

สำนักงานคณะกรรมการ พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานโดย PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์

BALL & BEAM CONTROL SYSTEMS BY PIC MICROCONTROLLER



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...62888
วัน,เดือน,ปี... 23 ส.ค. 2549

b. 11623981
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดานหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานโดย PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์
BALL & BEAM CONTROL SYSTEMS BY PIC MICROCONTROLLER

ผู้จัดทำ

นาย ปิยะพงษ์ ชมเชย รหัส 46015313

นาย วัฒนชัย โพธิ์กลิ่น รหัส 46015320



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ชนิตต์ ละออเพชรพันธุ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคานโดย PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์

โดย

นาย ปิยะพงษ์ ชมเชย

นาย วัฒนชัย โพธิ์กลิ่น

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชนัตถ์ ละออเพชรพันธุ์

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี ซึ่งออกแบบโดยวิธีการป้อนกลับของเสถียร ลูกบอลกลิ้งไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และหลังจากนั้นหยุดอยู่กับที่ได้โดยการปรับแนวระนาบของคาน ซึ่งมีผลต่อขนาดของแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับลูกบอล

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดของการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ การออกแบบเซนเซอร์, คอมพิวเตอร์ และแอสติเมเตอร์ รวมทั้งผลจากการซิมูเลชันที่ใช้โปรแกรม Matlab ระบุลูกบอลและคานซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นตัวขับ ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจะใช้ประโยชน์ในการทดลองจริง ตัวควบคุมที่ใช้เป็น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ซึ่งเขียนโปรแกรมควบคุมด้วยภาษา ซี จากการศึกษาบบลูกบอลและคาน ทำให้เข้าใจถึงหลักและกระบวนการทางระบบควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BALL & BEAM CONTROL SYSTEMS BY PIC MICROCONTROLLER

by

Piyapong Chomcheir**Wattanachai Poklin**

Advisor

Dr. Chanat La-orpacharapan**ABSTRACT**

This thesis presents the design of position control systems with a ball-and-beam application. A proportional derivative controller (PD) based on the state feedback design techniques is used to automatically control the angle of the horizontal beam. As a result, gravity causes the ball to roll along the beam to the desired position and then maintain the ball there.

Systems modeling, sensor, compensator, and estimator design are detailed in this thesis. Simulation results run on MATLAB program are also included. For future experiment purposes, a ball-and-beam system with a DC motor actuator was built. The controller is implemented on the PIC Microcontroller which is programmed by the C language. The ball-and-beam systems study give insights into important principles and processes in control.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือจากอาจารย์หนักัดถ์ ละออเพชรพันธุ์ ที่ให้คำแนะนำและคอยให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้นผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอพระคุณอย่างสูง

ขอขอพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่ตลอดเวลา

สุดท้ายขอขอพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีเสมอตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลงได้

คณะผู้จัดทำ

นาย ปิยะพงษ์ ชมเชย

นาย วัฒนชัย โพธิ์กลิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
2.1 บทนำ	2
2.2 ลูกบอลและคาน (Ball & Beam)	2
2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกบอลและคาน	2
2.2.1.1 พลังงานจลน์ของลูกบอล	3
2.2.1.2 พลังงานจลน์ของคาน	6
2.2.1.3 พลังงานศักย์ของลูกบอลและคาน	6
2.2.1.4 ลากรองเขียน	7
2.2.1.5 สมการลากรองจ์	7
2.2.1.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูกบอลและคาน	9
2.2.2 การปริภูมิสเททของลูกบอลและคาน	10
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	12
2.3.1.1 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.3.1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	14
2.3.1.3 ตัวแปรสเททของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.3.2	เกียร์บล็อก	16
2.3.2.1	บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้าตรงกับเกียร์บล็อก	17
2.3.2.2	ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้าตรงกับเกียร์บล็อก	18
2.3.2.3	ตัวแปรสเตทของมอเตอร์ไฟฟ้าตรงกับเกียร์บล็อก	18
2.4	โพเทนทิโอมิเตอร์	19
2.5	วงจรสวิตช์แบบ II-Bridge	21
2.6	การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	22
2.7	ไมโครคอนโทรลเลอร์	23
2.8	ตัวควบคุม	25
2.8.1	ระบบควบคุมแบบสัดส่วน	25
2.8.2	ระบบควบคุมแบบปริพันธ์	28
2.8.3	ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์	29
2.8.4	ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์	31
2.8.5	ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์	33
2.8.6	ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์	34
2.9	บทสรุป	35
บทที่ 3	การออกแบบและการสร้าง	36
3.1	การออกแบบของระบบทางกล	37
3.1.1	ลูกบอลตก	37
3.1.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	38
3.1.3	เซนเซอร์ตำแหน่ง	40
3.1.4	เซนเซอร์มุม	42
3.1.5	การออกแบบวงจรต่างๆ	47
3.1.5.1	วงจรจับมอเตอร์	47
3.1.5.2	วงจรจับเกท	48
3.1.5.3	วงจรแสดงผล	49
3.1.5.4	วงจรวัดตำแหน่งลูกบอล	49
3.1.5.5	วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458	50
3.1.5.6	วงจรรวมระบบ	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

3.2 การออกแบบโดยใช้ MATLAB	52
3.2.1 ระบบ DC Motor Position	52
3.3 การออกแบบตัวควบคุม	54
3.3.1 การออกแบบ Compensator	54
3.3.1.1 Estimator	54
3.3.1.2 Controller	55
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	56
4.1 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DC MOTOR	56
4.1.1 ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (armature resistance)	56
4.1.2 อินдукแตนซ์ของอาร์เมเจอร์ (armature inductance)	58
4.1.3 ค่าคงที่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back Emf Constant)	59
4.1.4 ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant)	60
4.1.5 ค่า Damping ของมอเตอร์ (B)	61
4.1.6 โมเมนต์ความเฉื่อยของ rotor (moment of inertia)	62
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์	63
5.1 บทสรุป	63
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	63
5.3 แนวทางพัฒนาต่อ	63
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	
ภาคผนวก ข โมเมนต์ความเฉื่อยของ Beam	
ภาคผนวก ค โมเมนต์ความเฉื่อยของ Ball	
ภาคผนวก ง Data Sheet	

เอกสารอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกบอลและคาน	2
2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนผิวราบโดยไม่มีแรงไถล	3
2.3 แสดงการหาความเร็วเชิงมุมของลูกบอล	4
2.4 แสดงการหาความเร็วเชิงเส้นของลูกบอล	5
2.5 พลังงานศักย์ของลูกบอลและคาน	6
2.6 โมเดลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับเกียร์บล็อกควบคุมอาร์เมเจอร์	12
2.7 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์	14
2.8 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับเกียร์บล็อก	17
2.9 แสดงวงจรโพเทนทิโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ	20
2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโพเทนทิโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ	20
2.11 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge	21
2.12 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อ On สวิตช์ S1 และ S3	21
2.13 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อ On สวิตช์ S2 และ S4	22
2.14 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	22
2.15 IC MAX232	23
2.16 การกำหนดช่วงจำกัดของเกาท์พุท	26
2.17 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบสัดส่วน	27
2.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสัดส่วน	27
2.19 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบปริพันธ์	28
2.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปริพันธ์	29
2.21 ผลการตอบสนองของระบบควบคุมแบบอนุพันธ์	30
2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบอนุพันธ์	30
2.23 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์	31
2.24 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์	32
2.25 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์	33
2.26 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	34
3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน	36
3.2 แสดงการหาค่า r	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

3.3 แสดงมอเตอร์และเกียร์บล็อกที่ใช้ในระบบ	38
3.4 แสดงการวางลวดความต้านทานบนแกนทั้ง 2 ด้าน สัมผัส กับบอล	40
3.5 การวัดแรงดันในแต่ละตำแหน่งของแกน	41
3.6 โพลเทนิโอมิเตอร์แบบโรตารีขนาด 100 K Ω แบบรอบเดียว	42
3.7 บล็อกไดอะแกรม ของเซนเซอร์มุม	42
3.8 โพลเทนิโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ ขนาด 100 K Ω แบบรอบเดียว เมื่อต่อเกียร์บล็อก	43
3.9 บล็อกไดอะแกรมของเกียร์บล็อกกับเซนเซอร์มุม	43
3.10 บล็อกไดอะแกรมของเกียร์บล็อกกับเซนเซอร์มุม	44
3.11 แสดงการคำนวณระยะวัดและการวัดหาแรงดันของแต่ละตำแหน่งการหมุนของแกน	45
3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการหมุนของแกนกับแรงดันจากการวัด	46
3.13 แสดงวงจรขั้วมอเตอร์ แบบ H-Bridge	47
3.14 แสดงวงจรขั้วเกท	48
3.15 แสดงการทำงานวงจรขั้วเกท	48
3.16 แสดงวงจรแสดงผลโดย MAX232	49
3.17 แสดงวงจรวัดตำแหน่งลูกบอล	49
3.18 แสดงการต่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458	50
3.19 แสดงวงจรรวมของระบบ	51
3.20 แสดงระบบคอนโทรลของระบบ Ball & Beam	54
3.21 แสดงรูปแบบการออกแบกระบบควบคุมแบบ State space	54
3.22 แสดงรูปแบบการออกแบบคอนโทรลเลอร์	55
4.1 การวัดความต้านทานของอาร์มเจอร์	56
4.2 แสดงการวัดความต้านทานของอาร์มเจอร์	56
4.3 การวัดหาค่า Armature Inductance โดยหาจาก time constant	58
4.4 ผลการวัดค่า Time Constant ทางไฟฟ้าของมอเตอร์	58
4.5 การวัด Back Emf Constant ของมอเตอร์	59
4.6 แสดงการวัด Back Emf Constant ของมอเตอร์	59
4.7 การหาค่า Friction ของมอเตอร์	61
4.8 การวัดหาโมเมนต์แรงเฉื่อยของดีซีมอเตอร์	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการคำนวณและการวัดของตำแหน่งลูกบอล	40
3.2 แสดงการคำนวณระยะวัดและการวัดหาแรงดันของแต่ละตำแหน่งการหมุนของคาน	45
4.1 ผลการทดลองหาค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (R_p)	57
4.2 ผลการทดลองการหาค่า Back Emf Constant ของมอเตอร์	60
4.3 ผลการทดลองการหาค่า Friction ของมอเตอร์ (เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน)	61
4.4 ผลการทดลองการหาค่า Friction ของมอเตอร์ (เมื่อมอเตอร์หมุนคงที่)	61



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

L	คือ ลากรองเจียน (Lagrangian)
P	คือ พลังงานศักย์รวมของระบบ (total potential energy)
K	คือ พลังงานจลน์รวมของระบบ (total kinetic energy)
q_i	คือ ระบบพิกัด (generalized coordinate system)
Q_i	คือ แรงในระบบพิกัดที่กำลังสนใจ (generalized forced)
i	คือ ลำดับของระบบ(System order)
J_{beam}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของคาน (moment of inertia of Beam)
J_{ball}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของลูกบอล (moment of inertia of Ball)
K_{ball}	คือ พลังงานจลน์ของลูกบอล (kinetic energy of Ball)
K_{beam}	คือ พลังงานจลน์ของคาน (kinetic energy of Beam)
M	คือ มวลของคาน
L	คือ ความยาวของคาน
R	คือ รัศมีของลูกบอล(radius of the ball)
0	คือ ศูนย์ของคาน
ω	คือ ความเร็วเชิงมุมของลูกบอล
m	คือ มวลของลูกบอล(mass of the ball)
v	คือ ความเร็วเชิงเส้นของลูกบอล
x	คือ ตำแหน่งของลูกบอล(ball position coordinate)
ϕ	คือ มุมของลูกบอลคาน
r	คือ รัศมีของลูกบอลที่กระทำกับคาน
h	คือ ความสูง
P_{beam}	คือ พลังงานศักย์ของคาน (potential energy of Beam)
P_{ball}	คือ พลังงานศักย์ของลูกบอล (potential energy of Ball)
\dot{x}	คือ derivative of the state vector with respect to time
A	คือ system matrix
B	คือ input matrix
x	คือ state vector
u	คือ input or control vector
y	คือ output vector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์(ต่อ)

C	คือ Output matrix
e_a	คือ DC Input voltage (volt)
i_a	คือ Armature Current (ampere)
R_a	คือ Armature Resistance (ohm)
L_a	คือ Armature Inductance (henry)
e_b	คือ Electromotive force voltage (back emf) (volt)
J_m	คือ Moment of inertia of rotor $(kg - m^2)/sec^2$
B_m	คือ Viscous friction of rotor (Damper)
T	คือ Motor Torque (N-M)
ω_m	คือ Angular velocity of motor(rad/sec)
θ_m	คือ Angular position of motor (rad)
K_T	คือ Torque constant (N-M / amp)
K_b	คือ back emf constant volt/(rad/sec)
T_L	คือ Load torque (N-M)
T_1, T_2	คือ แรงบิด
θ_1, θ_2	คือ ระยะทางการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม
N_1, N_2	คือ จำนวนซี่ฟัน
ω_1, ω_2	คือ ความเร็วเชิงมุม
r_1, r_2	คือ รัศมีของ Gear
n	คือ จำนวนเต็ม
g	คือ gravitational acceleration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน เป็นระบบควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่ง ระบบควบคุมดังกล่าวนี้มีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ คาน , ลูกบอลทรงกลมบนคาน ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ในแกนเดียว และมอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมการหมุนของคาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 สามารถจำลองระบบด้วยโปรแกรม MATLAB
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานและสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของดีซีมอเตอร์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน
- 1.2.4 สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมระบบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ด้วยภาษาซี

1.3 ขอบเขตของโครงการ

สามารถควบคุมตำแหน่งของลูกบอลบนคานให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการโดยการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ด้วยภาษาซี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีทักษะในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบด้วยภาษาซี
- 1.4.2 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในระบบควบคุมแบบต่าง ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เป็นการอธิบายถึงระบบทางกายภาพ (physical system) แบบเป็นเชิงเส้นได้อย่างเที่ยงตรง โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) และการแปลงลาปลาซ (laplace transform) ซึ่งต้องอาศัยกฎทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับระบบนั้นๆ

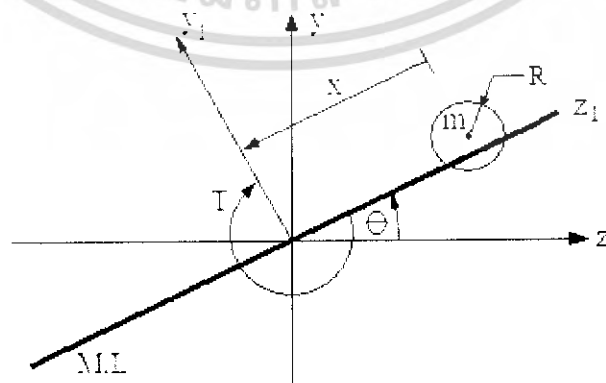
ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบของระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรตามเวลา (linear time-invariant systems) ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหนึ่งเอาต์พุตและหนึ่งอินพุตของระบบได้เท่านั้นในโดเมนความถี่ (frequency domain) โดยอาศัยรูปแบบทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปจะจัดระบบให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรม (block diagram) นิยมใช้กับระบบควบคุมแบบคลาสสิก (classical system) ที่พิจารณาเกี่ยวกับความเที่ยงตรง (accuracy) เสถียรภาพ (stable) และสมรรถนะบางอย่างที่ต้องการ

การปริภูมิสแตต (State variable) เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบ สามารถใช้ได้กับระบบที่มีหลายเอาต์พุตและหลายอินพุตในโดเมนความถี่ (time domain) นิยมใช้กับระบบควบคุมสมัยใหม่ (modern system) ที่พิจารณาเกี่ยวกับความสามารถในการควบคุมได้ (controllability) และความสามารถในการสังเกตได้ (observability) ของระบบ

2.2 ลูกบอลและคาน (Ball & Beam)

2.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกบอลและคาน

(Mathematical Model of Ball & Beam)



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกบอลและคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของระบบพลวัต (dynamic system) ในระบบ การเคลื่อนที่ลูกบอลบนคาน จะเลือกใช้วิธีของลากรองจ์ (lagrange) เป็นการหา สมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) หรือสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) ซึ่งจะต้อง กำหนดพิกัดวาง (q_i) ,แรงวาง (Q_i) ,และความสัมพันธ์ของพลังงานในระบบ, โดยที่พลังงานศักย์ (P : potential energy) จะเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่งและพลังงานจลน์ (K : kinetic energy) จะเป็นฟังก์ชันกับความเร็ว ดังนี้

$$P = P_{(q_i)}$$

$$K = K_{(q_i)}$$

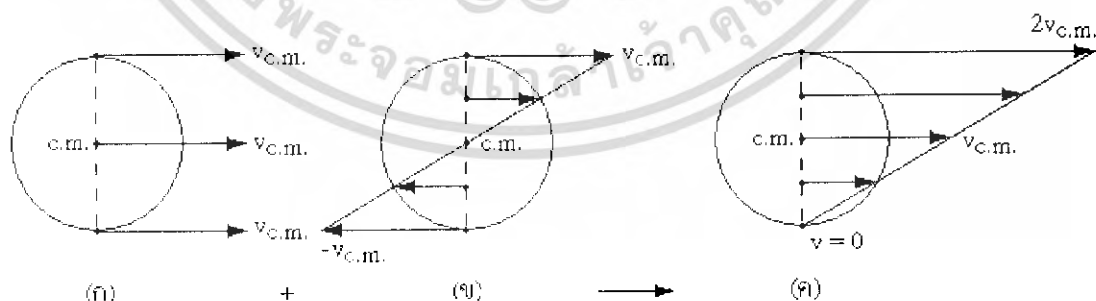
โดยสมการลากรองจ์ (Lagrange Equation) คือ

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

ถ้าให้ L ซึ่งเรียกว่า ลากรองเจียน (Lagrangian) จะได้ว่า

$$L = K - P \quad (2.2)$$

2.2.1.1 พลังงานจลน์ของลูกบอล (K_{ball} : Kinetic Energy of Ball)



รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน โดยไม่มีการไถล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ของลูกบอลที่กำลังกลิ้งไปบนผิวราบโดยไม่มีการไถล ดังรูปที่ 2.2 (ค) เราอาจคิดได้ว่าเป็นการรวมกันระหว่างการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งโดยไม่มีการกลิ้ง ดังรูปที่ 2.2 (ก) และการเคลื่อนที่หมุนอยู่กับที่ ดังรูปที่ 2.2 (ข) ดังนั้นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ของลูกบอล คือ

$$\begin{aligned} K_{\text{ball}} &= K_{\text{tra}} + K_{\text{rot}} \\ &= \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J_{\text{ball}}\omega^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่ K_{tra} คือ พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่งโดยไม่มีการกลิ้ง
 K_{rot} คือ พลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่หมุนอยู่กับที่

จากสมการ (2.3) หากความสัมพันธ์ (ω) และ (v) ให้อยู่ในเทอม x และ θ คือ

1. การหาความเร็วเชิงมุมของลูกบอล (ω)



รูปที่ 2.3 แสดงการหาความเร็วเชิงมุมของลูกบอล

มุมที่ลูกบอลหมุนไปเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงในแนวตั้งฉากกับระนาบ ดังรูปที่ 2.3 หาได้จาก

$$\alpha = \dot{\varphi} + \dot{\theta}$$

เมื่อ $\dot{\varphi} = \frac{\dot{x}}{r}$ จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

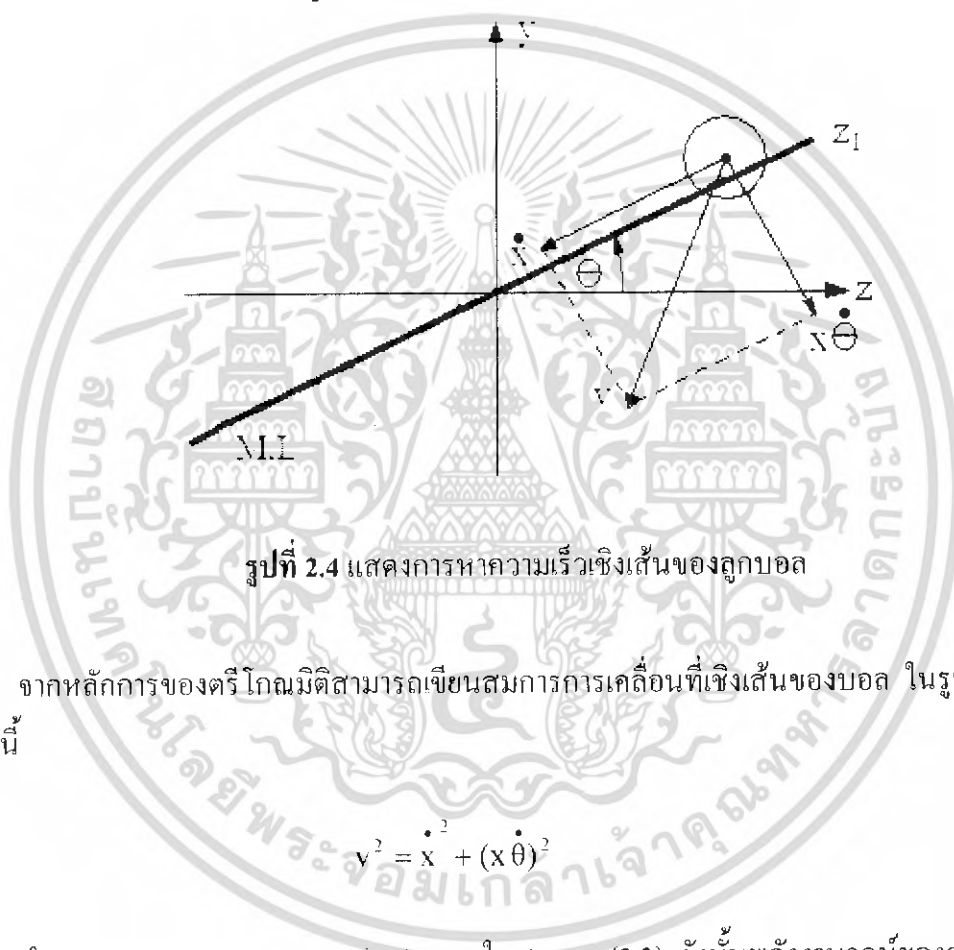
ดังนั้น หาสมการความเร็วเชิงมุมของลูกบอล ได้ดังนี้

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\omega = \frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \quad (2.5)$$

2. การหาความเร็วเชิงเส้นของลูกบอล (v)



รูปที่ 2.4 แสดงการหาความเร็วเชิงเส้นของลูกบอล

จากหลักการของตรีโกณมิติสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นของบอล ในรูปที่ 2.4 ได้ดังนี้

$$v^2 = \dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2 \quad (2.6)$$

นำสมการ (2.5) และสมการ (2.6) แทนในสมการ (2.3) ดังนั้นพลังงานจลน์ของการเคลื่อนที่ของลูกบอลในเทอม x และ θ จะได้ว่า

$$K_{\text{ball}} = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + \frac{1}{2}J_{\text{ball}}\left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta}\right)^2 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 พลังงานจลน์ของคาน (K_{beam} ; Kinetic Energy of Beam)

การเคลื่อนที่ของคาน เป็นการเคลื่อนที่ที่หมุนอยู่กับที่อย่างเดียวก ดังนั้นพลังงานจลน์ของคานหาได้ดังนี้

$$K_{\text{beam}} = \frac{1}{2} J_{\text{beam}} \dot{\theta}^2 \quad (2.8)$$

ดังนั้น พลังงานจลน์ของระบบ การเคลื่อนที่ของลูกบอลบนคาน ในเทอม x และ θ หาได้ดังนี้

$$K = K_{\text{ball}} + K_{\text{beam}}$$

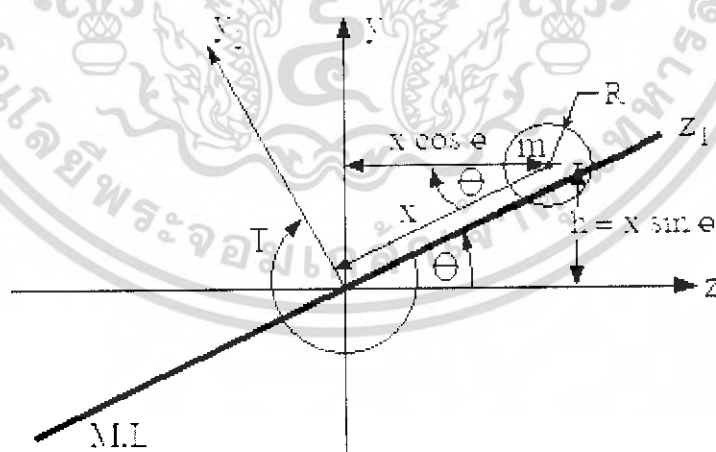
$$K = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + \frac{1}{2} J_{\text{ball}} \left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2} J_{\text{beam}} \dot{\theta}^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$J_{\text{beam}} = \frac{ML^2}{12} \quad (2.10)$$

$$J_{\text{ball}} = \frac{2}{5} mR^2 \quad (2.11)$$

2.2.1.3 พลังงานศักย์ของลูกบอลและคาน (Potential Energy of Ball & Beam)



รูปที่ 2.5 พลังงานศักย์ของลูกบอลและคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.5 คือการหาพลังงานศักย์ของการเคลื่อนที่ของลูกบอลและคาน (Ball & Beam) จะได้

$$\begin{aligned} P_{\text{ball}} &= mgh \\ &= mgx\sin\theta \end{aligned} \quad (2.12)$$

และ

$$P_{\text{beam}} = 0 \quad (2.13)$$

ดังนั้น พลังงานจลน์ของระบบ Ball & Beam ในเทอม x และ θ คือ

$$\begin{aligned} P &= P_{\text{ball}} + P_{\text{beam}} \\ &= mgx\sin\theta \end{aligned} \quad (2.14)$$

2.2.1.4 ลากรองเจียน (Lagrangian)

ดังนั้น นำสมการ (2.9) และสมการ (2.14) แทนในสมการ (2.2) จะได้สมการลากรองเจียนของระบบ Ball & Beam ดังนี้

$$L = \frac{1}{2} m(\dot{x}^2 + (x\dot{\theta})^2) + \frac{1}{2} J_{\text{ball}} \left(\frac{\dot{x}}{r} + \dot{\theta} \right)^2 + \frac{1}{2} J_{\text{beam}} \dot{\theta}^2 - mgx\sin\theta \quad (2.15)$$

2.2.1.5 สมการลากรองเจียน (Lagrange Equation)

จากระบบ Ball & Beam เขียนเป็นสมการลากรองเจียน (lagrange equation) แสดงการเคลื่อนที่ได้ 2 สมการ โดยกำหนดให้ x คือ พิกัดตำแหน่งลูกบอลบนคาน และ θ คือ พิกัดมุมของคาน ที่ทำกับระนาบซึ่งเป็นตัวแปลอิสระ แล้ว F และ T คือแรงภายนอกที่ทำในทิศทางเดียวกับพิกัดวาง

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นของลูกบอลบนคาน อธิบายโดยสมการ (2.1) คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F \quad (2.16)$$

เมื่อ F คือ แรงกระทำจากภายนอก มีค่าเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.15) ถ้า

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = m \dot{x} + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \dot{x} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} \dot{\theta} \quad (2.17)$$

แล้ว

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = m \ddot{x} + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \ddot{x} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} \ddot{\theta} \quad (2.18)$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial x} = mx \dot{\theta}^2 - mg \sin \theta \quad (2.19)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นของลูกบอลบนคาน คือ

$$\left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \right) \ddot{x} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} \ddot{\theta} - mx \dot{\theta}^2 + mg \sin \theta = 0 \quad (2.20)$$

และสมการการเคลื่อนที่เชิงมุมของลูกบอลบนคาน อธิบายโดยสมการ (2.1) คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = T \quad (2.21)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดจากภายนอก

จากสมการ (2.15) ถ้า

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mx^2 \dot{\theta} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} \dot{x} + (J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) \dot{\theta} \quad (2.22)$$

แล้ว

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = 2mx \dot{x} \dot{\theta} + mx^2 \ddot{\theta} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} \ddot{x} + (J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) \ddot{\theta} \quad (2.23)$$

และ

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -mgx \cos \theta \quad (2.24)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่เชิงมุมของลูกบอลบนคาน คือ

$$\frac{J_{\text{ball}}}{r} \ddot{x} + (mx^2 + J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) \ddot{\theta} + 2mx \dot{x} \dot{\theta} + mgx \cos \theta = T \quad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.20) และสมการ (2.25) จัดรูปใหม่จะได้

$$\ddot{x} = \frac{1}{\Delta} \left[(J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) m x \dot{\theta}^2 + m^2 x \dot{\theta}^2 - (m x^2 + J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) m g \sin \theta + 2 \frac{J_{\text{ball}}}{r} m x \dot{x} \dot{\theta} + \frac{J_{\text{ball}}}{r} m g x \cos \theta - \frac{J_{\text{ball}}}{r} T \right] \quad (2.26)$$

และ

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{\Delta} \left[\left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \right) T - 2 \left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \right) m x \dot{x} \dot{\theta} - \frac{J_{\text{ball}}}{r} m x \dot{\theta}^2 - \left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \right) m g x \cos \theta + \frac{J_{\text{ball}}}{r} m g \sin \theta \right] \quad (2.27)$$

โดยที่

$$\Delta = m(J_{\text{beam}} + J_{\text{ball}}) + \left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2} \right) m x^2 + \frac{J_{\text{beam}} J_{\text{ball}}}{r^2}$$

จากสมการ (2.26) และสมการ (2.27) คือ สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ของระบบ Ball & Beam

2.2.1.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูกบอลและคาน (Transfer Function of Ball & Beam)

