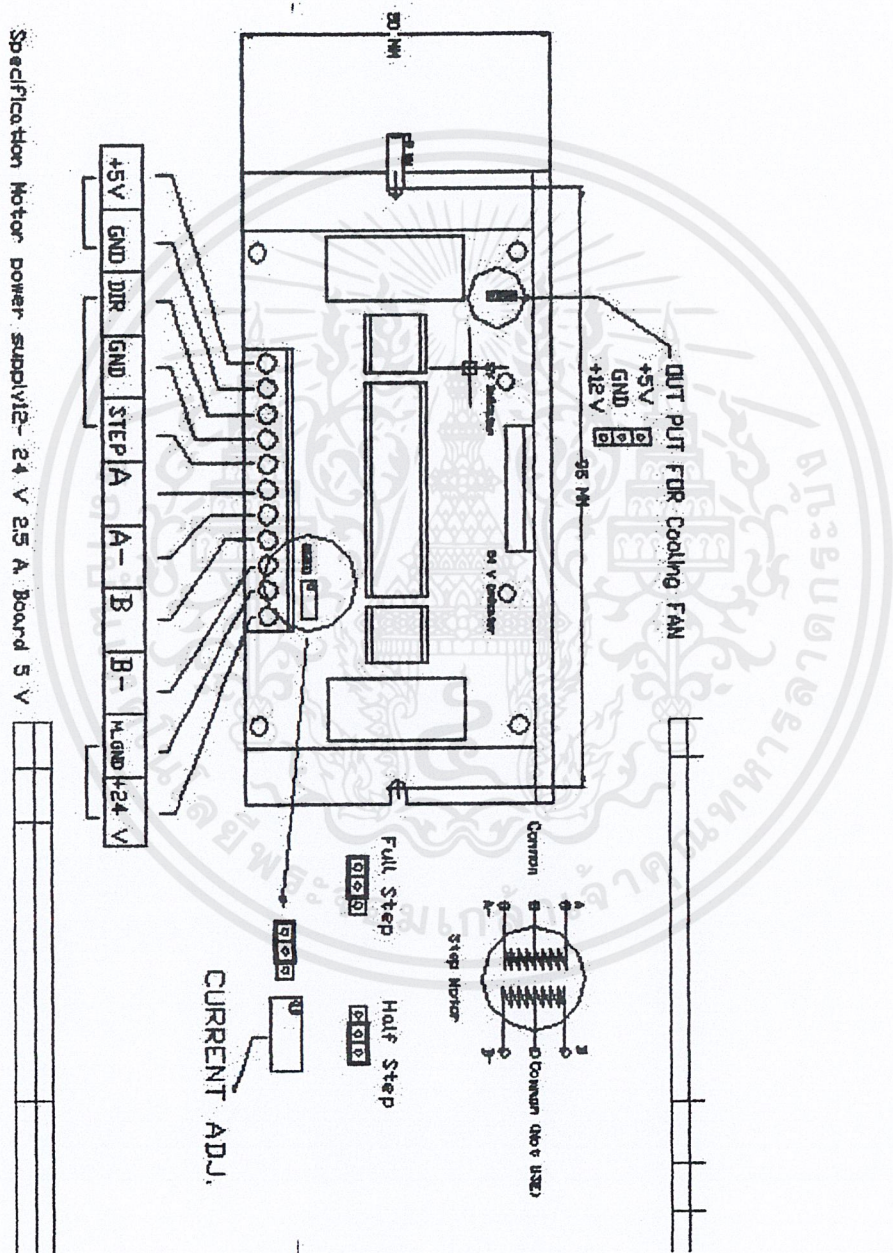
- 3) ถ้าเป็นระบบอนุรักษ์ ให้หาค่าของพลังงานศักย์ V ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป ถ้าไม่ใช่ระบบอนุรักษ์ ให้หาค่าของแรงแบบทั่วไป ในเทอมของโคออดิเนตแบบทั่วไป
- 4) สมการของลากรางจ์ที่จะประยุกต์มาใช้คือสมการ (๗-12),(๗-16) และ (๗-18)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ค-1 แบบ โครงสร้างของวงจรที่ใช้ในการแปลงดิจิทัลเป็นอนาลอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค-2 องค์ประกอบของวงจร

วงจรนี้จะใช้ไฟเลี้ยงวงจร 5 โวลต์ โดยรับมาจากภายนอก และรับไฟเลี้ยงมอเตอร์ซึ่งจะมีค่าระหว่าง 12 ถึง 24 โวลต์ จากภายนอกแล้วมาสร้างสัญญาณเสต็ป เพื่อบังคับมอเตอร์ ซึ่งสัญญาณนั้นสร้างจากข้อมูลที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน 2 เส้น เส้นแรกเป็นทิศทาง ส่วนเส้นที่สองจะสร้างสัญญาณความถี่คงที่(Pulse)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



April 1998

LMD18200 3A, 55V H-Bridge

General Description

The LMD18200 is a 3A H-Bridge designed for motion control applications. The device is built using a multi-technology process which combines bipolar and CMOS control circuitry with DMOS power devices on the same monolithic structure. Ideal for driving DC and stepper motors, the LMD18200 accommodates peak output currents up to 6A. An innovative circuit which facilitates low-loss sensing of the output current has been implemented.

Features

- Delivers up to 3A continuous output
- Operates at supply voltages up to 55V
- Low $R_{DS(ON)}$ typically 0.3 Ω per switch
- TTL and CMOS compatible inputs

- No "shoot-through" current
- Thermal warning flag output at 145°C
- Thermal shutdown (outputs off) at 170°C
- Internal clamp diodes
- Shorted load protection
- Internal charge pump with external bootstrap capability

Applications

- DC and stepper motor drives
- Position and velocity servomechanisms
- Factory automation robots
- Numerically controlled machinery
- Computer printers and plotters

Functional Diagram

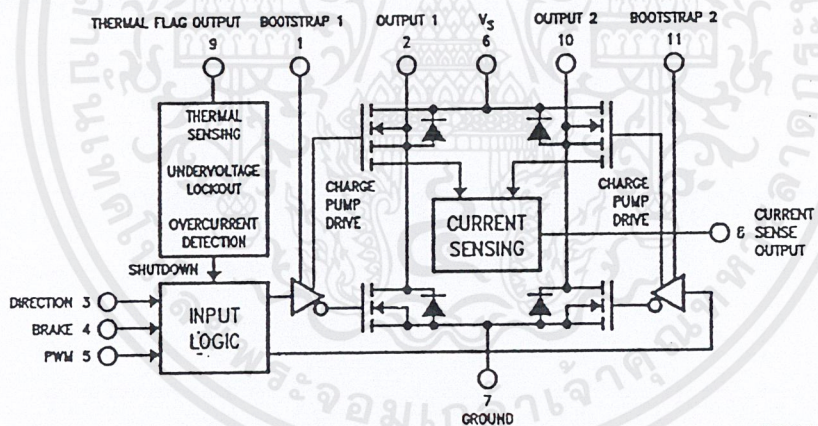
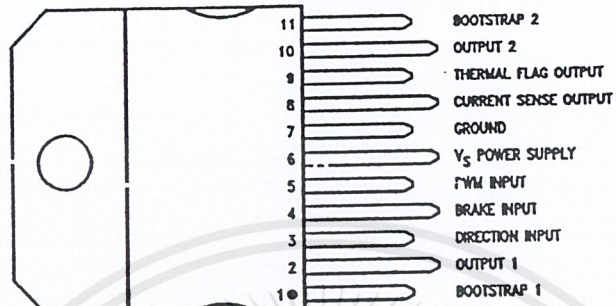


