

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ

REMOTELY OPERATED VEHICLE (ROV) CONTROL



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....62744
วัน,เดือน,ปี.....21 ส.ค. 2549

b. 41629460
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

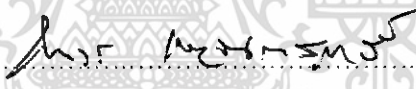
ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ
REMOTELY OPERATED VEHICLE (ROV) CONTROL

ผู้จัดทำ นาย ดนัย นุ่มนึ่ง รหัสนักศึกษา 46015302
ว่าที่ร้อยตรี ปริญญา ปัญญา ไร่ รหัสนักศึกษา 46015311


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ. ถาวร เบญจนราษฎร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ

Remotely Operated Vehicle (ROV) Control

โดย

นาย ดนัย นุ่มนึ่ง

ว่าที่ร้อยตรี ปรินญา ปัญญาไว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศศ. ฉวกร เบญจนราษฎร์

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอทฤษฎีและการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับยานสำรวจใต้น้ำ ในเบื้องต้นทำการออกแบบและประกอบโครงสร้างยานสำรวจใต้น้ำขึ้น ตลอดจนออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ และวงจรสำหรับอุปกรณ์วัดความดันและอุณหภูมิวัดค่ามุม ซึ่งใช้ในการวัดระดับความลึกและทิศทางของยานสำรวจตามลำดับ พร้อมติดตั้งกล้อง CCD ด้านหน้าของยานสำรวจเพื่อเก็บภาพใต้น้ำ จากนั้นศึกษาการประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์และเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมยานสำรวจและการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยในการควบคุมอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดีทำหน้าที่ควบคุมระดับความลึกและทิศทางของยานสำรวจอย่างอัตโนมัติ

ยานสำรวจใต้น้ำที่ได้เพิ่มเติมระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัตินี้ ได้นำไปทำการทดลองดำน้ำจริง เพื่อทดสอบเสถียรภาพและประสิทธิภาพ พบว่ายานสำรวจใต้น้ำที่ได้สร้างขึ้นสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมระดับความลึกและทิศทางได้ตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Remotely Operated Vehicle (ROV) Control

Danai Numnim

Parinya Panyavai

Advisor

Asst.Prof. Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2005

ABSTRACT

This thesis presents the study and implementation procedures of a remotely operated vehicle (ROV) using a CCD camera as a view finder. The objective is to utilize the knowledge of control system design for controlling the ROV. First, the structure and motor driver of the ROV are designed and realized. Also, the compass module and pressure transducer are used to measure the direction and depth of the ROV, respectively. Secondly, the PID controller is implemented via a microcontroller to control the movement of the ROV. Finally, the experiments are conducted to evaluate the stability and efficiency of the ROV. The results are satisfactory as the ROV can move well as expected.

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ถาวร เบนญจนราษฎร์ ที่ได้กรุณาและคอยให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้น ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จงกล งามวิวิทย์ และอาจารย์ตอน อิศรากร ที่ให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้ออุปการะต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.โยธิน เปรมปรามิรัชต์ รศ.ดร. เกียรติศักดิ์ ฅมวัชระ และอาจารย์รัชชัย คำศรี ที่ให้คำปรึกษาในส่วนของกรออกแบบโปรแกรมและวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปการะที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่ตลอดเวลา

สุดท้ายขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจที่ดีเสมอตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลงได้

ผู้จัดทำ

นายคณัย นุ่มนัม

ว่าที่ร้อยตรีปริญญา ปัญญาไว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ตัวควบคุม	3
2.1.1 ระบบควบคุมแบบพี	3
2.1.2 ระบบควบคุมแบบไอ	6
2.1.3 ระบบควบคุมแบบดี	8
2.1.4 ระบบควบคุมแบบพีไอ	9
2.1.5 ระบบควบคุมแบบพีดี	11
2.1.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี	12
2.2 ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยสุด	13
2.3 หลักการทำงานของยานสำรวจได้นำ	14
2.4 อุปกรณ์วัดค่าต่างๆ	15
2.4.1 อุปกรณ์วัดความดัน	15
2.4.1.1 การควบคุมระดับความลึก	16
2.4.1.2 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์วัดความดัน	17
2.4.2 อุปกรณ์วัดค่ามุม	18
2.4.2.1 การทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์	19
2.4.2.2 การทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ	20
2.4.2.3 รูปแบบของข้อมูล	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านพอร์ตอนุกรม	24
2.5.1 การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส	24
2.5.2 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	24
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์	26
บทที่ 3 การสร้างและการออกแบบ	28
3.1 การออกแบบ	28
3.1.1 ตัวขนสำรวจ	28
3.1.2 มอเตอร์	29
3.1.3 กล้องวีดีโอ	29
3.2 วงจรต่างๆ	30
3.2.1 วงจรขับมอเตอร์	30
3.2.2 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์	32
3.2.3 วงจรรวมชุดเซนเซอร์	32
3.2.4 วงจรขยายสัญญาณ PWM	33
3.2.5 วงจรแหล่งจ่ายไฟ	34
3.3 การออกแบบระบบควบคุม	35
3.4 แผนภาพกระบวนการรับค่าจากเซนเซอร์	36
3.5 กระบวนการคำนวณและส่งสัญญาณขับมอเตอร์	37
3.6 การรับค่าและคำนวณค่าฟิลต์ที่จะต้องจ่ายออกไปด้วยโปรแกรม Visual Basic	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน	40
4.2 การทดสอบการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิด	42
4.2.1 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพี	42
4.2.2 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	43
4.2.3 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี	45
4.3 การทดสอบการควบคุมทิศทางแบบวงปิด	47
4.3.1 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพี	47
4.3.2 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	48
4.3.3 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี	50

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	53
5.1 ผลสัมฤทธิ์ของโครงการ	53
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข	53
5.3 แนวทางในการค้นคว้าและพัฒนา	54
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ในโครงการ	56
ก.1 โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม	56
ก.2 โปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์	60
ก.2.1 โปรแกรมสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ของ PIC1 และ PIC2	60
ก.2.2 โปรแกรมรับค่าและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์วัดค่าทั้ง 2 ตัวไปยัง คอมพิวเตอร์ของ PIC3	62
ภาคผนวก ข. คู่มือประกอบการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในโครงการ	66
ข.1 อุปกรณ์วัดค่ามม	66
ข.2 อุปกรณ์วัดความดัน	68
ข.3 อุปกรณ์ต่างๆที่ประกอบในวงจร	69
ข.3.1 ไอซี PIC16F877A	69
ข.3.2 ไอซี CNY17-1	70
ข.3.3 ไอซี SN74LS125A	71
ข.3.4 ทรานซิสเตอร์ TIP122	72
ภาคผนวก ค. แผนผังอุปกรณ์และการเชื่อมต่อแผงวงจร	73
ค.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า	73
ค.2 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์	73
ค.3 วงจรรวมชุดเซนเซอร์	74
ค.4 วงจรขยายสัญญาณ PWM	75
เอกสารอ้างอิง	76

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต	4
2.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี	5
2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี	6
2.4 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ ไอ	7
2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบ ไอ	7
2.6 ผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี	8
2.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบดี	9
2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ	9
2.9 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอ	10
2.10 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีดี	11
2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	12
2.12 อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในโครงการ	15
2.13 วิธีการที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์วัดความดัน	17
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและแรงดันที่จ่ายให้อุปกรณ์วัดความดัน	18
2.15 อุปกรณ์วัดค่ามุมที่ใช้ในโครงการ	18
2.16 ไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์	19
2.17 ไดอะแกรมเวลาแสดงการทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ	21
2.18 การอ่านข้อมูลแบบบีซีดีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา	23
2.19 การอ่านข้อมูลแบบไบนารีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา	23
2.20 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส	24
2.21 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส	24
2.22 ไอซี MAX232	25
3.1 ด้านข้างของยานสำรวจ	28
3.2 มอเตอร์	29
3.3 กล้องวิดีโอ	29
3.4 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อเปิดสวิตช์ S1 และ S3	31
3.6 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อเปิดสวิตช์ S2 และ S4	31
3.7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์	31
3.8 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอรื	32
3.9 วงจรรวมชุดเซนเซอร์	33
3.10 วงจรขยายสัญญาณ PWM	33
3.11 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า	34
3.12 แผนผังแสดงการออกแบบระบบควบคุมยานสำรวจได้นำ	35
3.13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการรับค่าจากเซนเซอร์	36
3.14 แผนภาพแสดงวิธีการส่งสัญญาณและการจ่ายพัลส์ให้มอเตอร์	37
3.15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่าสัญญาณพัลส์ที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์	39
4.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าแรงดัน ไฟฟ้ากับความลึก	41
4.2 การทดสอบการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิด	42
4.3 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพี	42
4.4 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพี	43
4.5 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p	43
4.6 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p	44
4.7 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i	44
4.8 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i	45
4.9 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยแปรค่า K_d	45
4.10 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดี โดยแปรค่า K_d	46
4.11 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพี	47
4.12 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพี	48
4.13 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p	48
4.14 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p	49
4.15 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i	49
4.16 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i	50
4.17 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยแปรค่า K_d	50
4.18 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดี โดยแปรค่า K_d	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.19 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_p และ K_d	51
4.20 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_p และ K_d	52
ก.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม	56
ก.2 หน้าต่างรองของโปรแกรมแสดงกราฟทิศทางของยานสำรวจ	57
ก.3 หน้าต่างรองของโปรแกรมแสดงกราฟความลึกของยานสำรวจ	57
ข.1 ตำแหน่งขาต่างๆของอุปกรณ์วัดค่ามุม	66
ข.2 Vector 2X FUNCTION DESCRIPTION	67
ข.3 อุปกรณ์วัดความดัน	68
ข.4 ไอซี PIC16F877A	69
ข.5 ไอซี CNY17-1	70
ข.6 ไอซี SN74LS125A	71
ข.7 ทรานซิสเตอร์ TIP42C	72
ค.1 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า	73
ค.2 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์	74
ค.3 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรรวมชุดเซนเซอร์	74
ค.4 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรขยายสัญญาณ PWM	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความถี่	44



บทที่ 1

บทนำ

สืบเนื่องมาจากข้อเท็จจริงที่ว่ามนุษย์มีความอยากรู้อยากเห็นเป็นธรรมชาติ ได้ส่งผลให้มีการสำรวจและแสวงหานาวิกศาสตร์ ซึ่งแหล่งน้ำนี้ถือได้ว่าเป็นหนึ่งในหลายๆ แรงแบบคาลใจให้มนุษย์สืบค้น

ยานใต้น้ำ หรือ Underwater Vehicles (UVs) ได้ถือกำเนิดขึ้นมาประมาณต้นยุคปี ค.ศ.1950 และได้รับการพัฒนาสืบทอดตลอดมา ครอบคลุมกระทั่งปัจจุบัน ความจำเป็นหรือประโยชน์ที่ได้รับจากการประยุกต์ใช้ยานใต้น้ำนั้น เริ่มต้นจากการที่มนุษย์เราต้องเผชิญกับความเสี่ยงอันเนื่องมาจากการดำน้ำลงไปปฏิบัติการกิจต่างๆ ได้ท้องทะเล เช่น การสำรวจค้นหาแหล่งพลังงานธรรมชาติ การสำรวจและซ่อมบำรุงแนวท่อก๊าซธรรมชาติและสายเคเบิลใยแก้วนำแสง การสำรวจทางโบราณคดี การสำรวจทางธรณีวิทยา เป็นต้น ซึ่งกรณีศึกษาเหล่านี้จะต้องปฏิบัติการภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีความเสี่ยงสูง จึงจำเป็นที่จะต้องใช้หุ่นยนต์หรือยานพาหนะอันปฏิบัติการแทนมนุษย์

การแบ่งกลุ่มของยานใต้น้ำโดยทั่วไปนั้น สามารถจำแนกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ คือ

- 1) Remotely Operated หรือ Remotely Piloted ซึ่งหมายถึง ยานใต้น้ำที่มีสาย (Umbilical Link หรือ Tether) เชื่อมต่อด้วยยานใต้น้ำ กับ เรือบนผิวน้ำ หรือ สถานีควบคุมและสั่งการบนบก อีกนัยหนึ่งคือ เป็นการควบคุมระยะไกล (Remotely Controlled) ผ่านสายสัญญาณนั่นเอง
- 2) Unmanned หรือ Untethered หรือ Autonomous หมายถึง ยานใต้น้ำอัจฉริยะที่มีระบบสมองกลควบคุม สั่งการ นำร่อง และอื่นๆ ตลอดเวลาการปฏิบัติการกิจได้ท้องทะเล โดยมนุษย์ มีหน้าที่โปรแกรมภารกิจเข้าไปในสมองกลของยานใต้น้ำ หลังจากนั้นก็สามารถปล่อย (Launch) ยานใต้น้ำลงน้ำจากเรือบนผิวน้ำ จากฝั่ง หรือ จากท่าเรือ ได้เลย
- 3) Semi-Autonomous หรือ Towards Autonomous หรือ กึ่งอัจฉริยะ ซึ่งเป็นการผสมผสานเทคนิควิธีระหว่าง 1) และ 2) เข้าด้วยกัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นพื้นฐานสำคัญประการหนึ่ง ก่อนการสร้างยานใต้น้ำ ประเภท Autonomous ให้สำเร็จลุล่วงได้
- 4) Manned Submersible หรือ เรียกขานโดยย่อว่า ManSub คือ ยานใต้น้ำที่มีมนุษย์ประจำการในตัวยานๆ นั้นๆ เพื่อ ควบคุม สั่งการ นำร่อง และอื่นๆ ตลอดเวลา อีกนัยหนึ่ง คือ เรือดำน้ำ หรือ ยานสำรวจใต้น้ำ สำหรับการท่องเที่ยวได้ท้องทะเล ที่เรียกว่า Underwater Safari Submersible หนึ่ง อาจมีการผสมผสาน ระบบควบคุม สั่งการและนำร่อง อัตโนมัติ ที่เรียกว่า Auto-Pilot เข้ามาในตัวยานสำรวจใต้น้ำด้วยก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันนี้ความต้องการการใช้ระบบการสำรวจใต้น้ำในประเทศไทยมีสูงมาก และประเทศไทยเองยังไม่สามารถผลิต ROV ที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อใช้งานเองได้ อีกทั้งการส่งยานออกไปสำรวจใต้น้ำในแต่ละครั้งนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และจะต้องทำโดยผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเข้าเทคโนโลยีด้านนี้จากต่างประเทศ ดังนั้น จึงเป็นการดีถ้าจะมียานสำรวจใต้น้ำที่ราคาไม่สูงและควบคุมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงมีการค้นคว้าและคิดทำโครงการนี้ขึ้นมา โดยใช้ชื่อว่า “ Remotely Operated Vehicle (ROV) Control ” หรือ “ การควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ ” ซึ่งได้มีการพัฒนาไปแล้ว 3 รุ่น โดยรุ่นแรกจะใช้การควบคุมปริมาตรภายในเรือเพื่อควบคุมการดำขึ้นหรือลง (การใช้ถังอับเฉา) ส่วนรุ่นที่ 2 จะใช้ใบพัดแทนการควบคุมปริมาตร โดยการติดใบพัดไว้ด้านบนของเรือแล้วให้หมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาเพื่อควบคุมการดำขึ้นลง