จากสมการ (2.20) และสมการ (2.25) คือ สมการไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear equation) จึงต้องประมาณระบบให้เป็นสมการเชิงเส้น (linear equation) โดยทำ Linearized Approximation เพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของระบบ Ball & Beam ทำโดยกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) และตัดเทอม order ที่มากกว่า 1 ออก คือ

$$\sin \theta = \theta - \frac{\theta^3}{3!} + \frac{\theta^5}{5!} - \frac{\theta^7}{7!} + \dots \cong \theta \quad (2.28)$$

$$\cos \theta = 1 - \frac{\theta^2}{2!} + \frac{\theta^4}{4!} - \frac{\theta^6}{6!} + \dots \cong 1 \quad (2.29)$$

และ

$$\dot{\theta}^2 \cong x^2 \cong x x^2 \cong x^3 \cong 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้สมการ(2.20) และสมการ (2.25) ใหม่ที่เป็นสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ตามลำดับ คือ

$$\left(m + \frac{J_{\text{ball}}}{r^2}\right) \ddot{x} = mg\theta \quad (2.30)$$

$$J_{\text{beam}} \ddot{\theta} = T \quad (2.31)$$

จากสมการ (2.30) และสมการ (2.31) ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบ Ball & Beam เมื่อเอาที่พหุคือ x และอินพุตคือ θ จะได้ว่า

$$\frac{x(s)}{\theta(s)} = \frac{g}{\left(1 + \frac{2}{5} \left(\frac{R}{r}\right)^2\right) s^2} \quad (2.32)$$

และเมื่อเอาที่พหุคือ θ และอินพุตคือ T จะได้

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J_{\text{beam}} s^2} \quad (2.33)$$

จากสมการ (2.32) และสมการ (2.33) เป็นระบบอันดับ 2

2.2.2 การปริภูมิสแตทของลูกบอลและคาน (State Variable Model of Ball & Beam)

จากสมการ (2.26) และสมการ (2.27) คือ สมการไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear equation) จึงต้องประมาณระบบให้เป็นสมการเชิงเส้น (linear equation) เพื่อหาโมเดลปริภูมิสแตท (state variable model) โดยทำ Jacobian Linearization คือ

$$\dot{x}(t) = h(x(t), u(t), t) \quad (2.34)$$

$$\dot{y}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$\frac{dh}{dt} = \begin{bmatrix} \frac{dh_1}{dx_1} & \frac{dh_1}{dx_2} & \frac{dh_1}{dx_3} & \frac{dh_1}{dx_4} \\ \frac{dh_2}{dx_1} & \frac{dh_2}{dx_2} & \frac{dh_2}{dx_3} & \frac{dh_2}{dx_4} \\ \frac{dh_3}{dx_1} & \frac{dh_3}{dx_2} & \frac{dh_3}{dx_3} & \frac{dh_3}{dx_4} \\ \frac{dh_4}{dx_1} & \frac{dh_4}{dx_2} & \frac{dh_4}{dx_3} & \frac{dh_4}{dx_4} \end{bmatrix} \cdot \frac{dh}{du} = \begin{bmatrix} \frac{dh_1}{du} \\ \frac{dh_2}{du} \\ \frac{dh_3}{du} \\ \frac{dh_4}{du} \end{bmatrix}$$

กำหนดให้

$$h_1(t) = \dot{x}, h_2(t) = \ddot{x}, h_3(t) = \dot{\theta}, h_4(t) = \ddot{\theta}, u(t) = T \text{ และ } x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$\left. \frac{dh}{dt} \right|_{x, \dot{x}, \ddot{x}, \dot{\theta}, \ddot{\theta}=0} \text{ และ } \left. \frac{dh}{du} \right|_{x, \dot{x}, \ddot{x}, \dot{\theta}, \ddot{\theta}=0}$$

เขียนในรูปสมการปริภูมิสถานะ (State Space Equation) จะได้ว่า

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2.36}$$

$$y = Cx \tag{2.37}$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mg}{\rho} \cdot \frac{J_{ball}}{r} & 0 & -\frac{mg}{\rho} (J_{beam} + J_{ball}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{mg}{\rho} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) & 0 & \frac{mg}{\rho} \cdot \frac{J_{ball}}{r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{J_{ball}}{r} \\ 0 \\ \frac{1}{\rho} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) \end{bmatrix} T \tag{2.38}$$

และสมการเอาต์พุท (Output Equation) คือ

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{2.39}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $A = \frac{dh}{dt}$ และ $B = \frac{dh}{du}$

$$p = m \left(J_{\text{beam}} + \frac{r^2 J_{\text{ball}}}{R^2} \right) + \frac{J_{\text{beam}} J_{\text{ball}}}{R^2}$$

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

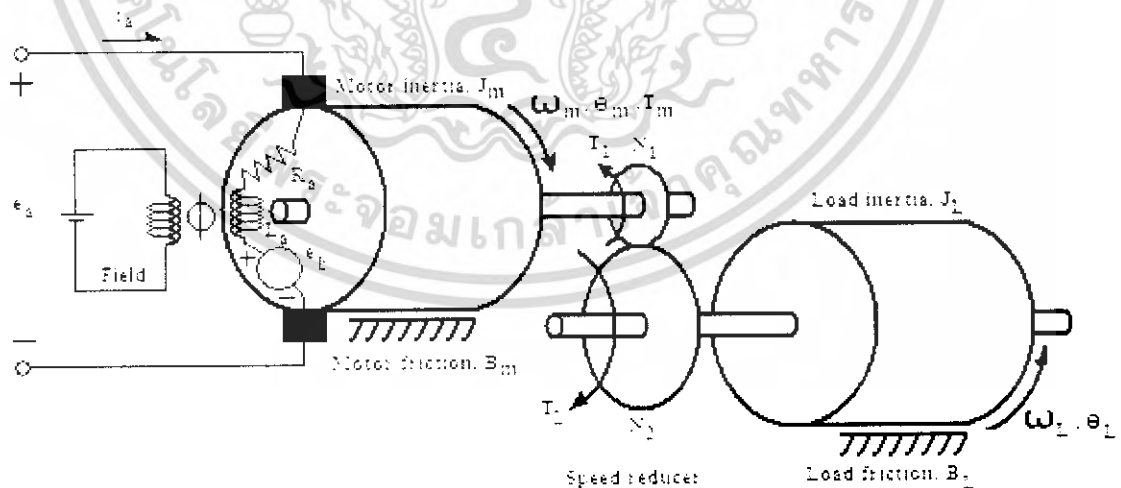
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor: Direct current motor) เป็นระบบเชิงกลไฟฟ้า (electromechanical system) นั่นคือเป็นระบบที่ผสมผสานระหว่างตัวแปรทางไฟฟ้า (electrical variables) และตัวแปรทางเชิงกล (mechanical variables) โดยการเปลี่ยนรูปพลังงานทางไฟฟ้า (electric energy) เป็นพลังงานทางเชิงกล (mechanical energy)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ที่ใช้ออกแบบกับระบบในหัวข้อนี้เป็นแบบกระตุ้นแยก (separately excited) ชนิดควบคุมแบบอาร์มเจอร์ (armature controlled)

2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

(Mathematical Model of DC Motor)

โมเดลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Mathematical Model of DC Motor) แสดงดังรูปที่ 2.6 ที่ประกอบด้วยโครงสร้างทั้งทางด้านไฟฟ้าและทางด้านทางกล ในกรณีนี้จำเป็นต้องให้กระแส (field) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าคงที่เพื่อให้ระบบเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.6 โมเดลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับเกียร์บล็อกควบคุมอาร์มเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque constant) จะสัมพันธ์กับแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor Torque) และกระแสอาร์เมเจอร์ (armature current) นั่นคือ

$$T_m = K_T i_a \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$K_T = nBlr \quad (2.41)$$

นอกจากนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) จะเป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุม (Angular velocity) DC Motor นั่นคือ

$$e_b = K_b \omega_m \quad (2.42)$$

เมื่อ

$$K_b = nBlr \quad (2.43)$$

จากโมเดลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Model of DC Motor) ในรูปที่ 2.6 เขียนสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) ได้ดังนี้

$$e_a - R_a i_a - L_a \frac{d}{dt} i_a - K_b \omega_m = 0 \quad (2.44)$$

$$K_T i_a - B_m \omega_m - T_d - J_m \frac{d}{dt} \omega_m = 0 \quad (2.45)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.46)$$

สมการ (2.44) คือสมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) อธิบายโดยกฎแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's Voltage Law:KVL) และสมการ (2.45) คือสมการทางเชิงกลของ DC motor อธิบายโดยกฎของนิวตัน (Newton's Law)

จากสมการ (2.44) - (2.46) นำมาทำการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ตามลำดับจะได้ว่า

$$I_a(s) = \frac{1}{L_a s + R_a} [E_a(s) - K_b \omega_m(s)] \quad (2.47)$$

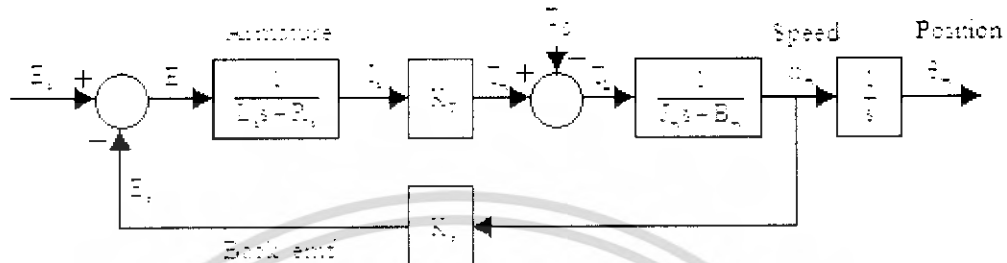
$$\omega_m(s) = \frac{1}{J_m s + B_m} [K_T I_a(s) - T_L(s)] \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\theta_m(s) = \frac{1}{s} \omega_m(s) \quad (2.49)$$

2.3.1.1 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Block Diagram of DC Motor)



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์

จากสมการ (2.47) - (2.49) นำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์ (Block Diagram of an armature controlled DC Motor) ได้ในรูปที่ 2.7

2.3.1.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Transfer Function of DC Motor)

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงระบบที่มี 2 อินพุต (input) คือ Voltage Supply (E_a) กับ Torque Load (T_d) และมีเอาต์พุต (output) เป็นทั้งความเร็วเชิงมุม (ω) และการเคลื่อนที่แบบเชิงมุม (θ) สำหรับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Transfer Function of DC Motor) เมื่อ อินพุต (Input) เป็น E_a และเอาต์พุต (Output) เป็น $\theta(s)$ โดยที่ $T_d = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_T}{s(L_a J_m s^2 + (R_a J_m + B_m L_a)s + B_m R_a + K_b K_T)} \quad (2.50)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อ อินพุต (Input) เป็น T_d และเอาต์พุต (Output) เป็น $\theta(s)$ โดยที่ $E_a = 0$ จะได้ว่า

$$\frac{\theta_m(s)}{T_d(s)} = -\frac{L_a s + R_a}{s(L_a J_m s^2 + (R_a J_m + B_m L_a)s + B_m R_a + K_b K_T)} \quad (2.51)$$

โมเดลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Model of DC Motor) เป็นระบบอันดับ 3 และชนิด 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.3 ตัวแปรสแตตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (State Variable Model of DC Motor)

จากสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) สมการ (2.44) - (2.46) นำมาจัดใหม่ให้อยู่ในรูปตัวแปรสแตต (state variable) i_a , ω_m และ θ_m จะได้สมการสแตต (state equations) ตามลำดับดังนี้

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{1}{L_a} [E_a - R_a i_a - K_b \omega_m] \quad (2.52)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J_m} [K_T i_a - B_m \omega_m - T_d] \quad (2.53)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.54)$$

จากสมการ(2.52) - (2.54) นำมาเขียนสมการปริภูมิสแตต (State Space Equation) ได้ดังนี้

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.55)$$

$$y = Cx \quad (2.56)$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} \omega_m \\ \frac{d}{dt} \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_T}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ T_d \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

และสมการเอาต์พุต (Output Equation) คือ

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่
- A คือ เมตริกซ์ระบบ (system matrix) ($n \times n$)
 - B คือ เมตริกซ์สัญญาณอินพุต (input matrix) ($n \times r$)
 - C คือ เมตริกซ์สัญญาณเอาต์พุต (output matrix) ($m \times n$)
 - x คือ เวกเตอร์สเตต (state vector) ($n \times 1$)
 - u คือ เวกเตอร์อินพุต (input vector) ($r \times 1$)
 - y คือ เวกเตอร์เอาต์พุต (output vector) ($m \times 1$)
 - n คือ อันดับของระบบ (system order)
 - m คือ จำนวนสัญญาณเอาต์พุต (number of output)
 - r คือ จำนวนสัญญาณอินพุต (number of input)

2.3.2 เกียร์บ็อกซ์ (Gearbox)

เกียร์บ็อกซ์ เป็นอุปกรณ์เครื่องกลซึ่งสามารถส่งผ่านพลังงานจากส่วนหนึ่งของระบบไปยังส่วนอื่นๆได้ในรูปของแรงงาน แรงบิด ความเร็ว และการเคลื่อนที่ สามารถหาความสัมพันธ์ได้จาก

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.59)$$

จากรูปที่ 2.6 สมการแรงบิดของ Gear ตัวที่ 1 คือ

$$T_m = J_m \frac{d^2}{dt^2} \omega_m + B_m \frac{d}{dt} \omega_m + T_l \quad (2.60)$$

สมการแรงบิดของ Gear ตัวที่ 2 คือ

$$T_l = J_l \frac{d^2}{dt^2} \omega_l + B_l \frac{d}{dt} \omega_l \quad (2.61)$$

จาก

$$T_l = \frac{1}{n_1} T_m \quad (2.62)$$

$$\omega_l = \frac{1}{n_1} \omega_m \quad (2.63)$$

เมื่อ

$$n_1 = \frac{N_2}{N_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.61) และ สมการ (2.63) ในสมการ (2.62) จะได้

$$T_l = \frac{1}{n_1} \left(J_L \frac{d\omega_m}{dt} + B_L \omega_m \right) \quad (2.64)$$

จากสมการ (2.64) แทนในสมการ (2.60) จะได้

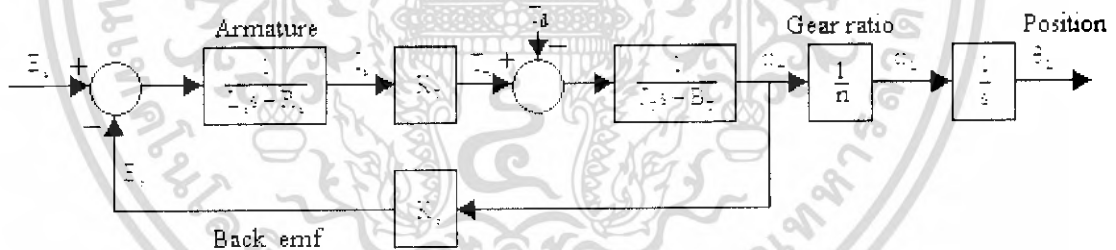
$$T_m = J_r \frac{d^2}{dt^2} \omega_m + B_r \frac{d}{dt} \omega_m \quad (2.65)$$

เมื่อ

$$J_r = J_m + \frac{1}{n_1^2} J_L \quad (2.66)$$

$$B_r = B_m + \frac{1}{n_1^2} B_L \quad (2.67)$$

2.3.2.1 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเกียร์บล็อก
(Block Diagram of DC Motor & Gear box)



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อกับเกียร์บล็อก

จากสมการ (2.47) - (2.49) นำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์กับเกียร์บล็อก (Block Diagram of an Armature Controlled DC Motor & Gear box) ได้ในรูปที่ 2.8

62888

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเกียร์บล็อก

(Transfer Function of DC Motor & Gearbox)

จากบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอาร์เมเจอร์ต่อกับเกียร์บล็อก ในรูปที่ 2.8 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Transfer Function of DC Motor) เมื่ออินพุตคือ E_a และเอาต์พุต เป็น $\theta(s)$ โดยที่ $T_d = T_f$

$$\frac{\theta_L(s)}{E_a(s)} = \frac{K_T}{n_1 s (L_a J_T s^2 + (R_a J_T + B_f L_a) s + B_f R_a + K_b K_T)} \quad (2.68)$$

โดยปกติค่าคงที่เวลาทางไฟฟ้า (τ_e : time constant) จะน้อยกว่าค่าคงที่เวลาทางกล (τ_m) มาก ถ้าค่าความเหนี่ยวนำในอาร์เมเจอร์ (L_a) มีค่าน้อย หรือ ค่าความเฉื่อยของมอเตอร์ (J_m) มีค่ามาก สามารถสมมติให้ $\tau_e = 0$ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) คือ

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{1}{n_1 s} \left(\frac{K_s}{1 + \tau_s s} \right) \quad (2.69)$$

เมื่อ

$$K_s = \frac{K_T}{B_m R_a + K_b K_T} \quad (2.70)$$

$$\tau_s = \frac{R_a J_m}{B_m R_a + K_b K_T} \quad (2.71)$$

2.3.2.3 ตัวแปรสถานะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับเกียร์บล็อก

(State Variable Model of DC Motor & Gear box)

$$\frac{d}{dt} i_a = \frac{1}{L_a} [E_a - R_a i_a - n_1 K_b \omega_L] \quad (2.72)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_L = \frac{1}{n_1 J_T} [K_T i_a - B_f \omega_m] \quad (2.73)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_L = \omega_L \quad (2.74)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ(2.72) - (2.74) นำมาเขียนสมการปริภูมิสเปซ (State Space Equation) ได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.75)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (2.76)$$

จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} \omega_m \\ \frac{d}{dt} \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{n_p K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{1}{n_p J_T} & -\frac{B_T}{J_T} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a \quad (2.77)$$

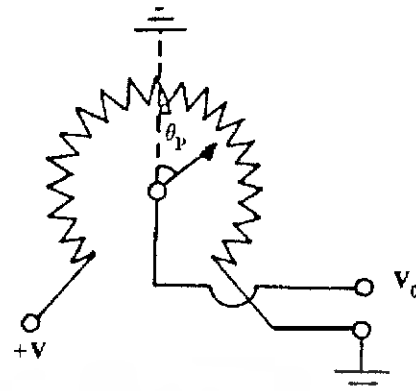
และสมการเอาต์พุต (Output Equation) คือ

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

2.4 โพลเทนทีโอมิเตอร์ (Potentiometer)

โพลเทนทีโอมิเตอร์ (potentiometer) เป็นเครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า อินพุตที่ป้อนเข้าโพลเทนทีโอมิเตอร์ (potentiometer) จะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่แบบเชิงกล และอาจเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบ (rotary) หรือเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น (linear) ก็ได้เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า (voltage) เข้าที่ปลายข้างที่เหลืออยู่กับที่ของ Potentiometer Output Voltage ที่ได้ของส่วนที่เคลื่อนที่จะแปรผันตรงกับความเร็วของการหมุน และระยะทางของการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น โพลเทนทีโอมิเตอร์ ชนิดหมุนรอบ (rotary) มี 2 แบบ คือแบบหมุนได้รอบเดียว และหมุนได้ 10 รอบ

ในระบบควบคุมโพลเทนทีโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ (rotary potentiometer) ใช้เป็น sensor ในการป้อนสัญญาณกลับตำแหน่ง ตำแหน่งในที่นี้พูดถึง มุม (angle) ซึ่งวงจรของโพลเทนทีโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรโพเทนทีโอเมเตอร์แบบหมุนรอบ

กรณีที่โพเทนทีโอเมเตอร์เชิงมุม แบบหมุนหลายรอบ จะได้สมการเอาต์พุต คือ

$$V_o = \frac{V}{2\pi} \theta_m \quad (2.79)$$

โดยที่ N คือ จำนวนรอบ

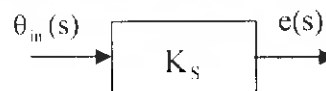
ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของโพเทนทีโอเมเตอร์แบบหมุนรอบ จะได้ว่า

$$\frac{e(s)}{\theta(s)} = K_s \quad (2.80)$$

เมื่อ

$$K_s = \frac{V}{2\pi} \quad (2.81)$$

เราสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของโพเทนทีโอเมเตอร์แบบหมุนรอบ ได้ดังนี้



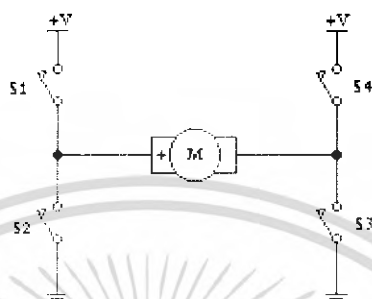
รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโพเทนทีโอเมเตอร์แบบหมุนรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge

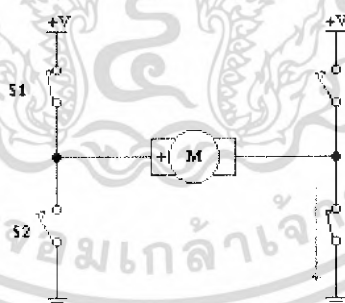
เริ่มจากหลักการของวงจรนั้น จะประกอบไปด้วย สวิตช์ 4 ตัว นั่นก็คือ S1, S2, S3 และ S4 ซึ่งในรูปตัวอย่างจะใช้มอเตอร์ดีซีเป็นภาระ (load) ของวงจร

ในสถานะเริ่มต้น สวิตช์ทุกตัว Off อยู่ ก็จะไม่ทำอะไรเกิดขึ้นทั้งสิ้น เพราะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์ (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 2.11 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge

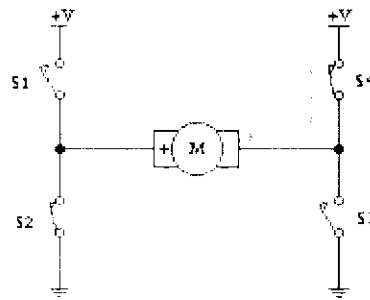
และเมื่อเราทำการ On สวิตช์ S1 และ S3 พร้อมกัน (รูปที่ 3.5) จะเป็นการเชื่อมวงจร ทำให้มีกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วบวกของมอเตอร์ไปยังขั้วลบของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ในทิศทาง Forward (จะหมุนแบบตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกานั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของการพันขดลวดภายในมอเตอร์)



รูปที่ 2.12 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อ On สวิตช์ S1 และ S3

และในทางกลับกัน ถ้าหากเราทำการ On สวิตช์ S2 และ S4 พร้อมกัน (รูปที่ 3.6) ก็จะเป็นการเชื่อมวงจร และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วลบของมอเตอร์ไปยังขั้วบวกของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ และเป็นการหมุนในทิศทางกลับทางหมุนกับกับกรณีแรก (Reverse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

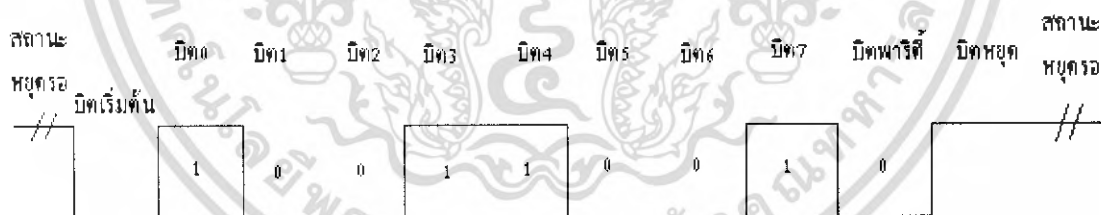


รูปที่ 2.13 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อ On สวิตช์ S2 และ S4

สรุปว่า วงจรนี้จะอาศัยสวิตช์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ เพื่อควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่เราต้องการ โดยการผลัดกัน On และ Off สวิตช์พร้อมกัน 2 ตัว นั่นเอง

2.6 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือการรับส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกาที่ร่วม แต่จะใช้การกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาทั้งค่ารับและค่าส่งให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณนาฬิกาที่ว่า อัตราการถ่ายข้อมูล หรือ บอร์ดเรต (board rate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bit per second: bps) แสดงดังรูปที่ 2.14



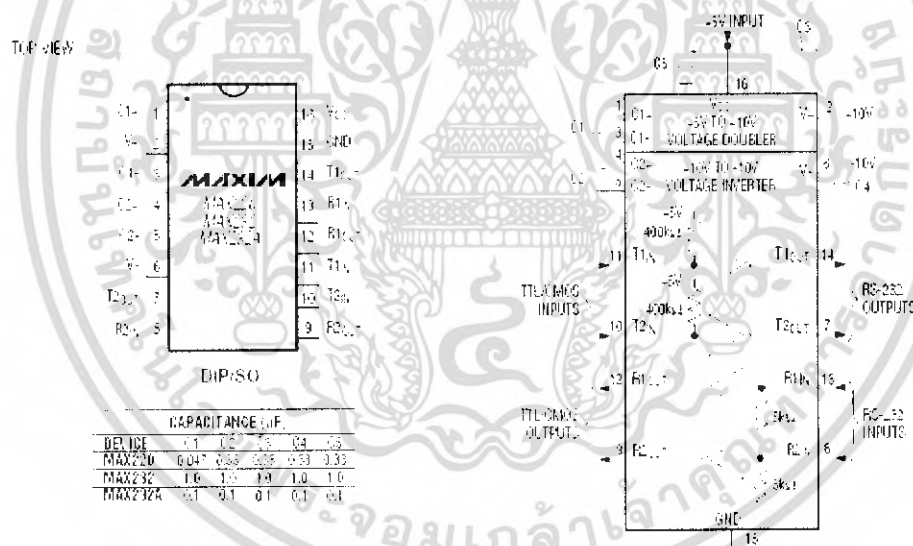
รูปที่ 2.14 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

มาตรฐานพอร์ตอนุกรมแบบ RS232 ในโครงการนี้จะต้องติดต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยผ่านพอร์ตอนุกรม ในที่นี้จึงขอกล่าวการสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมอะซิงโครนัส 2 ทิศทาง โดยได้กำหนดรูปแบบของอุปกรณ์เชื่อมต่อข้อมูล (Data Terminal Equipment : DTE) กับวงจรข้อมูลปลายทาง (Data Circuit Terminating : DCE) ไว้ว่า อุปกรณ์ DTE ต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีการประมวลผลในตัว ส่วนอุปกรณ์ DCE จะทำหน้าที่เป็นเพียงตัวรับข้อมูลที่ส่งมาจาก DTE เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาสัญญาณเอาต์พุตของพอร์ตอนุกรม ได้แก่ ขา DTR, RTS และ TxD โดยรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมขานี้คือรีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม (MCR) โดยมีตำแหน่ง (address) อยู่ถึรีจิสเตอร์หลักของพอร์ตอนุกรม 4 ตำแหน่ง รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของขา DTR จะอยู่ที่ตำแหน่งบิต 0 ส่วนขา RTS จะอยู่ที่ตำแหน่งบิต 1 ส่วนขา TxD เป็นขापกติในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงมีแอดเดรสอยู่ที่แอดเดรสรีจิสเตอร์หลัก

ระดับแรงดันที่ใช้งานสำหรับพอร์ตอนุกรม RS232 ได้ระบุช่วงระดับแรงดัน สำหรับการทำงานของพอร์ตอนุกรมไว้ว่า ที่ลอจิก “0” จะมีระดับสัญญาณ +3V ถึง +15V ส่วนลอจิก “1” จะมีระดับสัญญาณ -3V ถึง -15V ระดับสัญญาณนี้ทำให้ไม่สามารถที่จะนำเอาท์พุตใดๆต่อเข้ากับลอจิกเกตใช้งานได้โดยตรง จะต้องผ่านวงจรเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันเสียก่อน โดยปกติจะให้ไอซีจำพวก RS232 ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันของ RS232 ให้อยู่ในระดับที่ทีแอล โดยลอจิก “0” ซึ่งเดิมมีระดับสัญญาณ +3V ถึง +15V จะถูกแปลงเป็น 0V ส่วนลอจิก “1” ซึ่งมีระดับสัญญาณ -3V ถึง -15V จะเปลี่ยนเป็น +5V ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดิจิทัลอื่นที่ใช้ระดับแรงดันที่ทีแอลได้แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 IC MAX232

2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

เป็นอุปกรณ์ไอซี (Integrated Circuit: IC) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อน สามารถรับข้อมูลในรูปแบบสัญญาณดิจิทัลเข้าไปทำการประมวลผล แล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิทัลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในชิพ (chip) จะมีหน่วยประมวลผล (Central Processing Unit: CPU) หน่วยความจำ (memory) พอร์ต (Port) อยู่ในชิพเพียงตัวเดียวซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ชิพเดียว ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit: CPU) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาภายหลังเพื่อนำไปใช้ในวงจรทางด้านงานควบคุม คือ แทนที่ในการใช้งานจะต้องวงจรภายนอกต่าง ๆ เพิ่มเติมเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ก็จะทำการรวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ, ส่วนอินพุท/เอาต์พุท บางส่วนเข้าไปในตัว ไอซีเดียวกัน และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปด้วยเพื่อให้มีความสามารถเหมาะสมกับการใช้ในงานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา, วงจรการสื่อสารอนุกรม วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เป็นต้น สรุปคือ

$$\text{Microcontroller} = \text{Microprocessor} + \text{Memory} + \text{I/O}$$

ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยมักจะเป็นการนำไปใช้ฝังในระบบของอุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่าง เช่น ใช้ในรถยนต์ เต้าอบ ไมโครเวฟ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้าอัตโนมัติ เป็นต้น เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์มีข้อดีเหมาะสมต่อการใช้งานควบคุมหลายประการ เช่น

- ชิพไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็ก
- ระบบที่ได้มีราคาถูกกว่าการใช้ชิพไมโครโปรเซสเซอร์
- วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
- มีคุณสมบัติเพิ่มเติมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะซึ่งใช้งานได้ง่าย
- ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายใน และความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกัน ทำให้เลือกใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม

คุณสมบัติทั่วไปของ IC 18F458

- 35 Instruction คำสั่ง
- ปฏิบัติคำสั่งทั่วไปใน Cycle เดียว และ 2 Cycle ในคำสั่งการกระโดด
- ทำงานที่ความถี่สูงสุด 40 MHz (18F458)
- หน่วยความจำโปรแกรม 32 K(14 Bit Words)
- หน่วยความจำข้อมูล (RAM) 1536 Byte
- EEPROM 256 Byte

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถตอบสนองอินเตอร์รัพท์ 20 แหล่ง
- STACK 8 ระดับ
- สามารถเลือกโหมดของสัญญาณนาฬิกาได้
- กระแสทั้งซิงก์ และ ซอร์สของพอร์ต คือ 25 mA
- Timer/Counter 4 ตัว Timer0,Timer1,Timer2 และ Timer3
- โมดูล Capture/Compare/PWM จำนวน 1 ชุด
- โมดูล Enhanced/Capture/Compare/PWM จำนวน 1 ชุด
- Analog to Digital Converter 10Bit 11 Channel
- พอร์ต I/O จำนวน 5 พอร์ต A, B, C, D และ E รวมทั้งสิ้น 33 Bit

2.8 ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตของ Connective Element ส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม นิยมเรียก กฎการควบคุม (control Law) โดยจะมี 3 รูปแบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (P: Proportional Control)
2. ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (I: Integral Control)
3. ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (D: Derivative Control)

ในระบบบางประเภท มีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่ปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เรียกว่า การชดเชย (Compensation)

2.8.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (P: Proportional Control)

ในระบบควบคุมแบบสัดส่วน เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมเป็น ค่าความผิดพลาด $e(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

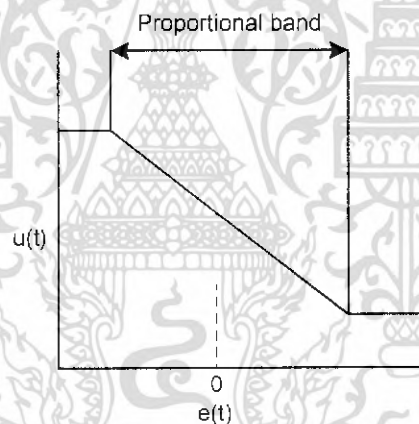
$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.82)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (proportional gain) จะพบว่าเอาต์พุตที่ออก จากตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่กำลัง พิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีค่าเป็น

$$G_c(s) = K_p \quad (2.83)$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบนี้ ก็จะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่ จากตัว ควบคุมในเวลานั้น อย่างไรก็ตาม การที่ให้อัตราขยายคงที่นั้นในทางปฏิบัติอาจกำหนดไว้ในบาง ช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น หรืออาจกำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าเอาต์พุตไม่น้อยกว่าค่าค่า หนึ่ง และไม่มากเกินไปกว่าค่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุตนั้น จะมีลักษณะดังรูป ที่ 2.16 และการกำหนดเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ จะ เรียกว่า proportional band.