FIGURE 1. Functional Block Diagram of LMD18200

DS010508-1

Connection Diagram and Ordering Information



MOUNTING TAB CONNECTED TO GROUND (PIN 7)

00010500-2

Top View
Order Number LMD18200T
See NS Package TA11B



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage (V_{B} , Pin 6)	60V
Voltage at Pins 3, 4, 5, 8 and 9	12V
Voltage at Bootstrap Pins (Pins 1 and 11)	$V_{OUT} + 16V$
Peak Output Current (200 ms)	6A
Continuous Output Current (Note 2)	3A
Power Dissipation (Note 3)	25W

Power Dissipation ($T_A = 25^\circ\text{C}$, Free Air)	3W
Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$	150°C
ESD Susceptibility (Note 4)	1500V
Storage Temperature, T_{STG}	-40°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C

Operating Ratings (Note 1)

Junction Temperature, T_J	-40°C to +125°C
V_B Supply Voltage	+12V to +55V

Electrical Characteristics (Note 5)

The following specifications apply for $V_B = 42V$, unless otherwise specified. Boldface limits apply over the entire operating temperature range, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, all other limits are for $T_A = T_J = 25^\circ\text{C}$.

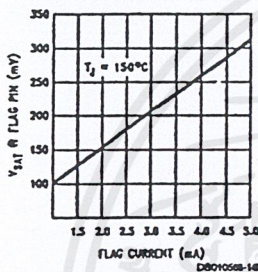
Symbol	Parameter	Conditions	Typ	Limt	Units
$R_{DS(ON)}$	Switch ON Resistance	Output Current = 3A (Note 6)	0.33	0.4/0.6	Ω (max)
$R_{DS(ON)}$	Switch ON Resistance	Output Current = 6A (Note 6)	0.33	0.4/0.6	Ω (max)
V_{CLAMP}	Clamp Diode Forward Drop	Clamp Current = 3A (Note 6)	1.2	1.5	V (max)
V_{IL}	Logic Low Input Voltage	Pins 3, 4, 5		-0.1	V (min)
				0.8	V (max)
I_{IL}	Logic Low Input Current	$V_{IN} = -0.1V$, Pins = 3, 4, 5		-10	μA (max)
V_{IH}	Logic High Input Voltage	Pins 3, 4, 5		2	V (min)
				12	V (max)
I_{IH}	Logic High Input Current	$V_{IN} = 12V$, Pins = 3, 4, 5		10	μA (max)
	Current Sense Output	$I_{OUT} = 1A$ (Note 8)	377	325/300	μA (min)
				425/450	μA (max)
	Current Sense Linearity	$1A \leq I_{OUT} \leq 3A$ (Note 7)	± 6	± 9	%
	Undervoltage Lockout	Outputs turn OFF		9	V (min)
				11	V (max)
T_{JW}	Warning Flag Temperature	Pin 9 $\leq 0.8V$, $I_L = 2\text{mA}$	145		$^\circ\text{C}$
$V_F(ON)$	Flag Output Saturation Voltage	$T_J = T_{JW}$, $I_L = 2\text{mA}$	0.15		V
$I_F(OFF)$	Flag Output Leakage	$V_F = 12V$	0.2	10	μA (max)
T_{JSD}	Shutdown Temperature	Outputs Turn OFF	170		$^\circ\text{C}$
I_S	Quiescent Supply Current	All Logic Inputs Low	13	25	mA (max)
t_{ON}	Output Turn-On Delay Time	Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$	300		ns
		Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	300		ns
t_{on}	Output Turn-On Switching Time	Bootstrap Capacitor = 10 nF			
		Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$	100		ns
		Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	80		ns
t_{OFF}	Output Turn-Off Delay Times	Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$	200		ns
		Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	200		ns
t_{off}	Output Turn-Off Switching Times	Bootstrap Capacitor = 10 nF			
		Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$	75		ns
		Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	70		ns
t_{pw}	Minimum Input Pulse Width	Pins 3, 4 and 5	1		μs
t_{CP}	Charge Pump Rise Time	No Bootstrap Capacitor	20		μs

Electrical Characteristics Notes

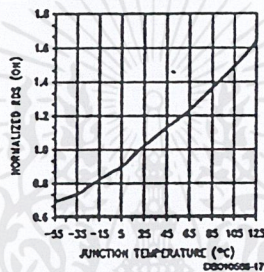
- Note 1: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions.
- Note 2: See Application Information for details regarding current limiting.
- Note 3: The maximum power dissipation must be derated at elevated temperatures and is a function of $T_{J(max)}$, θ_{JA} , and T_A . The maximum allowable power dissipation at any temperature is $P_{D(max)} = (T_{J(max)} - T_A) / \theta_{JA}$, or the number given in the Absolute Ratings, whichever is lower. The typical thermal resistance from junction to case (θ_{JC}) is 1.0°C/W and from junction to ambient (θ_{JA}) is 30°C/W. For guaranteed operation $T_{J(max)} = 125^\circ\text{C}$.
- Note 4: Human-body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor. Except Bootstrap pins (pins 1 and 11) which are protected to 1000V of ESD.
- Note 5: All limits are 10" ; production tested at 25°C. Temperature extreme limits are guaranteed via correlation using accepted SQC (Statistical Quality Control) methods. All limits are used to calculate AOQL (Average Outgoing Quality Level).
- Note 6: Output currents are pulsed ($t_W < 2$ ms, Duty Cycle < 5%).
- Note 7: Regulation is calculated relative to the current sense output value with a *A load.
- Note 8: Selections for tighter tolerances are available. Contact factory.