โครงการในรุ่นที่ 4 นี้จะเป็นการพัฒนาต่อจากโครงการในรุ่นที่ 3 โดยออกแบบโครงสร้างของยานสำรวจใหม่ ให้มีความแข็งแรงทนทาน และสามารถถอดประกอบได้ทุกชิ้นส่วนเพื่อการซ่อมบำรุงได้ง่ายขึ้น และได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) เพิ่มเติมเพื่อใช้วัดค่าความลึกและวัดค่ามุม ทำให้สามารถควบคุมแบบอัตโนมัติได้ และนอกจากนี้ ยังได้พัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อให้สามารถติดต่อกับผู้ควบคุมได้ง่ายขึ้นอีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีการควบคุม หลักการทำงานของยานสำรวจใต้น้ำ รวมไปถึง หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Transducer) และอุปกรณ์วัดค่ามุม (Compass Module) โดยจะแสดงถึงวิธีการใช้งาน การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านพอร์ตอนุกรมและไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1 ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีสัญญาณความผิดพลาดเป็นอินพุตและมีเอาต์พุตเป็นอินพุตของอุปกรณ์ขับสำหรับพลานท์ (Plant) ที่ต้องการควบคุม ส่วนนี้จะกล่าวถึงวิธีการเลือกใช้ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม นิยมเรียก กฎการควบคุม (Control Law) โดยที่นิยมมี 3 รูปแบบ คือ

1. ระบบควบคุมแบบพี (P: Proportional Control)
2. ระบบควบคุมแบบไอ (I: Integral Control)
3. ระบบควบคุมแบบดี (D: Derivative Control)

ในระบบบางประเภท มีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่ปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เรียกว่า การชดเชย (Compensation)

2.1.1 ระบบควบคุมแบบพี (P: Proportional Control)

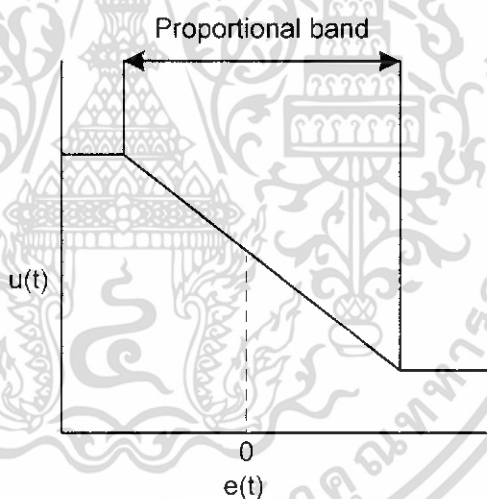
ในระบบควบคุมแบบพี เอาต์พุตของตัวควบคุม $u(t)$ จะเป็นสัดส่วนกับอินพุตของตัวควบคุม และถ้ากำหนดสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมเป็น ค่าความผิดพลาด $e(t)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา จะได้

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.1)$$

เมื่อ K_p เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional Gain) จะพบว่าเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมแบบพี เป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดในขณะที่กำลังพิจารณา ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_c(s)$ มีค่าเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.2)$$

ดังนั้นการควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบนี้ก็จะเป็นเพียงการขยายสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น การที่ได้สัญญาณความผิดพลาดขนาดใหญ่ที่เวลาหนึ่ง ทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีขนาดใหญ่จากตัวควบคุมในเวลาหนึ่ง อย่างไรก็ตามการที่ให้อัตราขยายคงที่นั้นในทางปฏิบัติอาจกำหนดไว้ในบางช่วงของสัญญาณความผิดพลาดเท่านั้น หรืออาจกำหนดให้ตัวควบคุมมีค่าเอาต์พุตไม่น้อยกว่าค่าค่าหนึ่งและไม่มากกว่าค่าค่าหนึ่งก็ได้ ซึ่งการกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุตจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 และการกำหนดเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพี ช่วงที่มีการกำหนดสัดส่วนนี้ จะเรียกว่า Proportional Band



รูปที่ 2.1 การกำหนดช่วงจำกัดของเอาต์พุต

การกำหนด Proportional Band นี้ จะช่วยให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าจำกัดไม่ไปสู่อันตรกิริยาทั้งทางด้านบวกและทางด้านลบ และเมื่อตัวควบคุมมีเอาต์พุตสูงที่สุดที่เป็นไปได้ค่าหนึ่ง ก็นิยามที่จะกำหนดเอาต์พุตค่าใด ๆ เป็นร้อยละของค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม 100% ก็หมายถึงว่าเอาต์พุตจะเปลี่ยนจากค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้ ไปเป็นค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งจะได้ว่า

$$K_p = \frac{100}{\text{proportional band}} \quad (2.3)$$

เนื่องจากเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอินพุต ดังนั้น ถ้าหากอินพุตมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ (Step) เอาต์พุตที่ได้ก็จะมีลักษณะเป็นสัญญาณระดับ เช่นกัน โดยลักษณะของกราฟแสดงอินพุตและเอาต์พุตจะมีสัดส่วนที่แน่นอนค่าหนึ่ง ตามรูปที่ 2.2 โดยรูปนี้แสดงถึงการตอบสนองของตัวควบคุม เมื่ออินพุตอยู่ในช่วง Proportional Band



รูปที่ 2.2 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบพี

ในทางปฏิบัติตัวควบคุมแบบพีนี้ มีลักษณะเหมือนกับเครื่องขยายสัญญาณรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นในลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออาจจะเป็นเครื่องขยายสัญญาณเชิงกล เช่น คัน ก็ได้ ลักษณะของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี ได้ดังบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ที่แสดงในรูปที่ 2.3 และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = K_p G_p(s) \quad (2.4)$$

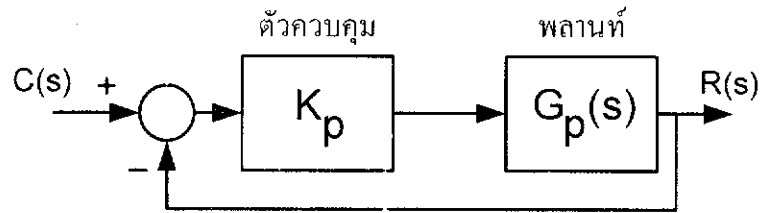
เมื่อ $G_p(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานท์ที่ต้องการควบคุม

ข้อเสียของระบบที่มีตัวควบคุมแบบพี คือไม่มีการเพิ่มอินทิเกรตหรือ $1/s$ ในส่วน Forward Path ซึ่งหมายความว่า ถ้าพลานท์เป็นชนิด (Type) 0 ตัวควบคุมจะไม่เปลี่ยนแปลงชนิด ทำให้ระบบเป็นชนิด 0 เหมือนเดิม ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดที่สภาพคงตัว (Steady State Error) จากรูปที่ 2.3 ระบบควบคุมแบบพี ซึ่งมีการป้อนกลับหนึ่งหน่วย มีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็น

$$G(s) = \frac{K_p G_p(s)}{1 + K_p G_p(s)} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพี

2.1.2 ระบบควบคุมแบบไอ (I: Integral Control)

ในระบบควบคุมแบบไอเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับการอินทิเกรตสัญญาณของค่าผิดพลาดเทียบกับเวลา หรือ

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.6)$$

เมื่อ K_i เป็นค่าคงที่เรียกว่า อัตราขยายแบบอินทิเกรต (Integral Gain) ซึ่งจะมีหน่วยเป็น sec^{-1} รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ เมื่อได้รับสัญญาณอินพุตแบบระดับ ค่า $u(t)$ ณ เวลา t ใดๆ หมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของสัญญาณอินพุตจากเวลา 0 ถึง t คูณด้วยอัตราขยายอินทิเกรต ดังนั้นเนื่องจากการมีสัญญาณอินพุตแบบระดับ เอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมจึงมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ด้วยอัตราที่คงที่ ในลักษณะรูปสัญญาณความชัน (Ramp)

จากสมการที่ (2.6) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบไอเป็น

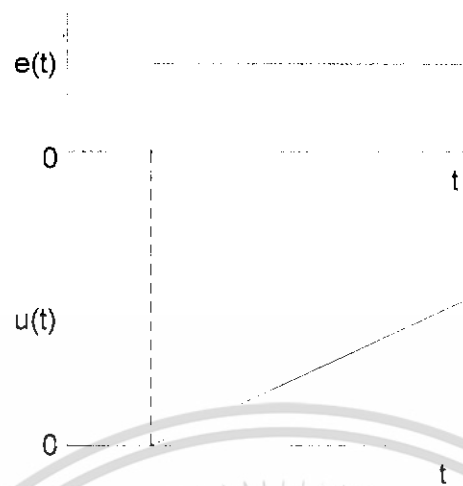
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.7)$$

ทำให้ระบบควบคุมแบบไอที่แสดงในรูปที่ 2.5 มีฟังก์ชันถ่ายโอน Forward-Path เป็น $\frac{K_i}{s} G_p(s)$

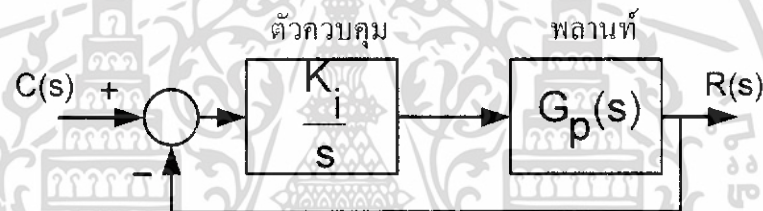
และมีฟังก์ชันถ่ายโอนระบบปิดเป็น

$$G(s) = \frac{\frac{K_i}{s} G_p(s)}{1 + \frac{K_i}{s} G_p(s)} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบไอ



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบไอ

ดังนั้นสามารถพิจารณาถึงข้อได้เปรียบของการควบคุมแบบไอได้จากฟังก์ชันถ่ายโอน Forward-Path ซึ่งจะเห็นว่าระบบควบคุมแบบไอ จะเพิ่มชนิดของระบบขึ้นมา 1 ระดับ เช่น ถ้าพลานท์เดิมเป็นชนิด 0 ระบบควบคุมแบบไอจะเป็น ชนิด 1 ซึ่งทำให้ระบบมีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวเป็นศูนย์เทียบต่อสัญญาณอินพุตแบบระดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มโพลที่ $s=0$ ในระบบวงเปิดและไม่มีการเพิ่มซีโรให้กับระบบควบคุม ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล (n) และจำนวนซีโร (m) เพิ่มขึ้นอีก 1 ซึ่งมีผลให้มุมของเส้นอะซิมโทต (Asymptote Angles) ของเส้นทางรากลดลง และจุดตัดเคลื่อนไปทางครึ่งขวาของระนาบ s (s -Plane) มากขึ้น มีผลทำให้ความเสถียรสัมพัทธ์ของระบบลดลง

2.1.3 ระบบควบคุมแบบดี (D: Derivative Control)

ระบบควบคุมแบบดีนี้ เอาที่พหุของตัวควบคุมจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลง อินพุตความผิดพลาดเทียบกับเวลา นั่นคือ

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

เมื่อ K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative Gain) และมีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 2.6 แสดงผลตอบสนองของระบบควบคุมแบบดี เมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณแบบ ความชัน จากสมการที่ (2.9) จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบดีจะให้สัญญาณส่งออกจากตัวควบคุมมีค่า มากเมื่อค่าอินพุตความผิดพลาดมีแนวโน้มเพิ่มในอัตราที่สูงก่อนที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นมาก จริงๆ

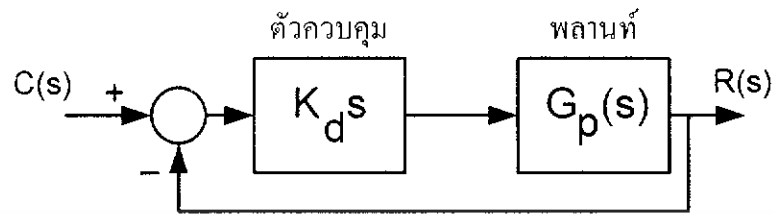
อย่างไรก็ตามหากความผิดพลาดมีค่าคงที่ก็จะไม่มีการสะสมค่าความผิดพลาดแม้ว่าค่า ความผิดพลาดจะมีมากก็ตาม ทำให้การควบคุมแบบดีนี้ ไม่เปลี่ยนแปลงต่อค่าความผิดพลาดที่คงที่ หรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ดังนั้นการควบคุมแบบนี้จึงไม่นิยมใช้เพียงลำพัง แต่มักจะใช้ควบคู่ ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบดี จะเป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.10)$$

ดังนั้น สำหรับระบบควบคุมแบบดีจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบปิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{K_d s G_p(s)}{1 + K_d s G_p(s)} \quad (2.11)$$



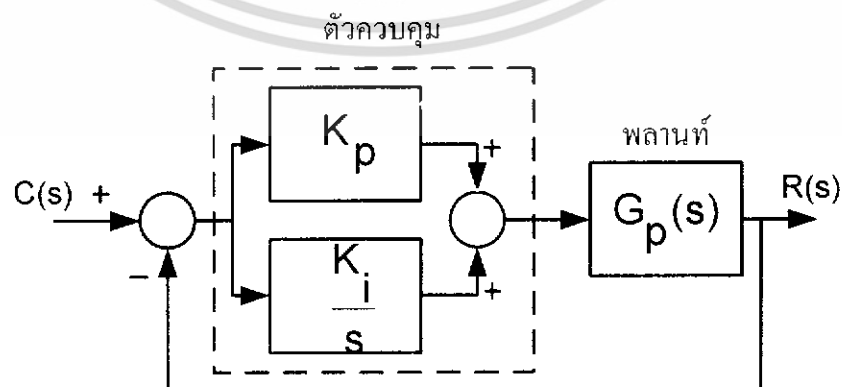
รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบดิ

ถ้าหากว่าระบบเป็นแบบชนิด 1 หรือสูงกว่า การควบคุมแบบดิจะลดเทอม s ในพหุนาม ส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนของ Forward-Path ลง ซึ่งจะปลดชนิดของระบบลง 1 อย่างไม่ก็ตามดังที่ได้กล่าวก่อนหน้านี้แล้วว่า การควบคุมแบบดินี้จะไม่ใช้เพียงลำพังแต่จะใช้ร่วมกับการควบคุมแบบอื่น เพราะเมื่อใช้การควบคุมแบบดิ ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

ในทางปฏิบัติการนำการควบคุมดิไปใช้นั้นค่อนข้างจะลำบาก ดังนั้น ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะเป็นการประมาณการควบคุมแบบดิโดยใช้ตัวชดเชยแบบมุน่า (Lead Compensator)

2.1.4 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI: Proportional plus Integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบไอ สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่งโดยการนำการควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอ ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามรูปที่ 2.8

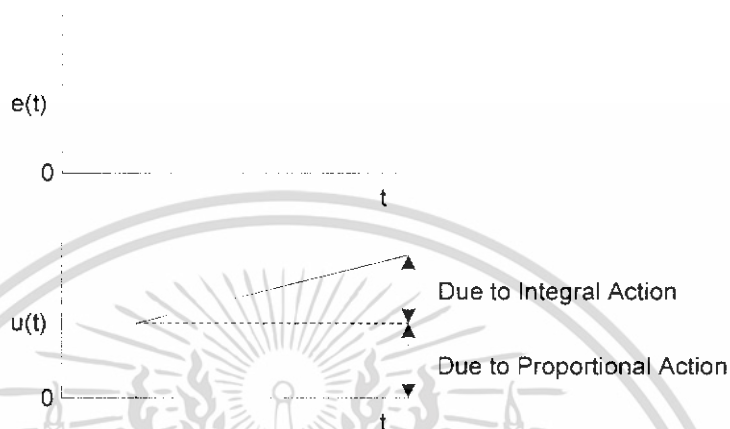


รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.9 การตอบสนองของตัวควบคุมแบบพีไอ

รูปที่ 2.9 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นแบบระดับ จากสมการที่ (2.12) ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอ เป็น

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{sK_p + K_i}{s} = K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s} \tag{2.13}$$