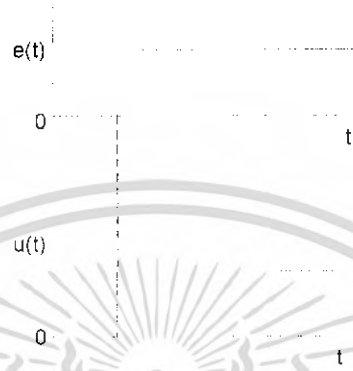
รูปที่ 2.16 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนด Proportional Band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่อันต์ ทั้ง ทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อตัวควบคุมมีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่ง ก็นิยมที่จะ กำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของ ตัวควบคุม 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไป ได้ ซึ่งจะได้ว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \quad (2.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็น สัญญาณระดับ (Step) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็น สัญญาณระดับ เช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูปที่ 2.17 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของตัวควบคุม เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง proportional band

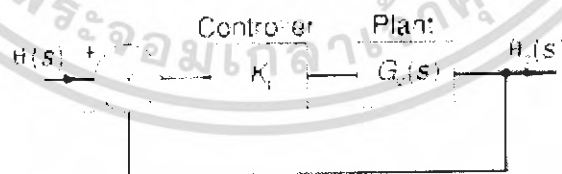


รูปที่ 2.17 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบสัดส่วน

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบสัดส่วน นี้มีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คาน ก็ได้ ลักษณะของระบบที่มีตัวควบคุมแบบสัดส่วน มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad (2.85)$$

เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรม ของระบบควบคุมแบบสัดส่วน

ข้อเสียของระบบที่มีตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือไม่มีการเพิ่มเทอม $1/s$ ในส่วน Forward path ซึ่งหมายความว่า ถ้าระบบเป็นชนิด 0 (type 0) ตัวควบคุมจะไม่เปลี่ยนแปลงชนิด ทำให้ระบบเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม และทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว (steady state error) เนื่องจากตัวควบคุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ได้ทำการเพิ่ม โพล (pole) หรือซีโร (zero) ใหม่ให้กับระบบเพียงแค่เปลี่ยนตำแหน่งของ โพล หรือ ซีโรเท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมแบบป้อนกลับหนึ่งหน่วย มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.86)$$

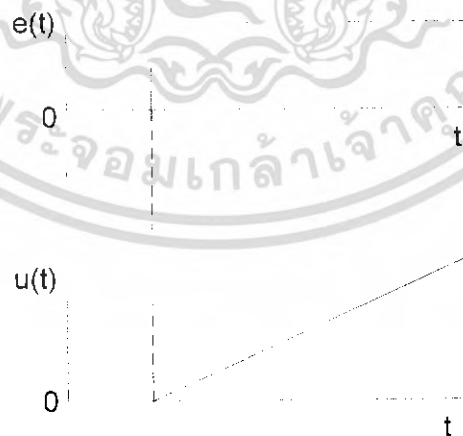
สมการคุณลักษณะเป็น $(1 + K_p G_p(s))$ และมีรากเปลี่ยนไปตามค่าของ K_p

2.8.2 ระบบควบคุมแบบปริพันธ์ (I: Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบปริพันธ์เอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณของค่าผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือ

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.87)$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่เรียกว่า Integral Gain ซึ่งจะมีหน่วยเป็น 1/sec รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการตอบสนองของระบบควบคุมแบบปริพันธ์ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบ ระดับ ค่าระหว่างเวลา t และ 0 หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุตจากเวลา 0 ถึง t ดังนั้นเนื่องจากระบบมีการมีสัญญาณอินพุตแบบ ระดับ เอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมมีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ทำให้เอาต์พุตที่เวลาใดๆจะเป็นสัดส่วนกับอินพุตที่เกิดขึ้น



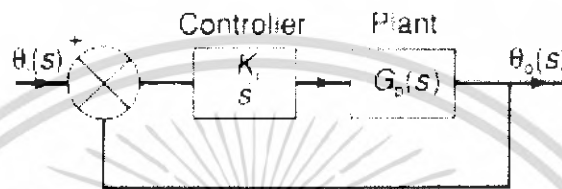
รูปที่ 2.19 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบปริพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบปริพันธ์เป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.88)$$

ดังนั้นสำหรับระบบที่แสดงในรูปที่ 2.20 การควบคุมแบบปริพันธ์ จะให้ Forward-Path Transfer Function เป็น $\frac{K_i}{s} G_p(s)$ และทำให้มีฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิด เป็น



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปริพันธ์

ดังนั้นสามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบปริพันธ์ ได้จากสมการ (2.88) ซึ่งจะเห็นว่าระบบควบคุมแบบปริพันธ์ จะเพิ่มจำนวนโพลให้กับระบบควบคุม และเพิ่มชนิดของระบบ จากชนิด 0 เป็น ชนิด 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อสัญญาณอินพุตแบบ ระดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ $s = 0$ และไม่มีการเพิ่มซีโรให้กับระบบควบคุม ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวน โพล (n) และจำนวนซีโร (m) เพิ่มขึ้นอีก 1

ซึ่งมีผลให้ Asymptote angles ของทางเดินรากลดลง และจุดตัดแกนเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของ s -plane มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

$$\text{Asymptote angle} = \pm \frac{\pi}{n-m}, \frac{3\pi}{n-m}, \dots \quad (2.89)$$

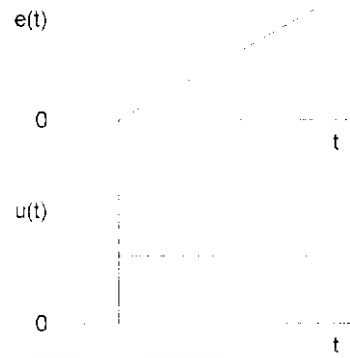
2.8.3 ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (D: Derivative Control)

ระบบควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ เอาท์พุทจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด เทียบต่อเวลา นั่นคือ

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.90)$$

เมื่อ K_d คือ Derivative Gain และมีหน่วยเป็นวินาที (sec)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 ผลตอบสนองของระบบ ควบคุมแบบอนุพันธ์

รูปที่ 2.21 แสดงสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณอินพุทเป็นสัญญาณแบบลาด (ramp) เมื่อได้รับสัญญาณอินพุท และไม่ใช้ค่าของความผิดพลาดซึ่งทำให้ได้สัญญาณส่งออกจากตัวควบคุมมีค่ามากกว่าก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมากจริงๆ อย่างไรก็ตาม หากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่าความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบอนุพันธ์นี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่ หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งผลที่ตามมาของการควบคุมแบบนี้จะไม่ใช้เพียงตัวเดียว แต่มักจะใช้ควบคู่รวมกับการควบคุมแบบอื่น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะเป็น

$$G_c(s) = K_d s \quad (1)$$

ดังนั้นสำหรับระบบควบคุมแบบดี จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น

$$G_o(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \quad (2.92)$$

บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ของระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (D: Derivative Control)



รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์จะลด S ในเทอมส่วนลง และลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไรก็ตามได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบอนุพันธ์ นี้จะไม่ใช้เพียงลำพัง แต่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์ ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ในทางปฏิบัติ การนำการควบคุมอนุพันธ์ไปใช้นั้นค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้นในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบอนุพันธ์ โดยใช้ Lead-Compensator ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.8.4 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์

(PI: Proportional plus Integral Control)

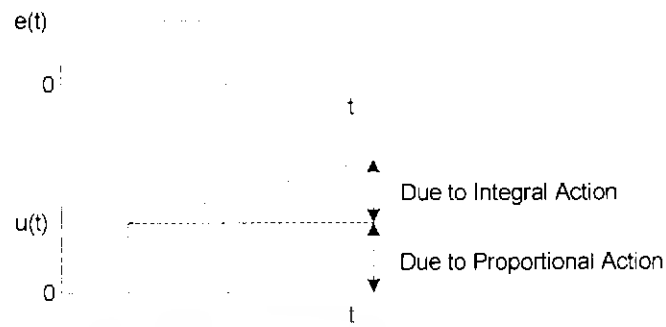
การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบปริพันธ์ สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.93)$$



รูปที่ 2.24 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์

รูปที่ 2.24 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นแบบระดับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ เป็น

$$G_o(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{sK_p + K_i}{s} = K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \quad (2.94)$$

ให้ Integral Time Constant เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \quad (2.95)$$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]}{s} \quad (2.96)$$

และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]G_p(s)}{s} \quad (2.97)$$

จะเห็นว่ามีซีโรที่ $s = -1/\tau_i$ และโพลที่ $s = 0$ เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์ การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับเพิ่มแนวของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้ไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัว

สำหรับอินพุตแบบระดับ (unit step input) นอกจากนั้นการที่เพิ่มซีโรให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล n และจำนวนซีโร m มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ Asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม เพราะ

$$\text{Intersection/point} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของศูนย์}) / (n - m)$$

อย่างไรก็ตามจุดตัดของเส้น Asymptotes บนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ส่งผลให้ความเสถียรภาพของระบบลดลง

การเพิ่มโพลที่ $s = 0$ และซีโรที่ $s = -1/\tau_d$ ทำให้จุดเปลี่ยนไปเท่ากับ $\pm(1/\tau_d)/(n - m)$ ซึ่งทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การลดลงของความเสถียรสัมพันธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบปรีพันธ์เพียงอย่างเดียวค่าของ K_p และ K_d จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของซีโรและโพลของระบบ โดยตำแหน่งของซีโรกำหนดด้วยค่า K_p ในขณะที่ K_d จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบแบบปิด

2.8.5 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์

(PD: Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบอนุพันธ์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบสัดส่วน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.25 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบแบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = (K_p + K_d s) G_p(s) \quad (2.98)$$

$$G_o(s) = K_p (1 + \tau_d s) G_p(s)$$

เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือ Derivative Time Constant ซึ่งในการควบคุมแบบนี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่

$s = -1/\tau_d$ และจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของระบบ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว

รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.6 ระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์ (PID Control)

การควบคุมโดยใช้แบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และรวมกับแบบอนุพันธ์ หรือ ที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (three-term control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.26 ทำให้เอาต์พุตของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุตเป็นความผิดพลาด $e(t)$ ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.99)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม จะเป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.100)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.101)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบแบบเปิดของระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่แสดงในรูปที่ 2.26 จะเป็น

$$G_o(s) = G_c(s) G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s) \quad (2.102)$$

$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2) G_p(s)}{\tau_i s}$$

ดังนั้นการควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มจำนวนขั้วโรให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัวและเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัว และทำให้ชนิด ชนิด ระบบเพิ่มขึ้น 1

รูปที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 บทสรุป

บทนี้จะกล่าวถึงการนำเอาหลักการทางพีชคณิตและคณิตศาสตร์มาอธิบายส่วนต่างๆในระบบ เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ในรูป บล็อกไดอะแกรม (block diagram) ปริภูมิสถานะ (state variable) ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาคำตอบ หาผลตอบสนองของระบบโดยใช้ MATLAB และนำไปคิดเป็นตัวเลขควบคุมในไมโครคอนโทรลเลอร์

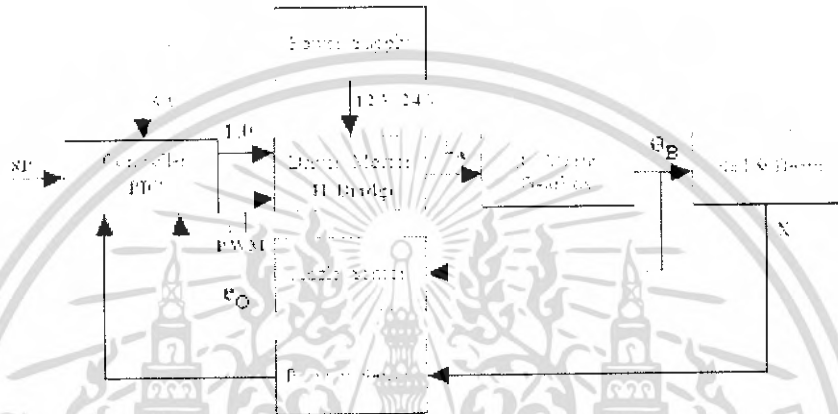


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

จากระบบการควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน เขียนบล็อกไดอะแกรม (Block diagram) โดยรวม คือ



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน

ส่วนประกอบหลักๆของระบบ คือ

1. ลูกบอลและคาน (Ball & Beam)
2. มอเตอร์และเกียร์บล็อก (Motor & Gearbox)
3. วงจรขับมอเตอร์ (Drives Motor)
4. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (PIC microcontroller)
5. แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) 5V, 12V และ 24V
6. เซนเซอร์มุม (Angle Sensor ; Potentiometer)
7. เซนเซอร์ตำแหน่ง (Position Sensor ; ลวดความต้านทาน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การออกแบบของระบบทางกล (Design of Mechanical System)

3.1.1 ลูกบอลและคาน (Ball & Beam)

คานที่ใช้ในการสร้างระบบ มีลักษณะเป็นร่องเส้นตรงเป็นทางวิ่งของลูกบอลเคลื่อนที่เป็นระยะ x ซึ่งจุดกึ่งกลางคานจะเป็นจุดหมุนทำมุม θ_1 กับระนาบ โดยต่อเข้ากับมอเตอร์

ข้อมูลคาน

$$L = 94.5 \text{ cm}$$

$$M = 0.5 \text{ Kg}$$

$$J_{\text{beam}} = 0.03721 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{sec}^2$$

ลูกบอลที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงกลมเหล็กเพื่ออาศัยคุณสมบัติการนำไฟฟ้าในการวัดตำแหน่งลูกบอลบนคาน

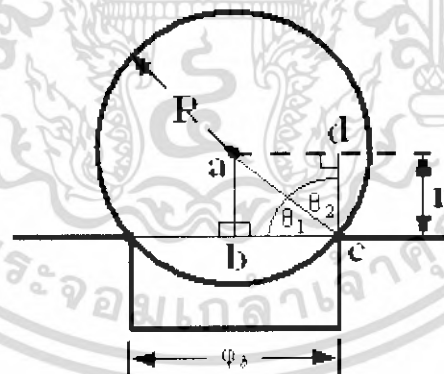
ข้อมูลลูกบอล

$$R = 1.25 \text{ cm}$$

$$m = 0.3 \text{ Kg}$$

$$J_{\text{ball}} = 0.00002 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)}/\text{sec}^2$$

$$\phi_b = 14 \text{ cm}$$



รูปที่ 3.2 แสดงการหาค่า r

จากหลักตรีโกณมิติ Δabc

เมื่อ

$$ac = R = 1.25 \text{ cm}$$

$$bc = \phi_b / 2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} R\cos\theta_1 &= \varphi_b/2 \\ \theta_1 &= \cos^{-1} \varphi_b/2R = \cos^{-1}(14\pi/2 \times 1.25 \times 180) \\ &= 84.4^\circ \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r &= R\sin\theta_1 \\ &= 1.24 \text{ cm} \end{aligned}$$

ตัวแปรแสดงของลูกบอล และ กาน (State Variable Model of Ball & Beam)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.3763 & 0 & -8.687 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -100.3503 & 0 & 0.3763 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1280 \\ 0 \\ 34.1328 \end{bmatrix} T$$

และสมการเอาต์พุต (output equation) คือ

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

3.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC MOTOR)



รูปที่ 3.3 แสดงมอเตอร์และเกียร์บล็อกที่ใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลมอเตอร์

$$R_a = 5.65\Omega$$

$$L_a = 0.523\text{mH}$$

$$K_t = 0.005 \text{ Nm / Amp}$$

$$K_b = 0.005 \text{ Volt / (rad/sec)}$$

$$J_m = 4.22 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}^2$$

$$B_m = 0.113 \times 10^{-6} \text{ Nm}$$

$$\omega_m = 4.835 \text{ rpm} / 24 \text{ V}$$

$$I_{a(\text{max})} = 2 \text{ Amp}$$

ข้อมูลเกียร์บล็อก

$$N_1 = 14$$

$$N_2 = 62$$

$$N_3 = 13$$

$$N_4 = 73$$

$$N_5 = 46$$

$$N_6 = 96$$

$$N_7 = 54$$

$$N_8 = 96$$

กำหนดให้

$$n_1 = \frac{N_2 N_4 N_6 N_8}{N_1 N_3 N_5 N_7}$$

$$= \frac{62 \times 73 \times 96 \times 96}{14 \times 13 \times 46 \times 54} = 92.26$$

จากสมการ (2.77) และสมการ (2.78) นำมาสมการปริภูมิสเปซ (State space Equation) เมื่อต่อมอเตอร์และเกียร์บล็อก ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_a \\ \frac{d}{dt} \omega_1 \\ \frac{d}{dt} \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.803 & -882 & 0 \\ 12.842 & -26.78 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.912 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสมการเอาต์พุต (output equation) คือ

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_m \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix}$$

3.1.3 เซนเซอร์ตำแหน่ง (Position Sensor)

การวัดตำแหน่งของลูกบอลบนกานเดือกใช้สวิตช์ความต้านทานซึ่งมีความต้านทาน 3.1 Ω.1๕ เส้น ผ่านศูนย์กลาง 0.065 cm และยาว 96 cm วางไว้บริเวณร่องของกานทั้ง 2 ด้าน สัมผัสกับบอล แสดงดังรูป



รูปที่ 3.4 แสดงการวางสวิตช์ความต้านทานบนกานทั้ง 2 ด้าน สัมผัส กับบอล

ตารางที่ 3.1 แสดงการวัดของตำแหน่งลูกบอล

ระยะ X(t) (cm)	ค่าจากการวัด(volt)
44	4.083
40	3.925
36	3.747
32	3.584
28	3.426
24	3.254
20	3.096
16	2.933

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การวัดแรงดันในแต่ละตำแหน่งของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

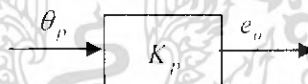
3.1.4 เซนเซอร์มุม (Angle Sensor)

เซนเซอร์ ที่ใช้วัดตำแหน่งมุมของคานในระบบเลือกใช้โพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) แบบโรตารี (Rotary) ขนาด 100 KΩ แบบรอบเดียว ซึ่งมีมุมหมุนตั้งแต่ 0 - 305 องศา และแสดงโครงสร้างดังรูป



รูปที่ 3.6 โพเทนทิโอมิเตอร์แบบโรตารีขนาด 100 KΩ แบบรอบเดียว

จากรูป แสดง บล็อกไดอะแกรม (Block diagram) ของ เซนเซอร์มุม (Angle Sensor) ดังนี้



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมของเซนเซอร์มุม

เมื่อ

$$K_p = \frac{V}{2\pi} \text{ V/rad}$$

การใช้งานต้องต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ค่าแรงดันที่ใช้แทน $V = 5 \text{ V}$ จากโพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) เป็นระบบรอบเดียว แต่มีมุมไม่ถึง 360 องศา ดังนั้น N หาได้ดังนี้
 หา N จาก 360 องศา เท่ากับ 1 รอบ

$$305 \text{ องศา เท่ากับ } \frac{1 \times 305}{360} = 0.847 \text{ รอบ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ แทน $N = 0.847$ จะได้

$$K_p = \frac{5}{2\pi \times 0.847} = 0.94$$

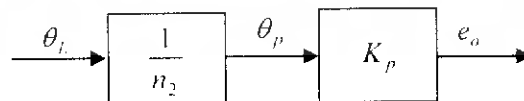


รูปที่ 3.8 โปเทนติโอมิเตอร์แบบหมุนรอบ ขนาด 100 K Ω แบบรอบเดียว เมื่อต่อเกียร์บล็อก

เมื่อต่อเกียร์บล็อก (Gearbox) กับ เซนเซอร์มุม (Angle Sensor) ดังรูปที่

ข้อมูลเกียร์บล็อก (Gearbox) $N_1 = 180$
 $N_2 = 28$

บล็อกไดอะแกรม (Block diagram) ของเกียร์บล็อก (Gearbox) กับเซนเซอร์มุม (Angle Sensor)



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของเกียร์บล็อกกับเซนเซอร์มุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$n_2 = \frac{N_2}{N_1}$$

ดังนั้น

$$\frac{1}{n_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{180}{28} = 6.43$$

ค่าอัตราขยาย (Gain) ใหม่ของเซนเซอร์มุม (Angle sensor) เมื่อต่อเกียร์บล็อก (Gearbox) จะได้

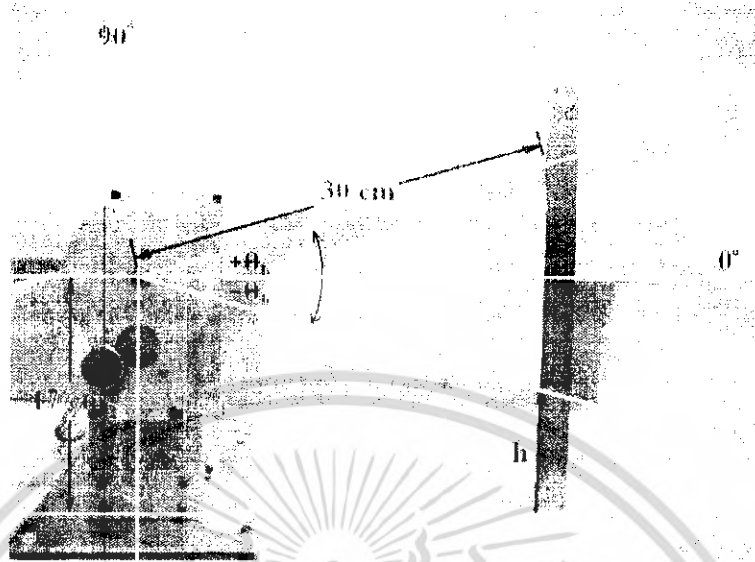
$$K_{new} = 0.94 \times 6.43 = 6.04$$

จะเห็นได้ว่าโพเทนทิโอมิเตอร์ (Potentiometer) มี $K_p = 0.94$ เมื่อต่อเกียร์บล็อก (Gearbox) ทำให้ Gain feedback ของ เซนเซอร์มุม (Angle Sensor) มีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้น บล็อกไดอะแกรม (Blockdiagram) ของเซนเซอร์มุม (Angle sensor) เมื่อต่อเข้ากับเกียร์บล็อก (Gearbox) ได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของเกียร์บล็อกกับเซนเซอร์มุม



รูปที่ 3.11 แสดงการคำนวณระยะวัดและการวัดหาแรงดันของแต่ละตำแหน่งการหมุนของกาน

จากรูปที่ 3.11 จุดหมุนของกานสูงจากพื้น 17 cm
 ระยะบนกานที่วัดถึงจุดหมุน 30 cm
 วัดแรงดันของแต่ละองศาโดยวัดระยะ h จากการคำนวณและบันทึกผลในตาราง

จากสูตร

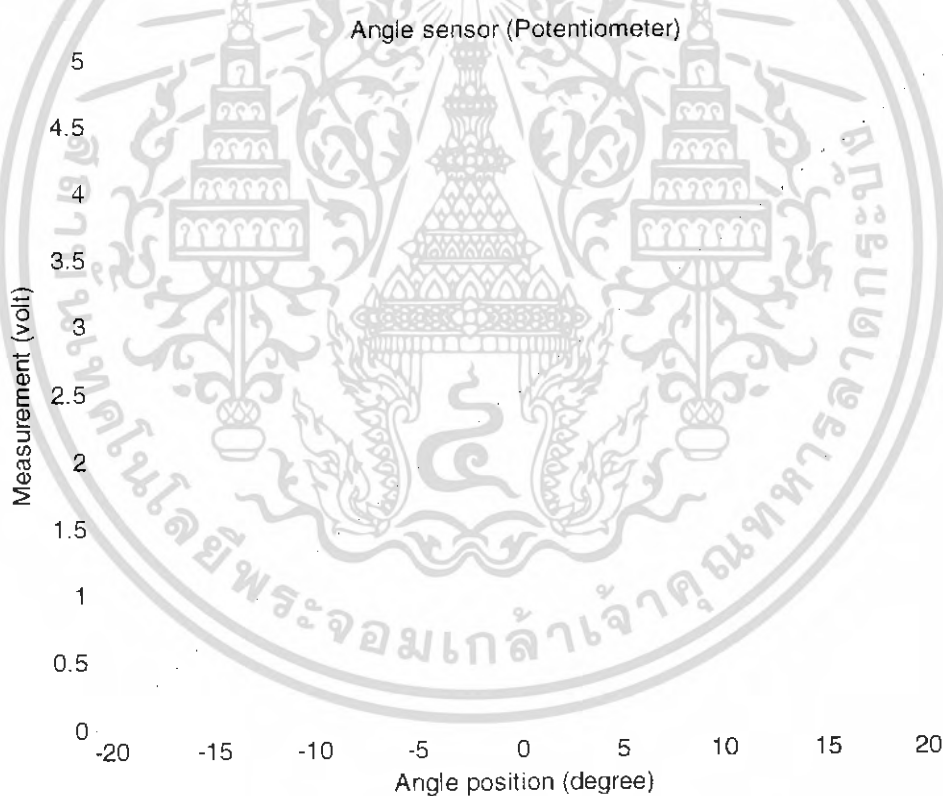
$$h = 17 + \sin(\pm\theta_0)$$

ตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณระยะวัดและการวัดหาแรงดันของแต่ละตำแหน่งการหมุนของกาน

θ_0 (degree)	ค่าจากการคำนวณ h (cm)	ค่าจากการวัด (Volt)
21	27.7	0.02
18	26.3	0.33
15	24.8	0.70
12	23.2	1.09
9	21.7	1.45
6	20.1	1.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3	18.6	2.15
0	17	2.50
-3	15.4	2.88
-6	13.9	3.18
-9	12.3	3.55
-12	10.8	3.88
-15	9.2	4.27
-18	7.7	4.60
-21	6.2	5.00



รูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการหมุนของคานกับแรงดันจากการวัด

จากการคำนวณและการวัดแสดงว่า เซนเซอร์มุม (Angle sensor) ที่ใช้ค่อนข้างมีความเป็นเชิงเส้น (Linear)

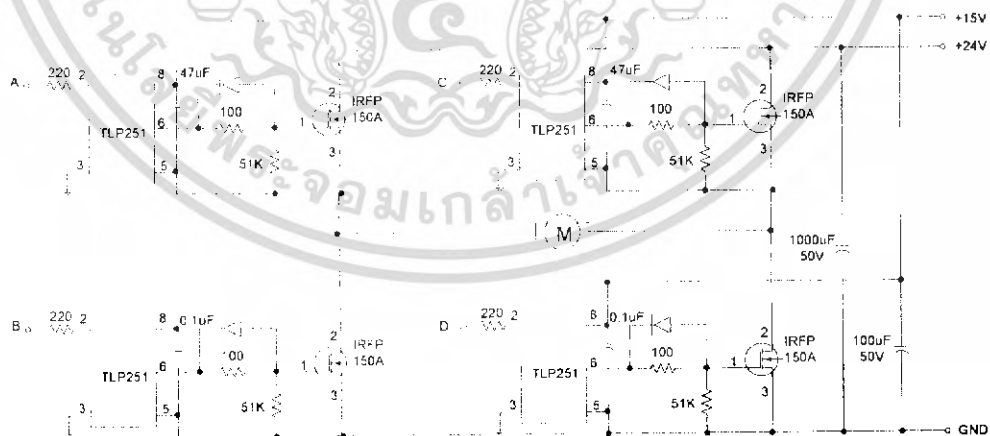
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 การออกแบบวงจรต่างๆ