Typical Performance Characteristics

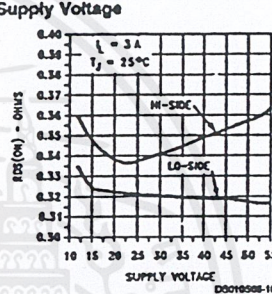
V_{FAT} vs Flag Current



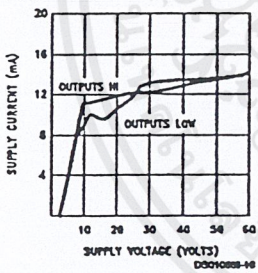
R_{DS(ON)} vs Temperature



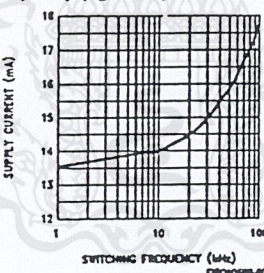
R_{DS(ON)} vs Supply Voltage



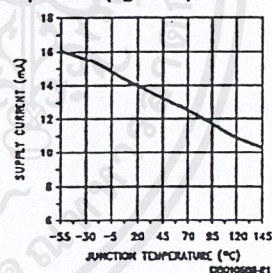
Supply Current vs Supply Voltage



Supply Current vs Frequency (V_S = 42V)



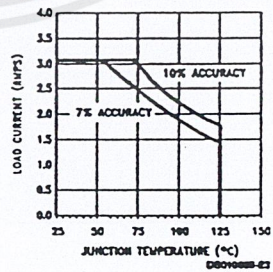
Supply Current vs Temperature (V_S = 42V)



Current Sense Output vs Load Current

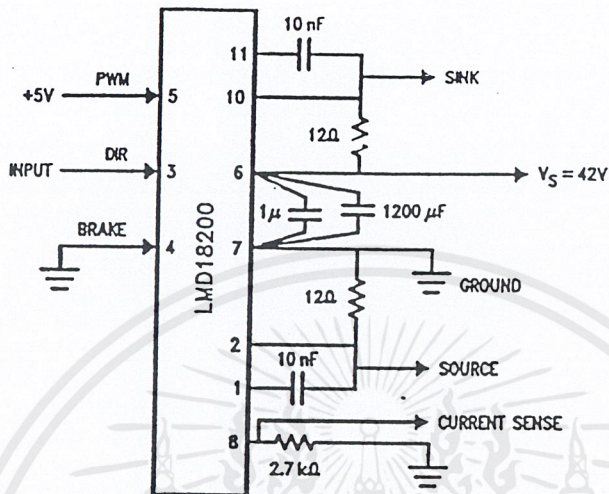


Current Sense Operating Region

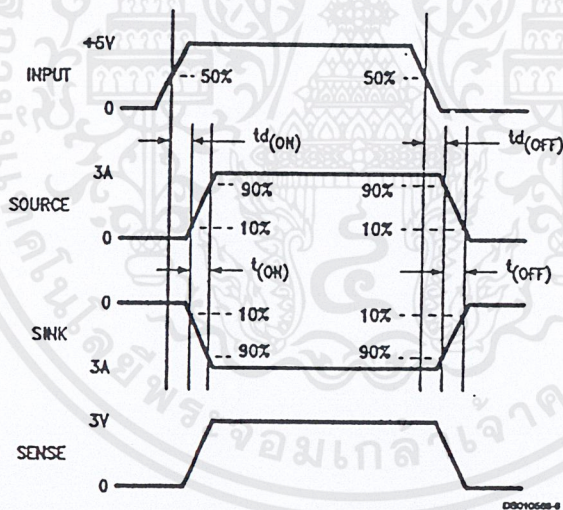


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Test Circuit



Switching Time Definitions



Pinout Description (See Connection Diagram)

Pin 1, BOOTSTRAP 1 Input: Bootstrap capacitor pin for half H-bridge number 1. The recommended capacitor (10 nF) is connected between pins 1 and 2.

Pin 2, OUTPUT 1: Half H-bridge number 1 output.

Pin 3, DIRECTION Input: See Table 1. This input controls the direction of current flow between OUTPUT 1 and OUTPUT 2 (pins 2 and 10) and, therefore, the direction of rotation of a motor load.

Pin 4, BRAKE Input: See Table 1. This input is used to brake a motor by effectively shorting its terminals. When

braking is desired, this input is taken to a logic high level and it is also necessary to apply logic high to PWM input, pin 5. The drivers that short the motor are determined by the logic level at the DIRECTION input (Pin 3): with Pin 3 logic high, both current sourcing output transistors are ON; with Pin 3 logic low, both current sinking output transistors are ON. All output transistors can be turned OFF by applying a logic high to Pin 4 and a logic low to PWM input Pin 5; in this case only a small bias current (approximately -1.5 mA) exists at each output pin.

Pinout Description

(See Connection Diagram) (Continued)

Pin 5, PWM Input: See Table 1. How this input (and DIRECTION input, Pin 3) is used is determined by the format of the PWM signal.

Pin 6, V_{cc} Power Supply

Pin 7, GROUND Connection: This pin is the ground return, and is internally connected to the mounting tab.

Pin 8, CURRENT SENSE Output: This pin provides the sourcing current sensing output signal, which is typically 377 μ A/A.

Pin 9, THERMAL FLAG Output: This pin provides the thermal warning flag output signal. Pin 9 becomes active-low at 145°C (junction temperature). However the chip will not shut itself down until 170°C is reached at the junction.

Pin 10, OUTPUT 2: Half H-bridge number 2 output.

Pin 11, BOOTSTRAP 2 Input: Bootstrap capacitor pin for Half H-bridge number 2. The recommended capacitor (10 nF) is connected between pins 10 and 11.

absence of a pulse signal (a continuous logic low level) represents zero drive. Current delivered to the load is proportional to pulse width. For the LMD18200, the DIRECTION input (pin 3) is driven by the sign signal and the PWM input (pin 5) is driven by the magnitude signal.

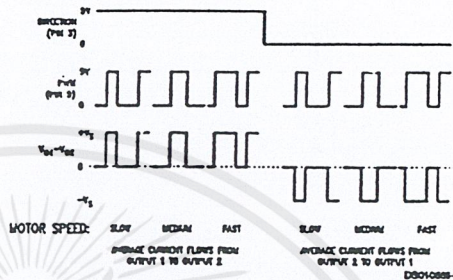


FIGURE 3. Sign/Magnitude PWM Control

USING THE CURRENT SENSE OUTPUT

The CURRENT SENSE output (pin 8) has a sensitivity of 377 μ A per ampere of output current. For optimal accuracy and linearity of this signal, the value of voltage generating resistor between pin 8 and ground should be chosen to limit the maximum voltage developed at pin 8 to 5V, or less. The maximum voltage compliance is 12V.

It should be noted that the recirculating currents (free wheeling currents) are ignored by the current sense circuitry. Therefore, only the currents in the upper sourcing outputs are sensed.

USING THE THERMAL WARNING FLAG

The THERMAL FLAG output (pin 9) is an open collector transistor. This permits a wired OR connection of thermal warning flag outputs from multiple LMD18200's, and allows the user to set the logic high level of the output signal swing to match system requirements. This output typically drives the interrupt input of a system controller. The interrupt service routine would then be designed to take appropriate steps, such as reducing load currents or initiating an orderly system shutdown. The maximum voltage compliance on the flag pin is 12V.

SUPPLY BYPASSING

During switching transitions the levels of fast current changes experienced may cause troublesome voltage transients across system stray inductance.

It is normally necessary to bypass the supply rail with a high quality capacitor(s) connected as close as possible to the V_{cc} Power Supply (Pin 6) and GROUND (Pin 7). A 1 μ F high-frequency ceramic capacitor is recommended. Care should be taken to limit the transients on the supply pin below the Absolute Maximum Rating of the device. When operating the chip at supply voltages above 40V a voltage suppressor (transorb) such as P8KE62A is recommended from supply to ground. Typically the ceramic capacitor can be eliminated in the presence of the voltage suppressor. Note that when driving high load currents a greater amount of supply bypass capacitance (in general at least 100 μ F per Amp of load current) is required to absorb the recirculating currents of the inductive loads.