นิยามค่าเวลาคงตัวอินทิกรัล (Integral Time Constant) เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i} \tag{2.14}$$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]}{s} \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (2.16)$$

$$= \frac{K_p [s + (1/\tau_1)G_p(s)]}{s}$$

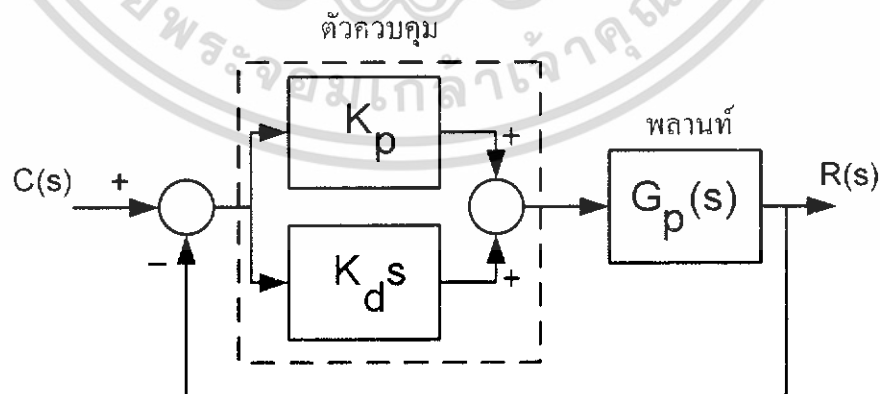
จะเห็นว่ามิซีโรที่ $s = -1/\tau_1$ และโพลที่ $s = 0$ เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ การที่เพิ่มตัวประกอบ s เข้ากับพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเป็นการเพิ่มชนิดของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบควบคุมแบบพีไอนี้ไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุทแบบระดับ นอกจากนั้นการที่เพิ่มมิซีโรให้กับระบบไปพร้อมๆกัน ก็ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล(n) และจำนวนมิซีโร(m) มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของเส้นอะซิมโทตสำหรับเส้นทางรากมีค่าคงเดิม แต่จุดตัดของเส้นอะซิมโทตบนแกนจริง (Centroid) จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น เนื่องจาก

$$\text{จุดตัดของเส้นอะซิมโทตบนแกนจริง} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของมิซีโร}) / (n - m)$$

ดังนั้นจุดตัดของเส้นอะซิมโทตจะเปลี่ยนไปเท่ากับ $-(1/\tau_1)/(n - m)$ ส่งผลให้ความเสถียรภาพของระบบลดลง อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพัทธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบไอเพียงอย่างเดียว

2.1.5 ระบบควบคุมแบบพีดี (PD: Proportional plus Derivative Control)

ถ้าการควบคุมแบบดีใช้ร่วมกับการควบคุมแบบพี ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น



รูปที่ 2.10 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

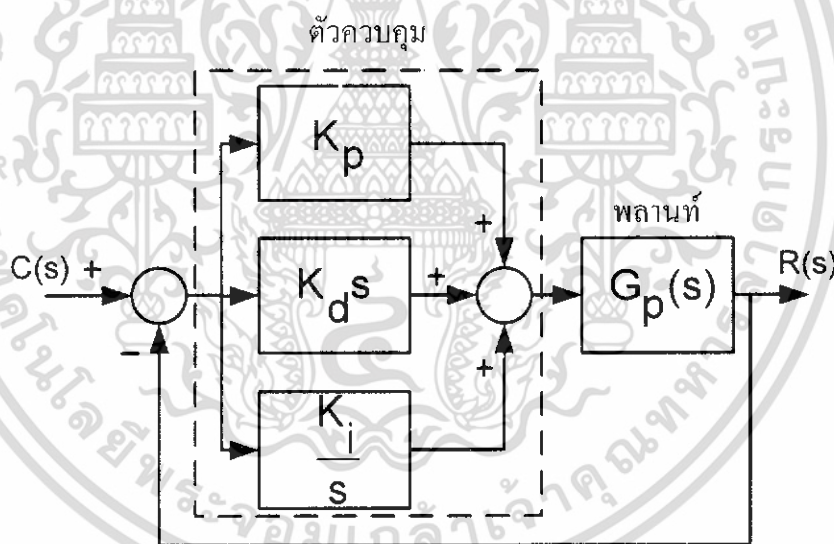
$$G_o(s) = (K_p + K_d s)G_p(s) \quad (2.17)$$

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

เมื่อ $\tau_d = \frac{K_p}{K_d}$ คือ ค่าเวลาคงตัวอนุพันธ์ (Derivative Time Constant) ซึ่งในการควบคุมแบบนี้ จะมีซีโรเพิ่มขึ้นที่ $s = -\tau_d$ และจะเห็นว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดของระบบ ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัว

2.1.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID: Proportional plus Integral plus Derivative Control)

การควบคุมโดยใช้แบบพีร่วมกับแบบไอและรวมกับแบบดี หรือที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (Tree-term Control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.11 ทำให้เอาที่พู่ทของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด $e(t)$ ดังนี้



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.18)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.19)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2.20)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบแบบเปิดของระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่แสดงในรูปที่ 2.11 จะเป็น

$$G_o(s) = G_c(s)G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) G_p(s) \quad (2.21)$$

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

ดังนั้น การควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มจำนวนขีโรให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัวและเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัว และทำให้ชนิดระบบเพิ่มขึ้น 1

2.2 ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method)

จากการทดลองที่จะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 4 พบว่าค่าวัด (x) จากอุปกรณ์วัดต่างๆ มีลักษณะแปรผันตรงกับค่าจริง (y) ซึ่งอาจสามารถประมาณได้ด้วยสมการเส้นตรง

$$\hat{y} = mx + b \quad (2.22)$$

อย่างไรก็ตามจากค่าวัดที่พบในการทดลองจะไม่มีสัมประสิทธิ์ m และ b ใดๆที่ทำให้ค่าคำนวณ \hat{y} เท่ากับค่าจริง y ได้สำหรับทุกๆ ค่าวัด x ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เพื่อใช้ในการประมาณหาสัมประสิทธิ์ m และ b ที่ “ดีที่สุด” จากข้อมูลที่ทดลองได้ ค่าจริง y ต่างๆกัน n ค่า โดยในการหาเส้นตรงซึ่งสามารถประมาณความสัมพันธ์ของข้อมูลวัดได้ “ดีที่สุด” จำเป็นต้องมีดัชนีเพื่อให้งบชี้ระดับความใกล้เคียงของการประมาณ ซึ่งในที่นี้คือผลรวมของค่าความผิดพลาดของการประมาณกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด กล่าวคือ

$$J(m, b) = \sum (y - \hat{y})^2 \text{ มีค่าน้อยที่สุด (Minimum)} \quad (2.23)$$

และ

$$\sum (y - \hat{y})^2 = 0 \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้ จากสมการที่ (2.22) แทนค่า \hat{y} จะได้

$$J(m, b) = \sum (y - mx - b)^2 \quad (2.25)$$

จากเงื่อนไขที่ต้องการทำให้ค่า $J(m, b)$ มีค่าน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่า m และ b ที่ทำให้อนุพันธ์ย่อยของ J มีค่าเป็น 0 คือ

$$\frac{\partial J(m, b)}{\partial m} = -2 \sum (y - mx - b) = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial J(m, b)}{\partial b} = -2 \sum (y - mx - b)(x) = 0 \quad (2.27)$$

หรือ

$$\sum y = nb + m \sum x \quad (2.28)$$

$$\sum xy = b \sum x + m \sum x^2 \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.27) และ (2.28) หาค่า b และ m ได้ดังนี้

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (2.30)$$

$$m = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (2.31)$$

เมื่อ \bar{x} และ \bar{y} เป็นค่าเฉลี่ยของ x และ y ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (2.32)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum y}{n} \quad (2.33)$$

2.3 หลักการทำงานของยานสำรวจใต้น้ำ

ยานสำรวจใต้น้ำ คือยานสำรวจที่สามารถลอยอยู่บนผิวน้ำหรือจมลงสู่ใต้น้ำได้ โดยเราจะอาศัยคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักหรือแรงกดที่กระทำกับตัวยานสำรวจ

สำหรับโครงการนี้ โดยปกติแล้วตัวยานสำรวจจะลอยอยู่ที่ระดับผิวน้ำโดยมีมอเตอร์ 2 ตัวสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งซึ่งติดตั้งตรงกลางของตัวยานสำรวจใต้น้ำ และ อีก 2 ตัวสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวระนาบซึ่งติดตั้งตรงด้านท้ายของยานสำรวจใต้น้ำ ถ้าต้องการจะให้ตัวยานสำรวจดำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

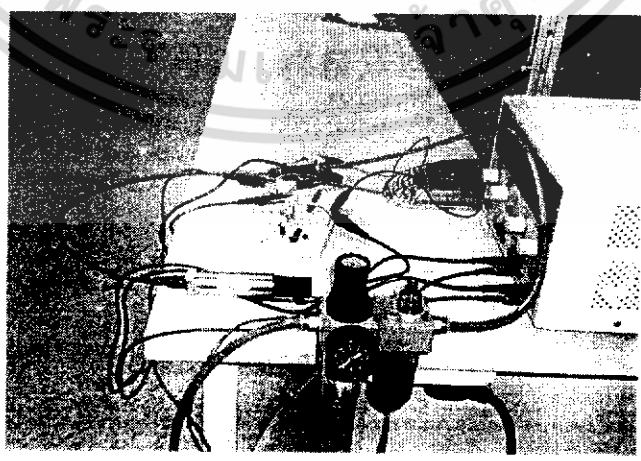
ลงสู่ได้นำ ก็ทำการสั่งให้มอเตอร์ส่วนกลางของตัวยานสำรวจทั้ง 2 ตัวทำงานเพื่อให้ใบพัดสร้างแรงกดให้แก่ตัวยานสำรวจ ยานสำรวจก็จะดำลงสู่ใต้ผิวน้ำซึ่งจะดำลงไปลึกเท่าใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับระดับความเร็วของการหมุนของมอเตอร์ และเมื่อต้องการจะให้ตัวยานสำรวจลอยขึ้นสู่ผิวน้ำก็ทำได้โดยการสั่งการให้มอเตอร์หยุดทำงาน แรงกดที่ตัวยานสำรวจก็จะหมดไป ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวระนาบนั้น ก็จะใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ 2 ตัวที่อยู่ทางด้านท้ายของยานสำรวจ เมื่อต้องการจะให้ยานสำรวจเคลื่อนที่ไปข้างหน้าตรงๆก็สั่งการให้มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้ทำงานพร้อมกัน โดยหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ใบพัดที่ติดอยู่กับมอเตอร์ก็จะสร้างแรงดันตัวยานสำรวจให้เคลื่อนที่ไป ถ้าต้องการจะให้ยานสำรวจเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวาก็สั่งให้มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้หมุนในทิศทางสลับกัน แรงกระทำรวมที่กระทำกับตัวยานสำรวจก็จะทำให้ตัวยานสำรวจเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ

2.4 อุปกรณ์วัดค่าต่างๆ

ในการควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการตรวจวัดสถานะของยาน โดยเฉพาะระดับความลึกและทิศทาง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง หลักการทำงานของอุปกรณ์วัดความดันและอุปกรณ์วัดค่ามุมตลอดจนการนำมาใช้ในการวัดระดับความลึกและทิศทางของยานสำรวจใต้น้ำ

2.4.1 อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดัน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดความดันของของไหล (ก๊าซหรือน้ำ) โดยจะแปลงค่าความดันที่ได้ออกมาในรูปของกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้า สำหรับในโครงการนี้ ตัวอุปกรณ์วัดความดันจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวัดระดับความลึกที่ยานสำรวจดำลงไป ทำให้ทราบสถานะของยานสำรวจที่อยู่ลึกจากผิวน้ำลงไปได้อย่างถูกต้อง แล้วจึงนำเอาระดับความลึกที่ได้นี้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานสำรวจใต้น้ำต่อไป



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 การควบคุมระดับความลึก

การควบคุมระดับความลึกเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของการควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ เนื่องจากเป็นส่วนที่จะทำให้ยานสำรวจใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงได้ตามตำแหน่งความลึกที่ผู้ใช้งานต้องการ ในการที่จะควบคุมระดับความลึกแบบอัตโนมัติได้อย่างถูกต้องนั้น จำเป็นที่จะต้องมียุทธวิธีตรวจสอบระดับความลึก แต่เนื่องจากการตรวจวัดความลึกจากผิวน้ำนั้นทำได้ยาก และไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดที่ออกแบบมาสำหรับงานนี้โดยตรง

ดังนั้น จึงได้นำเอาอุปกรณ์วัดความดันมาประยุกต์ใช้ โดยนำเอาค่าความดันที่ได้มาแปรเป็นค่าของระดับความลึก โดยอาศัยความรู้เรื่องเกี่ยวกับความดันในของเหลวซึ่งในที่นี้ก็คือน้ำ ดังนี้

“ความดันในของเหลว ณ จุด ๆ หนึ่ง = ความดันบรรยากาศ + ความดันของของเหลวที่กดทับ ”

$$P_{ab} = P_{atm} + P_g \quad (2.34)$$

โดย

P_{ab} คือ ความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) (psi)

P_{atm} คือ ความดันบรรยากาศ (Atmosphere pressure) (psi)

P_g คือ ความดันเกจ (Gage pressure) (psi)

โดยความดันของของเหลวที่กดทับ (ในที่นี้ก็คือน้ำ) หรือความดันเกจนี้ จะแปรผันตามระดับความลึก ดังสมการ

$$P_g = \rho_{water} gh \quad (2.35)$$

เมื่อ

ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h คือ ระดับความลึก (m)

จากสมการจะได้ว่า

$$P_g = P_{atm} + \rho_{water} gh \quad (2.36)$$

ซึ่งค่าความดันบรรยากาศเป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 14.7 psi และค่าความหนาแน่นของน้ำก็เป็นค่าคงที่เช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ $10^3 kg/m^3$ ส่วนระดับความลึกก็คือความลึกที่วัดจากผิวน้ำลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดความดัน รุ่น PT150 ผลิตโดยบริษัท Winters Instruments และสามารถวัดความดันได้ในช่วง 0 - 150 psig ความสามารถในการวัดระดับความลึกของอุปกรณ์วัดความดันตัวนี้อยู่ในช่วง ประมาณ 0-100 เมตร จากผิวน้ำ

เนื่องจากสถานที่ในการทดลองมีระดับความลึกของน้ำประมาณ 0-5 เมตร ดังนั้น ที่ความลึก $h = 0$ เมตร จะได้

$$P_{ab} = 14.7 + ((10^3 \times 9.81 \times 0) \div (6.985 \times 10^3)) = 14.7 \text{ psi}$$

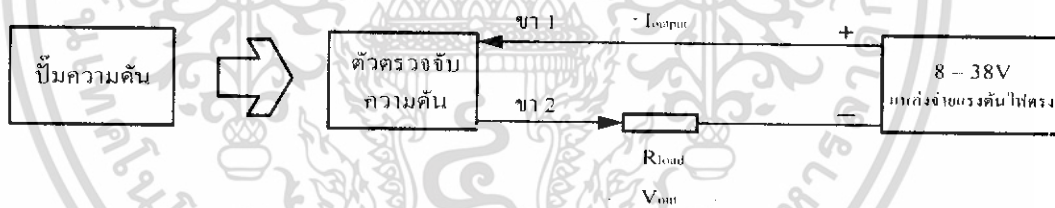
ที่ความลึก $h = 5$ เมตร จะได้

$$P_{ab} = 14.7 + ((10^3 \times 9.81 \times 5) \div (6.985 \times 10^3)) = 21.72 \approx 25 \text{ psi}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงที่เหมาะสมที่จะใช้งานคือ 0 - 25 psi