3.1.5.1 วงจรขับมอเตอร์ (Drives Motor)

วงจรกาคเอาท์พุทที่ใช้ควบคุมมอเตอร์เป็นแบบ H-Bridge ซึ่งประกอบด้วยมอสเฟต 4 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิทซ์ซึ่ง ควบคุมการทำงานได้ 4 ควอดรันท์ (quadrant) ทำให้มอเตอร์หมุนได้ 2 ทิศทาง ซึ่งเอาท์พุทแบบนี้มีข้อดีคือ ง่าย ใช้เพาเวอร์ซัพพลาย (power supply) เพียงตัวเดียว และยังป้องกันโวลต์เจจย้อนกลับ การคอนโทรลใช้ พัลซ์-วิดท์ โมดูเลชัน (Pulse-width Modulation type Bipolar: PWM)

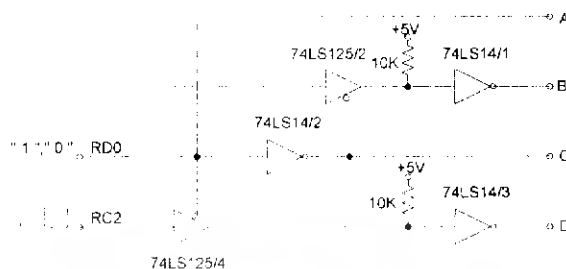
มอสเฟต (mosfet) มีข้อดีคือ สามารถนำมาใช้งานความถี่สูงตั้งแต่ 50 KHz ไปจนถึง 400 KHz เนื่องจากใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงสถานะค่อนข้างสั้นหรือมีการทำงานที่เร็ว การขับมอสเฟตให้นำกระแสจึงกระทำได้ง่าย และยุ่งยากน้อยกว่าทรานซิสเตอร์ โดยที่มีการสูญเสียในการสวิตช์ (switching loss) น้อยกว่าทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้ยังไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเรื่อง เบคคันทารีเบรกคววน์ ในขณะที่ทำงานเหมือนทรานซิสเตอร์ แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงการนำกระแส (on state) ของมอสเฟตมีค่าความต้านทานทำให้กำลังสูญเสียในช่วงนี้ (conduction loss) สูงมากกว่าทรานซิสเตอร์ที่มีแรงดันตกคร่อมน้อยกว่า และมอสเฟตยังทนต่อแรงดันขณะนำกระแส (forward blocking voltage) ได้ต่ำกว่าทรานซิสเตอร์ ในบางวงจรจะมีปัญหาเรื่องการกราวด์ ที่อินพุทเกทของมอสเฟต เพราะที่ขาซอร์สของมอสเฟตกำลัง บางตัวอยู่เหนือกราวด์อ้างอิง ดังนั้นเอาท์พุทของวงจรขับเกทดังกล่าวต้องทำการแยกกราวด์ (Isolate) ทางไฟฟ้ากับวงจรควบคุมเกทพัลส์ (gate control pulse) โดยปกติอุปกรณ์ที่นิยมใช้แยกกราวด์ คือ optical coupling ซึ่งเลือกใช้เบอร์ TLP251 แสดงวงจรวงจรถับมอเตอร์ (Drives Motor) ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรถับมอเตอร์ แบบ H-Bridge

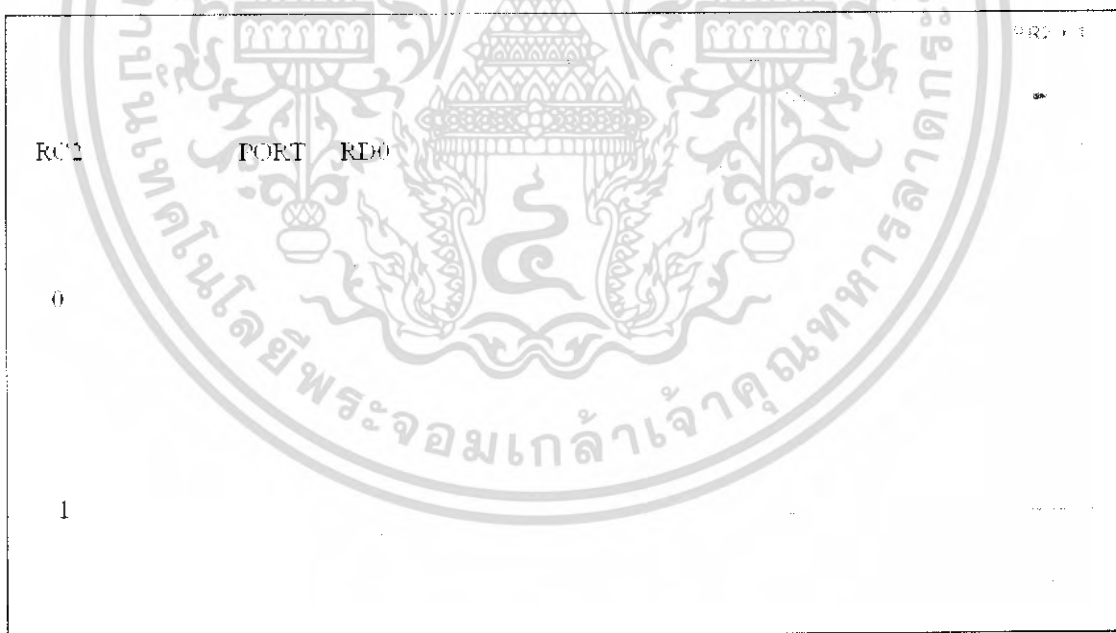
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5.2 วงจรขับเกท (Gate drive circuit)



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรขับเกท

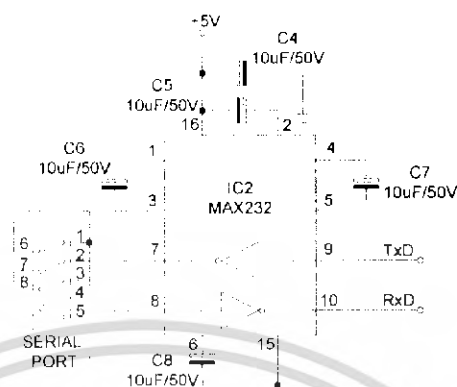
จากรูปที่ 3.14 ชุดขับเกทเป็นวงจรลอจิกโดยใช้ Trigger Inverter เบอร์ 74LS14 และ Quad Bus Buffer เบอร์ 74LS125 ซึ่งจะต่ออยู่กับขา A B C และ D ของภาควงจรถับมอเตอร์ (drives motor) โดยที่สามารถควบคุมทิศทางขา RC2 โดยสัญญาณ “High” และ “Low” และควบคุมความเร็วโดยใช้พัลส์-วิดท์ โมดูเลชัน (PWM) ทางขา RD0 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงการทำงานดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงการทำงานวงจรถับเกท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5.3 วงจรแสดงผล

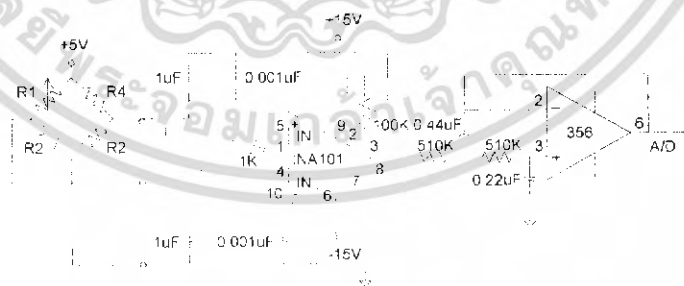


รูปที่ 3.16 แสดงวงจรแสดงผลโดย MAX232

จากรูปที่ 3.16 เป็นวงจรใช้ IC MAX232 เป็นตัวเชื่อมต่อเพื่อ ส่งค่าทางขา TxD และรับค่าทางขา RxD จากไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรม Hyper Terminal ผ่านทางพอร์ทอนุกรม (Serial Port)

3.1.5.4 วงจรวัดตำแหน่งลูกบอล

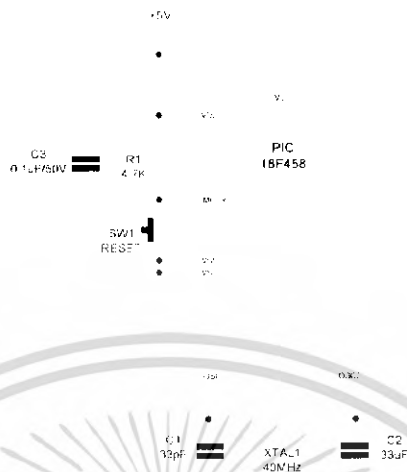
การวัดตำแหน่งของลูกบอลใช้วงจรบริดจ์แล้วขยายสัญญาณด้วย Instrument amp จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้กรองความถี่สูงออกก่อนที่จะเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อลดสัญญาณรบกวน โดยวงจร Butterworth Filter โดยใช้ Op-amp เบอร์ 356 แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.17 แสดงวงจรวัดตำแหน่งลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5.5 วงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458



รูปที่ 3.18 แสดงการต่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 18F458

จากรูป 3.17 แสดงการต่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้แหล่งจ่ายภายนอก ระหว่าง 4.5V-6.0V และคริสตอลจะกำเนิดสัญญาณนาฬิกาซึ่งมีลักษณะการทำงานเป็นวงรอบ (cycle) โดยความเร็วจะเท่ากับ $1\text{cycle} = \text{XTAL}/4$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบโดยใช้ MATLAB

จากสมการปริภูมิสแตต (state space equation) ของลูกบอลและคาน (ball & beam)

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10.803 & -882 & 0 \\ 12.842 & -26.78 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_L \\ \theta_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1,912 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} E_a$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix}$$

จากสมการปริภูมิสแตต (state space equation) ของมอเตอร์และเกียร์ (ball & beam)

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0.3763 & 0 & -8.687 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -100.3503 & 0 & -0.3763 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -0.1280 \\ 0 \\ 34.1328 \end{bmatrix} T$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

ดังนั้น State Variable Model ของระบบ Ball & Beam ที่สร้างขึ้น คือ

$$\ddot{x} = \frac{mg}{p} \frac{J_{ball}}{r} x - \frac{mg}{p} (J_{beam} + J_{ball}) \dot{\theta} - \frac{1}{p} \frac{J_{ball}}{r} K_T i_a$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{mg}{p} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) x + \frac{mg}{p} \frac{J_{ball}}{r} \theta + \frac{1}{p} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) K_T i_a$$

$$\dot{i}_a = \frac{E_a}{L_a} - \frac{R_a}{L_a} \dot{\theta} - \frac{K_T}{L_a} i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{mg J_{ball}}{p r} & 0 & -\frac{mg}{p} (J_{beam} + J_{ball}) & 0 & -\frac{1}{p} \frac{J_{ball}}{r} K_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{mg}{p} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) & 0 & \frac{mg J_{ball}}{p r} & 0 & \frac{1}{p} \left(m + \frac{J_{ball}}{r^2} \right) K_T \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_T}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} E_a$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$

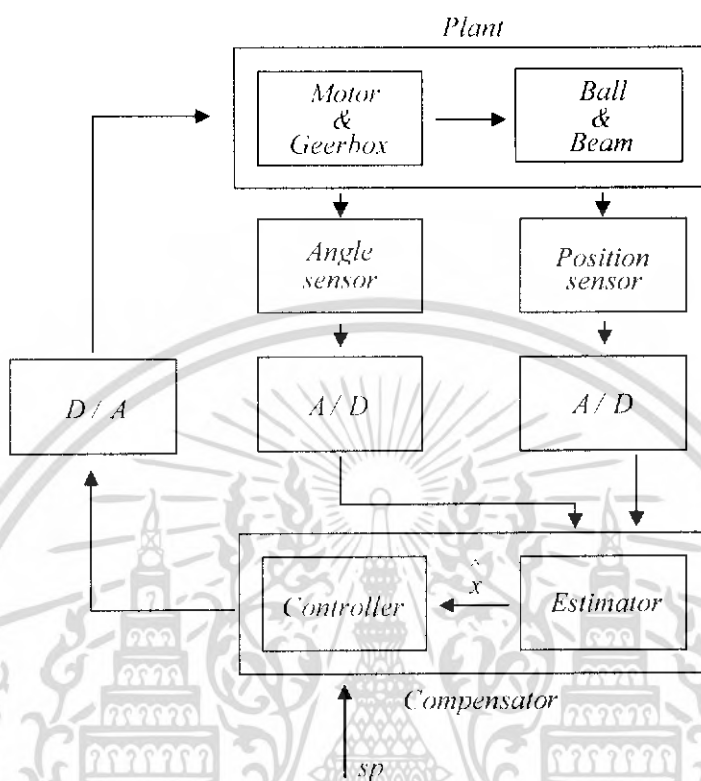
เมื่อแทนค่า

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2964 & 0 & -6.8392 & 0 & -0.0005 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -79.0259 & 0 & 0.2964 & 0 & 0.1344 \\ 0 & 0 & 0 & -9.56 & -10.8030593 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1912.0459 \end{bmatrix} E_a$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ x \\ \dot{\theta} \\ i_a \end{bmatrix}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

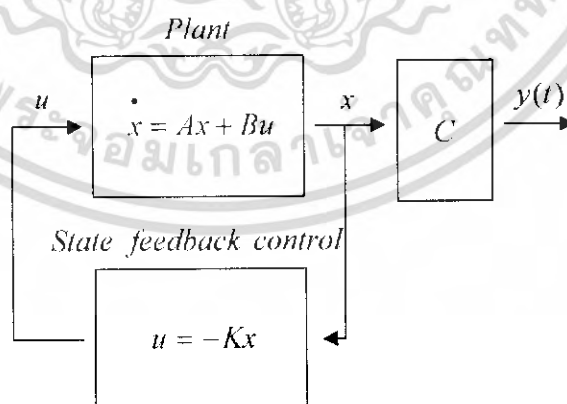
3.3 การออกแบบตัวควบคุม



รูปที่ 3.20 แสดงระบบคอนโทรลของระบบ Ball & Beam

3.3.1 การออกแบบ Compensator

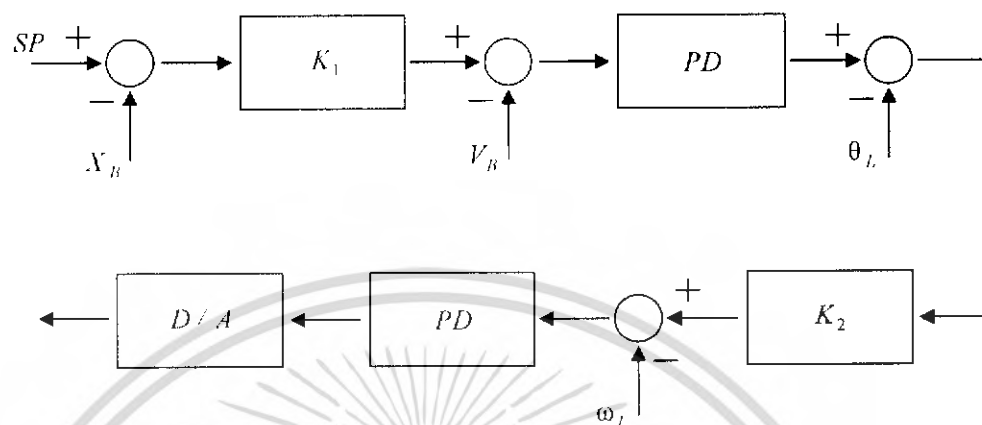
3.3.1.1 Estimator



รูปที่ 3.21 แสดงรูปแบบการออกแบบระบบควบคุมแบบ State space

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1.2 Controller



รูปที่ 3.22 แสดงรูปแบบการออกแบบคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

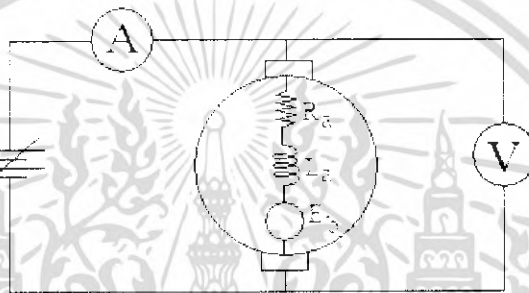
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

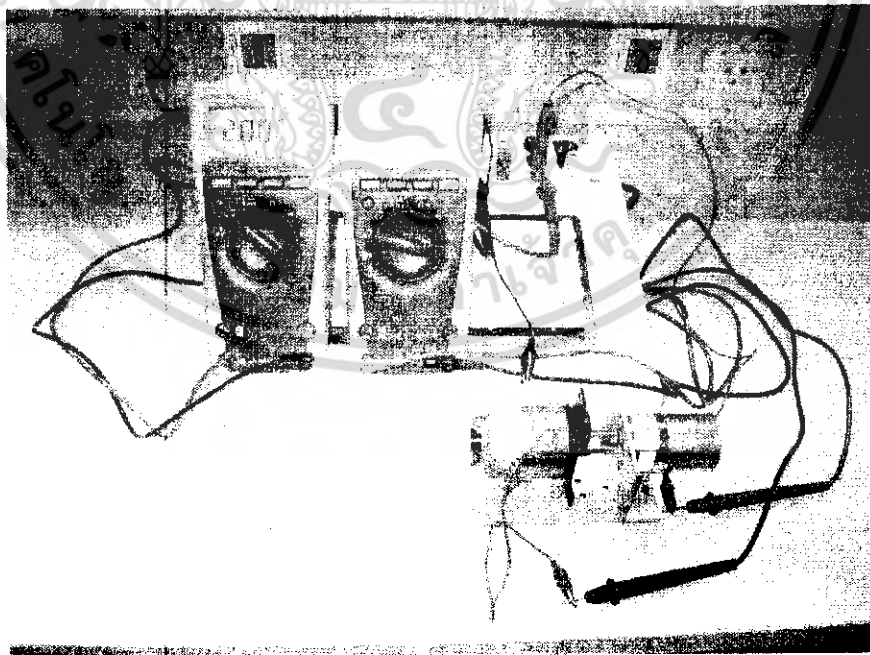
บทนี้จะกล่าวถึงการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เพื่อใช้หาค่าตอบของระบบ

4.1 การทดลองค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ DC MOTOR

4.1.1 ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Armature Resistance)



รูปที่ 4.1 การวัดความต้านทานของอาร์เมเจอร์



รูปที่ 4.2 แสดงการวัดความต้านทานของอาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง

1. ต้ออุปกรณ์ดังรูป
2. ทำให้ $\omega_m = 0$ โดยล็อกแกนมอเตอร์ให้หยุดหมุน
3. ทำให้เทอม $L_a \frac{d}{dt} i_a = 0$ โดยป้อน DC MOTOR Supply
4. จาก $e_a = R_a i_a + L_a \frac{d}{dt} i_a + K_b \omega_m$ จะได้ $e_a = R_a i_a$
 หา $R_a = \frac{e_a}{i_a}$
5. เปลี่ยนค่า e_a หลายๆ ค่าพร้อมทั้งวัดค่า i_a
6. บันทึกค่าข้อ 5 ในตารางที่ พร้อมทั้งคำนวณหา R_a
7. หาค่าเฉลี่ยของ R_a

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (R_a)

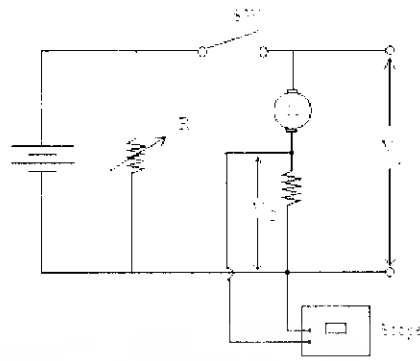
e_a (V)	i_a (A)	R_a (Ω)
2	0.346	5.780
3	0.525	5.714
4	0.685	5.839
5	0.926	5.400
6	1.185	5.063
7	1.247	5.613
8	1.350	5.926
9	1.632	5.515
10	1.772	5.643
11	1.952	5.635
12	1.990	6.030

$$\text{ค่าเฉลี่ย } R_a = \frac{5.780 + 5.714 + 5.839 + 5.400 + 5.063 + 5.613 + 5.926 + 5.515 + 5.643 + 5.635 + 6.030}{11}$$

$$= 5.650 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 อินдукแตนซ์ของอาร์เมเจอร์ (Armature Inductance)



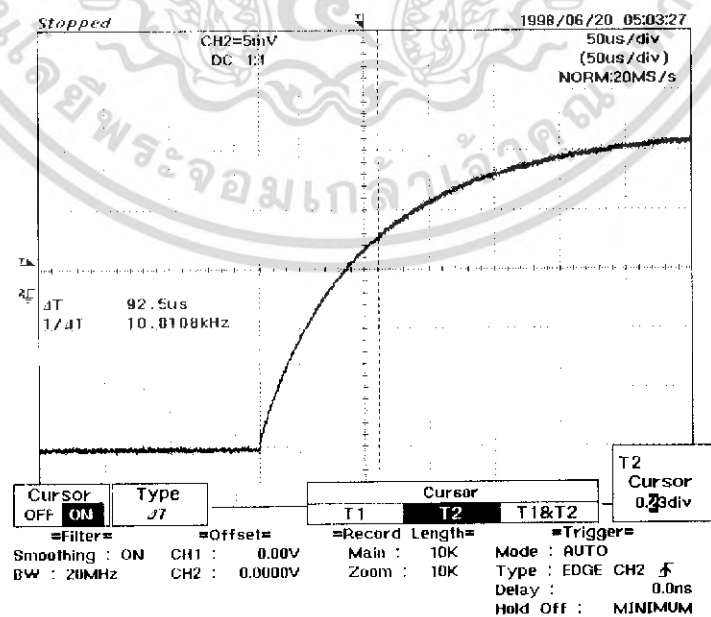
รูปที่ 4.3 การวัดค่า Armature Inductance โดยหาจาก time constant

การทดลอง

1. ต่ออุปกรณ์ดังรูป
2. ล้อคแกนมอเตอร์
3. ป้อน step input voltage ที่ v_s ดังรูป
4. วัดค่า v_L ด้วยออสซิลโลสโคป
5. บันทึกผลในกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง v_L กับ t
6. วัดระยะเวลาที่มีกระแสถึง 63.2% ของ v_s ระยะเวลาที่วัดได้คือ τ_c ดังรูป
7. หา L_a จาก

$$\tau_c = \frac{L_a}{R_a}$$

$$L_a = R_a \tau_c$$



รูปที่ 4.4 ผลการวัดค่า Time Constant ทางไฟฟ้าของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$V / \text{DIV} = 5 \text{ mv}$$

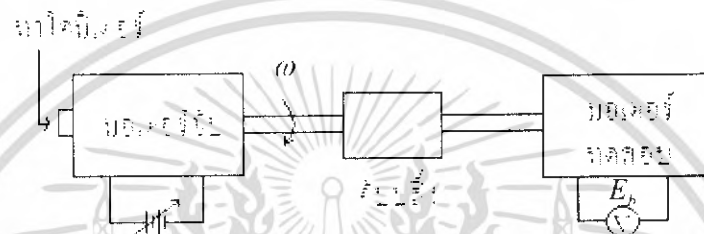
$$T / \text{DIV} = 50 \mu\text{s}$$

จากผลการทดลอง

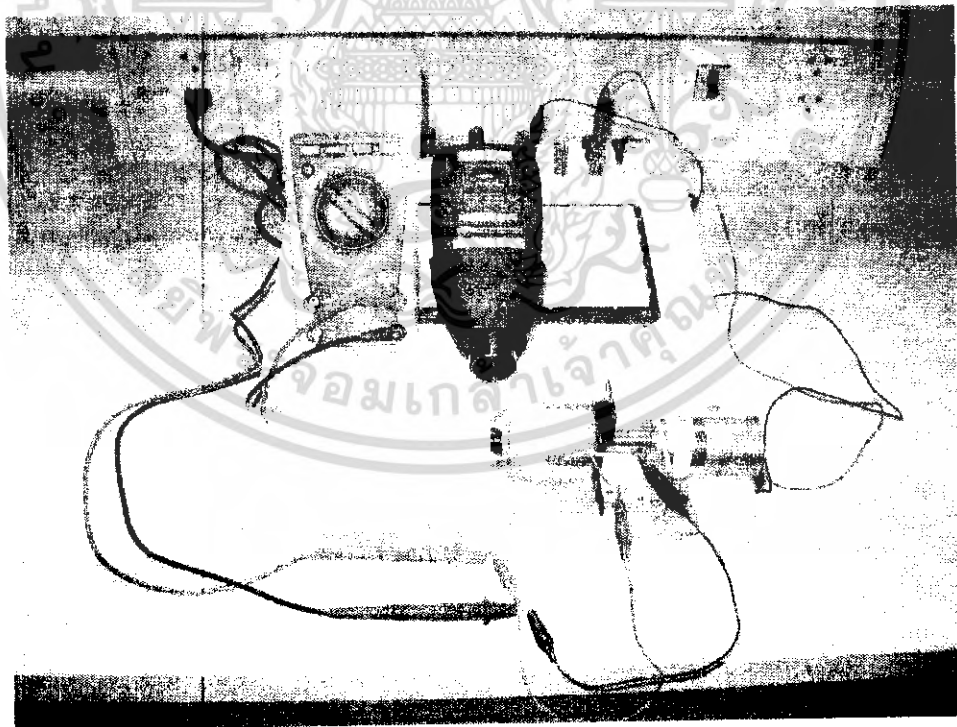
$$L_a = R_a \tau_c$$

$$= 5.650 \times 92.5 \times 10^{-6} = 0.523 \text{ mH}$$

4.1.3 Back Emf Constant



รูปที่ 4.5 การวัด Back Emf Constant ของมอเตอร์



รูปที่ 4.6 แสดงการวัด Back Emf Constant ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง

1. ต่ออุปกรณ์ดังรูป
2. ป้อน DC Power Supply หลาย ๆ ค่าพร้อมทั้งวัดความเร็วของ ω และค่า back emf
3. บันทึกผลข้อ 2. ในตาราง
4. คำนวณหา $K_b = \frac{E_b}{\omega}$
5. หาค่าเฉลี่ยของ K_b

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการหาค่า Back Emf Constant ของมอเตอร์

E_b (V)	ω (rad/sec)	K_b (m)
0.125	24.0	5.208
0.178	34.2	5.205
0.220	44.0	5.000
0.268	53.3	5.028
0.318	62.9	5.056
0.367	72.6	5.055
0.414	82.5	5.018
0.472	92.3	5.114
0.513	101.8	5.039
0.563	111.4	5.054

ค่าเฉลี่ย

$$K_b = \left(\frac{5.208 + 5.205 + 5.000 + 5.028 + 5.056 + 5.055 + 5.018 + 5.114 + 5.039 + 5.054}{10} \right) \frac{\text{volts}}{\text{rad/sec}}$$

$$= 0.005078 \frac{\text{volts}}{\text{rad/sec}}$$

4.1.4. ค่าคงที่ของแรงบิด (Torque Constant)

จาก emf constant (K_b) มีความสัมพันธ์กับ torque constant

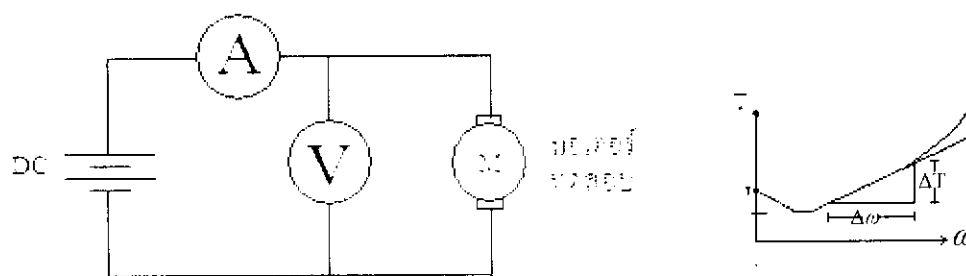
ดังนี้

$$K_t = K_b$$

$$K_t = 0.005078 \text{ Nm/A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 ค่า Friction ของมอเตอร์ (B)



รูปที่ 4.7 การหาค่า Friction ของมอเตอร์

การทดลอง

1. ต่อกับอุปกรณ์ดังรูป
2. ป้อน Voltage มากขึ้นเรื่อย ๆ และบันทึกค่าจาก DC Volt-Meter และ Amp- Meter พร้อมทั้งวัดความเร็วรอบ ω และบันทึกผลในตาราง
3. นำค่าในตารางมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Torque (T) กับความเร็วรอบ (ω)

4. ค่า torque คำนวณจาก $T = K_T I_a$

โดย ค่า Static torque $T_s = K_T I_{as}$

เมื่อ I_{as} = กระแสเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์

ค่า Dynamic torque $T_d = K_T I_a$

เมื่อ I_a = กระแสที่ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่

5. ค่า Friction $B = \frac{\Delta T}{\Delta \omega}$ หาได้จากกราฟดังรูป

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการหาค่า Friction ของมอเตอร์ (เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน)

e_a (V)	I_{as} (A)	ω (rpm)	T_s (Nm)
1.73	0.267	0	0.00130

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการหาค่า Friction ของมอเตอร์ (เมื่อมอเตอร์หมุนคงที่)