TABLE 1. Logic Truth Table

PWM	Dir	Brake	Active Output Drivers
H	H	L	Source 1, Sink 2
H	L	L	Sink 1, Source 2
L	X	L	Source 1, Source 2
H	H	H	Source 1, Source 2
H	L	H	Sink 1, Sink 2
L	X	H	NONE

Application Information

TYPES OF PWM SIGNALS

The LMD18200 readily interfaces with different forms of PWM signals. Use of the part with two of the more popular forms of PWM is described in the following paragraphs.

Simple, locked anti-phase PWM consists of a single, variable duty-cycle signal in which is encoded both direction and amplitude information (see Figure 2). A 50% duty-cycle PWM signal represents zero drive, since the net value of voltage (integrated over one period) delivered to the load is zero. For the LMD18200, the PWM signal drives the direction input (pin 3) and the PWM input (pin 5) is tied to logic high.

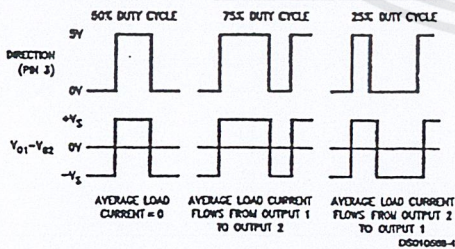


FIGURE 2. Locked Anti-Phase PWM Control

Sign/magnitude PWM consists of separate direction (sign) and amplitude (magnitude) signals (see Figure 3). The (absolute) magnitude signal is duty-cycle modulated, and the

Application Information (Continued)

CURRENT LIMITING

Current limiting protection circuitry has been incorporated into the design of the LMD18200. With any power device it is important to consider the effects of the substantial surge currents through the device that may occur as a result of shorted loads. The protection circuitry monitors this increase in current (the threshold is set to approximately 10 Amps) and shuts off the power device as quickly as possible in the event of an overload condition. In a typical motor driving application the most common overload faults are caused by shorted motor windings and locked rotors. Under these conditions the inductance of the motor (as well as any series inductance in the V_{CC} supply line) serves to reduce the magnitude of a current surge to a safe level for the LMD18200. Once the device is shut down, the control circuitry will periodically try to turn the power device back on. This feature allows the immediate return to normal operation in the event that the fault condition has been removed. While the fault remains however, the device will cycle in and out of thermal shutdown. This can create voltage transients on the V_{CC} supply line and therefore proper supply bypassing techniques are required.

The most severe condition for any power device is a direct, hard-wired ("screwdriver") long term short from an output to ground. This condition can generate a surge of current through the power device on the order of 15 Amps and require the die and package to dissipate up to 500 Watts of power for the short time required for the protection circuitry to shut off the power device. This energy can be destructive, particularly at higher operating voltages (>30V) so some precautions are in order. Proper heat sink design is essential and it is normally necessary to heat sink the V_{CC} supply pin (pin 6) with 1 square inch of copper on the PCB.

INTERNAL CHARGE PUMP AND USE OF BOOTSTRAP CAPACITORS

To turn on the high-side (sourcing) DMOS power devices, the gate of each device must be driven approximately 8V more positive than the supply voltage. To achieve this an internal charge pump is used to provide the gate drive voltage. As shown in Figure 4, an internal capacitor is alternately switched to ground and charged to about 14V, then switched to V supply thereby providing a gate drive voltage greater than V supply. This switching action is controlled by a continuously running internal 300 kHz oscillator. The rise time of this drive voltage is typically 20 μ s which is suitable for operating frequencies up to 1 kHz.

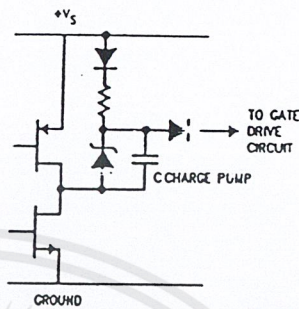


FIGURE 4. Internal Charge Pump Circuitry

For higher switching frequencies, the LMD18200 provides for the use of external bootstrap capacitors. The bootstrap principle is in essence a second charge pump whereby a large value capacitor is used which has enough energy to quickly charge the parasitic gate input capacitance of the power device resulting in much faster rise times. The switching action is accomplished by the power switches themselves Figure 5. External 10 nF capacitors, connected from the outputs to the bootstrap pins of each high-side switch provide typically less than 100 ns rise times allowing switching frequencies up to 500 kHz.

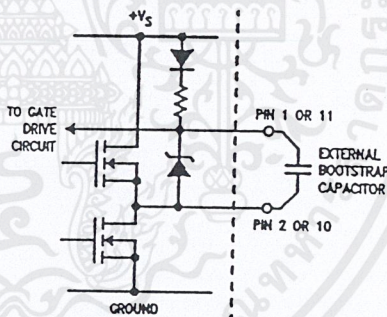


FIGURE 5. Bootstrap Circuitry

INTERNAL PROTECTION DIODES

A major consideration when switching current through inductive loads is protection of the switching power devices from the large voltage transients that occur. Each of the four switches in the LMD18200 have a built-in protection diode to clamp transient voltages exceeding the positive supply or ground to a safe diode voltage drop across the switch.

The reverse recovery characteristics of these diodes, once the transient has subsided, is important. These diodes must come out of conduction quickly and the power switches must be able to conduct the additional reverse recovery current of the diodes. The reverse recovery time of the diodes protecting the sourcing power devices is typically only 70 ns with a reverse recovery current of 1A when tested with a full 8A of forward current through the diode. For the sinking devices the recovery time is typically 100 ns with 4A of reverse current under the same conditions.

Typical Applications

FIXED OFF-TIME CONTROL

This circuit controls the current through the motor by applying an average voltage equal to zero to the motor terminals for a fixed period of time, whenever the current through the motor exceeds the commanded current. This action causes

the motor current to vary slightly about an externally controlled average level. The duration of the Off-period is adjusted by the resistor and capacitor combination of the LM555. In this circuit the Sign/Magnitude mode of operation is implemented (see Types of PWM Signals).