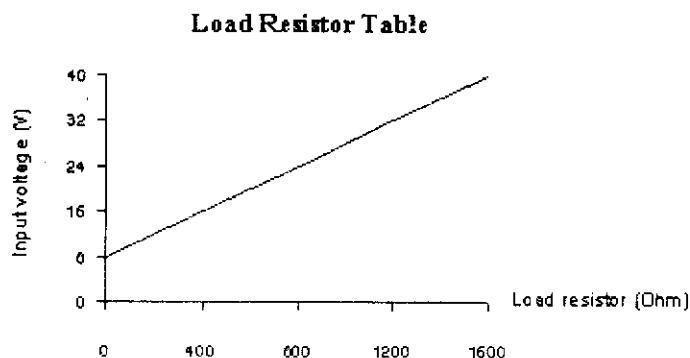
2.4.1.2 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์วัดความดัน

ในการประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดความดันเพื่อวัดระดับความลึกนั้นจะต้องเริ่มจากการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันและค่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ตัวอุปกรณ์วัดจ่ายออกมา ซึ่งจะต้องทำการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง แล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันและค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้หรือค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วแต่การนำไปใช้งาน โดยใช้วิธีการทดสอบดังรูป



รูปที่ 2.13 วิธีการที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์วัดความดัน

ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบดังรูปที่ 2.13 จะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 4 - 20 mA แต่ถ้านำไปใช้งานในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าก็สามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่ตกคร่อม R_{load} ไปใช้งานได้ ซึ่ง V_{out} จะมีค่าอยู่ในช่วงหนึ่ง ขึ้นอยู่กับค่าของ R_{load} ที่นำมาใช้งาน เช่น ถ้าใช้ R_{load} ที่มีค่า 200Ω , I_{output} มีค่าคงที่คืออยู่ในช่วง 4 - 20 mA ดังนั้นจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้า V_{out} ที่ตกคร่อม R_{load} อยู่ในช่วง 0.8 - 4 V อย่างไรก็ตามค่า R_{load} ที่จะนำมาใช้จะต้องสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรง (Input Voltage) ที่จ่ายให้แก่ตัวอุปกรณ์วัดความดัน โดยมีความสัมพันธ์กันตามตารางความต้านทานภาระ (Load Resistor Table) ในรูปที่ 2.14

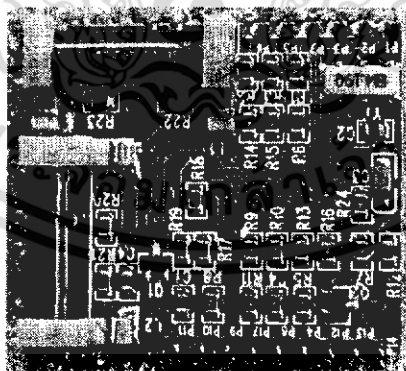


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและแรงดันที่จ่ายให้อุปกรณ์วัดความดัน

จะเห็นได้ว่าย่านที่เราใช้งานอยู่ในช่วง 0 - 25 psi ซึ่งในช่วงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณน้อยมาก ดังนั้น จึงต้องสร้างวงจรขยายย่านให้ขยายย่านกว้างขึ้นให้เหมาะสมกับการใช้งาน

2.4.2 อุปกรณ์วัดค่ามุม

อุปกรณ์วัดค่ามุม เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดมุมหรือทิศทาง โดยการสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นแล้วเปรียบเทียบความเข้มของสนามแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่ามุมที่วัดเทียบกับทิศเหนือ ตำแหน่งที่ทิศเหนือพอดีจะมีค่าเป็น 0° และ ณ ตำแหน่งทิศเหนือหรือ 0° นี้ เมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกาจะให้ค่าตั้งแต่ 0° ถึง 359° โดยอุปกรณ์วัดค่ามุมที่นำมาใช้ใน โครงการนี้เป็นรุ่น Vector 2X (V2X) ซึ่งผลิต โดยบริษัท Precision Navigation, Inc.



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์วัดค่ามุมที่ใช้ในโครงการ

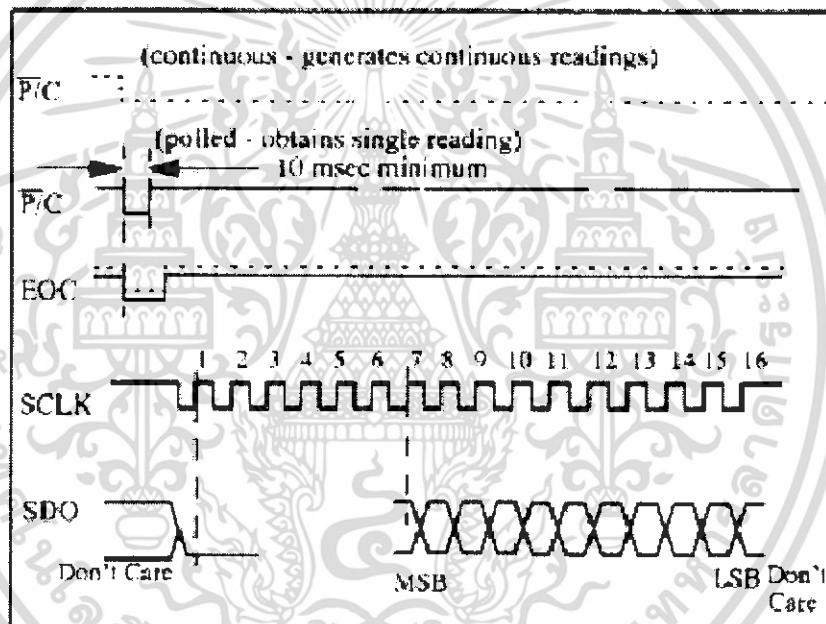
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะการทำงานของอุปกรณ์วัดค่ามุมชนิดนี้ มี 2 สถานะหลัก ๆ คือ

- การทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์ (Master Mode)
- การทำงานสถานะที่เป็นสเลฟ (Slave Mode)

2.4.2.1 การทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์

ในสถานะนี้จะใช้อุปกรณ์วัดค่ามุมเป็นอุปกรณ์หลักในการทำงาน สำหรับการทำงานในสถานะนี้ไม่จำเป็นจะต้องใช้ตัวคอนโทรลเลอร์ ในการควบคุมก็ได้ เพราะตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมสามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาออกมาได้ โดยเมื่อตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมทำการคำนวณค่าเรียบร้อยแล้ว จะให้ค่าเอาท์พุทออกมา 2 สัญญาณคือค่ามุมที่วัดได้และสัญญาณนาฬิกาจำนวน 16 ลูก สำหรับในด้านการติดต่อกับตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมเพื่อขออ่านข้อมูลนั้น สามารถทำได้ทั้ง 2 แบบ คือการขออ่านค่าตลอดเวลา และการขออ่านค่าเพียงครั้งเดียว ตามไคอะแกรมเวลา (Timing Diagram) ดังนี้



รูปที่ 2.16 ไคอะแกรมเวลาแสดงการทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์

การตั้งค่าสำหรับการทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ต่อขา $\overline{M/S}$ เข้ากับ Low ส่วนขา \overline{RAW} ต่อไว้ที่ High หรือจะไม่ต่อก็ได้
2. ต่อขา \overline{SS} เข้ากับ High หรือจะไม่ต่อก็ได้
3. ขา $\overline{BCD}/\text{Bin}$ เป็นขาสำหรับเลือกรูปแบบของเอาท์พุท ต่อขานี้เข้ากับ High ถ้าต้องการให้เอาท์พุทเป็น Binary หรือต่อกับ Low ถ้าต้องการให้เป็น BCD
4. ขา \overline{RES} เป็นขาที่ใช้สำหรับเลือกความละเอียด ต่อขานี้เข้ากับ High ถ้าต้องการความละเอียดสูงหรือต่อเข้ากับ Low ถ้าต้องการความละเอียดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สำหรับรูปแบบของการติดต่อนั้นเลือกโดยการจ่ายพัลส์เข้าที่ขา \overline{P}/C คือ ถ้าต้องการอ่านค่าเพียงครั้งเดียวให้จ่ายพัลส์ Low อย่างน้อย 10 msec เข้าที่ขา \overline{P}/C (ตามที่แสดงในไดอะแกรมเวลาในรูป) แต่ถ้าต้องการอ่านค่าตลอดเวลาอย่างต่อเนื่องก็ให้คงสถานะ Low ไว้ตลอดเวลา
6. ในการคำนวณค่าเอาต์พุตนั้น จะเป็นดังนี้
 - เมื่อขา \overline{P}/C เป็น Low แล้ว \overline{EOC} จะเปลี่ยนสถานะเป็น Low ด้วย โดยขณะนั้นตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมจะทำการคำนวณค่า
 - หลังจากที่ตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมทำการคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้ว สถานะของ \overline{EOC} จะเปลี่ยนเป็น High ทำให้ที่ขา SCLK ให้ค่าเอาต์พุตเป็นสัญญาณนาฬิกาจำนวน 16 ลูกที่มีความถี่ 4 KHz และที่ขา SDO จะให้ค่าเอาต์พุตเป็นค่ามุมที่วัดได้ตามรูปแบบของข้อมูลที่เลือกไว้แล้ว
7. สำหรับการติดต่อขออ่านข้อมูลจากตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมแบบขออ่านเพียงครั้งเดียวนั้น หลังจากที่ตัวอุปกรณ์ทำการคำนวณเสร็จสิ้นแล้วก็จะเซตตัวเองเข้าสู่โหมดการพัก (Sleep Mode) จนกว่าจะมีการติดต่อขออ่านค่าครั้งต่อไป ส่วนการติดต่อแบบขออ่านค่าอย่างต่อเนื่องนั้น เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการตัวอุปกรณ์จะไม่เซตตัวเองเข้าสู่โหมดการพักแต่จะวนลูปรทำงานในข้อ 6 เพื่อทำการคำนวณค่ามุมเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของตัวอุปกรณ์ต่อไปตามไดอะแกรมเวลาในรูปที่ 2.16 ทำให้สามารถอ่านค่าได้ตลอดเวลา

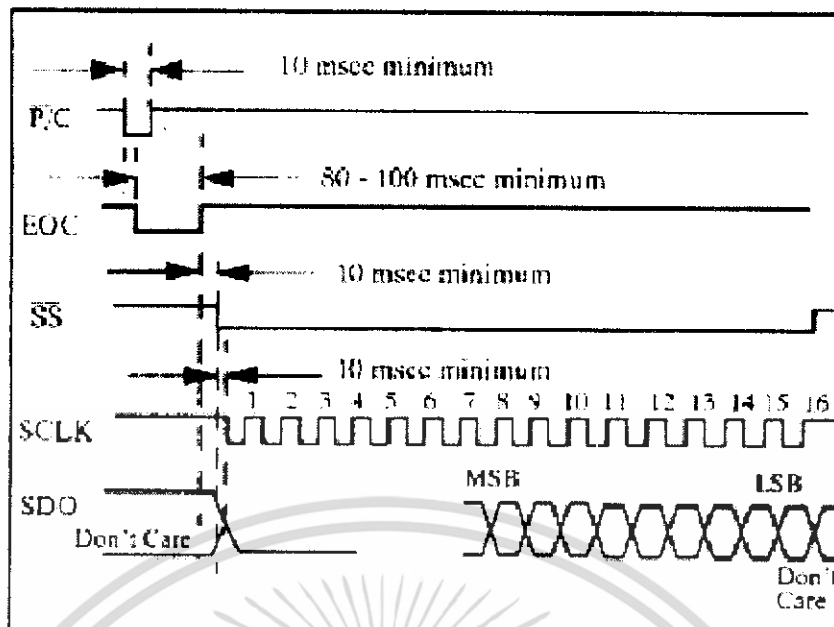
2.4.2.2 การทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ

การทำงานในสถานะนี้จะแตกต่างกับการทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์ตรงที่ตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมจะไม่สร้างสัญญาณนาฬิกาเป็นเอาต์พุตออกมา แต่ในทางกลับกัน จะรับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเข้ามา เพื่อเป็นตัวกำหนดการคล็อก (Clock) ข้อมูลที่คำนวณได้ออกไป โดยสัญญาณนาฬิกาที่ส่งเข้าไปจะต้องมีจำนวน 16 ลูกสมบูรณ์และมีความถี่ไม่เกิน 1 MHz นั่นคือความถี่สูงสุดของการคล็อกข้อมูลออกจะไม่เกิน 1 MHz ด้วย และของการติดต่อขออ่านข้อมูลในการทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ สามารถทำการติดต่อขออ่านข้อมูลได้เพียงแบบเดียวเท่านั้น คือ แบบการขออ่านค่าเพียงครั้งเดียว ตามไดอะแกรมเวลา รูปที่ 2.17

การตั้งค่าสำหรับการทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ต่อขา \overline{M}/S เข้ากับ High ส่วนขา \overline{RAW} ต่อไว้กับ High หรือไม่ต่อก็ได้
2. ขา \overline{BCD}/Bin เป็นขาสำหรับเลือกรูปแบบของเอาต์พุต ต่อขานี้เข้ากับ High ถ้าต้องการให้เอาต์พุตเป็น Binary หรือต่อกับ Low ถ้าต้องการให้เป็น BCD
3. ขา \overline{RES} เป็นขาที่ใช้สำหรับเลือกความละเอียด ต่อขานี้เข้ากับ High ถ้าต้องการความละเอียดสูงหรือต่อเข้ากับ Low ถ้าต้องการความละเอียดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ไคอะแกรมเวลาแสดงการทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ