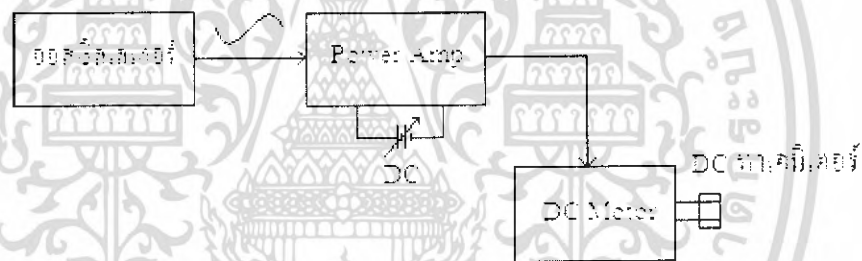
e_a (V)	I_a (A)	ω (rpm)	T_d (Nm)
2	0.116	264.4	0.00058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4	0.131	655.2	0.00066
6	0.148	1042	0.00074
8	0.161	1452	0.00080
10	0.163	1865	0.00081
12	0.171	2277	0.00086
14	0.181	2676	0.00090
16	0.186	3096	0.00093
18	0.193	3524	0.00097
20	0.200	3966	0.00100

$$\text{ค่า Friction } B = \frac{0.001 - 0.00058}{3966 - 264.4} = 0.113 \times 10^{-6}$$

4.1.6 ค่าโมเมนต์แรงเฉื่อย (Moment of Inertia)



รูปที่ 4.8 การวัดหาโมเมนต์แรงเฉื่อยของดีซีมอเตอร์

การทดลอง

1. ต่ออุปกรณ์ดังรูป
2. ป้อน DC Power Supply ให้กับ Motor จนดีซีมอเตอร์หมุนในทิศทางเดียว
3. ป้อนความถี่ให้กับ Motor
4. เปลี่ยนค่าความถี่ (ก) หลายๆ ค่า พร้อมทั้งวัดความเร็วรอบ (ω_m) และบันทึกผล
5. คำนวณ
$$J_m = \frac{k_t I_m}{2\pi f_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และบทสรุป

5.1 บทสรุป

การควบคุมตำแหน่งลูกบอลบนคาน เราใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เป็นตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมอยู่ในส่วน compensator ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ controller และ estimator โดยที่ estimator จะเป็นตัวประมาณค่า ในระบบตัวแปรที่ใช้ controller มี 4 ตัว โดยรู้ค่าจากเซนเซอร์มุม และเซนเซอร์ตำแหน่งมี 2 ตัว คือ x และ θ อีก 2 ตัว จะประมาณค่าโดย estimator คือ \hat{x} และ $\hat{\theta}$ โดยจะต้องเขียนฟังก์ชันในโปรแกรมรูปดิครีต (discrete) ซึ่งกำหนดฟังก์ชันที่ใช้ควบคุมประกอบด้วยตัวแปร 4 ตัว คือ x \hat{x} θ และ $\hat{\theta}$ ในการหาฟังก์ชันในตอนแรกจะหาแบบ continuous ในโดเมน t ก่อน และจึงแปลงเป็นแบบดิครีต (discrete) ในโดเมน z โดยที่ฟังก์ชันทั้ง 4 ตัว คือ x \hat{x} θ และ $\hat{\theta}$ จะใช้ สมการปริภูมิสเทต (state space equation) แสดงการหา โดยที่เราจะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่เราต้องการจะควบคุม ซึ่งประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เกียร์บล็อก วงจรขับมอเตอร์ เซนเซอร์มุม เซนเซอร์ตำแหน่ง คาน และลูกบอล เป็นต้น จากนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (differential equations) การแปลงลาปลาซ (laplace transform) ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) และสมการปริภูมิสเทต (state space equation) โดยใช้กฎต่างๆทางคณิตศาสตร์หรือฟิสิกส์อ้างอิง และสามารถนำเอาสมการเหล่านี้มาจำลองระบบด้วย MATLAB เพื่อดูผลตอบสนองของระบบต่อไป

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ด้านโครงสร้าง ในช่วงแรกจะมีปัญหาด้านการออกแบบคือต้องคิดว่าจะวางอุปกรณ์วางตรงไหนวางอย่างไรบนโครงสร้างและส่วนที่เป็นปัญหามากที่สุดคือเกียร์บล็อกจะมีเบสเล็กเล็กซึ่งเป็นสิ่งไม่ต้องการ

ด้านการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ ค่าที่ได้อาจมีความผิดพลาด ทำให้การจำลองด้วย MATLAB และการคำนวณไม่สอดคล้องกับระบบจริง จึงทำให้ค่าที่จะนำไปใช้ควบคุมได้ยากและต้องใช้เวลา

5.3 แนวทางพัฒนาต่อ

จากโครงสร้างที่ได้สร้างขึ้นต้องมีการพัฒนาในด้านโปรแกรมต่อคือต้องมีฟังก์ชันที่นำไปควบคุมสอดคล้องกับระบบจริงมากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- (1) เดช พุทธเจริญทอง. “การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์” 1999, หน้า 13
- (2) โยชิน เปรมปราณีรัชต์. ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ.2533.
- (3) วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2538.
- (4) William J.Palm. **System dynamic**. 3 rd. ED. Boston : McGraw – Hill, Inc 2005.
- (5) Benjamin C. Kuo. **Automatic control system**. 4 th ED. New Delhi : Prentice-Hill, Inc 1985.
- (6) Thananchai Leephakpreeda. **Dynamic system and control**. Thailand : Thammasat University, Inc 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

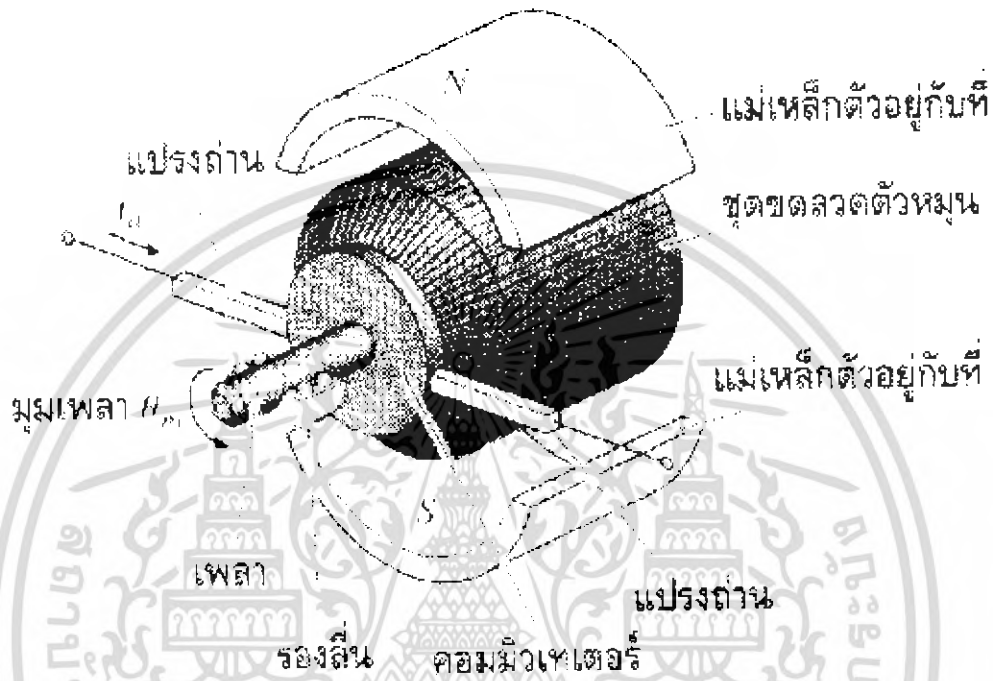


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โครงสร้างและหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบพื้นฐานภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร (PM DC Motors) หลักๆ คือ stator, rotor, armature และ commutator

เมื่อ	stator	คือ แม่เหล็กถาวรที่อยู่กับที่และสร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic field)
	rotor	คือ แกนเหล็กที่ยึดแบร์ริง (Bearings) และหมุนรอบตัวมันเองจากแรงบิด
	armature	คือ ขดลวดที่ติดกับ rotor
	commutator	คือ หน้าสัมผัสที่เชื่อมต่อปลายตัวนำแต่ละเส้นเรียกว่า Slip rings สัมผัสกับ
	brushes	ที่อยู่กับที่ เป็นตัวส่งผ่านกระแส i_a (armature current) ครบวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 แสดงหลักพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรง

Torque Motor (T_m)

$$T_m = K_f i_a \quad (1)$$

จากรูป 2 แสดงหลักพื้นฐานของมอเตอร์กระแสตรง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงบนตัวนำ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$F = nBli \quad (2)$$

เมื่อ

F คือแรงบนตัวนำ (N)

n คือจำนวนขดลวด Armature

B คือความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Tesla)

i คือกระแสที่ไหลผ่านขดลวด (Ampere)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ 2.2 แรงบิดตัวนำจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็กและกระแส ถ้า armature มีรัศมีคือ r แรงบิดของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่ไหลผ่าน armature สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_m = F_r = nBl i_a r = K_r i_a \quad (3)$$

โดยที่

$$K_r = nBlr$$

เมื่อ

T_m คือ แรงบิดมอเตอร์ (N-M)

K_r คือ ค่าคงตัวแรงบิด (N-M / Amp)

r คือ รัศมีของ Armature (metre)

i_a คือ กระแสไฟฟ้าที่ Armature (Amp)

Back emf (e_b)

$$e_b = K_b \omega_m \quad (4)$$

นอกจากนี้ จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวได้ว่าการเคลื่อนของขดลวดใดๆ ในสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวด นั่นคือทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electromotive Force: emf) สมการของแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ คือ

$$e_b(t) = \frac{d}{dt} \phi \quad (5)$$

เมื่อ

$e_b(t)$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (voltage)

ϕ คือ เส้นแรงแสนามแม่เหล็ก (weber)

ถ้า

$$\phi = BA \quad (6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมุติค่า B คงที่ และ A คือ พื้นที่ผิวของตัวนำ จากสมการ 2.1.5 เขียนใหม่ได้เป็น

$$e_b(t) = -B \frac{d}{dt} A \quad (7)$$

การหาพื้นที่ผิวของตัวนำจากรูป โดย

พื้นที่ A_1 คือ

$$A_1 = r(\pi - \theta)l \quad (8)$$

พื้นที่ A_2 คือ

$$A_2 = r\theta l \quad (9)$$

ดังนั้น

$$e_b(t) = -B \frac{d}{dt} (A_1 - A_2) = 2Brl\omega$$

$$e_b = K_b \omega_m$$

เมื่อ

$e_b(t)$ คือ back emf (voltage)

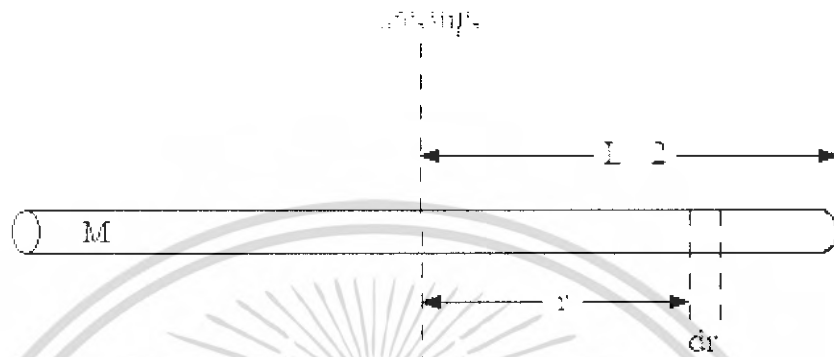
K_b คือ back emf constant

ω คือ ความเร็วมอเตอร์ (rad / sec)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โมเมนต์ความเฉื่อยของ Beam (J_{beam})



รูปที่ 3 แบ่งวัตถุหมุนรอบแกนผ่านกึ่งกลางแบ่ง

จากรูป แบ่งแบ่งวัตถุเป็น dm ฉะนั้น

$$dm = \frac{M}{L} dr$$

ฉะนั้น

$$J_{\text{beam}} = \int r^2 dm$$

$$= 2 \left[\frac{M}{L} \int r^2 dr \right] = 2 \left[\frac{M}{L} \left[\frac{r^3}{3} \right]_0^{L/2} \right]$$

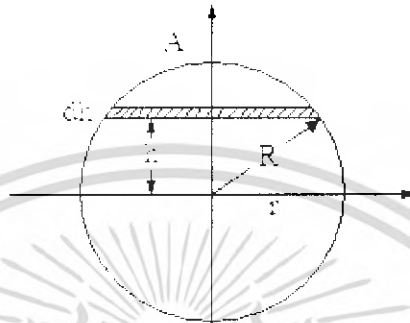
$$= \frac{ML^2}{12}$$

$$J_{\text{beam}} = \frac{ML^2}{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โมเมนต์ความเฉื่อยของ Ball (J_{ball})



รูปที่ 4 แบ่งทรงกลมเป็นแผ่นบางๆ

จากรูป คำนวณของแผ่นบางๆ เท่ากับ dm

$$dm = \pi r^2 \frac{M}{L} dh$$

การแบ่งทรงกลมเป็นแผ่นบางๆ ซึ่งลักษณะเป็นจานแบน จะได้

$$dJ_{\text{ball}} = \frac{1}{2} r^2 dm$$

แทนค่า dm จะได้

$$dJ_{\text{ball}} = \frac{1}{2} r^2 \pi r^2 \frac{M}{V} dh$$

$$= \frac{1}{2} r^4 \pi \frac{M}{V} dh$$

จากรูป จะได้

$$r^2 + h^2 = R^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r^4 = (R^2 - h^2)^2$$

$$= R^4 - 2R^2h^2 + h^4$$

แทนค่า r^4 ใน จะได้

$$dJ_{\text{ball}} = \frac{1}{2} \pi (R^4 - 2R^2h^2 + h^4) \frac{M}{V} dh$$

$$J_{\text{ball}} = \int dJ_{\text{ball}}$$

$$= 2 \left[\frac{1}{2} \frac{\pi M}{V} \int_0^R (R^4 - 2R^2h^2 + h^4) dh \right]$$

$$= \frac{\pi M}{V} \left[R^4h - \frac{2}{3} R^2h^3 + \frac{h^5}{5} \right]_0^R$$

$$= \frac{8}{15} \frac{\pi MR^5}{V}$$

จากปริมาตรทรงกลม $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

$$J_{\text{ball}} = \frac{2}{5} MR^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



MICROCHIP

PIC18F2480/2580/4480/4580 **Data Sheet**

28/40/44-Pin
Enhanced Flash Microcontrollers
with ECAN™ Technology, 10-Bit A/D
and nanoWatt Technology



MICROCHIP PIC18F2480/2580/4480/4580

28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers with ECAN™ Technology, 10-Bit A/D and nanoWatt Technology

Power Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode current down to 0.1 μ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1 μ A, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, up to 40 MHz
- 4X Phase Lock Loop (PLL) – available for crystal and internal oscillators
- Two External RC modes, up to 4 MHz
- Two External Clock modes, up to 40 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - Provides a complete range of clock speeds, from 31 kHz to 32 MHz when used with PLL
 - User tunable to compensate for frequency drift
- Secondary oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Fail-Safe Clock Monitor
 - Allows for safe shutdown if peripheral clock stops

Special Microcontroller Features:

- C compiler optimized architecture with optional extended instruction set
- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-programmable under software control
- Priority levels for interrupts
- 8 x 8 Single Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V

Peripheral Highlights:

- High current sink/source 25 mA/25 mA
- Three external interrupts
- One Capture/Compare/PWM (CCP) module
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module (40/44-pin devices only):
 - One, two or four PWM outputs
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-Shutdown and Auto-Restart
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI™ (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- Enhanced Addressable USART module
 - Supports RS-485, RS-232 and LIN 1.3
 - RS-232 operation using internal oscillator block (no external crystal required)
 - Auto-Wake-up on Start bit
 - Auto-Baud detect
- 10-bit, up to 11-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D), up to 100 Ksps
 - Auto-acquisition capability
 - Conversion available during Sleep
- Dual analog comparators with input multiplexing

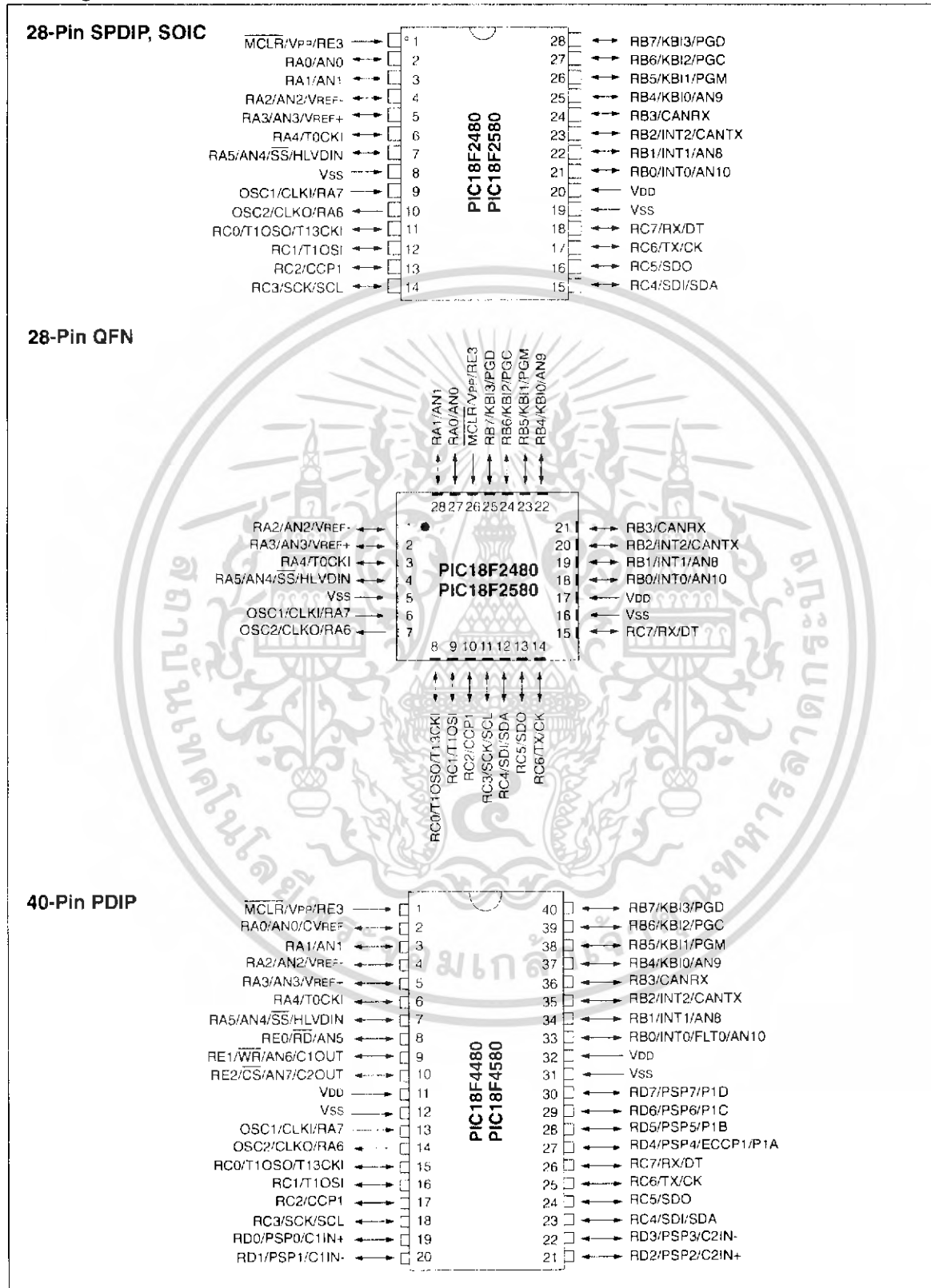
ECAN Module Features:

- Message bit rates up to 1 Mbps
- Conforms to CAN 2.0B ACTIVE Specification
- Fully backward compatible with PIC18XXX8 CAN modules
- Three modes of operation:
 - Legacy, Enhanced Legacy, FIFO
- Three dedicated transmit buffers with prioritization
- Two dedicated receive buffers
- Six programmable receive/transmit buffers
- Three full 29-bit acceptance masks
- 16 full 29-bit acceptance filters w/ dynamic association
- DeviceNet™ data byte filter support
- Automatic remote frame handling
- Advanced error management features

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	MSSP		EUSART	Comp.	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI™	Master I ² C™			
PIC18F2480	16K	8192	768	256	25	8	1/0	Y	Y	1	0	1/3
PIC18F2580	32K	16384	1536	256	36	8	1/0	Y	Y	1	0	1/3
PIC18F4480	16K	8192	768	256	25	11	1/1	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4580	32K	16384	1536	256	36	11	1/1	Y	Y	1	2	1/3

PIC18F2480/2580/4480/4580

Pin Diagrams



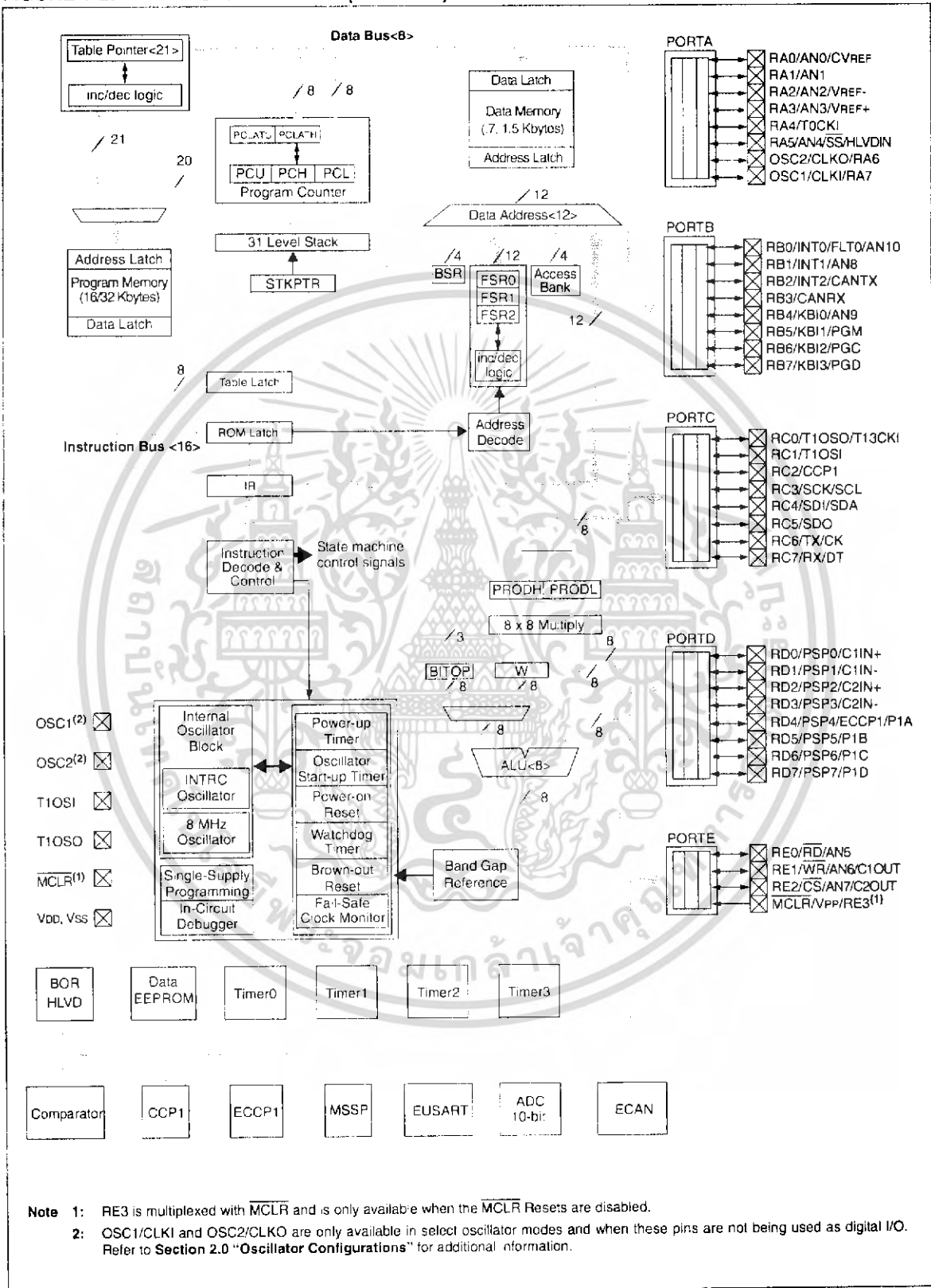
PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-1: DEVICE FEATURES

Features	PIC18F2480	PIC18F2580	PIC18F4480	PIC18F4580
Operating Frequency	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz	DC – 40 MHz
Program Memory (Bytes)	16384	32768	16384	32768
Program Memory (Instructions)	8192	16384	8192	16384
Data Memory (Bytes)	768	1536	768	1536
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	1	1	1	1
Enhanced Capture/ Compare/PWM Modules	0	0	1	1
ECAN Module	1	1	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Parallel Communications (PSP)	No	No	Yes	Yes
10-bit Analog-to-Digital Module	8 Input Channels	8 Input Channels	11 Input Channels	11 Input Channels
Comparators	0	0	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable High/Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin SPDIP 28-pin SOIC 28-pin QFN	28-pin SPDIP 28-pin SOIC 28-pin QFN	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

PIC18F2480/2580/4480/4580

FIGURE 1-2: PIC18F4480/4580 (40/44-PIN) BLOCK DIAGRAM



Note 1: RE3 is multiplexed with MCLR and is only available when the MCLR Resets are disabled.
Note 2: OSC1/CLKI and OSC2/CLKO are only available in select oscillator modes and when these pins are not being used as digital I/O. Refer to Section 2.0 "Oscillator Configurations" for additional information.

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
MCLR/VPP/RE3 MCLR VPP RE3	1	18	18	I P I	ST ST	Master Clear (input) or programming voltage (input). Master Clear (Reset) input. This pin is an active-low Reset to the device. Programming voltage input. Digital input.
OSC1/CLKI/RA7 OSC1 CLKI RA7	13	32	30	I I I/O	ST CMOS TTL	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise. External clock source input. Always associated with pin function OSC1. (See related OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins.) General purpose I/O pin.
OSC2/CLKO/RA6 OSC2 CLKO RA6	14	33	31	O O I/O	— — TTL	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate. General purpose I/O pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RA0/AN0/CVREF	2	19	19	I/O	TTL	PORTA is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Analog input 0. Analog Comparator Reference output.
RA0				I	Analog	
AN0				O	Analog	
CVREF						
RA1/AN1	3	20	20	I/O	TTL	Digital I/O. Analog input 1.
RA1				I	Analog	
AN1						
RA2/AN2/VREF-	4	21	21	I/O	TTL	Digital I/O. Analog input 2. A/D Reference Voltage (Low) input.
RA2				I	Analog	
AN2				I	Analog	
VREF-						
RA3/AN3/VREF+	5	22	22	I/O	TTL	Digital I/O. Analog input 3. A/D Reference Voltage (High) input.
RA3				I	Analog	
AN3				I	Analog	
VREF+						
RA4/T0CKI	6	23	23	I/O	TTL	Digital I/O. Timer0 external clock input.
RA4				I	ST	
T0CKI						
RA5/AN4/SS/HLVDIN	7	24	24	I/O	TTL	Digital I/O. Analog input 4. SPI™ Slave Select input. High/Low-Voltage Detect input. See the OSC2/CLKO/RA6 pin. See the OSC1/CLKI/RA7 pin.
RA5				I	Analog	
AN4				I	TTL	
SS				I	Analog	
HLVDIN						
RA6						
RA7						

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RB0/INT0/FLT0/ AN10	33	9	8	I/O	TTL	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O.
RB0				I	ST	External interrupt 0.
INT0				I	ST	Enhanced PWM Fault input (ECCP1 module).
FLT0				I	Analog	Analog input 10.
AN10						
RB1/INT1/AN8	34	10	9	I/O	TTL	Digital I/O.
RB1				I	ST	External interrupt 1.
INT1				I	ST	External interrupt 1.
AN8				I	Analog	Analog input 8.
RB2/INT2/CANTX	35	11	10	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2				I	ST	External interrupt 2.
INT2				I	ST	External interrupt 2.
CANTX				O	TTL	CAN bus TX.
RB3/CANRX	36	12	11	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3				I	TTL	CAN bus RX.
CANRX				I	TTL	CAN bus RX.
RB4/KBI0/AN9	37	14	14	I/O	TTL	Digital I/O.
RB4				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI0				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
AN9				I	Analog	Analog input 9.
RB5/KBI1/PGM	38	15	15	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI1				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGM				I/O	ST	Low-Voltage ICSP™ Programming enable pin.
RB6/KBI2/PGC	39	16	16	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI2				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGC				I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming clock pin.
RB7/KBI3/PGD	40	17	17	I/O	TTL	Digital I/O.
RB7				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
KBI3				I	TTL	Interrupt-on-change pin.
PGD				I/O	ST	In-Circuit Debugger and ICSP programming data pin.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RC0/T1OSO/T13CKI	15	34	32			PORTC is a bidirectional I/O port.
RC0				I/O	ST	Digital I/O.
T1OSO				O	—	Timer1 oscillator output.
T13CKI				I	ST	Timer1/Timer3 external clock input.
RC1/T1OSI	16	35	35			
RC1				I/O	ST	Digital I/O.
T1OSI				I	CMOS	Timer1 oscillator input.
RC2/CCP1	17	36	36			
RC2				I/O	ST	Digital I/O.
CCP1				I/O	ST	Capture1 input/Compare1 output/PWM1 output.
RC3/SCK/SCL	18	37	37			
RC3				I/O	ST	Digital I/O.
SCK				I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ mode.
SCL				I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C™ mode.
RC4/SDI/SDA	23	42	42			
RC4				I/O	ST	Digital I/O.
SDI				I	ST	SPI data in.
SDA				I/O	ST	I ² C data I/O.
RC5/SDO	24	43	43			
RC5				I/O	ST	Digital I/O.
SDO				O	—	SPI data out.
RC6/TX/CK	25	44	44			
RC6				I/O	ST	Digital I/O.
TX				O	—	EUSART asynchronous transmit.
CK				I/O	ST	EUSART synchronous clock (see related RX/DT).
RC7/RX/DT	26	1	1			
RC7				I/O	ST	Digital I/O.
RX				I	ST	EUSART asynchronous receive.
DT				I/O	ST	EUSART synchronous data (see related TX/CK).