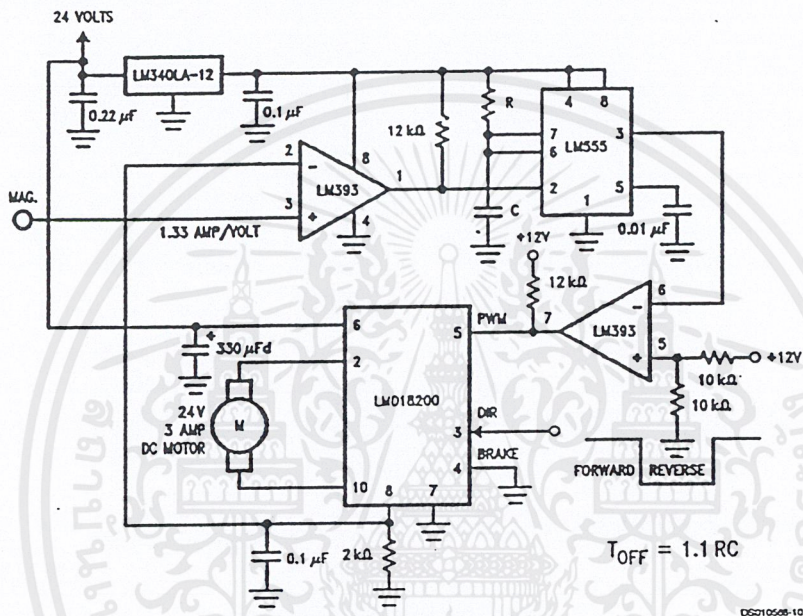


FIGURE 6. Fixed Off-Time Control

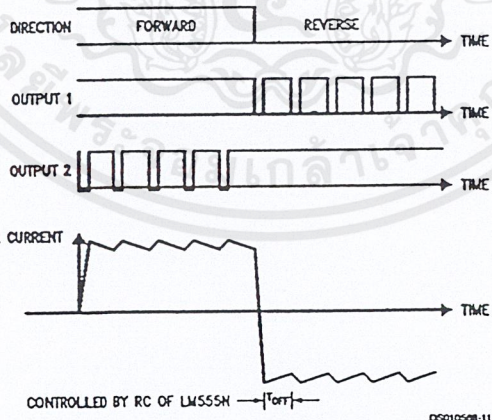


FIGURE 7. Switching Waveforms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

TORQUE REGULATION

Locked Anti-Phase Control of a brushed DC motor. Current sense output of the LMD18200 provides load sensing. The LM3525A is a general purpose PWM controller. The relationship of peak motor current to adjustment voltage is shown in Figure 9.

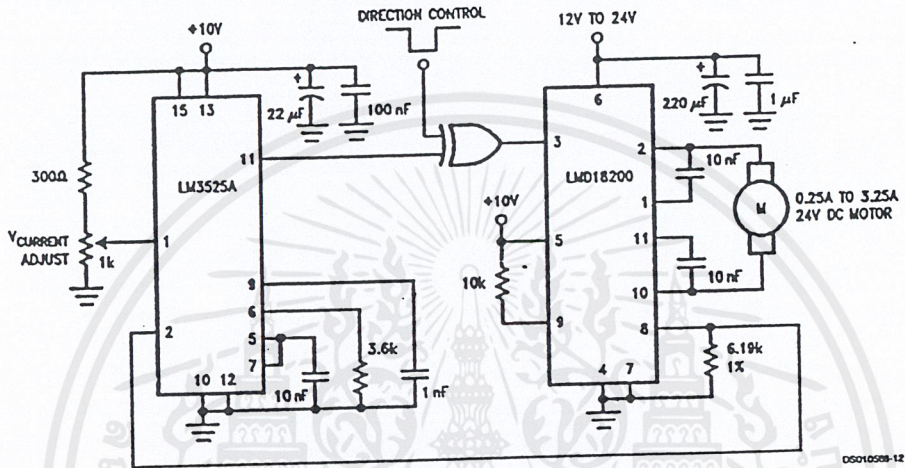


FIGURE 8. Locked Anti-Phase Control Regulates Torque

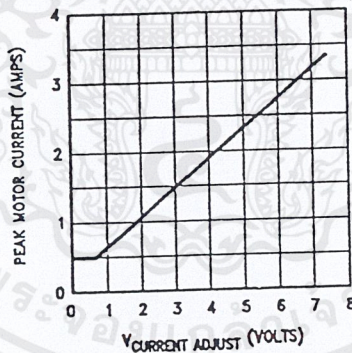


FIGURE 9. Peak Motor Current vs. Adjustment Voltage

VELOCITY REGULATION

Utilizes tachometer output from the motor to sense motor speed for a locked anti-phase control loop. The relationship of motor speed to the speed adjustment control voltage is shown in Figure 11.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

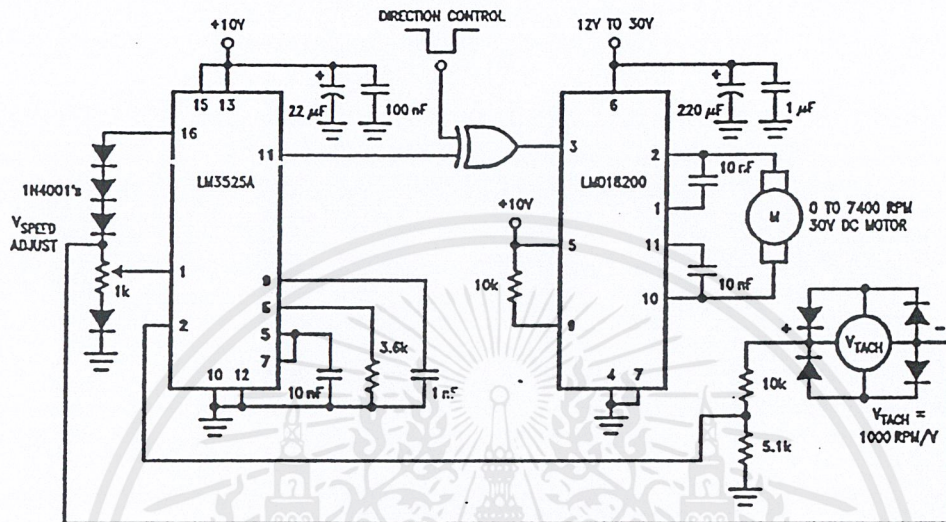


FIGURE 10. Regulate Velocity with Tachometer Feedback

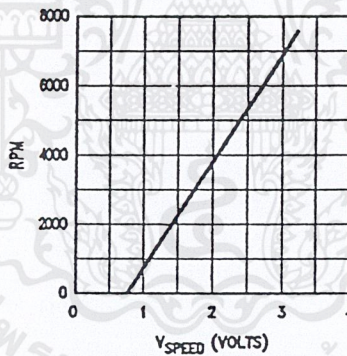


FIGURE 11. Motor Speed vs Control Voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Order this document by SG3525AD

SG3525A SG3527A

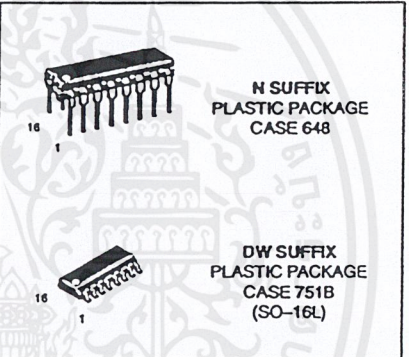
Pulse Width Modulator Control Circuits

The SG3525A, SG3527A pulse width modulator control circuits offer improved performance and lower external parts count when implemented for controlling all types of switching power supplies. The on-chip +5.1 V reference is trimmed to $\pm 1\%$ and the error amplifier has an input common-mode voltage range that includes the reference voltage, thus eliminating the need for external divider resistors. A sync input to the oscillator enables multiple units to be slaved or a single unit to be synchronized to an external system clock. A wide range of deadtime can be programmed by a single resistor connected between the CT and Discharge pins. These devices also feature built-in soft-start circuitry, requiring only an external timing capacitor. A shutdown pin controls both the soft-start circuitry and the output stages, providing instantaneous turn off through the PWM latch with pulsed shutdown, as well as soft-start recycle with longer shutdown commands. The under voltage lockout inhibits the outputs and the changing of the soft-start capacitor when VCC is below nominal. The output stages are totem-pole design capable of sinking and sourcing in excess of 200 mA. The output stage of the SG3525A features NOR logic resulting in a low output for an off-state while the SG3527A utilized OR logic which gives a high output when off.