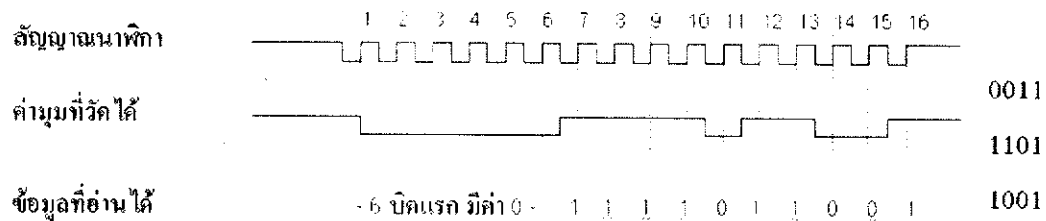
4. จ่ายพัลส์ Low เข้าที่ขา $\overline{P/C}$ ให้ความยาวพัลส์ไม่ต่ำกว่า 10 ms เพื่อขอติดต่อกับอุปกรณ์เพื่ออ่านค่า สำหรับความยาวพัลส์นั้นจะไม่จำกัดค่ามากที่สุดว่าจะต้องยาวเท่าใด แต่มีข้อแม้เพียงว่าขา $\overline{P/C}$ จะต้องมีสถานะกลับเป็น High ก่อนที่จะให้ขา \overline{SS} มีสถานะเป็น Low เพื่อ คล็อกข้อมูลออก ส่วนขา \overline{SS} นั้นจะเริ่มจ่ายพัลส์ Low ได้หลังจากที่ \overline{EOC} มีสถานะกลับเป็น High แล้วอย่างน้อยที่สุด 10 ms
5. อุปกรณ์วัดมุมจะทำการคำนวณในขณะที่ขา \overline{EOC} มีสถานะเป็น Low และเมื่อขา \overline{EOC} มีสถานะกลับเป็น High ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณก็พร้อมที่จะเป็นค่าเอาท์พุทโดย
 - หลังจากที่ทำให้ขา $\overline{P/C}$ เป็น Low แล้ว \overline{EOC} จะมีสถานะเป็น Low ตามด้วย
 - หลังจากที่ตัวอุปกรณ์ทำการคำนวณค่าเพื่อเป็นเอาท์พุทเสร็จแล้ว \overline{EOC} ก็จะมีสถานะกลับเป็น High แต่มีข้อจำกัดว่า $\overline{P/C}$ จะต้องมีสถานะกลับเป็น High ก่อนที่ \overline{EOC} จะมีสถานะกลับเป็น High
6. หลังจากที่ \overline{EOC} มีสถานะกลับเป็น High แล้ว ต้องรอน้อย 10 ms จึงจะทำให้ \overline{SS} เป็น Low ได้ แต่ \overline{SS} จะต้องเป็น Low ขณะที่มีการคล็อกข้อมูลออกไป
7. ที่ SCLK จะต้องได้รับสัญญาณนาฬิกา 16 ลูกอย่างสมบูรณ์ และสัญญาณนั้นจะต้องมีความถี่ไม่เกิน 1 MHz ด้วย โดยกระบวนการช่วงนี้คือ
 - ก่อนที่จะทำให้ SCLK เป็น Low ที่ขา \overline{SS} จะต้องถูกทำให้เป็น Low ก่อนช่วงเวลานึง ซึ่งความยาวของช่วงเวลาจะขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบ
 - ในการอ่านข้อมูลนั้น จะอ่านข้อมูลบิตแรกจาก SDO ได้เมื่อสัญญาณนาฬิกาเปลี่ยนจาก Low เป็น High (ในช่วงขอขาขึ้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- และเช่นกันคือจะต้องจ่ายสัญญาณนาฬิกา 6 ลูกสมบรูณ์ให้แก่ SCLK เพื่อที่จะอ่านข้อมูลใน 6 บิตถัดไป
 - เมื่ออ่านข้อมูลได้ครบ 6 บิตแรกแล้วจะต้องหยุดรอเวลาช่วงหนึ่งแล้วจึงจ่ายสัญญาณนาฬิกาอีก 8 ลูกสมบรูณ์เป็นอย่างน้อย เพื่อทำการอ่านข้อมูลอีก 8 บิตที่เหลือต่อไป ซึ่งการอ่านข้อมูลนั้นก็เหมือนกันใน 6 บิตแรกคือ จะอ่านที่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกา ซึ่งเมื่ออ่านข้อมูลตัวสุดท้ายเสร็จแล้ว SCLK ก็เปลี่ยนสถานะเป็น High และคงค่าไว้ตลอดจนกว่าจะมีการอ่านข้อมูลครั้งต่อไป
8. สำหรับข้อมูลในบิตสุดท้ายจะถูกคล็อกออกไปภายในเวลา 20 μsec นับตั้งแต่ขอบขาขึ้นของสัญญาณนาฬิกาสุดท้าย สำหรับ 15 บิตก่อนหน้านี้สามารถอ่านค่าได้เลยไม่ต้องรอเวลาเหมือนในลูกสุดท้าย แต่อาจจะมีการคิเลย์บ้างในระหว่างบิตต่อบิต
 9. หลังจากที่ข้อมูลถูกคล็อกออกไปแล้ว และทำให้ \overline{SS} เป็น High อีกครั้งหนึ่ง แล้วตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมจะเซทตัวเองให้กลับไปสู่ Sleep mode
 10. สำหรับขา \overline{P}/C และขา \overline{SS} สามารถต่อไว้ด้วยกันซึ่งการทำงานก็จะเป็นไปตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้สามารถลดความยุ่งยากในการควบคุมได้ แต่ถ้าเป็นในกรณีที่ไม่ได้ต่อขาทั้งสองไว้ด้วยกันแล้ว เมื่อมีการจ่ายพัลส์ Low ให้แก่ \overline{P}/C เพื่อแสดงการขอติดต่อกับอุปกรณ์วัดค่ามุม แล้ว \overline{EOC} จะเป็น Low ซึ่งความยาวของพัลส์ Low ที่จ่ายให้แก่ \overline{P}/C นั้น จะต้องเป็น Low อยู่จนกระทั่ง \overline{EOC} เป็น Low แล้ว จึงจะให้ \overline{P}/C กลับเป็น High ได้ และเมื่อ \overline{EOC} เป็น Low แล้ว ก็จะคงค่า Low นี้อยู่ 80 -100 msec จากนั้น \overline{EOC} จะกลับเป็น High อีกครั้ง หลังจากนี้ให้ทิ้งช่วงเวลาประมาณ 10 msec แล้วจึงทำให้ขา \overline{SS} เป็น Low จนกระทั่งคล็อก ข้อมูลบิตสุดท้ายออกไปเรียบร้อยแล้ว จึงทำให้ขา \overline{SS} กลับเป็น High เพื่อรอการขอติดต่อกครั้งต่อไป

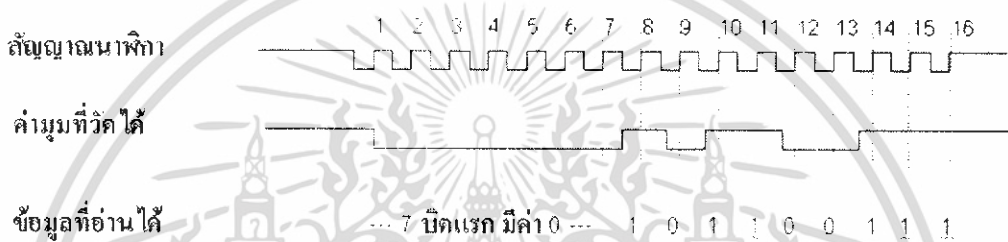
2.4.2.3 รูปแบบของข้อมูล

สำหรับรูปแบบของข้อมูลที่ออกมานั้นสามารถเลือกรูปแบบได้ คือ เป็นได้ทั้งแบบ บีซีดี (BCD : Binary Code Decimal) และ แบบ ไบนารีหรือเลขฐานสอง (Binary) โดยการอ่านข้อมูลนั้นจะต้องอ่านเทียบกับสัญญาณนาฬิกาที่ตัวอุปกรณ์วัดค่ามุมจ่ายออกมาจากการทำงานในสถานะที่เป็นมาสเตอร์ หรือสัญญาณนาฬิกาที่จ่ายให้แก่อุปกรณ์วัดค่ามุมจากการทำงานในสถานะที่เป็นสเลฟ โดยจะอ่านทุก ๆ ขอบขาลงของสัญญาณนาฬิกา สำหรับแบบบีซีดี ข้อมูลใน 6 บิตแรกจะมีค่าเป็น 0 และจะเริ่มอ่านข้อมูลที่เป็นค่ามุมตั้งแต่บิตที่ 7 ไปแล้ว ส่วนแบบไบนารี ข้อมูลใน 7 บิตแรกจะมีค่าเป็น 0 และจะเริ่มอ่านข้อมูลที่เป็นค่ามุมตั้งแต่บิตที่ 8 เป็นต้นไป รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างการอ่านข้อมูลแบบบีซีดีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา ณ ค่ามุม 359 องศาและรูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างการอ่านข้อมูลแบบไบนารีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา ณ ค่ามุม 359 องศา



$$\text{ค่ามุมที่อ่านได้} = (3^\circ \times 100) + (5^\circ \times 10) + (9^\circ \times 1) = 359^\circ$$

รูปที่ 2.18 การอ่านข้อมูลแบบบีซีดีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 2.19 การอ่านข้อมูลแบบไบนารีเทียบกับสัญญาณนาฬิกา

$$\begin{aligned} \text{ค่ามุมที่อ่านได้} &= 10110011_2 = (2^7 \times 1) + (2^6 \times 1) + (2^5 \times 1) + (2^4 \times 1) + (2^3 \times 1) + \\ &(2^2 \times 1) + (2^1 \times 1) = 359 \end{aligned}$$

จากรูปที่ 2.18 ค่ามุมที่วัดได้ตัวแรกนั้นจะต้องอ่านเทียบกับลูกที่ 7 ของสัญญาณนาฬิกา เนื่องจากการเลือกรูปแบบของข้อมูล ดังนั้นในบิตแรกของข้อมูลที่เป็นค่ามุมจึงมีค่าเป็น 1 และเมื่ออ่านค่ามุมเทียบกับสัญญาณนาฬิกาในบิตต่อๆ ไปก็จะได้ข้อมูลทั้งหมดเป็น “1111011001” ซึ่งสามารถแปลค่าได้เป็นมุม 359° ส่วนในรูปที่ 2.19 นั้น เมื่อเลือกรูปแบบของข้อมูลเป็นแบบไบนารีแล้ว ข้อมูลที่จะอ่านในบิตแรกจะต้องอ่านเทียบกับสัญญาณนาฬิกาที่ 8 ซึ่งจากรูปจะมีค่าเป็น 1 และเมื่ออ่านค่ามุมเทียบกับสัญญาณนาฬิกาในบิตต่อ ๆ ไปก็จะได้ข้อมูลเป็น “101100111” ซึ่งสามารถแปลค่าได้เป็นมุม 359°

นอกจากนี้ยังมีบิตที่อาจจะนำมาเป็นตัวตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยถ้าข้อมูลที่ได้เป็นค่ามุมที่ได้จากการประมวลผล ไม่ใช่ค่าที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดของตัวอุปกรณ์นั้น ใน 6 บิต หรือ 7 บิตแรก (ตามรูปแบบของข้อมูลที่เลือกไว้) จะมีค่าเป็น 0 เสมอ ซึ่งถ้าในช่วงบิตดังกล่าวนี้ เกิดมีค่าเป็น 1 ก็จะสามารถรู้ได้ว่าขณะนี้อุปกรณ์วัดค่ามุมเกิดความผิดพลาดและต้องการการรีเซ็ต เพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องต่อไป

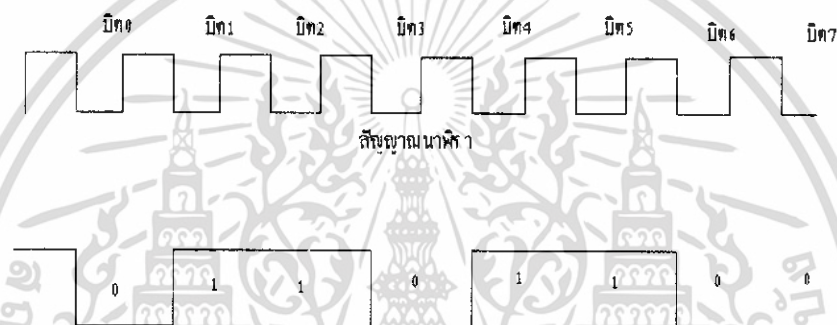
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอกโดยผ่านพอร์ตอนุกรม

การสื่อสารแบบอนุกรมนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือการสื่อสารอนุกรมแบบซิงโครนัส และการสื่อสารแบบอะซิงโครนัส

2.5.1 การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส

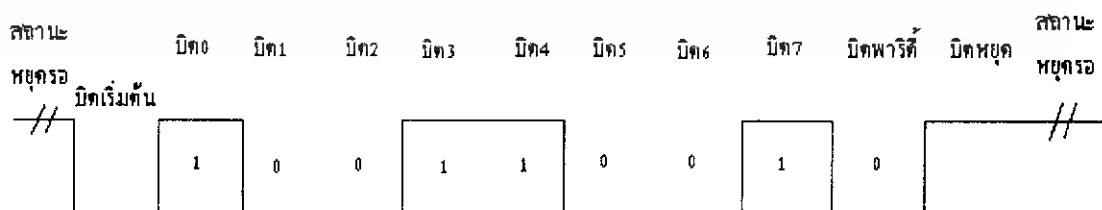
การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัสจะมีสัญญาณนาฬิกา ร่วมอยู่กับการรับและส่งสัญญาณ ด้วยการติดต่อกันแบบนี้จะต้องใช้สายในการเชื่อมต่ออย่างน้อยที่สุด 3 เส้นคือ สัญญาณนาฬิกา ข้อมูล และกราวด์ ข้อดีของการส่งแบบนี้ สามารถควบคุมให้เครื่องส่งและเครื่องรับทำงานได้พร้อมกันอย่างถูกต้องและทางเครื่องรับสามารถแปลรหัสข่าวสารได้ถูกต้องตรงตามด้านส่ง การส่งสัญญาณแบบนี้ มีใช้ทั่วไปในเครื่องรับส่งที่มีความเร็วสูง แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส

2.5.2 การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือการรับส่งข้อมูลไปในสายโดยไม่จำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกา ร่วม แต่จะใช้การกำหนดค่าสัญญาณนาฬิกาทั้งค่ารับและค่าส่งให้มีค่าเท่ากัน ซึ่งเรียกสัญญาณนาฬิกาที่ว่า อัตราการถ่ายข้อมูล หรือ บอดเรต (Baud Rate) มีหน่วยเป็น บิตต่อวินาที (bit per second: bps) แสดงดังรูปที่ 2.21



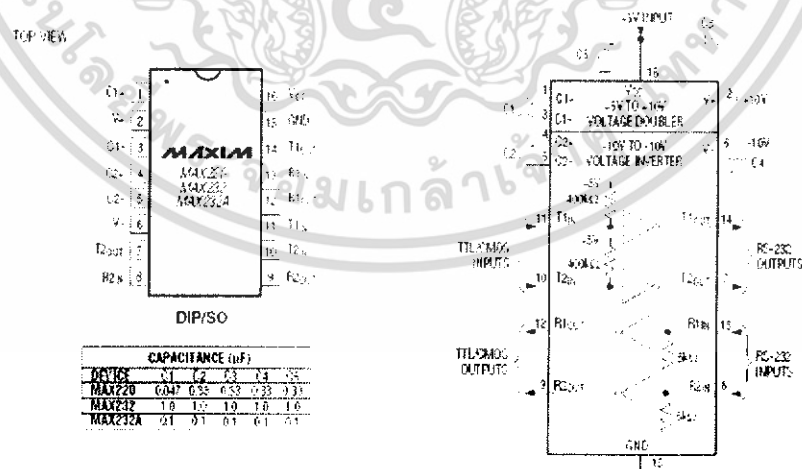
รูปที่ 2.21 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ขาสัญญาณเอาต์พุตของพอร์ตอนุกรม ได้แก่ ขา DTR, RTS และ TxD โดยรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมขาเหล่านี้คือรีจิสเตอร์ควบคุมโมเด็ม (MCR) โดยมีแอดเดรสอยู่ดีกรีจิสเตอร์หลักของพอร์ตอนุกรม 4 ตำแหน่ง รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานของขา DTR จะอยู่ที่ตำแหน่งบิต 0 ส่วนขา RTS จะอยู่ที่ตำแหน่งบิต 1 ส่วนขา TxD เป็นขาปกติในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงมีแอดเดรส อยู่ที่แอดเดรสรีจิสเตอร์หลัก

ระดับแรงดันที่ใช้งานสำหรับพอร์ตอนุกรม RS232 ได้ระบุช่วงระดับแรงดัน สำหรับการ ทำงานของพอร์ตอนุกรมไว้ว่า ที่ลอจิก “0” จะมีระดับสัญญาณ +3V ถึง +15V ส่วนลอจิก “1” จะมีระดับสัญญาณ -3V ถึง -15V ระดับสัญญาณนี้ทำให้ไม่สามารถที่จะนำขาเอาต์พุตใดๆต่อเข้ากับลอจิกเกตใช้งานได้โดยตรง จะต้องผ่านวงจรเพื่อเปลี่ยนระดับแรงดันเสียก่อน โดยปกติจะใช้ไอซี จำพวก RS232 ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงระดับแรงดันของ RS232 ให้อยู่ในระดับที่ที่แอล โดยลอจิก “0” ซึ่งเดิมมีระดับสัญญาณ +3V ถึง +15V จะถูกแปลงเป็น 0V ส่วนลอจิก “1” ซึ่งมีระดับสัญญาณ -3V ถึง -15V จะเปลี่ยนเป็น +5V ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดิจิทัลอื่นที่ใช้ระดับแรงดันที่ที่แอลได้จึงจำเป็นต้องใช้ IC MAX232 ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ไอซี MAX232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์ไอซี (IC: Integrated Circuit) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อน สามารถรับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิทัลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิทัลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในชิพจะมีหน่วยประมวลผล หน่วยความจำและพอร์ต (Port) อยู่ในชิพเพียงตัวเดียวซึ่งอาจจะเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์ชิพเดี่ยว ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนาแยกออกมาภายหลังเพื่อนำไปใช้ในวงจรทางด้านงานควบคุม คือ แทนที่ในการใช้งานจะต้องวางจรรยาภายนอกต่าง ๆ เพิ่มเติมเช่นเดียวกับไมโครโปรเซสเซอร์ ก็ จะทำการรวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ, ส่วนอินพุต/เอาต์พุต บางส่วนเข้าไปในตัว ไอซี เดียวกัน และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปด้วยเพื่อให้มีความสามารถเหมาะสมกับการใช้งานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา, วงจรการสื่อสารอนุกรม, วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล เป็นต้น สรุป คือ