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
						PORTD is a bidirectional I/O port or a Parallel Slave Port (PSP) for interfacing to a microprocessor port. These pins have TTL input buffers when PSP module is enabled.
RD0/PSP0/C1IN+	19	38	38	I/O	ST	Digital I/O.
RD0				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
PSP0				I	Analog	Comparator 1 input (+).
C1IN+						
RD1/PSP1/C1IN-	20	39	39	I/O	ST	Digital I/O.
RD1				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
PSP1				I	Analog	Comparator 1 input (-)
C1IN-						
RD2/PSP2/C2IN+	21	40	40	I/O	ST	Digital I/O.
RD2				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
PSP2				I	Analog	Comparator 2 input (+).
C2IN+						
RD3/PSP3/C2IN-	22	41	41	I/O	ST	Digital I/O.
RD3				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
PSP3				I	Analog	Comparator 2 input (-).
C2IN-						
RD4/PSP4/ECCP1/P1A	27	2	2			
RD4				I/O	ST	Digital I/O.
PSP4				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
ECCP1				I/O	ST	Capture2 input/Compare 2 output/PWM2 output.
P1A				O	TTL	ECCP1 PWM output A.
RD5/PSP5/P1B	28	3	3			
RD5				I/O	ST	Digital I/O.
PSP5				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
P1B				O	TTL	ECCP1 PWM output B.
RD6/PSP6/P1C	29	4	4			
RD6				I/O	ST	Digital I/O.
PSP6				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
P1C				O	TTL	ECCP1 PWM output C.
RD7/PSP7/P1D	30	5	5			
RD7				I/O	ST	Digital I/O.
PSP7				I/O	TTL	Parallel Slave Port data.
P1D				O	TTL	ECCP1 PWM output D.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 1-3: PIC18F4480/4580 PINOUT I/O DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Number			Pin Type	Buffer Type	Description
	PDIP	QFN	TQFP			
RE0/ $\overline{\text{RD}}$ /AN5 RE0 $\overline{\text{RD}}$ AN5	8	25	25	I/O I I	ST TTL Analog	<p>PORT_E is a bidirectional I/O port.</p> <p>Digital I/O. Read control for Parallel Slave Port (see also $\overline{\text{WR}}$ and $\overline{\text{CS}}$ pins). Analog input 5.</p>
RE1/ $\overline{\text{WR}}$ /AN6/C1OUT RE1 $\overline{\text{WR}}$ AN6 C1OUT	9	26	26	I/O I I O	ST TTL Analog TTL	<p>Digital I/O. Write control for Parallel Slave Port (see $\overline{\text{CS}}$ and $\overline{\text{RD}}$ pins). Analog input 6. Comparator 1 output.</p>
RE2/ $\overline{\text{CS}}$ /AN7/C2OUT RE2 $\overline{\text{CS}}$ AN7 C2OUT	10	27	27	I/O I I O	ST TTL Analog TTL	<p>Digital I/O. Chip Select control for Parallel Slave Port (see related $\overline{\text{RD}}$ and $\overline{\text{WR}}$). Analog input 7. Comparator 2 output.</p>
RE3	—	—	—	—	—	See MCLR/VPP/RE3 pin.
V _{SS}	12, 31	6, 30, 31	6, 29	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
V _{DD}	11, 32	7, 8, 28, 29	7, 28	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
NC	—	13	12, 13, 33, 34	—	—	No connect.

Legend: TTL = TTL compatible input CMOS = CMOS compatible input or output
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels I = Input
 O = Output P = Power

PIC18F2480/2580/4480/4580

15.0 CAPTURE/COMPARE/PWM (CCP) MODULES

PIC18F2480/2580 devices have one CCP module. PIC18F4480/4580 devices have two CCP (Capture/Compare/PWM) modules. CCP1, discussed in this chapter, implements standard Capture, Compare and Pulse-Width Modulation (PWM) modes.

ECCP1 implements an Enhanced PWM mode. The ECCP implementation is discussed in Section 16.0 "Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) Module".

The CCP1 module contains a 16-bit register which can operate as a 16-bit Capture register, a 16-bit Compare register or a PWM Master/Slave Duty Cycle register. For the sake of clarity, all CCP module operation in the following sections is described with respect to CCP1, but is equally applicable to ECCP1.

Capture and Compare operations described in this chapter apply to all standard and Enhanced CCP modules. The operations of PWM mode, described in Section 15.4 "PWM Mode", apply to ECCP1 only.

REGISTER 15-1: CCP1CON: CAPTURE/COMPARE/PWM CONTROL REGISTER 1

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	
—	—	DC1B1	DC1B0	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	
bit 7								bit 0

bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5-4 **DC1B1:DC1B0:** PWM Duty Cycle bit 1 and bit 0 for CCP1 Module

Capture mode:

Unused.

Compare mode:

Unused.

PWM mode:

These bits are the two LSBs (bit 1 and bit 0) of the 10-bit PWM duty cycle. The eight MSBs (DC19:DC12) of the duty cycle are found in ECCPR1L.

bit 3-0 **CCP1M3:CCP1M0:** CCP Module 1 Mode Select bits

0000 = Capture/Compare/PWM disabled (resets CCP1 module)

0001 = Reserved

0010 = Compare mode, toggle output on match (CCP1IF bit is set)

0011 = Reserved

0100 = Capture mode, every falling edge or CAN message received (time-stamp)⁽¹⁾

0101 = Capture mode, every rising edge or CAN message received (time-stamp)⁽¹⁾

0110 = Capture mode, every 4th rising edge or every 4th CAN message received (time-stamp)⁽¹⁾

0111 = Capture mode, every 16th rising edge or every 16th CAN message received (time-stamp)⁽¹⁾

1000 = Compare mode: initialize CCP pin low; on compare match, force CCP pin high (CCP1IF bit is set)

1001 = Compare mode: initialize CCP pin high; on compare match, force CCP pin low (CCP1IF bit is set)

1010 = Compare mode: generate software interrupt on compare match (CCP1IF bit is set, CCP1 pin reflects I/O state)

1011 = Compare mode: trigger special event, reset timer (TMR1 or TMR3, CCP1IF bit is set)

11xx = PWM mode

Note 1: Selected by CANCAP (CIOCON<4>) bit; overrides the CCP1 input pin source.

Legend:

R = Readable bit

W = Writable bit

U = Unimplemented bit, read as '0'

-n = Value at POR

'1' = Bit is set

'0' = Bit is cleared

x = Bit is unknown

PIC18F2480/2580/4480/4580

15.1 CCP Module Configuration

Each Capture/Compare/PWM module is associated with a control register (generically, CCPxCON) and a data register (CCPRx). The data register, in turn, is comprised of two 8-bit registers: CCPRxL (low byte) and CCPRxH (high byte). All registers are both readable and writable.

15.1.1 CCP MODULES AND TIMER RESOURCES

The CCP modules utilize Timers 1, 2 or 3, depending on the mode selected. Timer1 and Timer3 are available to modules in Capture or Compare modes, while Timer2 is available for modules in PWM mode.

TABLE 15-1: CCP MODE – TIMER RESOURCE

CCP/ECCP Mode	Timer Resource
Capture Compare PWM	Timer1 or Timer3 Timer1 or Timer3 Timer2

The assignment of a particular timer to a module is determined by the Timer-to-CCP enable bits in the T3CON register (Register 14-1). Both modules may be active at any given time and may share the same timer resource if they are configured to operate in the same mode (Capture/Compare or PWM) at the same time. The interactions between the two modules are summarized in Figure 15-1 and Figure 15-2.

TABLE 15-2: INTERACTIONS BETWEEN CCP1 AND ECCP1 FOR TIMER RESOURCES

CCP1 Mode	ECCP1 Mode	Interaction
Capture	Capture	Each module can use TMR1 or TMR3 as the time base. Time base can be different for each CCP.
Capture	Compare	CCP1 can be configured for the special event trigger to reset TMR1 or TMR3 (depending upon which time base is used). Automatic A/D conversions on trigger event can also be done. Operation of CCP1 could be affected if it is using the same timer as a time base.
Compare	Capture	CCP1 can be configured for the special event trigger to reset TMR1 or TMR3 (depending upon which time base is used). Operation of CCP1 could be affected if it is using the same timer as a time base.
Compare	Compare	Either module can be configured for the special event trigger to reset the time base. Automatic A/D conversions on ECCP1 trigger event can be done. Conflicts may occur if both modules are using the same time base.
Capture	PWM ⁽¹⁾	None
Compare	PWM ⁽¹⁾	None
PWM ⁽¹⁾	Capture	None
PWM ⁽¹⁾	Compare	None
PWM ⁽¹⁾	PWM	Both PWMs will have the same frequency and update rate (TMR2 interrupt).

Note 1: Includes standard and Enhanced PWM operation.

15.2 Capture Mode

In Capture mode, the ECCPR1H:ECCPR1L register pair captures the 16-bit value of the TMR1 or TMR3 registers when an event occurs on the CCP1 pin (RB3 or RC1, depending on device configuration). An event is defined as one of the following:

- every falling edge
- every rising edge
- every 4th rising edge
- every 16th rising edge

The event is selected by the mode select bits, CCP1M3:CCP1M0 (CCP1CON<3:0>). When a capture is made, the interrupt request flag bit, CCP1IF (PIR2<1>), is set; it must be cleared in software. If another capture occurs before the value in register CCPR1 is read, the old captured value is overwritten by the new captured value.

15.2.1 CCP PIN CONFIGURATION

In Capture mode, the appropriate CCPx pin should be configured as an input by setting the corresponding TRIS direction bit.

Note: If RC2/CCP1 or RD4/PSP4/ECCP1/P1A is configured as an output, a write to the port can cause a capture condition.

15.2.2 TIMER1/TIMER3 MODE SELECTION

The timers that are to be used with the capture feature (Timer1 and/or Timer3) must be running in Timer mode or Synchronized Counter mode. In Asynchronous Counter mode, the capture operation may not work. The timer to be used with each CCP module is selected in the T3CON register (see Section 15.1.1 "CCP Modules and Timer Resources").

15.2.3 SOFTWARE INTERRUPT

When the Capture mode is changed, a false capture interrupt may be generated. The user should keep the CCPxIE interrupt enable bit clear to avoid false interrupts. The interrupt flag bit, CCPxIF, should also be cleared following any such change in operating mode.

15.2.4 CCP PRESCALER

There are four prescaler settings in Capture mode; they are specified as part of the operating mode selected by the mode select bits (CCP1M3:CCP1M0). Whenever the CCP module is turned off or the CCP module is not in Capture mode, the prescaler counter is cleared. This means that any Reset will clear the prescaler counter.

Switching from one capture prescaler to another may generate an interrupt. Also, the prescaler counter will not be cleared; therefore, the first capture may be from a non-zero prescaler. Example 15-1 shows the recommended method for switching between capture prescalers. This example also clears the prescaler counter and will not generate the "false" interrupt.

15.2.5 CAN MESSAGE TIME-STAMP

The CAN capture event occurs when a message is received in any of the receive buffers. When configured, the CAN module provides the trigger to the CCP1 module to cause a capture event. This feature is provided to "time-stamp" the received CAN messages.

This feature is enabled by setting the CANCEP bit of the CAN I/O Control register (CIOCON<4>). The message receive signal from the CAN module then takes the place of the events on RC2/CCP1.

If this feature is selected, then four different capture options for CCP1M<3:0> are available:

- 0100 – every time a CAN message is received
- 0101 – every time a CAN message is received
- 0110 – every 4th time a CAN message is received
- 0111 – capture mode, every 16th time a CAN message is received

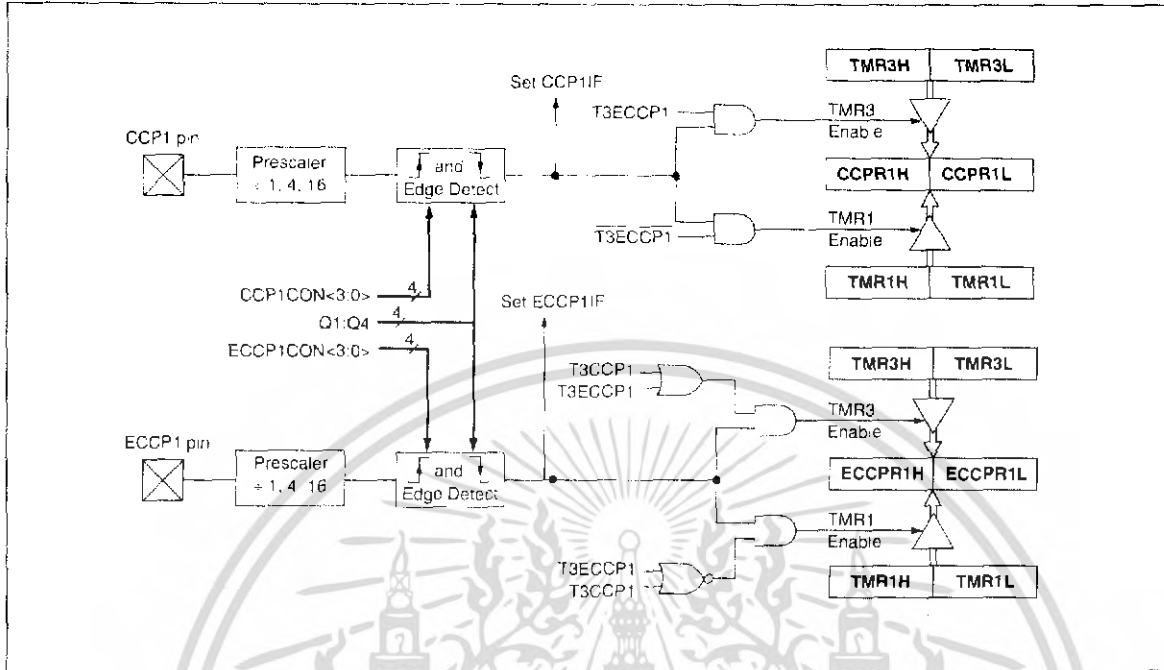
EXAMPLE 15-1: CHANGING BETWEEN CAPTURE PRESCALERS

```

CLRWF CCP1CON      ; Turn CCP module off
MOVLW NEW_CAPT_PS  ; Load WREG with the
                    ; new prescaler mode
                    ; value and CCP ON
MOVWF CCP1CON      ; Load CCP1CON with
                    ; this value
    
```

PIC18F2480/2580/4480/4580

FIGURE 15-1: CAPTURE MODE OPERATION BLOCK DIAGRAM



PIC18F2480/2580/4480/4580

15.3 Compare Mode

In Compare mode, the 16-bit CCP1R register value is constantly compared against either the TMR1 or TMR3 register pair value. When a match occurs, the CCP1 pin can be:

- driven high
- driven low
- toggled (high-to-low or low-to-high)
- remain unchanged (that is, reflects the state of the I/O latch)

The action on the pin is based on the value of the mode select bits (ECCP1M3:ECCP1M0). At the same time, the interrupt flag bit CCP1IF is set.

15.3.1 CCP PIN CONFIGURATION

The user must configure the CCPx pin as an output by clearing the appropriate TRIS bit.

Note: Clearing the CCP1CON register will force the RC2 compare output latch (depending on device configuration) to the default low level. This is not the PORTC I/O data latch.

15.3.2 TIMER1/TIMER3 MODE SELECTION

Timer1 and/or Timer3 must be running in Timer mode or Synchronized Counter mode if the CCP module is using the compare feature. In Asynchronous Counter mode, the compare operation may not work.

15.3.3 SOFTWARE INTERRUPT MODE

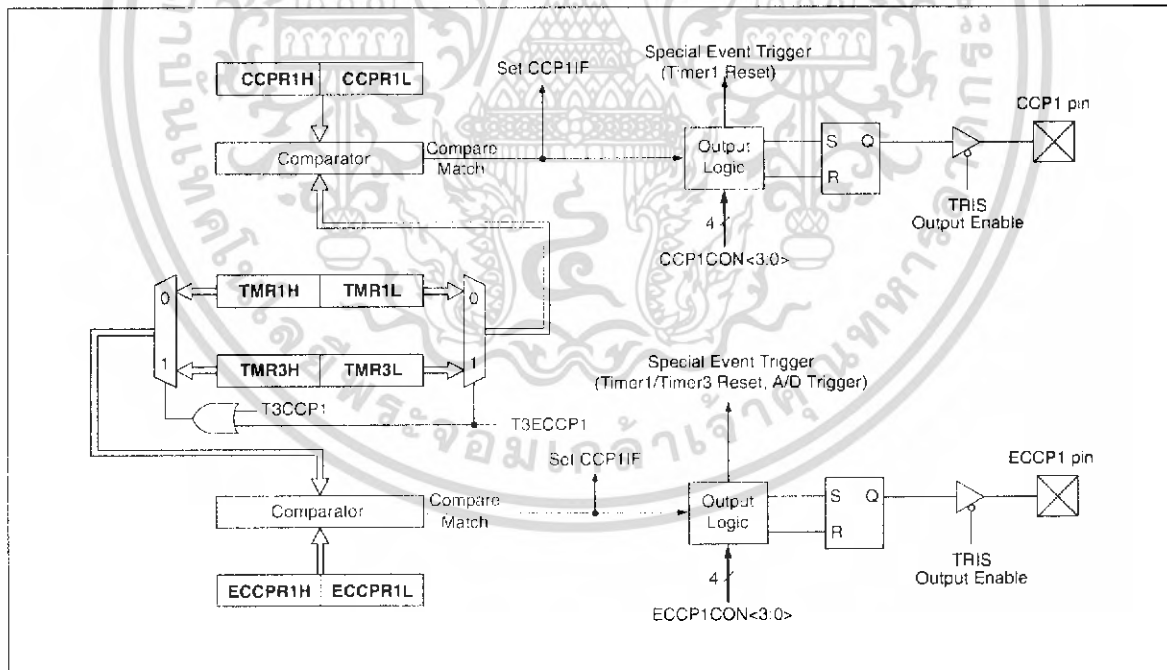
When the Generate Software Interrupt mode is chosen (CCP1M3:CCP1M0 = 1010), the CCP1 pin is not affected. Only a CCP interrupt is generated, if enabled and the CCP1IE bit is set.

15.3.4 SPECIAL EVENT TRIGGER

Both CCP modules are equipped with a special event trigger. This is an internal hardware signal generated in Compare mode to trigger actions by other modules. The special event trigger is enabled by selecting the Compare Special Event Trigger mode (CCP1M3:CCP1M0 = 1011).

For either CCP module, the special event trigger resets the timer register pair for whichever timer resource is currently assigned as the module's time base. This allows the CCPx registers to serve as a programmable period register for either timer.

FIGURE 15-2: COMPARE MODE OPERATION BLOCK DIAGRAM



PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 15-3: REGISTERS ASSOCIATED WITH CAPTURE, COMPARE, TIMER1 AND TIMER3

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Reset Values on page
INTCON	GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF	49
RCON	IPEN	SBOREN	—	Ri	TO	PD	POR	BOR	50
IPR1	PSPIP	ADIP	RCIP	TXIP	SSPIP	CCP1IP	TMR2IP	TMR1IP	52
PIR1	PSPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	52
PIE1	PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	52
IPR2	OSCFIP	CMIP ⁽²⁾	—	EEIP	BCLIP	HLVDIP	TMR3IP	ECCP1IP ⁽²⁾	51
PIR2	OSCFIF	CMIF ⁽²⁾	—	EEIF	BCLIF	HLVDIF	TMR3IF	ECCP1IF ⁽²⁾	52
PIE2	OSCFIE	CMIE ⁽²⁾	—	EEIE	BCLIE	HLVDIE	TMR3IE	ECCP1IE ⁽²⁾	51
TRISB	PORTB Data Direction Register								52
TRISC	PORTC Data Direction Register								52
TMR1L	Holding Register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								50
TMR1H	Holding Register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								50
T1CON	RD16	T1RUN	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON	50
TMR3H	Timer3 Register High Byte								51
TMR3L	Timer3 Register Low Byte								51
T3CON	RD16	T3ECCP1 ⁽¹⁾	T3CKPS1	T3CKPS0	T3CCP1	T3SYNC	TMR3CS	TMR3ON	51
CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								51
CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								51
CCP1CON	—	—	DC1B1	DC1B0	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	51
ECCPR1L ⁽¹⁾	Enhanced Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								51
ECCPR1H ⁽¹⁾	Enhanced Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								51
ECCP1CON ⁽¹⁾	EPWM1M1	EPWM1M0	EDC1B1	EDC1B0	ECCP1M3	ECCP1M2	ECCP1M1	ECCP1M0	51

Legend: — = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by Capture and Compare, Timer1 or Timer3.

Note 1: These bits or registers are available on PIC18F4X80 devices only.

2: These bits are available on PIC18F4X80 devices and reserved on PIC18F2X80 devices.

PIC18F2480/2580/4480/4580

15.4 PWM Mode

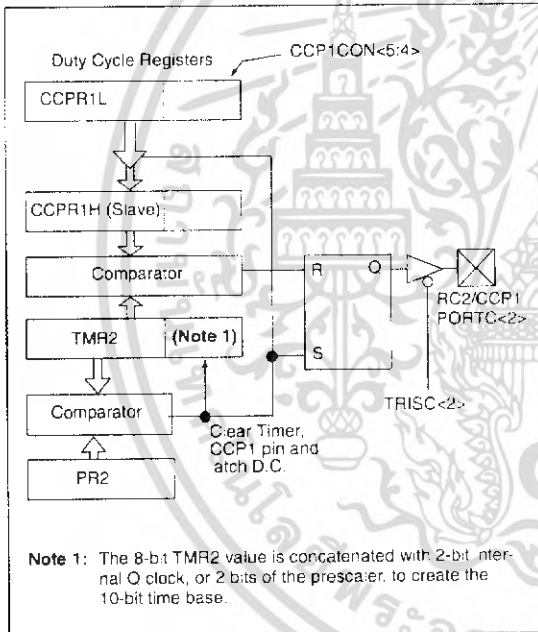
In Pulse-Width Modulation (PWM) mode, the CCP1 pin produces up to a 10-bit resolution PWM output. Since the CCP1 pin is multiplexed with a PORTB or PORTC data latch, the appropriate TRIS bit must be cleared to make the CCP1 pin an output.

Note: Clearing the CCP1CON register will force the RC2 output latch (depending on device configuration) to the default low level. This is not the PORTC I/O data latch.

Figure 15-3 shows a simplified block diagram of the CCP module in PWM mode.

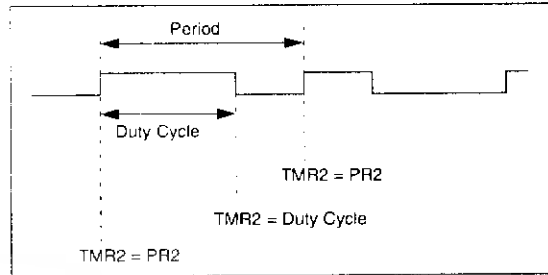
For a step-by-step procedure on how to set up the CCP module for PWM operation, see Section 15.4.4 "Setup for PWM Operation".

FIGURE 15-3: SIMPLIFIED PWM BLOCK DIAGRAM



A PWM output (Figure 15-4) has a time base (period) and a time that the output stays high (duty cycle). The frequency of the PWM is the inverse of the period (1/period).

FIGURE 15-4: PWM OUTPUT



15.4.1 PWM PERIOD

The PWM period is specified by writing to the PR2 (PR4) register. The PWM period can be calculated using the following formula.

EQUATION 15-1:

$$\text{PWM Period} = (\text{PR2} + 1) \cdot 4 \cdot \text{Tosc} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

PWM frequency is defined as 1/[PWM period].

When TMR1 (TMR3) is equal to PR2 (PR2), the following three events occur on the next increment cycle:

- TMR2 is cleared
- The CCP1 pin is set (exception: if PWM duty cycle = 0%, the CCP1 pin will not be set)
- The PWM duty cycle is latched from ECCPR1L into ECCPR1H

Note: The Timer2 postscalers (see Section 13.0 "Timer2 Module") are not used in the determination of the PWM frequency. The postscaler could be used to have a servo update rate at a different frequency than the PWM output.

15.4.2 PWM DUTY CYCLE

The PWM duty cycle is specified by writing to the ECCPR1L register and to the CCP1CON<5:4> bits. Up to 10-bit resolution is available. The ECCPR1L contains the eight MSBs and the CCP1CON<5:4> contains the two LSbs. This 10-bit value is represented by ECCPR1L:ECCP1CON<5:4>. The following equation is used to calculate the PWM duty cycle in time.

EQUATION 15-2:

$$\text{PWM Duty Cycle} = (\text{ECCPR1L:ECCP1CON<5:4>}) \cdot \text{Tosc} \cdot (\text{TMR2 Prescale Value})$$

ECCPR1L and ECCP1CON<5:4> can be written to at any time, but the duty cycle value is not latched into ECCPR1H until after a match between PR2 and TMR2 occurs (i.e., the period is complete). In PWM mode, ECCPR1H is a read-only register.

PIC18F2480/2580/4480/4580

The ECCPR1H register and a 2-bit internal latch are used to double-buffer the PWM duty cycle. This double-buffering is essential for glitchless PWM operation.

When the ECCPR1H and 2-bit latch match TMR2, concatenated with an internal 2-bit Q clock or 2 bits of the TMR2 prescaler, the CCP1 pin is cleared.

The maximum PWM resolution (bits) for a given PWM frequency is given by the equation.

EQUATION 15-3:

$$\text{PWM Resolution (max)} = \frac{\log\left(\frac{F_{OSC}}{F_{PWM}}\right)}{\log(2)} \text{ bits}$$

Note: If the PWM duty cycle value is longer than the PWM period, the ECCP1 pin will not be cleared.

TABLE 15-4: EXAMPLE PWM FREQUENCIES AND RESOLUTIONS AT 40 MHz

PWM Frequency	2.44 kHz	9.77 kHz	39.06 kHz	156.25 kHz	312.50 kHz	416.67 kHz
Timer Prescaler (1, 4, 16)	16	4	1	1	1	1
PR2 Value	FFh	FFh	FFh	3Fh	1Fh	17h
Maximum Resolution (bits)	14	12	10	8	7	6.58

15.4.3 PWM AUTO-SHUTDOWN (ECCP1 ONLY)

The PWM auto-shutdown features of the Enhanced CCP module are available to ECCP1 in PIC18F4480/4580 (40/44-pin) devices. The operation of this feature is discussed in detail in **Section 16.4.7 "Enhanced PWM Auto-Shutdown"**.

Auto-shutdown features are not available for CCP1.

15.4.4 SETUP FOR PWM OPERATION

The following steps should be taken when configuring the CCP module for PWM operation:

1. Set the PWM period by writing to the PR2 register.
2. Set the PWM duty cycle by writing to the CCPR1L register and CCP1CON<5:4> bits.
3. Make the CCP1 pin an output by clearing the appropriate TRIS bit.
4. Set the TMR2 prescale value, then enable Timer2 by writing to T2CON.
5. Configure the CCP1 module for PWM operation.

PIC18F2480/2580/4480/4580

TABLE 15-5: REGISTERS ASSOCIATED WITH PWM AND TIMER2

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Reset Values on page
INTCON	GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF	49
RCON	IPEN	SBOREN	—	RI	TO	PD	POR	BOR	50
PIR1	PSP1F	AD1F	RC1F	TX1F	SSP1F	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	52
PIE1	PSP1E	AD1E	RC1E	TX1E	SSP1E	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	52
IPR1	PSP1P	AD1P	RC1P	TX1P	SSP1P	CCP1IP	TMR2IP	TMR1IP	52
TRISB	PORTB Data Direction Register								52
TRISC	PORTC Data Direction Register								52
TMR2	Timer2 Module Register								50
PR2	Timer2 Module Period Register								50
T2CON	—	T2OUTPS3	T2OUTPS2	T2OUTPS1	T2OUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	50
CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								51
CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								51
CCP1CON	—	—	DC1B1	DC1B0	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	51
ECCPR1L ⁽¹⁾	Enhanced Capture/Compare/PWM Register 1 (LSB)								51
ECCPR1H ⁽¹⁾	Enhanced Capture/Compare/PWM Register 1 (MSB)								51
ECCP1CON ⁽¹⁾	EPWM1M1	EPWM1M0	EDC1B1	EDC1B0	ECCP1M3	ECCP1M2	ECCP1M1	ECCP1M0	51

Legend: — = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used by PWM or Timer2.

Note 1: These registers are unimplemented on PIC18F2X80 devices.

PIC18F2480/2580/4480/4580

19.0 10-BIT ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER (A/D) MODULE

The Analog-to-Digital (A/D) converter module has 8 inputs for the PIC18F2X80 devices and 11 for the PIC18F4X80 devices. This module allows conversion of an analog input signal to a corresponding 10-bit digital number.

The module has five registers:

- A/D Result High Register (ADRESH)
- A/D Result Low Register (ADRESL)
- A/D Control Register 0 (ADCON0)
- A/D Control Register 1 (ADCON1)
- A/D Control Register 2 (ADCON2)

The ADCON0 register, shown in Register 19-1, controls the operation of the A/D module. The ADCON1 register, shown in Register 19-2, configures the functions of the port pins. The ADCON2 register, shown in Register 19-3, configures the A/D clock source, programmed acquisition time and justification.