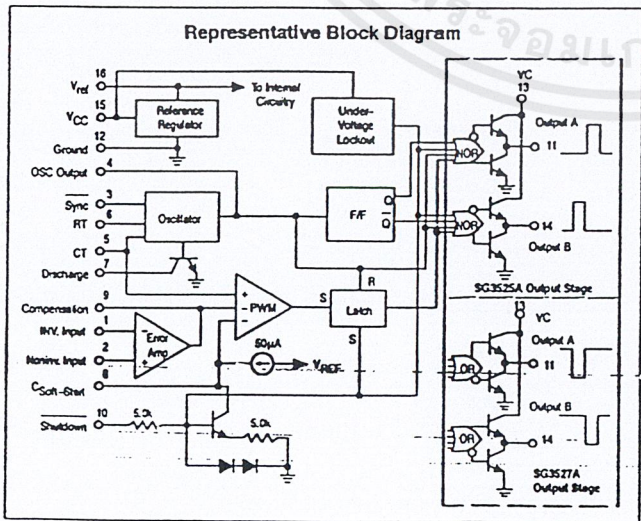
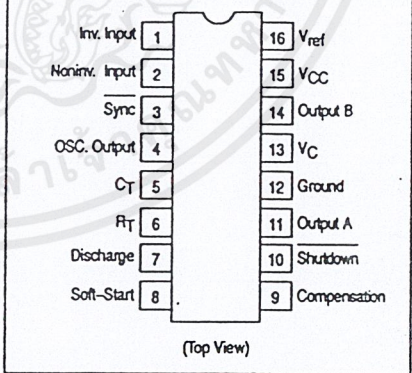
- 8.0 V to 35 V Operation
- 5.1 V \pm 1.0% Trimmed Reference
- 100 Hz to 400 kHz Oscillator Range
- Separate Oscillator Sync Pin
- Adjustable Deadtime Control
- Input Undervoltage Lockout
- Latching PWM to Prevent Multiple Pulses
- Pulse-by-Pulse Shutdown
- Dual Source/Sink Outputs: \pm 400 mA Peak

PULSE WIDTH MODULATOR CONTROL CIRCUITS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA



PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
SG3525AN	T _A = 0° to +70°C	Plastic DIP
SG3525ADW		SO-16L
SG3527AN		Plastic DIP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG3525A SG3527A

MAXIMUM RATINGS (Note 1)

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	+40	V _{dc}
Collector Supply Voltage	V _C	+40	V _{dc}
Logic Inputs		-0.3 to +5.5	V
Analog Inputs		-0.3 to V _{CC}	V
Output Current, Source or Sink	I _O	±500	mA
Reference Output Current	I _{ref}	50	mA
Oscillator Charging Current		5.0	mA
Power Dissipation (Plastic & Ceramic Package) T _A = +25°C (Note 2) T _C = +25°C (Note 3)	P _D	1000 2000	mW
Thermal Resistance Junction-to-Air	R _{θJA}	100	°C/W
Thermal Resistance Junction-to-Case	R _{θJC}	60	°C/W
Operating Junction Temperature	T _J	+150	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	-55 to +125	°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	T _{Solder}	+300	°C

NOTES: 1. Values beyond which damage may occur.
2. Derate at 10 mW/°C for ambient temperatures above +50°C.
3. Derate at 16 mW/°C for case temperatures above +25°C.

RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Characteristics	Symbol	Min	Max	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	8.0	35	V _{dc}
Collector Supply Voltage	V _C	4.5	35	V _{dc}
Output Sink/Source Current (Steady State) (Peak)	I _O	0 0	±100 ±400	mA
Reference Load Current	I _{ref}	0	20	mA
Oscillator Frequency Range	f _{osc}	0.1	400	kHz
Oscillator Timing Resistor	R _T	2.0	150	kΩ
Oscillator Timing Capacitor	C _T	0.001	0.2	μF
Deadtime Resistor Range	R _D	0	500	Ω
Operating Ambient Temperature Range	T _A	0	+70	°C

APPLICATION INFORMATION

Shutdown Options (See Block diagram, front page)

Since both the compensation and soft-start terminals (Pins 9 and 8) have current source pull-ups, either can readily accept a pull-down signal which only has to sink a maximum of 100 μA to turn off the outputs. This is subject to the added requirement of discharging whatever external capacitance may be attached to these pins.

An alternate approach is the use of the shutdown circuitry of Pin 10 which has been improved to enhance the available shutdown options. Activating this circuit by applying a positive signal on Pin 10 performs two functions: the PWM

latch is immediately set providing the fastest turn-off signal to the outputs; and a 150 μA current sink begins to discharge the external soft-start capacitor. If the shutdown command is short, the PWM signal is terminated without significant discharge of the soft-start capacitor, thus, allowing, for example, a convenient implementation of pulse-by-pulse current limiting. Holding Pin 10 high for a longer duration, however, will ultimately discharge this external capacitor, recycling slow turn-on upon release.

Pin 10 should not be left floating as noise pickup could conceivably interrupt normal operation.

SG3525A SG3527A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = +20$ Vdc, $T_A = T_{low}$ to T_{high} [Note 4], unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
REFERENCE SECTION					
Reference Output Voltage ($T_J = +25^\circ\text{C}$)	V_{ref}	5.00	5.10	5.20	Vdc
Line Regulation ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$)	Reg_{line}	-	10	20	mV
Load Regulation ($0\text{ mA} \leq I_L \leq 20\text{ mA}$)	Reg_{load}	-	20	50	mV
Temperature Stability	$\Delta V_{ref}/\Delta T$	-	20	-	mV
Total Output Variation Includes Line and Load Regulation over Temperature	ΔV_{ref}	4.95	-	5.25	Vdc
Short Circuit Current ($V_{ref} = 0\text{ V}$, $T_J = +25^\circ\text{C}$)	I_{SC}	-	80	100	mA
Output Noise Voltage (10 Hz $\leq f \leq 10$ kHz, $T_J = +25^\circ\text{C}$)	V_n	-	40	200	μV_{rms}
Long Term Stability ($T_J = +125^\circ\text{C}$) (Note 5)	S	-	20	50	mV/yr

OSCILLATOR SECTION (Note 6, unless otherwise noted.)