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

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

- ชิพ ไอซีและระบบที่ได้มีขนาดเล็ก
- ระบบที่ได้มีราคาถูกกว่าการใช้ชิพไมโครโปรเซสเซอร์
- วงจรที่ได้จะมีความซับซ้อนน้อย ช่วยลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการต่อวงจร
- มีคุณสมบัติเพิ่มเติมสำหรับงานควบคุมโดยเฉพาะซึ่งใช้งานได้ง่าย
- ช่วยลดระยะเวลาในการพัฒนาระบบได้

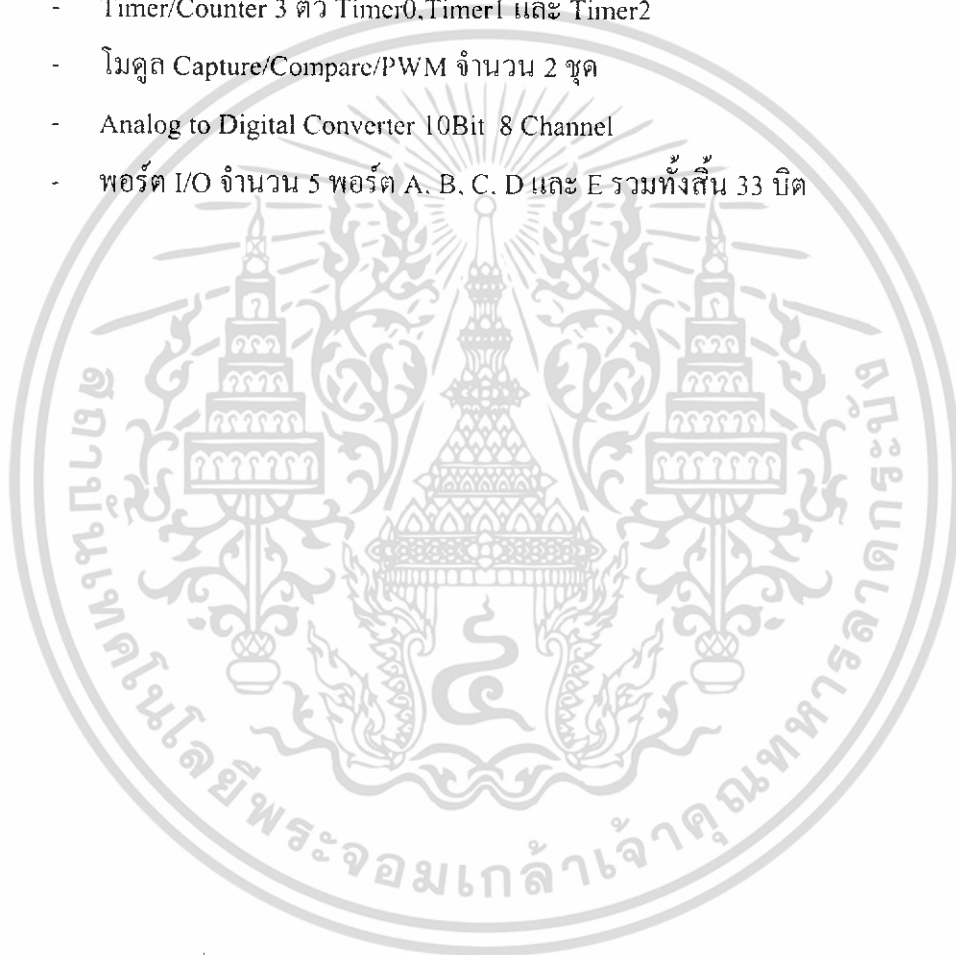
ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกันทำให้เลือกใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม

ในโครงงานนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล PIC เลือกใช้ไอซีเบอร์ PIC 16F877 เพราะมีคุณสมบัติที่ต้องการในโครงงานนี้ และง่ายต่อการโปรแกรมควบคุม คุณสมบัติทั่วไปของ IC 16F877

- 35 Instruction คำสั่ง
- ปฏิบัติคำสั่งทั่วไปใน Cycle เดียว และ 2 Cycle ในคำสั่งการกระโดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำงานที่ความถี่สูงสุด 20 MHz (16F877-20/P)
- หน่วยความจำโปรแกรม 8 K(14 Bit Words)
- หน่วยความจำข้อมูล (RAM) 368 Byte
- EEPROM 256 Byte
- สามารถตอบสนองอินเทอร์รัพท์ 14 แหล่ง
- STACK 8 ระดับ
- สามารถเลือกโหมดของสัญญาณนาฬิกาได้
- กระแสที่ซิงก์ และ ซอร์สของพอร์ต คือ 25 mA
- Timer/Counter 3 ตัว Timer0, Timer1 และ Timer2
- โมดูล Capture/Compare/PWM จำนวน 2 ชุด
- Analog to Digital Converter 10Bit 8 Channel
- พอร์ต I/O จำนวน 5 พอร์ต A, B, C, D และ E รวมทั้งสิ้น 33 บิต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

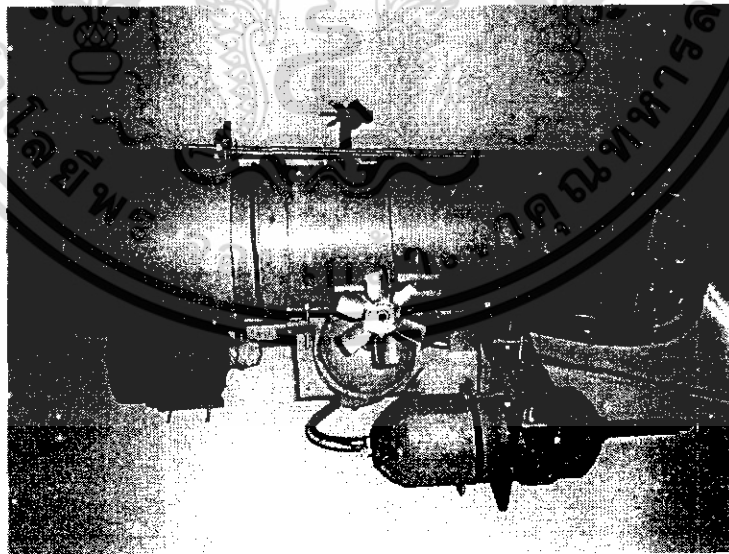
ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบขานสำรวจและวงจรต่างๆที่ใช้ในการควบคุมของขานสำรวจใต้น้ำ หลักการทำงานของวงจร การเชื่อมต่อวงจร การออกแบบระบบควบคุม

3.1 การออกแบบ

3.1.1 ตัวขานสำรวจ

ขานสำรวจที่ทำการออกแบบจะมีลักษณะเป็น โครงสร้างทรงกระบอก ตัวขานสำรวจทำด้วยท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว โดยใช้ฝาครอบปิดหัวท้าย ภายในท่อมีพื้นที่สำหรับใส่ อุปกรณ์และวงจรควบคุมต่างๆ ใ้้ง่ายและสะดวก ปริมาตรอากาศภายในท่อมีมากพอที่จะทำให้ขานสำรวจสามารถลอยน้ำได้ โดยไม่ต้องมีตัวช่วยพยุง สาเหตุที่เลือกใช้ท่อ PVC เนื่องจากท่อ PVC สามารถดัดขึ้นรูปได้ตามต้องการ โดยใช้ความร้อน ตัดต่อใ้้ง่าย มีความคงทนแข็งแรง และหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ซึ่งถ้าหากใช้โครงเหล็กแล้วอาจทำให้เกิดสนิมใ้้ง่ายเนื่องจากขานสำรวจต้องสัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา

การชิล (Shield) ตัวขานสำรวจฝาครอบท้ายจะยึดติดถาวรและเจาะรูเพื่อร้อยสาย ในส่วนตัวถังด้านหน้าจะเจาะรูเพื่อใส่ลูกยางกันน้ำ จำนวน 2 ชั้น



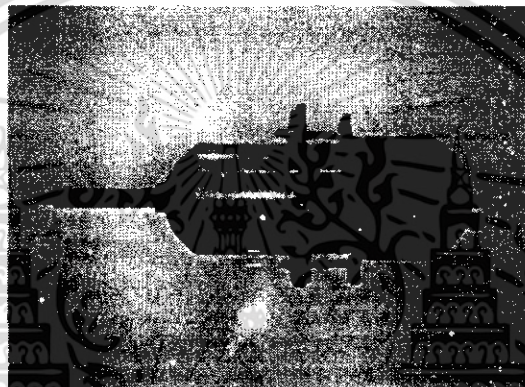
รูปที่ 3.1 ด้านข้างของขานสำรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 มอเตอร์

ใช้ท่อ PVC ที่มีขนาดสามารถสวมใส่ตัวมอเตอร์เข้าไปได้พอดี ใช้ฝาครอบปิดหัวท้าย โดยให้ฝาครอบส่วนหัวยึดติดถาวรและเจาะรูตรงกลางเพื่อให้แกนเพลายื่นออกมาได้ ต่อจากนั้นต่อแกนมอเตอร์กับแกนเพลายื่นออกมาเพื่อติดใบพัด นำท่อเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพลามากถึงเกลียวด้านนอก ส่วนบนของเกลียวทำเป็นบัวเพื่อรองรับลูกยางกันน้ำ นำท่อเหล็กที่ได้มายึดเข้ากับฝาครอบส่วนหัวที่เจาะรูตรงกลางไว้ให้แน่น

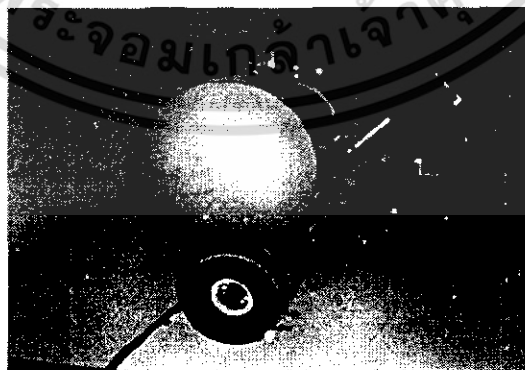
แกนเพลานำมาต่อกับแกนมอเตอร์จะกลิ้งร่องเพื่อใส่ลูกยางกันน้ำ 3 ส่วน คือ ส่วนหัว ส่วนกลาง และส่วนท้าย ตัดถึงด้านท้ายกลิ้งร่องเพื่อใส่ลูกยางกันน้ำแล้วนำฝาครอบท้ายมาปิด ฝาครอบท้ายจะเจาะรูเพื่อร้อยสายไฟ



รูปที่ 3.2 มอเตอร์

3.1.3 กล้องวิดีโอ

ด้านหน้าของยานสำรวจเป็นส่วนของกล้องวิดีโอที่ใช้ในการถ่ายภาพใต้น้ำซึ่งจะถูกบรรจุอยู่ในวัสดุที่กันน้ำ โดยที่ด้านหน้าจะติดด้วยแผ่นอะคริลิกโปร่งแสงเพื่อให้กล้องสามารถถ่ายภาพได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 3.3 กล้องวิดีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรต่างๆ

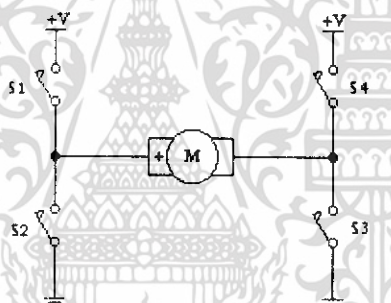
ในส่วนของวงจรที่ติดตั้งอยู่บนยานสำรวจนั้นจะประกอบด้วยวงจรขับมอเตอร์ วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์ วงจรรวมชุดเซนเซอร์ วงจรขับสัญญาณ PWM และวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.2.1 วงจรขับมอเตอร์

ในการสร้างยานสำรวจได้นี้ การควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดีซี มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ในโครงงานนี้ใช้หลักการการทำงานของวงจร H-Bridge Switching เป็นตัวควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์

การนำหลักการของวงจรสวิตช์แบบ H-Bridge นั้น จะประกอบด้วย สวิตช์ 4 ตัว ก็คือ S1, S2, S3 และ S4 ซึ่งในรูปแบบตัวอย่างจะใช้มอเตอร์ดีซีเป็นภาระของวงจร

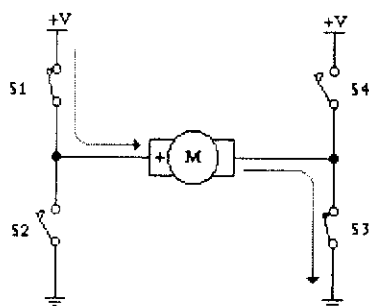
ในสภาวะเริ่มต้น สวิตช์ทุกตัวไม่ทำงานอยู่ ซึ่งไม่มีอะไรเกิดขึ้นทั้งสิ้น เพราะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่มอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4



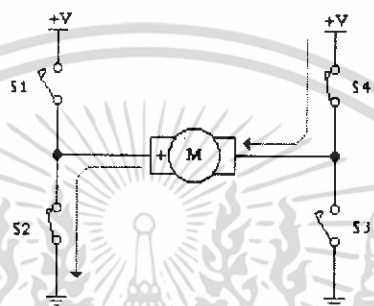
รูปที่ 3.4 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge

เมื่อสวิตช์ S1 และ S3 ทำงานพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 3.5 จะเป็นการเชื่อมวงจร ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วบวกของมอเตอร์ไปยังขั้วลบของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการพันขดลวดภายในมอเตอร์

ในทางกลับกัน ถ้าหากสวิตช์ S2 และ S4 ทำงานพร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 3.6 ก็จะเป็นการเชื่อมวงจร และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมอเตอร์จากขั้วลบของมอเตอร์ไปยังขั้วบวกของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ และเป็นการหมุนในทิศทางกลับทางหมุนกับกับกรณีแรก

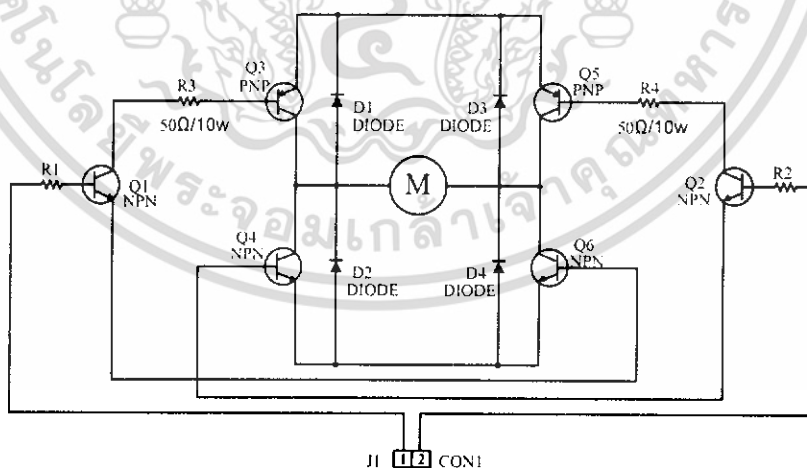


รูปที่ 3.5 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อเปิดสวิตช์ S1 และ S3