REGISTER 19-1: ADCON0: A/D CONTROL REGISTER 0

	U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
	—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
bit 7								bit 0
bit 7-6	Unimplemented: Read as '0'							
bit 5-2	CHS3:CHS0: Analog Channel Select bits							
	0000 = Channel 0 (AN0)							
	0001 = Channel 1 (AN1)							
	0010 = Channel 2 (AN2)							
	0011 = Channel 3 (AN3)							
	0100 = Channel 4 (AN4)							
	0101 = Channel 5 (AN5) ^(1,2)							
	0110 = Channel 6 (AN6) ^(1,2)							
	0111 = Channel 7 (AN7) ^(1,2)							
	1000 = Channel 8 (AN8)							
	1001 = Channel 9 (AN9)							
	1010 = Channel 10 (AN10)							
	1011 = Unused							
	1100 = Unused							
	1101 = Unused							
	1110 = Unused							
	1111 = Unused							
	Note 1: These channels are not implemented on PIC18F2X80 devices.							
	2: Performing a conversion on unimplemented channels will return full-scale measurements.							
bit 1	GO/DONE: A/D Conversion Status bit							
	<u>When ADON = 1:</u>							
	1 = A/D conversion in progress							
	0 = A/D Idle							
bit 0	ADON: A/D On bit							
	1 = A/D converter module is enabled							
	0 = A/D converter module is disabled							

Legend:

R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

PIC18F2480/2580/4480/4580

REGISTER 19-2: ADCON1: A/D CONTROL REGISTER 1

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0 ⁽¹⁾	R/W-q ⁽¹⁾	R/W-q ⁽¹⁾	R/W-q ⁽¹⁾
—	—	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
bit 7						bit 0	

bit 7-6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5 **VCFG1:** Voltage Reference Configuration bit (VREF- source)

1 = VREF- (AN2)
0 = AVSS

bit 4 **VCFG0:** Voltage Reference Configuration bit (VREF+ source)

1 = VREF+ (AN3)
0 = AVDD

bit 3-0 **PCFG3:PCFG0:** A/D Port Configuration Control bits:

PCFG3: PCFG0	AN10	AN9	AN8	AN7 ⁽²⁾	AN6 ⁽²⁾	AN5 ⁽²⁾	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000 ⁽¹⁾	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111 ⁽¹⁾	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

A = Analog input D = Digital I/O

Note 1: The POR value of the PCFG bits depends on the value of the PBA DEN bit in Configuration Register 3H. When PBA DEN = 1, PCFG<3:0> = 0000; when PBA DEN = 0, PCFG<3:0> = 0111.

2: AN5 through AN7 are available only in PIC18F4X80 devices.

Legend:			
R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'	
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared	x = Bit is unknown

PIC18F2480/2580/4480/4580

REGISTER 19-3: ADCON2: A/D CONTROL REGISTER 2

R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	—	ACQT2	ACQT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0
bit 7							bit 0

bit 7 **ADFM:** A/D Result Format Select bit
 1 = Right justified
 0 = Left justified

bit 6 **Unimplemented:** Read as '0'

bit 5-3 **ACQT2:ACQT0:** A/D Acquisition Time Select bits
 111 = 20 TAD
 110 = 16 TAD
 101 = 12 TAD
 100 = 8 TAD
 011 = 6 TAD
 010 = 4 TAD
 001 = 2 TAD
 000 = 0 TAD⁽¹⁾

bit 2-0 **ADCS2:ADCS0:** A/D Conversion Clock Select bits
 111 = FRC (clock derived from A/D RC oscillator)⁽¹⁾
 110 = Fosc/64
 101 = Fosc/16
 100 = Fosc/4
 011 = FRC (clock derived from A/D RC oscillator)⁽¹⁾
 010 = Fosc/32
 001 = Fosc/8
 000 = Fosc/2

Note 1: If the A/D FRC clock source is selected, a delay of one Tcy (instruction cycle) is added before the A/D clock starts. This allows the SLEEP instruction to be executed before starting a conversion.

Legend:

R = Readable bit	W = Writable bit	U = Unimplemented bit, read as '0'
-n = Value at POR	'1' = Bit is set	'0' = Bit is cleared x = Bit is unknown

PIC18F2480/2580/4480/4580

The analog reference voltage is software selectable to either the device's positive and negative supply voltage (AVDD and AVSS), or the voltage level on the RA3/AN3/VREF+ and RA2/AN2/VREF-/CVREF pins.

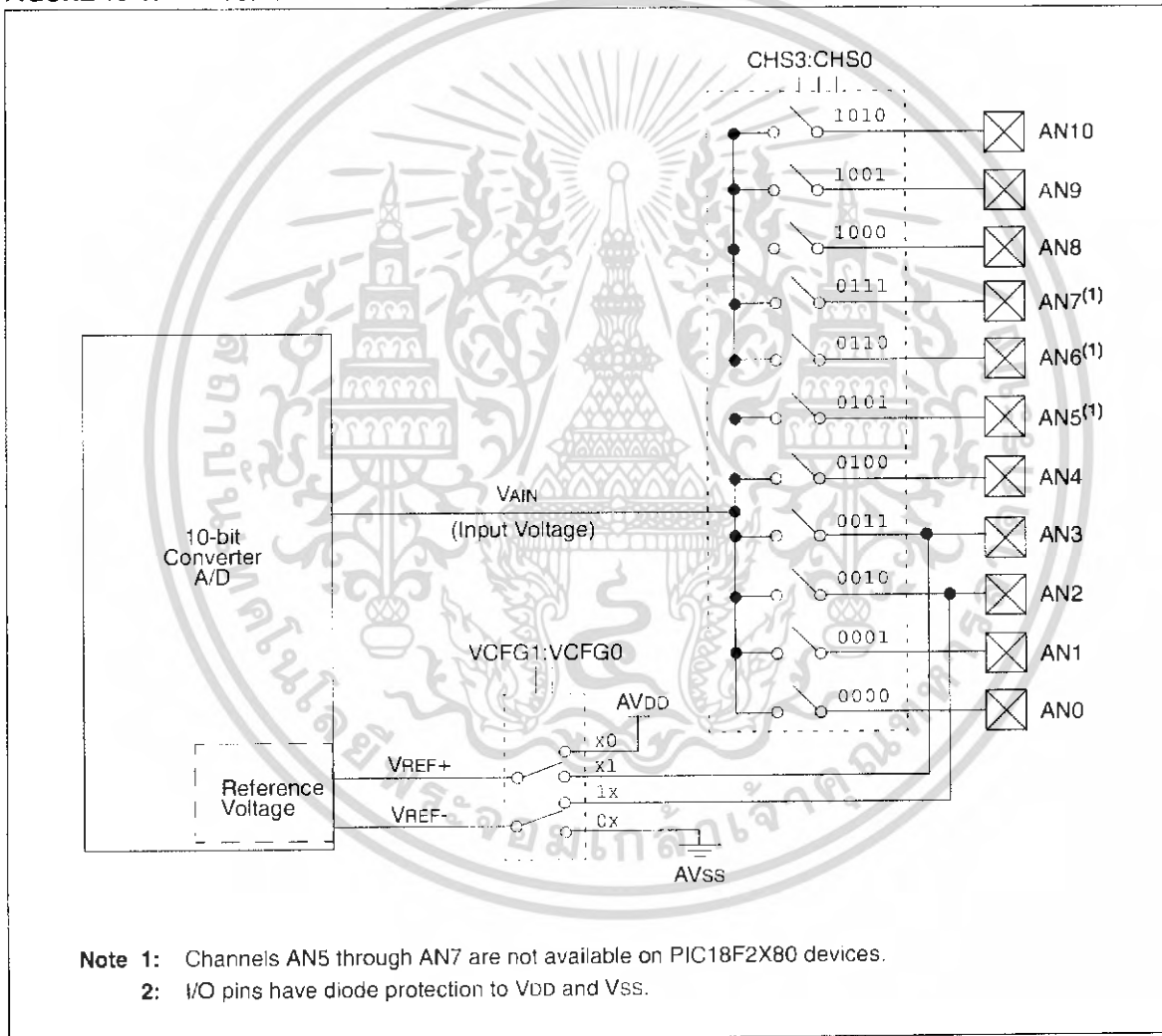
The A/D converter has a unique feature of being able to operate while the device is in Sleep mode. To operate in Sleep, the A/D conversion clock must be derived from the A/D's internal RC oscillator.

The output of the sample and hold is the input into the converter, which generates the result via successive approximation.

A device Reset forces all registers to their Reset state. This forces the A/D module to be turned off and any conversion in progress is aborted.

Each port pin associated with the A/D converter can be configured as an analog input, or as a digital I/O. The ADRESH and ADRESL registers contain the result of the A/D conversion. When the A/D conversion is complete, the result is loaded into the ADRESH/ADRESL registers, the GO/DONE bit (ADCON0 register) is cleared and A/D Interrupt Flag bit ADIF is set. The block diagram of the A/D module is shown in Figure 19-1.

FIGURE 19-1: A/D BLOCK DIAGRAM



PIC18F2480/2580/4480/4580

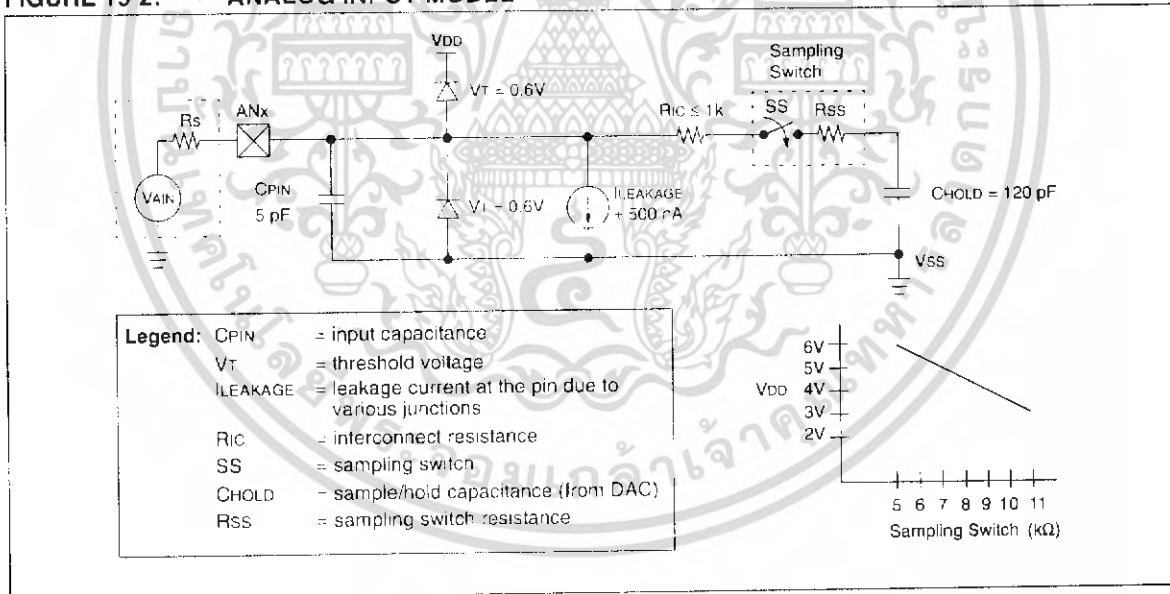
The value in the ADRESH/ADRESL registers is not modified for a Power-on Reset. The ADRESH/ADRESL registers will contain unknown data after a Power-on Reset.

After the A/D module has been configured as desired, the selected channel must be acquired before the conversion is started. The analog input channels must have their corresponding TRIS bits selected as an input. To determine acquisition time, see **Section 19.1 "A/D Acquisition Requirements"**. After this acquisition time has elapsed, the A/D conversion can be started. An acquisition time can be programmed to occur between setting the GO/DONE bit and the actual start of the conversion.

The following steps should be followed to perform an A/D conversion:

1. Configure the A/D module:
 - Configure analog pins, voltage reference and digital I/O (ADCON1)
 - Select A/D input channel (ADCON0)
 - Select A/D acquisition time (ADCON2)
 - Select A/D conversion clock (ADCON2)
 - Turn on A/D module (ADCON0)
2. Configure A/D interrupt (if desired):
 - Clear ADIF bit
 - Set ADIE bit
 - Set GIE bit
3. Wait the required acquisition time (if required).
4. Start conversion:
 - Set GO/DONE bit (ADCON0 register)
5. Wait for A/D conversion to complete, by either:
 - Polling for the GO/DONE bit to be cleared
 - OR
 - Waiting for the A/D interrupt
6. Read A/D Result registers (ADRESH:ADRESL); clear bit ADIF, if required.
7. For next conversion, go to step 1 or step 2, as required. The A/D conversion time per bit is defined as TAD. A minimum wait of 2 TAD is required before next acquisition starts.

FIGURE 19-2: ANALOG INPUT MODEL



PIC18F2480/2580/4480/4580

19.1 A/D Acquisition Requirements

For the A/D converter to meet its specified accuracy, the charge holding capacitor (CHOLD) must be allowed to fully charge to the input channel voltage level. The analog input model is shown in Figure 19-2. The source impedance (Rs) and the internal sampling switch (Rss) impedance directly affect the time required to charge the capacitor CHOLD. The sampling switch (Rss) impedance varies over the device voltage (VDD). The source impedance affects the offset voltage at the analog input (due to pin leakage current). The **maximum recommended impedance for analog sources is 2.5 kΩ**. After the analog input channel is selected (changed), the channel must be sampled for at least the minimum acquisition time before starting a conversion.

Note: When the conversion is started, the holding capacitor is disconnected from the input pin.

To calculate the minimum acquisition time, Equation 19-1 may be used. This equation assumes that 1/2 LSB error is used (1024 steps for the A/D). The 1/2 LSB error is the maximum error allowed for the A/D to meet its specified resolution.

Example 19-3 shows the calculation of the minimum required acquisition time TACQ. This calculation is based on the following application system assumptions:

CHOLD	=	120 pF
Rs	=	2.5 kΩ
Conversion Error	≤	1/2 LSB
VDD	=	5V → Rss = 7 kΩ
Temperature	=	50°C (system max.)
VHOLD	=	0V @ time = 0

EQUATION 19-1: ACQUISITION TIME

$$\begin{aligned} TACQ &= \text{Amplifier Settling Time} + \text{Holding Capacitor Charging Time} + \text{Temperature Coefficient} \\ &= TAMP + TC + TCOFF \end{aligned}$$

EQUATION 19-2: A/D MINIMUM CHARGING TIME

$$\begin{aligned} VHOLD &= (VREF - (VREF/2048)) \cdot (1 - e^{-(T/CHOLD)(R_{IC} + R_{SS} + R_S)}) \\ \text{or} \\ TC &= -(CHOLD)(R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln(1/2048) \end{aligned}$$

EQUATION 19-3: CALCULATING THE MINIMUM REQUIRED ACQUISITION TIME

$$\begin{aligned} TACQ &= TAMP + TC + TCOFF \\ TAMP &= 5 \mu\text{s} \\ TCOFF &= (\text{Temp} - 25^\circ\text{C})(0.05 \mu\text{s}/^\circ\text{C}) \\ &= (50^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})(0.05 \mu\text{s}/^\circ\text{C}) \\ &= 1.25 \mu\text{s} \\ \text{Temperature coefficient is only required for temperatures } > 25^\circ\text{C}. \text{ Below } 25^\circ\text{C}, TCOFF = 0 \text{ ms.} \\ TC &= -(CHOLD)(R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln(1/2048) \mu\text{s} \\ &= -(120 \text{ pF})(1 \text{ k}\Omega + 7 \text{ k}\Omega + 2.5 \text{ k}\Omega) \ln(0.0004883) \mu\text{s} \\ &= 9.61 \mu\text{s} \\ TACQ &= 5 \mu\text{s} + 1.25 \mu\text{s} + 9.61 \mu\text{s} \\ &= 12.86 \mu\text{s} \end{aligned}$$

PIC18F2480/2580/4480/4580

19.2 Selecting and Configuring Automatic Acquisition Time

The ADCON2 register allows the user to select an acquisition time that occurs each time the GO/DONE bit is set.

When the GO/DONE bit is set, sampling is stopped and a conversion begins. The user is responsible for ensuring the required acquisition time has passed between selecting the desired input channel and setting the GO/DONE bit. This occurs when the ACQT2:ACQT0 bits (ADCON2<5:3>) remain in their Reset state (1000) and is compatible with devices that do not offer programmable acquisition times.

If desired, the ACQT bits can be set to select a programmable acquisition time for the A/D module. When the GO/DONE bit is set, the A/D module continues to sample the input for the selected acquisition time, then automatically begins a conversion. Since the acquisition time is programmed, there may be no need to wait for an acquisition time between selecting a channel and setting the GO/DONE bit.

In either case, when the conversion is completed, the GO/DONE bit is cleared, the ADIF flag is set and the A/D begins sampling the currently selected channel again. If an acquisition time is programmed, there is nothing to indicate if the acquisition time has ended or if the conversion has begun.

19.3 Selecting the A/D Conversion Clock

The A/D conversion time per bit is defined as TAD. The A/D conversion requires 11 TAD per 10-bit conversion. The source of the A/D conversion clock is software selectable. There are seven possible options for TAD:

- 2 TOSC
- 4 TOSC
- 8 TOSC
- 16 TOSC
- 32 TOSC
- 64 TOSC
- Internal RC Oscillator

For correct A/D conversions, the A/D conversion clock (TAD) must be as short as possible, but greater than the minimum TAD (approximately 2 μ s, see parameter 130 for more information).

Table 19-1 shows the resultant TAD times derived from the device operating frequencies and the A/D clock source selected.

TABLE 19-1: TAD vs. DEVICE OPERATING FREQUENCIES

Operation	AD Clock Source (TAD)		
	ADCS2:ADCS0	PIC18F2X80/4X80	PIC18LF2X80/4X80 ⁽⁴⁾
2 TOSC	000	1.25 MHz	666 kHz
4 TOSC	100	2.50 MHz	1.33 MHz
8 TOSC	001	5.00 MHz	2.66 MHz
16 TOSC	101	10.0 MHz	5.33 MHz
32 TOSC	010	20.0 MHz	10.65 MHz
64 TOSC	110	40.0 MHz	21.33 MHz
RC ⁽³⁾	x11	1.00 MHz ⁽¹⁾	1.00 MHz ⁽²⁾

- Note 1:** The RC source has a typical TAD time of 4 ms.
Note 2: The RC source has a typical TAD time of 6 ms.
Note 3: For device frequencies above 1 MHz, the device must be in Sleep for the entire conversion or the A/D accuracy may be out of specification.
Note 4: Low-power (PIC18LFXXXX) devices only.

PIC18F2480/2580/4480/4580

19.4 Operation in Power Managed Modes

The selection of the automatic acquisition time and A/D conversion clock is determined in part, by the clock source and frequency while in a power managed mode.

If the A/D is expected to operate while the device is in a power managed mode, the ACQT2:ACQT0 and ADCS2:ADCS0 bits in ADCON2 should be updated in accordance with the clock source to be used in that mode. After entering the mode, an A/D acquisition or conversion may be started. Once started, the device should continue to be clocked by the same clock source until the conversion has been completed.

If desired, the device may be placed into the corresponding Idle mode during the conversion. If the device clock frequency is less than 1 MHz, the A/D RC clock source should be selected.

Operation in the Sleep mode requires the A/D FRC clock to be selected. If bits ACQT2:ACQT0 are set to '000' and a conversion is started, the conversion will be delayed one instruction cycle to allow execution of the SLEEP instruction and entry to Sleep mode. The IDLEN bit (OSCCON<7>) must have already been cleared prior to starting the conversion.

19.5 Configuring Analog Port Pins

The ADCON1, TRISA, TRISB and TRISE registers all configure the A/D port pins. The port pins needed as analog inputs must have their corresponding TRIS bits set (input). If the TRIS bit is cleared (output), the digital output level (VOH or VOL) will be converted.

The A/D operation is independent of the state of the CHS3:CHS0 bits and the TRIS bits.

Note 1: When reading the Port register, all pins configured as analog input channels will read as cleared (a low level). Pins configured as digital inputs will convert an analog input. Analog levels on a digitally configured input will be accurately converted.

2: Analog levels on any pin defined as a digital input may cause the digital input buffer to consume current out of the device's specification limits.

3: The PBADEN bit in Configuration Register 3H configures PORTB pins to reset as analog or digital pins by controlling how the PCFG0 bits in ADCON1 are reset.

PIC18F2480/2580/4480/4580

19.6 A/D Conversions

Figure 19-3 shows the operation of the A/D converter after the GO bit has been set and the ACQT2:ACQT0 bits are cleared. A conversion is started after the following instruction to allow entry into Sleep mode before the conversion begins.

Figure 19-4 shows the operation of the A/D converter after the GO bit has been set and the ACQT2:ACQT0 bits are set to '010' and selecting a 4 TAD acquisition time before the conversion starts.

Clearing the GO/DONE bit during a conversion will abort the current conversion. The A/D Result register pair will NOT be updated with the partially completed A/D conversion sample. This means the ADRESH:ADRESL registers will continue to contain the value of the last completed conversion (or the last value written to the ADRESH:ADRESL registers).

After the A/D conversion is completed or aborted, a 2 TAD wait is required before the next acquisition can be started. After this wait, acquisition on the selected channel is automatically started.

Note: The GO/DONE bit should **NOT** be set in the same instruction that turns on the A/D.

FIGURE 19-3: A/D CONVERSION TAD CYCLES (ACQT<2:0> = 000, TACQ = 0)

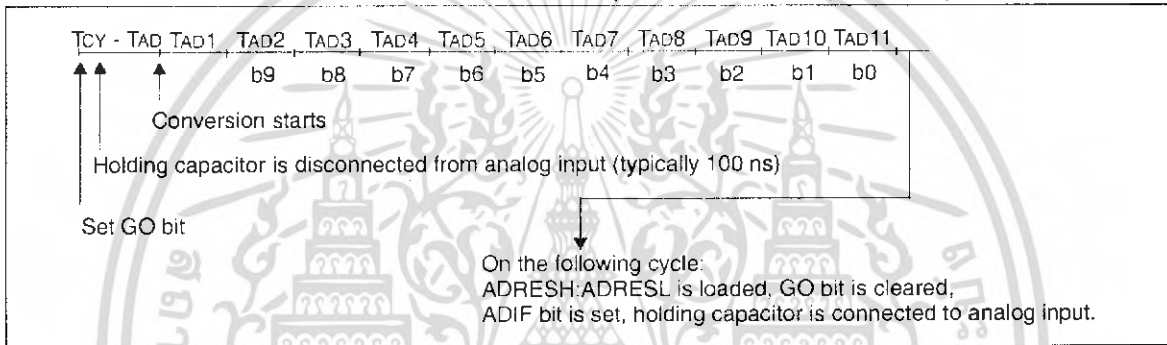
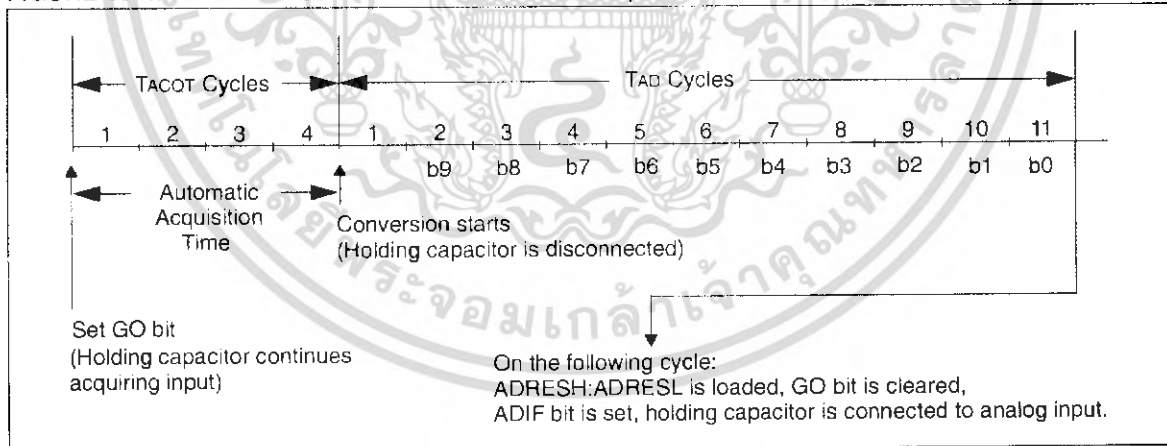


FIGURE 19-4: A/D CONVERSION TAD CYCLES (ACQT<2:0> = 010, TACQ = 4 TAD)



PIC18F2480/2580/4480/4580

19.7 Use of the CCP1 Trigger

An A/D conversion can be started by the "special event trigger" of the ECCP1 module. This requires that the ECCP1M3:ECCP1M0 bits (ECCP1CON<3:0>) be programmed as '1011' and that the A/D module is enabled (ADON bit is set). When the trigger occurs, the GO/DONE bit will be set, starting the A/D acquisition and conversion and the Timer1 (or Timer3) counter will be reset to zero. Timer1 (or Timer3) is reset to automatically repeat the A/D acquisition period with minimal

software overhead (moving ADRESH/ADRESL to the desired location). The appropriate analog input channel must be selected and the minimum acquisition period is either timed by the user, or an appropriate TACO time selected before the "special event trigger" sets the GO/DONE bit (starts a conversion).

If the A/D module is not enabled (ADON is cleared), the "special event trigger" will be ignored by the A/D module, but will still reset the Timer1 (or Timer3) counter.

TABLE 19-2: REGISTERS ASSOCIATED WITH A/D OPERATION

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Reset Values on page
INTCON	GIE/GIEH	PEIE/GIEL	TMR0IE	INT0IE	RBIE	TMR0IF	INT0IF	RBIF	49
IPR1	PSPIP	ADIP	RCIP	TXIP	SSPIP	CCP1IP	TMR2IP	TMR1IP	52
PIR1	PSPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	52
PIE1	PSPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	52
IPR2	OSCFIP	CMIP	—	EEIP	BCLIP	HLVDIP	TMR3IP	ECCP1IP ⁽⁵⁾	51
PIR2	OSCFIF	CMIF	—	EEIF	BCLIF	HLVDIF	TMR3IF	ECCP1IF ⁽⁵⁾	51
PIE2	OSCFIE	CMIE	—	EEIE	BCLIE	HLVDIE	TMR3IE	ECCP1IE ⁽⁵⁾	52
ADRESH	A/D Result Register High Byte								50
ADRESL	A/D Result Register Low Byte								50
ADCON0	—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON	50
ADCON1	—	—	VCFG1	VCFG0	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0	50
ADCON2	ADFM	—	ACOT2	ACOT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0	50
PORTA	RA7 ⁽²⁾	RA6 ⁽²⁾	RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0	52
TRISA	TRISA7 ⁽²⁾	TRISA6 ⁽²⁾	PORTA Data Direction Register						52
PORTB	Read PORTB pins, Write LATB Latch								52
TRISB	PORTB Data Direction Register								52
LATB	PORTB Output Data Latch								52
PORTE ⁽⁴⁾	—	—	—	—	RE3 ⁽³⁾	Read PORTE pins, Write LATE ⁽¹⁾			52
TRISE ⁽⁴⁾	IBF	OBF	IBOV	PSPMODE	—	PORTE Data Direction			52
LATE ⁽⁴⁾	—	—	—	—	—	LATE2	LATE1	LATE0	52

Legend: — = unimplemented, read as '0'. Shaded cells are not used for A/D conversion.

Note 1: These bits are unimplemented on PIC18F2X80 devices; always maintain these bits clear.

2: These pins may be configured as port pins depending on the Oscillator mode selected.

3: RE3 port bit is available only as an input pin when the MCLRE configuration bit is '0'.

4: These registers are not implemented on PIC18F2X80 devices.

5: These bits are available on PIC18F4X80 and reserved on PIC18F2X80 devices.