Initial Accuracy ($T_J = +25^\circ\text{C}$)		-	± 2.0	± 6.0	%
Frequency Stability with Voltage ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$)	$\frac{\Delta f_{osc}}{D \cdot V_{CC}}$	-	± 1.0	± 2.0	%
Frequency Stability with Temperature	$\frac{\Delta f_{osc}}{D \cdot T}$	-	± 0.3	-	%
Minimum Frequency ($R_T = 150\text{ k}\Omega$, $C_T = 0.2\text{ }\mu\text{F}$)	f_{min}	-	50	-	Hz
Maximum Frequency ($R_T = 2.0\text{ k}\Omega$, $C_T = 1.0\text{ nF}$)	f_{max}	400	-	-	kHz
Current Mirror ($I_{RT} = 2.0\text{ mA}$)		1.7	2.0	2.2	mA
Clock Amplitude		3.0	3.5	-	V
Clock Width ($T_J = +25^\circ\text{C}$)		0.3	0.5	1.0	μs
Sync Threshold		1.2	2.0	2.8	V
Sync Input Current (Sync Voltage = +3.5 V)		-	1.0	2.5	mA

ERROR AMPLIFIER SECTION ($V_{CM} = +5.1\text{ V}$)

Input Offset Voltage	V_{IO}	-	2.0	10	mV
Input Bias Current	I_{IB}	-	1.0	10	μA
Input Offset Current	I_{IO}	-	-	1.0	μA
DC Open Loop Gain ($R_L \geq 10\text{ M}\Omega$)	A_{VOL}	60	75	-	dB
Low Level Output Voltage	V_{OL}	-	0.2	0.5	V
High Level Output Voltage	V_{OH}	3.8	5.6	-	V
Common Mode Rejection Ratio ($+1.5\text{ V} \leq V_{CM} \leq +5.2\text{ V}$)	CMRR	60	75	-	dB
Power Supply Rejection Ratio ($+8.0\text{ V} \leq V_{CC} \leq +35\text{ V}$)	PSRR	50	60	-	dB

PWM COMPARATOR SECTION

Minimum Duty Cycle	DC_{min}	-	-	0	%
Maximum Duty Cycle	DC_{max}	45	49	-	%
Input Threshold, Zero Duty Cycle (Note 6)	V_{th}	0.6	0.9	-	V
Input Threshold, Maximum Duty Cycle (Note 6)	V_{th}	-	3.3	3.6	V
Input Bias Current	I_{IB}	-	0.05	1.0	μA

NOTES: 4. $T_{low} = 0^\circ$ for SG3525A, 3527A $T_{high} = +70^\circ\text{C}$ for SG3525A, 3527A
 5. Since long term stability cannot be measured on each device before shipment, this specification is an engineering estimate of average stability from lot to lot.
 6. Tested at $f_{osc} = 40\text{ kHz}$ ($R_T = 3.6\text{ k}\Omega$, $C_T = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, $R_D = 0\Omega$).

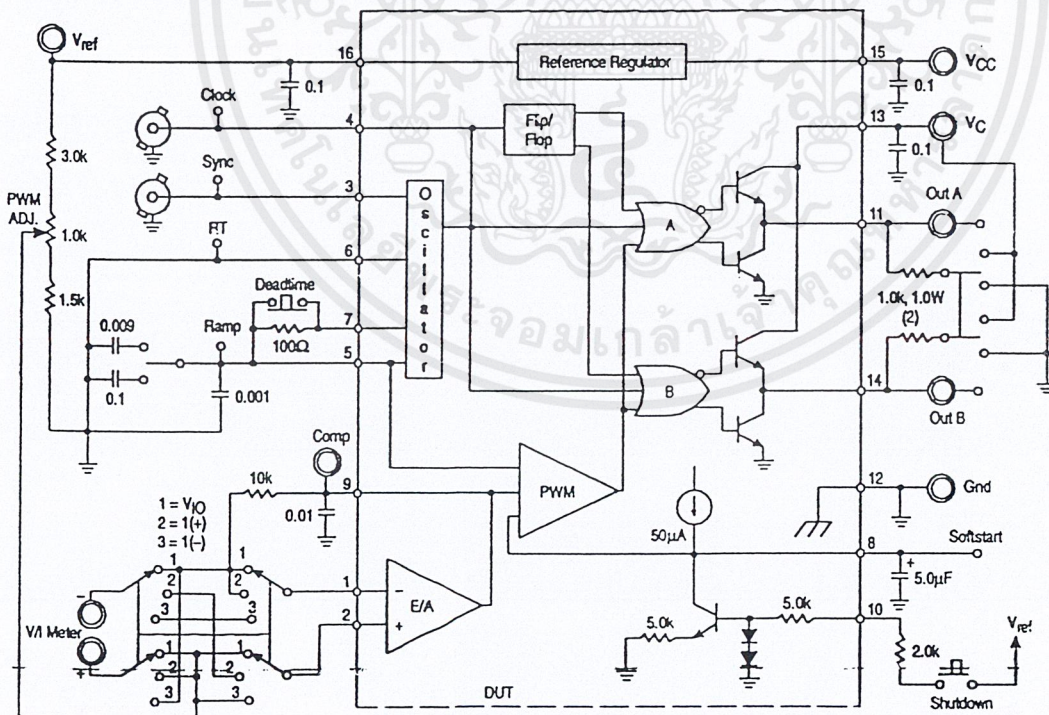
SG3525A SG3527A

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

Characteristics	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
SOFT-START SECTION					
Soft-Start Current ($V_{shutdown} = 0\text{ V}$)		25	50	80	μA
Soft-Start Voltage ($V_{shutdown} = 2.0\text{ V}$)		-	0.4	0.6	V
Shutdown Input Current ($V_{shutdown} = 2.5\text{ V}$)		-	0.4	1.0	mA
OUTPUT DRIVERS (Each Output, $V_{CC} = +20\text{ V}$)					
Output Low Level ($I_{sink} = 20\text{ mA}$) ($I_{sink} = 100\text{ mA}$)	V_{OL}	- -	0.2 1.0	0.4 2.0	V
Output High Level ($I_{source} = 20\text{ mA}$) ($I_{source} = 100\text{ mA}$)	V_{OH}	18 17	19 18	- -	V
Under Voltage Lockout (V_8 and $V_9 = \text{High}$)	V_{UL}	6.0	7.0	8.0	V
Collector Leakage, $V_C = +35\text{ V}$ (Note 7)	$I_C(\text{leak})$	-	-	200	μA
Rise Time ($C_L = 1.0\text{ nF}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	t_r	-	100	600	ns
Fall Time ($C_L = 1.0\text{ nF}$, $T_J = 25^\circ\text{C}$)	t_f	-	50	300	ns
Shutdown Delay ($V_{DS} = +3.0\text{ V}$, $C_S = 0$, $T_J = +25^\circ\text{C}$)	t_{ds}	-	0.2	0.5	μs
Supply Current ($V_{CC} = +35\text{ V}$)	I_{CC}	-	14	20	mA

NOTE: 7. Applies to SG3525A only, due to polarity of output pulses.