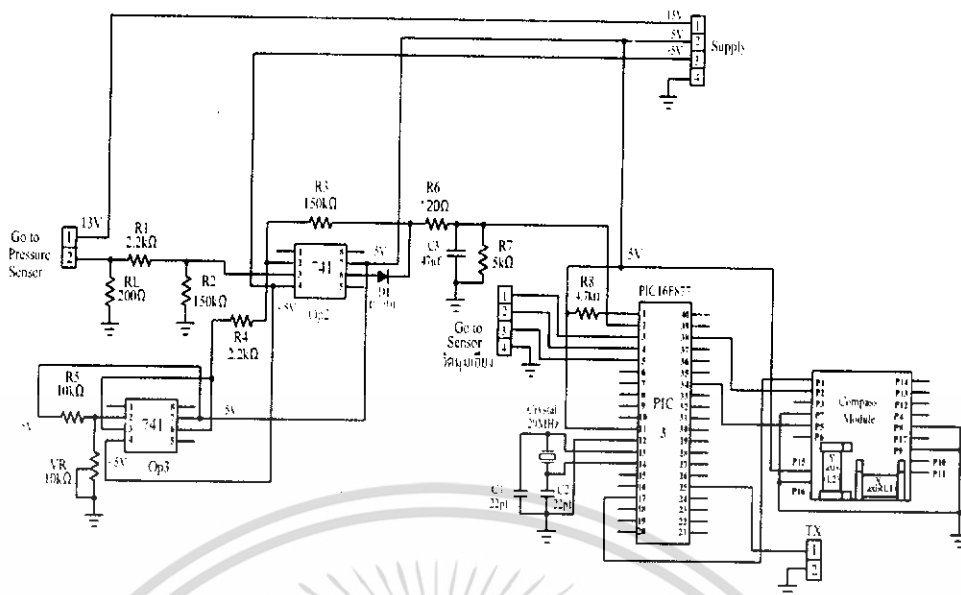
รูปที่ 3.6 วงจรสวิตช์แบบ H-Bridge เมื่อเปิดสวิตช์ S2 และ S4

สรุปว่า วงจรนี้จะอาศัยสวิตช์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมอเตอร์ เพื่อควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่ต้องการ โดยการผลัดสลับการทำงานกัน ทั้ง 2 ตัวนั่นเอง



รูปที่ 3.7 วงจรขับมอเตอร์

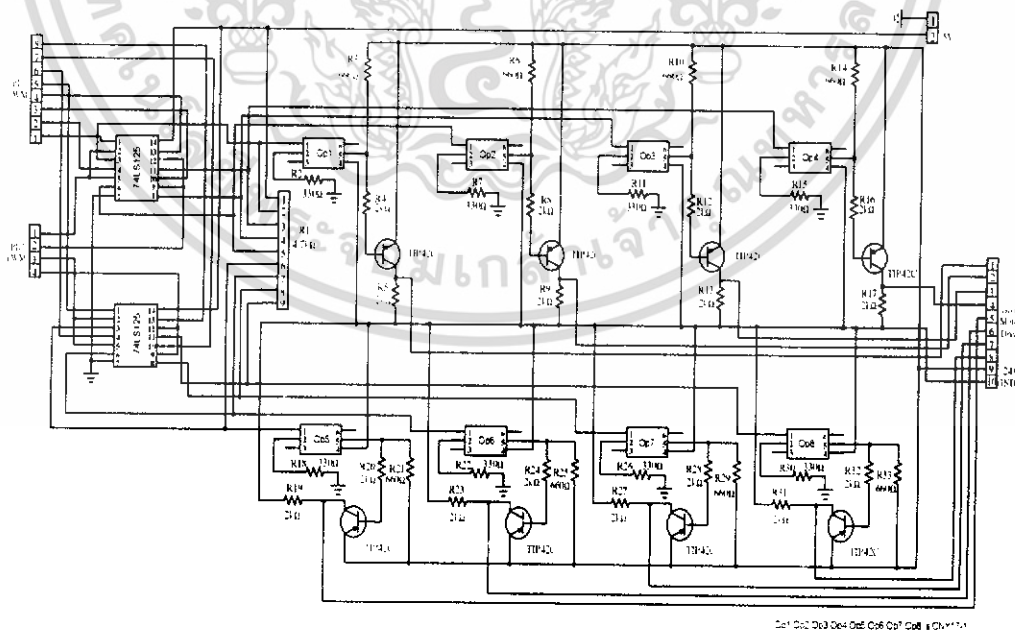
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 วงจรรวมชุดเซนเซอร์

3.2.4 วงจรขยายสัญญาณ PWM

วงจรในรูปที่ 3.10 เป็นวงจรขยายสัญญาณ PWM จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับมาจากวงจรในรูปที่ 3.8 และทำหน้าที่แยกคราวด์ ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับแหล่งจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากมอเตอร์ สัญญาณที่ถูกขยายแล้วจะถูกส่งไปยังวงจรขับมอเตอร์เพื่อเป็นสัญญาณไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์



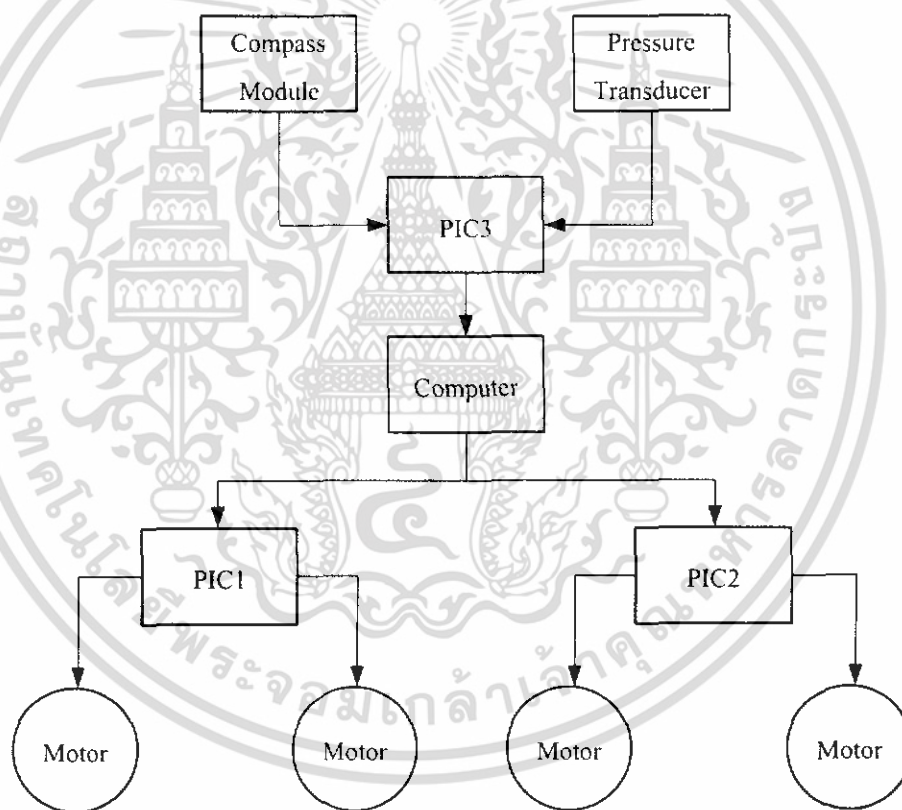
รูปที่ 3.10 วงจรขยายสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมเรือดำน้ำ จะทำโดยใช้คอนโทรลเลอร์ทั้งหมด 3 ตัว จากรูปที่ 3.12 จะแสดงการออกแบบโดย PIC3 จะรับข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้ง 2 ชุด คือค่ามุมและค่าความลึก แล้วจึงนำข้อมูลส่งให้กับคอมพิวเตอร์ เพื่อประมวลผล โดยอาศัยตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นระบบอ้างอิง และสร้างสัญญาณควบคุม ออกมาส่งต่อให้กับ PIC1 และ PIC2 เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์จ่ายให้แก่มอเตอร์ต่อไป

เนื่องจากตัวคอนโทรลเลอร์ PIC3 ตัวสามารถจ่ายสัญญาณพัลส์ได้เพียง 2 ช่องเท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ตัวคอนโทรลเลอร์ 2 ตัว เพื่อจ่ายสัญญาณพัลส์ 4 ช่อง ให้กับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว ซึ่งต้องใช้สัญญาณ PWM ทั้งหมด 4 ช่อง โดยในส่วนของโปรแกรมที่ออกแบบให้กับตัวคอนโทรลเลอร์ทั้ง 2 ตัวได้แสดงรายละเอียดไว้แล้วในภาคผนวก

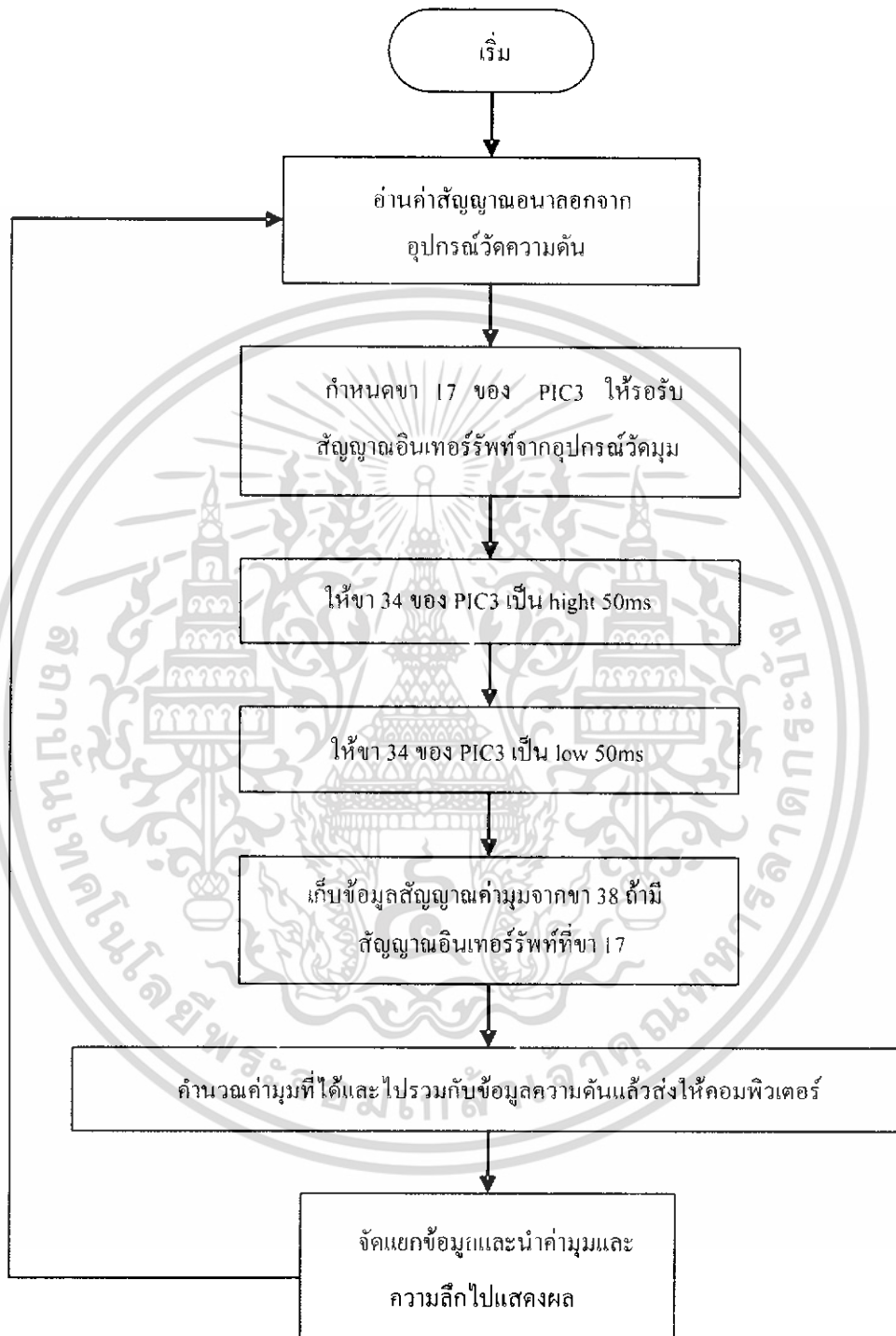


รูปที่ 3.12 แผนผังแสดงการออกแบบระบบควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 แผนภาพกระบวนการรับค่าจากเซนเซอร์

จากวงจรดังรูปที่ 3.9 จะทำการออกแบบโปรแกรมการทำงานของ PIC3 ได้ดังรูปที่ 3.13

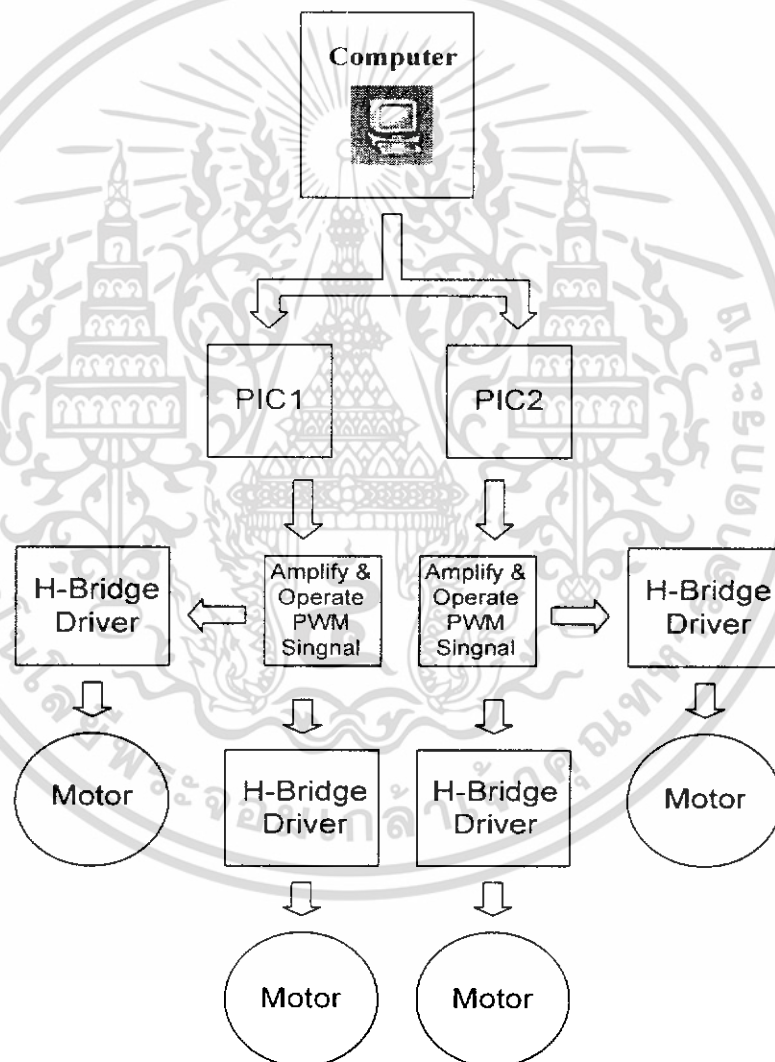


รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานในการรับค่าจากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กระบวนการคำนวณและส่งสัญญาณขับเคลื่อนมอเตอร์