Advanced Power MOSFET

IRFP150A

FEATURES

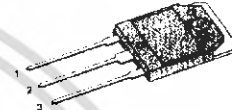
- Avalanche Rugged Technology
- Rugged Gate Oxide Technology
- Lower Input Capacitance
- Improved Gate Charge
- Extended Safe Operating Area
- 175 °C Operating Temperature
- Lower Leakage Current : 10 μ A (Max.) @ $V_{DS} = 100V$
- Lower $R_{DS(on)}$: 0.032 Ω (Typ.)

$$BV_{DSS} = 100 V$$

$$R_{DS(on)} = 0.04 \Omega$$

$$I_D = 43 A$$

TO-3P



1.Gate 2. Drain 3. Source

Absolute Maximum Ratings

Symbol	Characteristic	Value	Units
V_{DSS}	Drain-to-Source Voltage	100	V
I_D	Continuous Drain Current ($T_C=25^\circ C$)	43	A
	Continuous Drain Current ($T_C=100^\circ C$)	30.4	
I_{DM}	Drain Current-Pulsed ①	170	A
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 0	V
E_{AS}	Single Pulsed Avalanche Energy ②	740	mJ
I_{AR}	Avalanche Current ①	43	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ①	19.3	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ③	6.5	V/ns
P_D	Total Power Dissipation ($T_C=25^\circ C$)	193	W
	Linear Derating Factor	1.28	
T_J, T_{S-G}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
T_L	Maximum Lead Temp. for Soldering Purposes, 1/8" from case for 5-seconds	300	

Thermal Resistance

Symbol	Characteristic	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	--	0.78	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink	0.24	--	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	--	40	

Rev. B

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR
©1999 Fairchild Semiconductor Corporation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP150A

N-CHANNEL POWER MOSFET

Electrical Characteristics ($T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Condition
BV_{DSS}	Drain-Source Breakdown Voltage	100	--	--	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu\text{A}$
$\Delta BV/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coeff.	--	0.11	--	V/ $^\circ\text{C}$	$I_D=250\mu\text{A}$ See Fig 7
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	--	4.0	V	$V_{DS}=5V, I_D=250\mu\text{A}$
I_{GSS}	Gate-Source Leakage, Forward	--	--	100	nA	$V_{GS}=20V$
	Gate-Source Leakage, Reverse	--	--	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	--	--	10	μA	$V_{DS}=100V$
		--	--	100		$V_{DS}=80V, T_C=150^\circ\text{C}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-Source On-State Resistance	--	--	0.04	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=21.5A$ ④
g_{fs}	Forward Transconductance	--	28.34	--	Ω	$V_{DS}=40V, I_D=21.5A$ ④
C_{iss}	Input Capacitance	--	1750	2270	pF	$V_{GS}=0V, V_{DS}=25V, f=1\text{MHz}$ See Fig 5
C_{oss}	Output Capacitance	--	420	485		
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	--	185	215		
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	--	17	50	ns	$V_{DD}=50V, I_D=40A,$ $R_G=6.2\Omega$ See Fig 13 ④⑤
t_r	Rise Time	--	20	50		
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	--	80	160		
t_f	Fall Time	--	45	100		
Q_g	Total Gate Charge	--	75	97	nC	$V_{DS}=80V, V_{GS}=10V,$ $I_D=40A$ See Fig 6 & Fig 12 ④⑤
Q_{gs}	Gate-Source Charge	--	13.2	--		
Q_{gd}	Gate-Drain("Miller") Charge	--	34.8	--		

Source-Drain Diode Ratings and Characteristics

Symbol	Characteristic	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Condition
I_S	Continuous Source Current	--	--	43	A	Integral reverse pn-diode in the MOSFET
I_{SM}	Pulsed-Source Current	①	--	170		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	④	--	1.6	V	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=43A, V_{GS}=0V$
t_{rr}	Reverse Recovery Time	--	135	--	ns	$T_J=25^\circ\text{C}, I_S=40A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	--	0.65	--	μC	$di_f/dt=100A/\mu\text{s}$ ④

Notes ;

- ① Repetitive Rating : Pulse Width Limited by Maximum Junction Temperature
- ② $L=0.6\text{mH}, I_{AS}=43A, V_{DU}=25V, R_C=27\Omega$, Starting $T_J=25^\circ\text{C}$
- ③ $I_{SD} \leq 40A, di/dt \leq 0.0A/\mu\text{s}, V_{DB} \leq BV_{DSS}$, Starting $T_J=25^\circ\text{C}$
- ④ Pulse Test : Pulse Width = 250 μs , Duty Cycle $\leq 2\%$
- ⑤ Essentially Independent of Operating Temperature

FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig 1. Output Characteristics

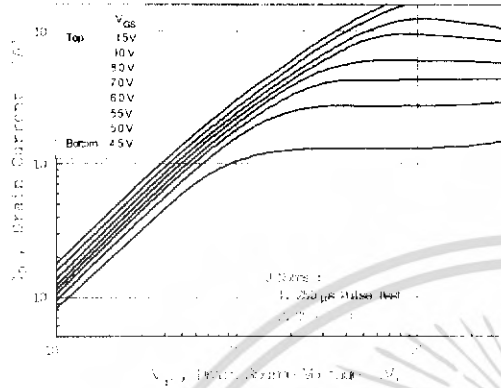


Fig 2. Transfer Characteristics

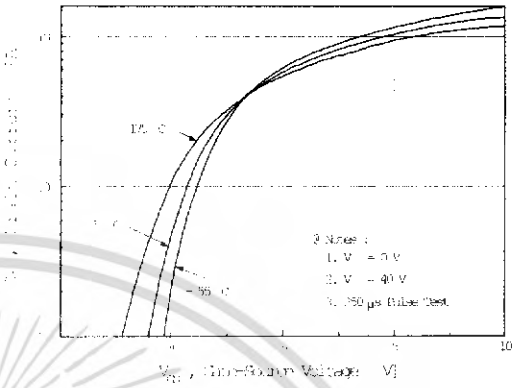


Fig 3. On-Resistance vs. Drain Current

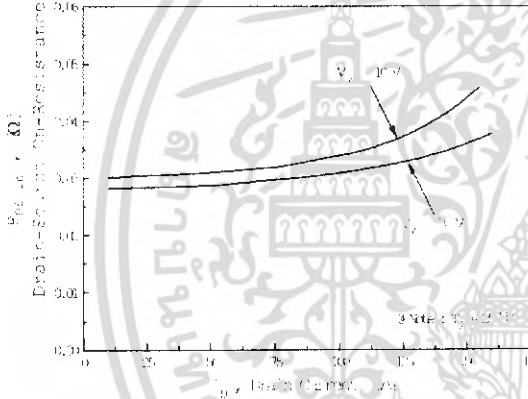


Fig 4. Source-Drain Diode Forward Voltage

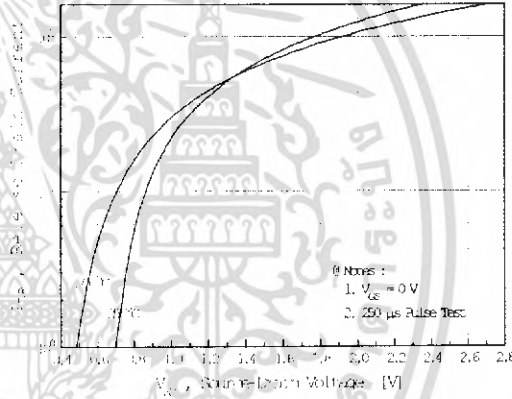


Fig 5. Capacitance vs. Drain-Source Voltage

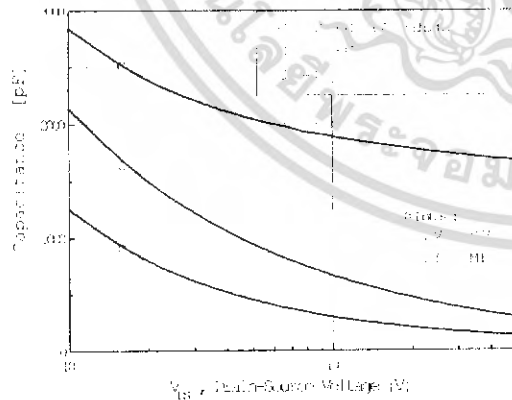
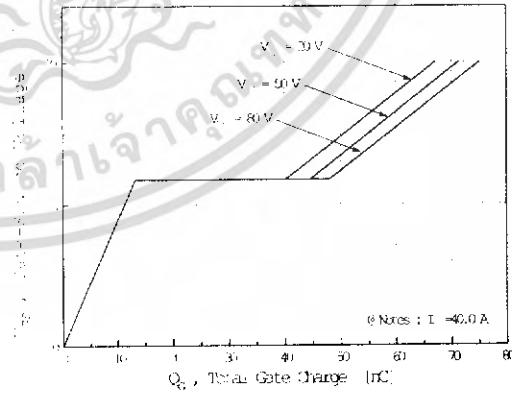


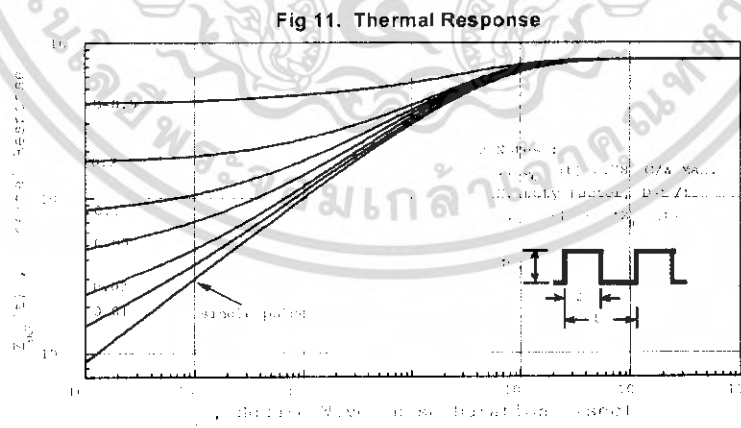
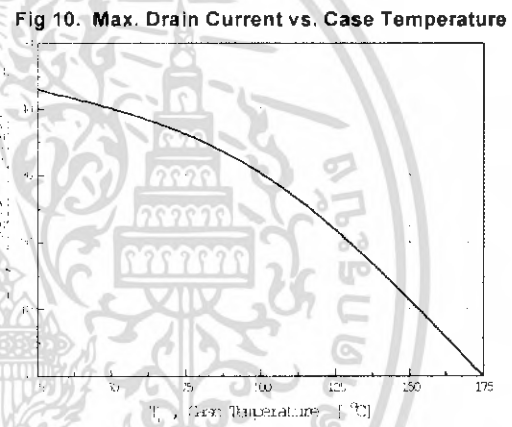
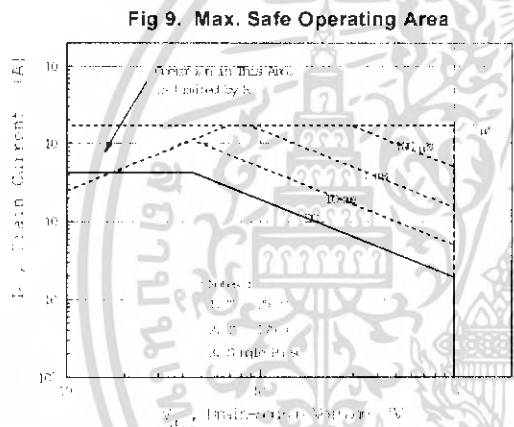
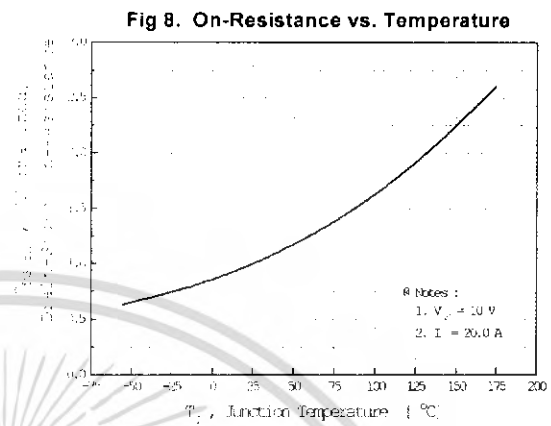
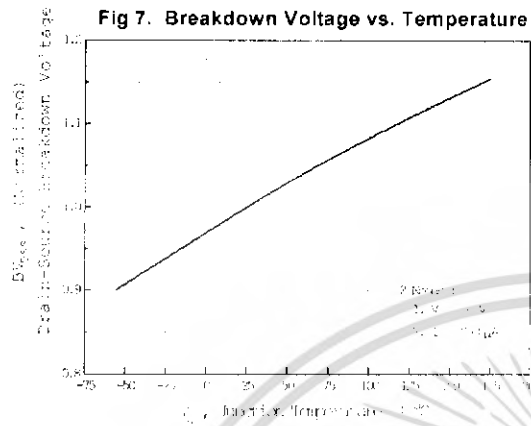
Fig 6. Gate Charge vs. Gate-Source Voltage



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IRFP150A

N-CHANNEL POWER MOSFET



FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig 12. Gate Charge Test Circuit & Waveform

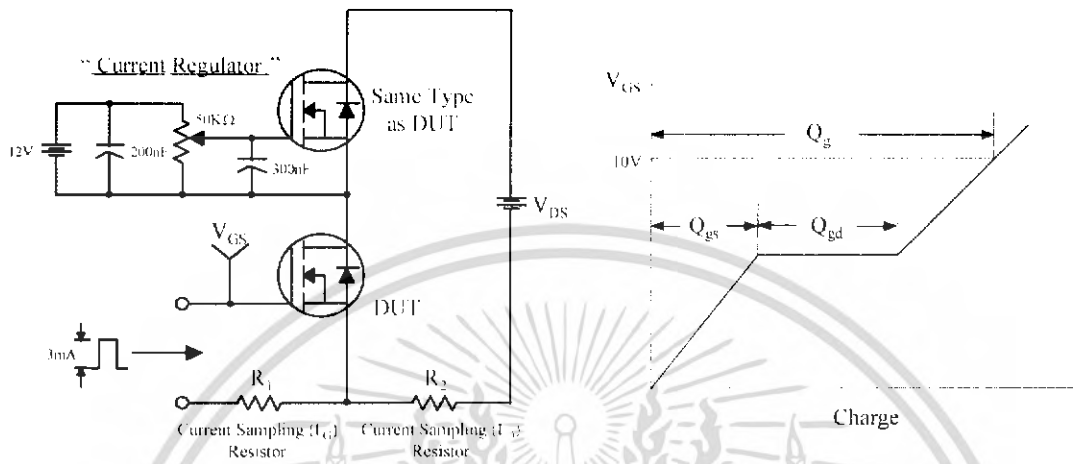


Fig 13. Resistive Switching Test Circuit & Waveforms

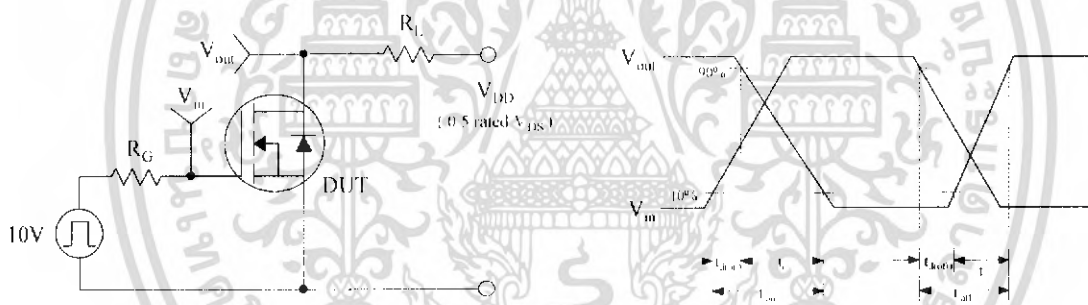
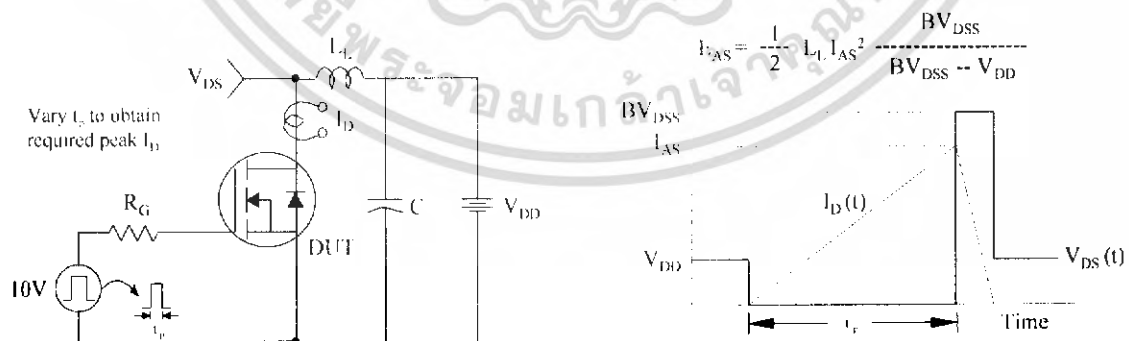


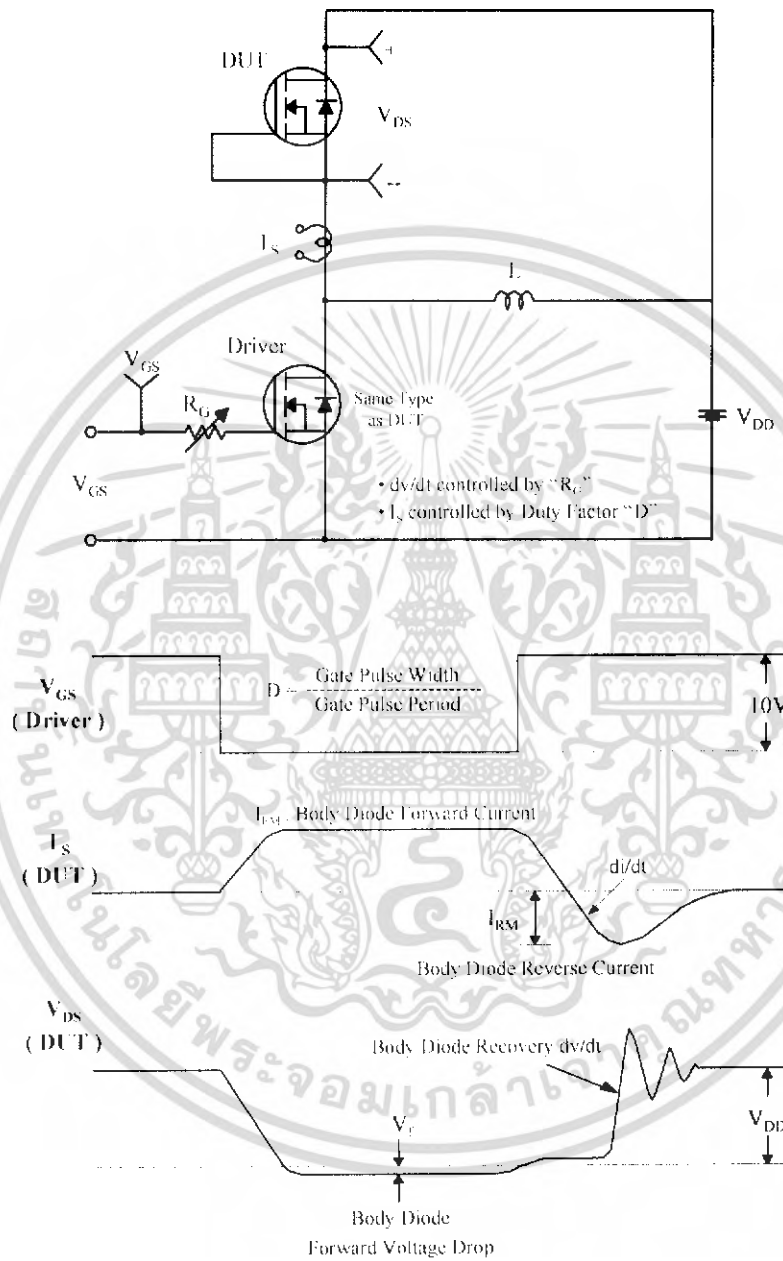
Fig 14. Unclamped Inductive Switching Test Circuit & Waveforms



FAIRCHILD
SEMICONDUCTOR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fig 15. Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit & Waveforms

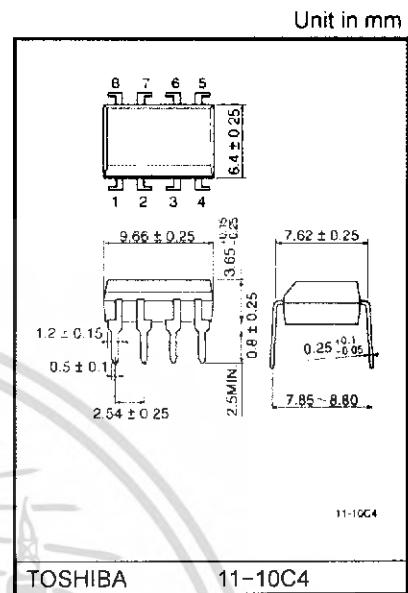


TLP251

- Inverter For Air Conditionor
- Induction Heating
- Transistor Inverter
- Power MOS FET Gate Drive
- IGBT Gate Drive

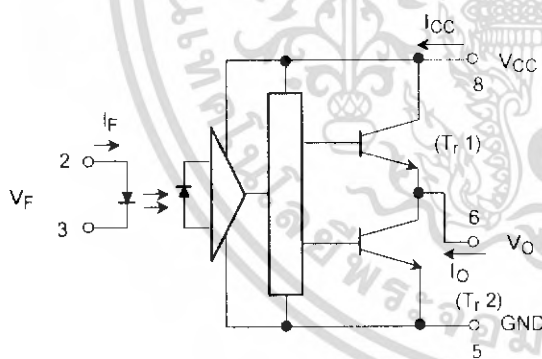
The TOSHIBA TLP251 consists of a GaAs light emitting diode and a integrated photodetector.
 This unit is 8-lead DIP package.
 TLP251 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.
 Especially TLP251 is capable of "direct" gate drive of lower power IGBTs.
 (~15A)

- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): $10\text{--}35\text{V}$
- Output current (I_O): $\pm 0.4\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH} / t_{pHL}): $1\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500\text{Vrms}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file no.E67349

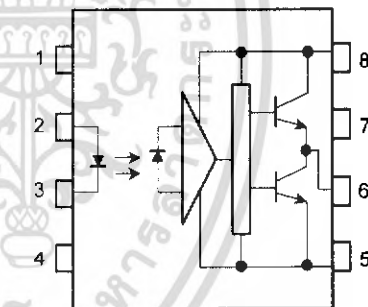


TOSHIBA 11-10C4
 Weight: 0.54g

Schematic



Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : Gnd
- 6 : V_O (Output)
- 7 : N.C.
- 8 : V_{CC}

A $0.1\mu\text{F}$ bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5(see Note 5).

Truth Table

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	- 0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_j	125	°C	
Detector	"H" peak output current ($P_W \leq 2.0\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPH}	- 0.4	A	
	"L" peak output current ($P_W \leq 2.0\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPL}	0.4	A	
	Output voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_O	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Supply voltage	(Ta ≤ 70°C)	V_{CC}	35	V
		(Ta = 85°C)		24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_O / \Delta T_a$	- 0.73	V / °C	
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	- 0.73	V / °C	
	Junction temperature	T_j	125	°C	
	Operating frequency (Note 3)	f	25	kHz	
Operating temperature range	T_{opr}	-20~85	°C		
Storage temperature range	T_{stg}	-55~125	°C		
Lead soldering temperature(10s)	T_{sol}	260	°C		
Isolation voltage (AC, 1min., R.H. ≤ 60%) (Note 4)	BV_S	2500	Vrms		

(Note 1) Pulse width $P_W \leq 1\mu s, 300pps$

(Note 2) Exponential waveform

(Note 3) Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -0.25A(\leq 2.0\mu s), I_{OPL} \leq +0.25A(\leq 2.0\mu s)$

(Note 4) Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

(Note 5) A ceramic capacitor(0.1μF) should be connected from pin 8 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Input current, on	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA	
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V	
Supply voltage	V_{CC}	10	—	30	20	V
Peak output current	I_{OPH} / I_{OPL}	—	—	± 0.1	A	
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	70	85	°C

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit	
Input forward voltage	V_F	—	$I_F = 10\text{ mA}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.6	1.8	V	
Temperature coefficient of forward voltage	$\Delta V_F / \Delta T_a$	—	$I_F = 10\text{ mA}$	—	-2.0	—	mV / °C	
Input reverse current	I_R	—	$V_R = 5\text{ V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	—	10	μA	
Input capacitance	C_T	—	$V = 0$, $f = 1\text{ MHz}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	45	250	pF	
Output current	"H" level	I_{OPH}	3	$V_{CC} = 30\text{ V}$ (*1) $I_F = 0$ $V_{B-6} = 4\text{ V}$ $V_{B-5} = 2.5\text{ V}$	-0.1	-0.25	—	A
	"L" level	I_{OPL}	2		0.1	0.2	—	
Output voltage	"H" level	V_{OH}	4	$V_{CC1} = +15\text{ V}$, $V_{EE1} = -15\text{ V}$ $R_L = 200\Omega$, $I_F = 5\text{ mA}$	11	13.2	—	V
	"L" level	V_{OL}	5	$V_{CC1} = +15\text{ V}$, $V_{EE1} = -15\text{ V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_F = 0.8\text{ V}$	—	-14.5	-12.5	
Supply current	"H" level	I_{CCH}	—	$V_{CC} = 30\text{ V}$, $I_F = 10\text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	7.5	—	mA
				$V_{CC} = 30\text{ V}$, $I_F = 10\text{ mA}$	—	—	11	
	"L" level	I_{CCL}	—	$V_{CC} = 30\text{ V}$, $I_F = 0\text{ mA}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	8	—	
				$V_{CC} = 30\text{ V}$, $I_F = 0\text{ mA}$	—	—	11	
Threshold input current	"Output L → H"	I_{FLH}	—	$V_{CC1} = +15\text{ V}$, $V_{EE1} = -15\text{ V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_O > 0\text{ V}$	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H → L"	V_{FLH}	—	$V_{CC1} = +15\text{ V}$, $V_{EE1} = -15\text{ V}$ $R_L = 200\Omega$, $V_O < 0\text{ V}$	0.8	—	—	V
Supply voltage	V_{CC}	—	—	10	—	35	V	
Capacitance (input-output)	C_s	—	$V_s = 0$, $f = 1\text{ MHz}$ $T_a = 25^\circ\text{C}$	—	1.0	2.0	pF	
Resistance (input-output)	R_s	—	$V_s = 500\text{ V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$ $R.H. \leq 60\%$	1×10^{12}	10^{14}	—	Ω	

* All typical values are at Ta=25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs

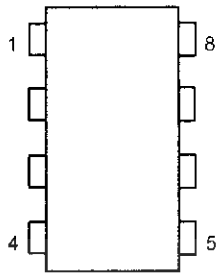
Switching Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t _{pLH}	6	I _F = 8mA V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = 15V R _L = 200 Ω	—	0.25	1.0	μs
	H→L	t _{pHL}			—	0.25	1.0	
Output rise time		t _r			—	—	—	
Output fall time		t _f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output		C _{MH}	7	V _{CM} = 600V, I _F = 8mA, V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	-5000	—	—	V / μs
Common mode transient immunity at low level output		C _{ML}	7	V _{CM} = 600V, I _F = 0mA, V _{CC} = 30V, Ta = 25°C	5000	—	—	V / μs

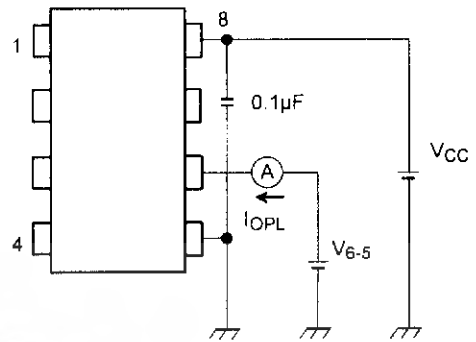
*All typical values are at Ta=25°C



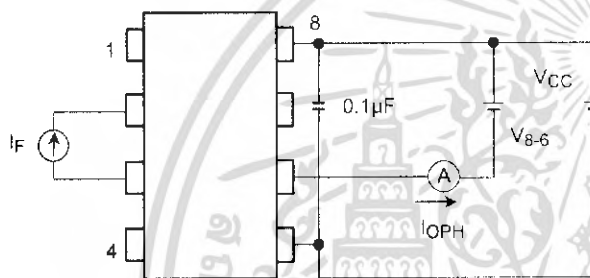
Test Circuit 1:



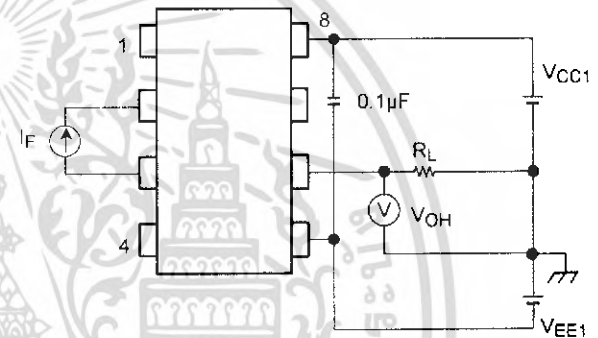
Test Circuit 2: I_{OPL}



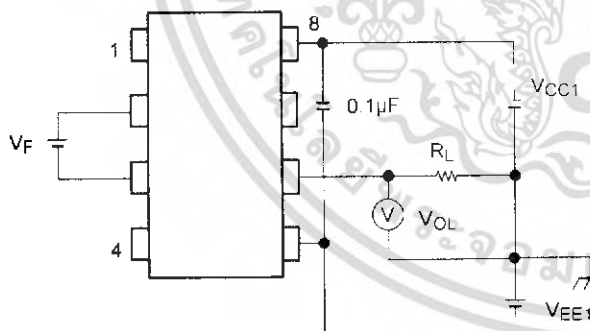
Test Circuit 3: I_{OPH}



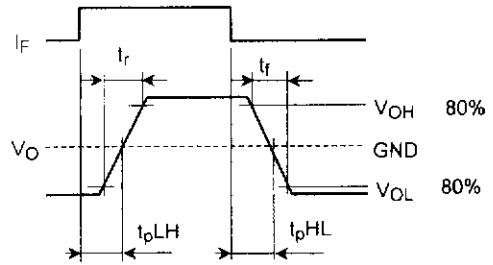
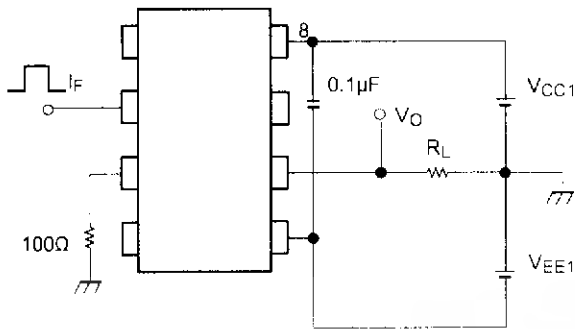
Test Circuit 4: V_{OH}



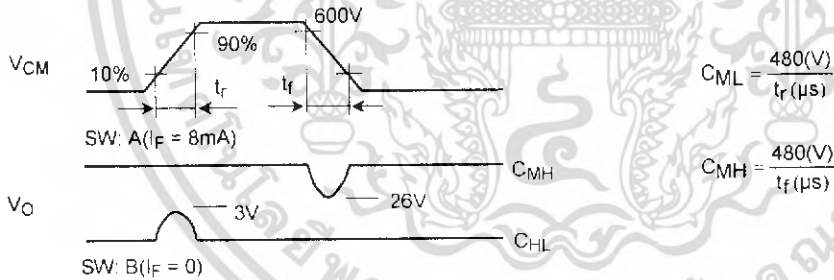
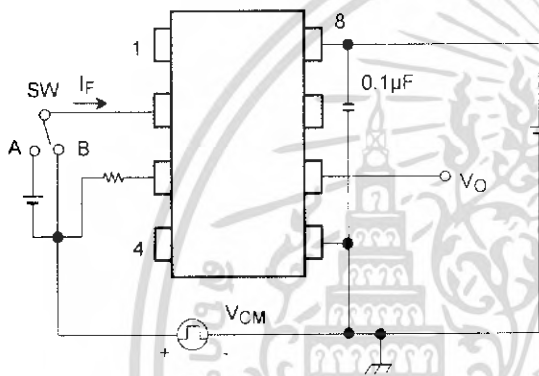
Test Circuit 5: V_{OL}



Test Circuit 6: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



Test Circuit 7: C_{MH} , C_{ML}



C_{ML} (C_{MH}) is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.