Lab Test Fixture



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG3525A SG3527A

Figure 1. Oscillator Charge Time versus R_T

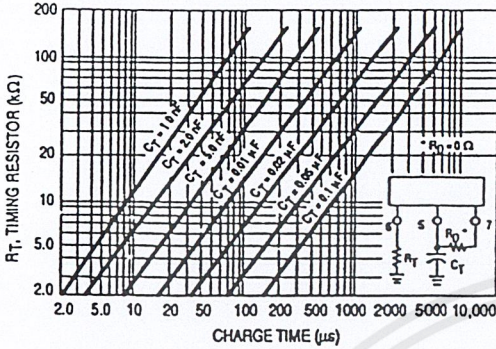


Figure 2. Oscillator Discharge Time versus R_D

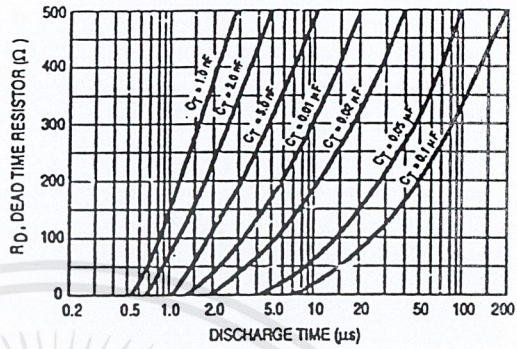


Figure 3. Error Amplifier Open Loop Frequency Response

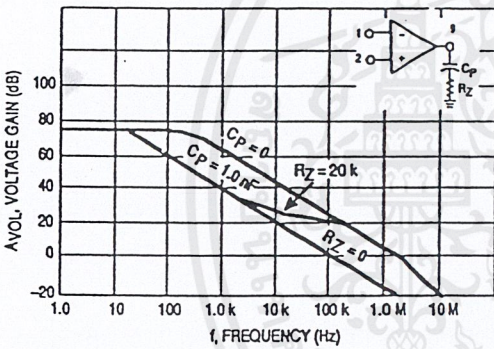


Figure 4. Output Saturation Characteristics (SG3525A)

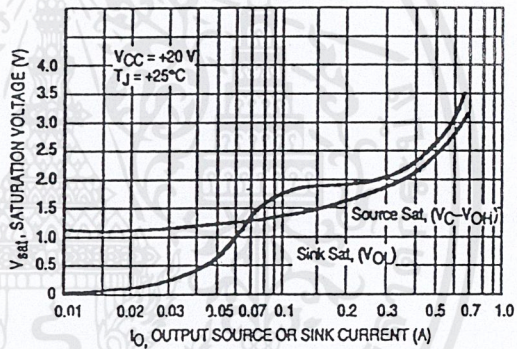


Figure 5. Oscillator Schematic (SG3525A)

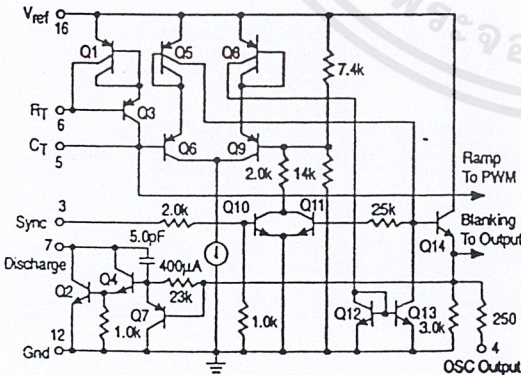
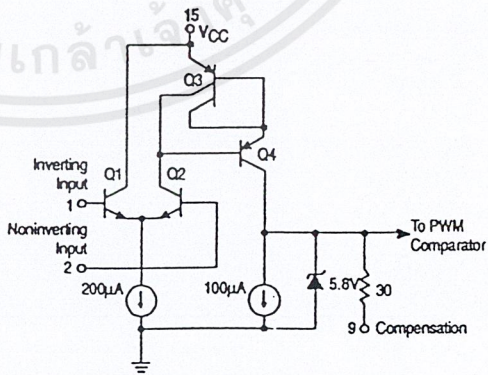


Figure 6. Error Amplifier Schematic (SG3525A)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SG3525A SG3527A

Figure 7. SG3525A Output Circuit (1/2 Circuit Shown)

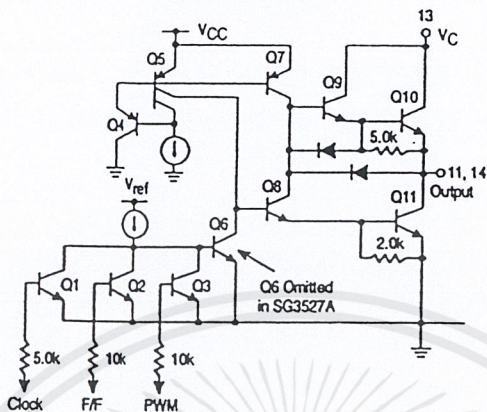
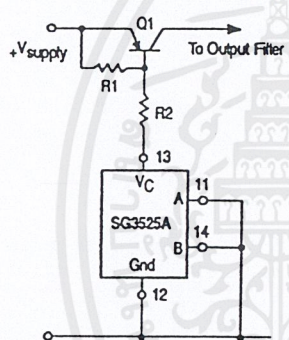
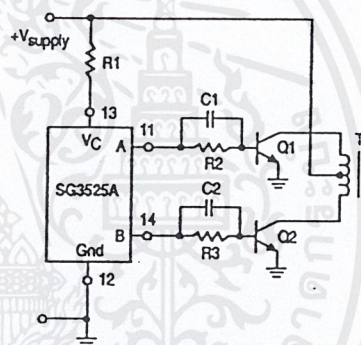


Figure 8. Single-Ended Supply



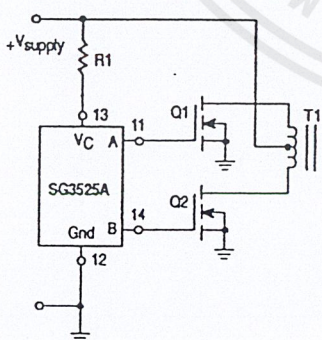
For single-ended supplies, the driver outputs are grounded. The VC terminal is switched to ground by the totem-pole source transistors on alternate oscillator cycles.

Figure 9. Push-Pull Configuration



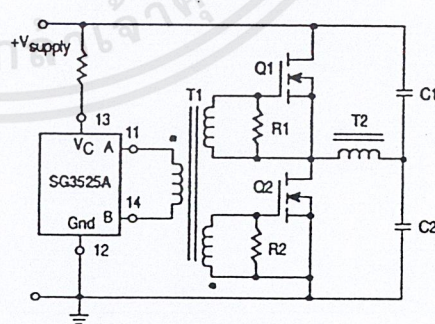
In conventional push-pull bipolar designs, forward base drive is controlled by R1-R3. Rapid turn-off times for the power devices are achieved with speed-up capacitors C1 and C2.

Figure 10. Driving Power FETS



The low source impedance of the output drivers provides rapid charging of power FET input capacitance while minimizing external components.

Figure 11. Driving Transformers in a Half-Bridge Configuration



Low power transformers can be driven directly by the SG3525A. Automatic reverse occurs during deadtime, when both ends of the primary winding are switched to ground.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้