เนื่องจากวงจรที่ใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีอยู่เดิมนั้นได้ชำรุดเสียหายไปบางส่วน ประกอบกับการทำงานของวงจรเดิมนั้นไม่เหมาะกับการทำงานที่ความถี่สูงเนื่องจากเป็นวงจรที่สร้างจากรีเลย์ ซึ่งเป็นการทำงานเชิงกลและมักเกิดการอาร์คเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง ซึ่งจากการทดสอบจะพบว่า การทำงานที่ความถี่ต่ำ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่วงจรจับมาก เป็นผลให้กำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้ามอเตอร์มีค่าลดลง ด้วยเหตุผลนี้วงจรเดิมจึงไม่ซึ่งเหมาะกับการพัฒนาให้ใช้ได้ที่มีความถี่สูงขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงและจัดทำวงจรกลับเฟสมอเตอร์และจ่ายสัญญาณพัลส์ขึ้นมาใหม่ โดยใช้แนวคิดแสดงในรูปที่ 3.14



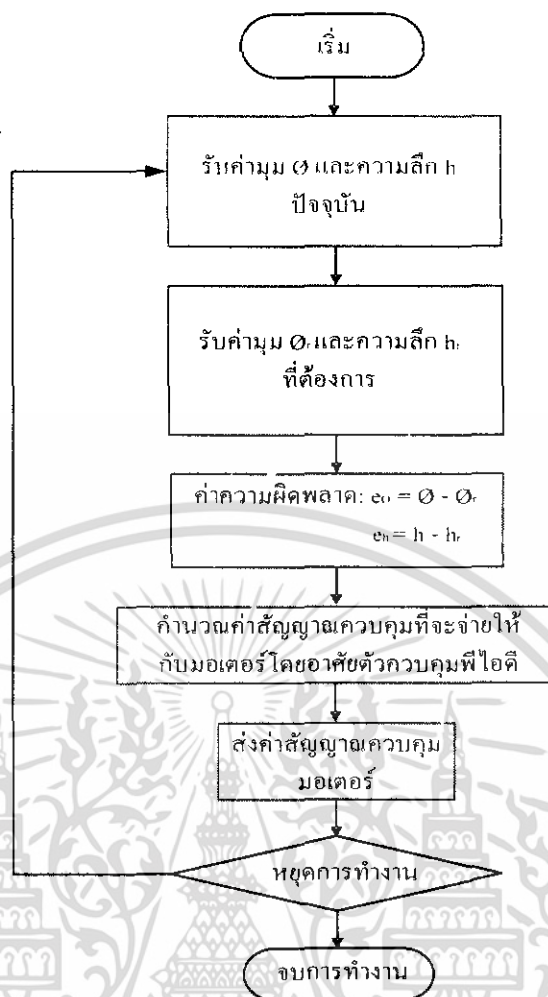
รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงวิธีการส่งสัญญาณและการจ่ายพัลส์ให้มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผังรูปที่ 3.14 ผู้ใช้จะติดต่อกับวงจรขับมอเตอร์โดยผ่านทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งผู้ใช้จะส่งข้อมูลซึ่งเป็นค่าควิตีไซเคิล และทิศทางของมอเตอร์แต่ละตัวโดยใช้โปรแกรม Visual Basic ซึ่งถูกออกแบบมาให้ใช้สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งานโดยตรง จากนั้นคอมพิวเตอร์จะส่งข้อมูลให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นมาสเตอร์หรือตัวหลักคือ PIC1 โดย PIC1 จะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้ และจัดแยกว่าข้อมูลที่ส่งมานั้นจะเป็นค่าควิตีไซเคิลและทิศทางของมอเตอร์ตัวใด จากนั้นจะทำการส่งข้อมูลที่แยกแล้วให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นสเลฟคือ PIC2 เพื่อให้ PIC2 นำไปใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อส่งต่อไปให้แก่วงจรขยายและทำการกำหนดทิศทางของมอเตอร์ต่อไป ซึ่งสัญญาณที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งสองตัวส่งมานั้น ประกอบด้วยสัญญาณพัลส์ จำนวน 4 ช่องสัญญาณที่มีค่าควิตีไซเคิลตามที่ผู้ใช้งานกำหนดเพื่อจ่ายให้แก่มอเตอร์แต่ละตัว และสัญญาณอินเนเบิล (Enable signal) ซึ่งเป็นลอจิก “1” และ “0” เพื่อบอกว่ามอเตอร์ตัวใดจะหมุนทางใดอีก จำนวน 8 ช่องสัญญาณ โดยตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เลือกใช้คือ PIC 16F877A เนื่องจากสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ ซึ่งแต่ละตัวนั้นจะสามารถสร้างสัญญาณพัลส์ได้ 2 ช่องสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ตัวในการสร้างสัญญาณพัลส์ 4 ช่องสัญญาณ และทำการเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลระหว่างกัน จากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังวงจขยายและจัดการสัญญาณพัลส์ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณพัลส์ที่รับมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วส่งให้แก่วงจรขับมอเตอร์ และนอกจากนี้ยังเป็นวงจรที่กำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์แต่ละตัวด้วย โดยวงจรมีจะรับสัญญาณพัลส์มารอไว้ และนำสัญญาณอินเนเบิลมาเป็นตัวกำหนดว่าสัญญาณพัลส์ที่รับมานั้น จะต้องจ่ายให้แก่ฝั่งใดของวงจรขับมอเตอร์เพื่อให้หมุนไปในทิศทางที่ผู้ใช้ต้องการ จากนั้นจะนำสัญญาณพัลส์ที่ได้ส่งเข้าไปยังมอเตอร์แต่ละตัวตามที่ผู้ใช้งานได้กำหนดไว้

3.6 การรับค่าและคำนวณค่าพัลส์ที่จะต้องจ่ายออกไปด้วยโปรแกรม Visual Basic

ผังรูปที่ 3.15 แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าสัญญาณพัลส์ที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์เริ่มต้นจากการรับค่ามุมกับระดับความลึกที่ต้องการ และ คำนวณกับระดับความลึกปัจจุบันซึ่งรับมาจาก PIC3 ที่รับค่าจากอุปกรณ์วัดตั้งกล่าวในหัวข้อ 3.2.3 จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบเพื่อคำนวณค่าความผิดพลาด และนำมาหาสัญญาณควบคุมมอเตอร์โดยอาศัยตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้คาบเวลาของการสุ่มสัญญาณ (Sampling Time) ซึ่งได้จากการทดลองวัดเท่ากับ 150 ms จากนั้นนำค่าที่คำนวณได้ส่งไปยังตัวคอนโทรลเลอร์ PIC1 และ PIC2 คอนโทรลเลอร์ทั้งสองตัวจะส่งสัญญาณ PWM ไปยังวงจขยายสัญญาณ PWM ในรูปที่ 3.10 และส่งสัญญาณ PWM ไปยังวงจรขับมอเตอร์



รูปที่ 3.15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการคำนวณค่าสัญญาณพัลส์ที่จะจ่ายให้แก่มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง เพื่อทดสอบ การทำงานของอุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ควมคุมยานสำรวจได้นำ ทดสอบการทำงานการเคลื่อนที่ในการดำน้ำแบบวงปิดและการเคลื่อนที่หาทิศทางแบบวงปิด

4.1 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน

การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน เป็นการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความลึกที่ตัวเซนเซอร์วัดความดันจ่ายออกมา โดยการทดลองนี้ได้นำเซนเซอร์วัดความดันไปหย่อนลงในท่อ PVC ที่บรรจุน้ำที่มีความลึกประมาณ 150 เซนติเมตร

เมื่อทำการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความลึก จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 และนำค่าที่ได้จากตารางที่ 4.1 มาหาค่าสมการกำลังสองน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความลึก

ระดับความลึก (ซม.)	การทดลองครั้งที่ 1		การทดลองครั้งที่ 2		การทดลองครั้งที่ 3		การทดลองครั้งที่ 4		ค่าเฉลี่ย	
	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น
0	0.03	0.25	0.26	0.03	0.03	0.03	0.03	0.3	0.087	0.152
10	0.03	0.53	0.57	0.63	0.03	0.66	0.61	0.65	0.31	0.617
20	0.7	0.76	0.76	0.81	0.77	0.85	0.82	0.82	0.762	0.81
30	0.91	0.95	0.96	1.05	1.03	1.05	1.01	1.04	0.977	1.022
40	1.11	1.16	1.19	1.25	1.24	1.27	1.27	1.25	1.202	1.232
50	1.33	1.39	1.42	1.47	1.48	1.5	1.46	1.46	1.422	1.455
60	1.56	1.6	1.67	1.66	1.69	1.7	1.69	1.67	1.652	1.657
70	1.74	1.81	1.87	1.87	1.9	1.92	1.91	1.88	1.855	1.87
80	1.97	2	2.07	2.09	2.13	2.12	2.11	2.09	2.07	2.075
90	2.19	2.22	2.3	2.32	2.35	2.33	2.32	2.32	2.29	2.297
100	2.42	2.24	2.52	2.52	2.57	2.57	2.54	2.52	2.512	2.462

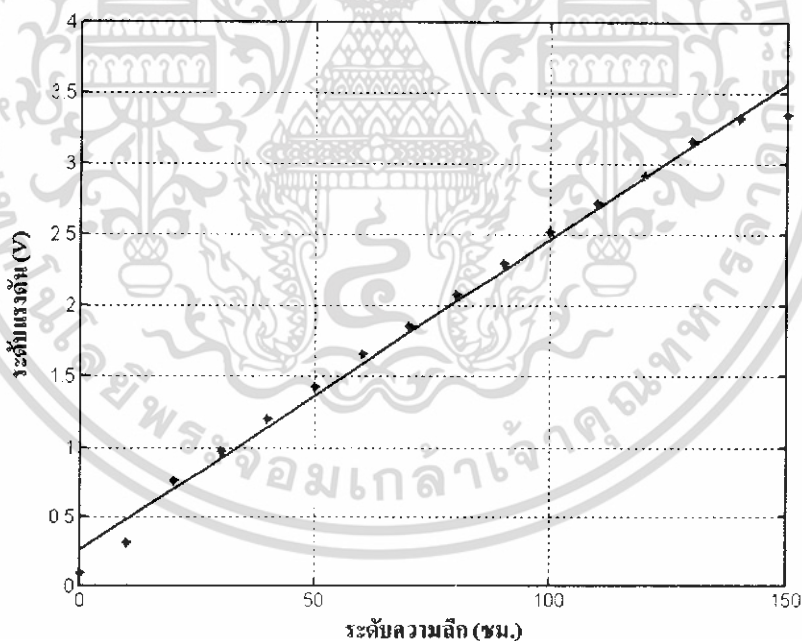
เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงบนเว็บไซต์ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความถี่

ระดับความถี่ (ชม.)	การทดลองครั้งที่1		การทดลองครั้งที่2		การทดลองครั้งที่3		การทดลองครั้งที่4		ค่าเฉลี่ย	
	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง	ขึ้น
110	2.63	2.61	2.74	2.73	2.77	2.76	2.75	2.72	2.722	2.705
120	2.82	2.84	2.93	2.91	2.98	2.96	2.93	2.91	2.915	2.905
130	3.03	3.04	3.17	3.12	3.26	3.23	3.17	3.16	3.157	3.137
140	3.28	3.27	3.33	3.33	3.34	3.34	3.34	3.33	3.322	3.317
150	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35

ใช้คำสั่ง Polyfit ของโปรแกรม MATLAB ในการคำนวณหาสมการเส้นตรง ซึ่งมีลักษณะดังเส้นตรงในรูปที่ 4.1 โดยได้สมการดังนี้ คือ $y = 0.0221x + 0.2576$



รูปที่ 4.1 กราฟการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

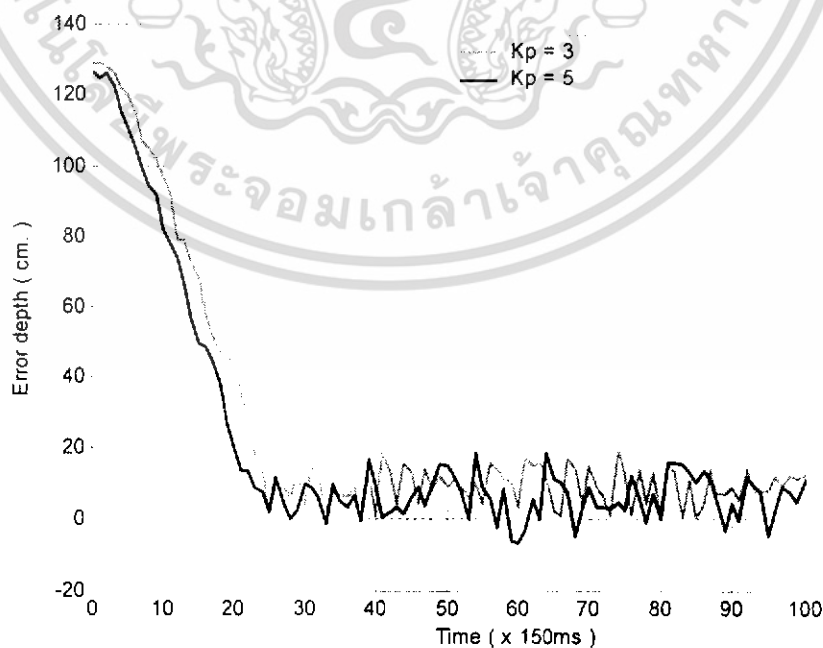
4.2 การทดสอบการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิด

การทดลองนี้เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตการณ์เคลื่อนที่ในการดำน้ำของยานสำรวจใต้น้ำโดยใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆด้วยอัตราขยายที่ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในการดำน้ำของยานสำรวจใต้น้ำด้วยสมการของตัวควบคุมแบบต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอและตัวควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอและแบบดี



รูปที่ 4.2 การทดสอบการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิด

4.2.1 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพี

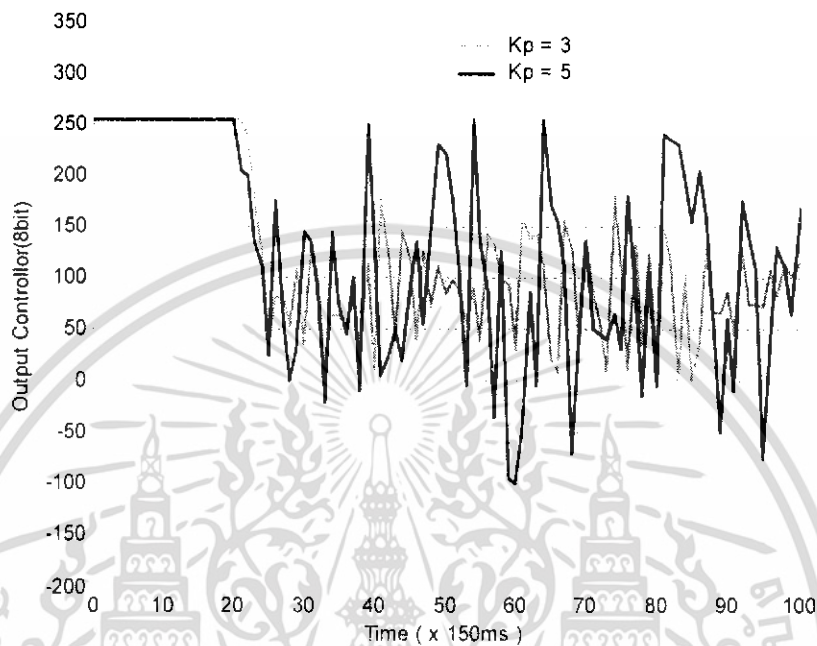


รูปที่ 4.3 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

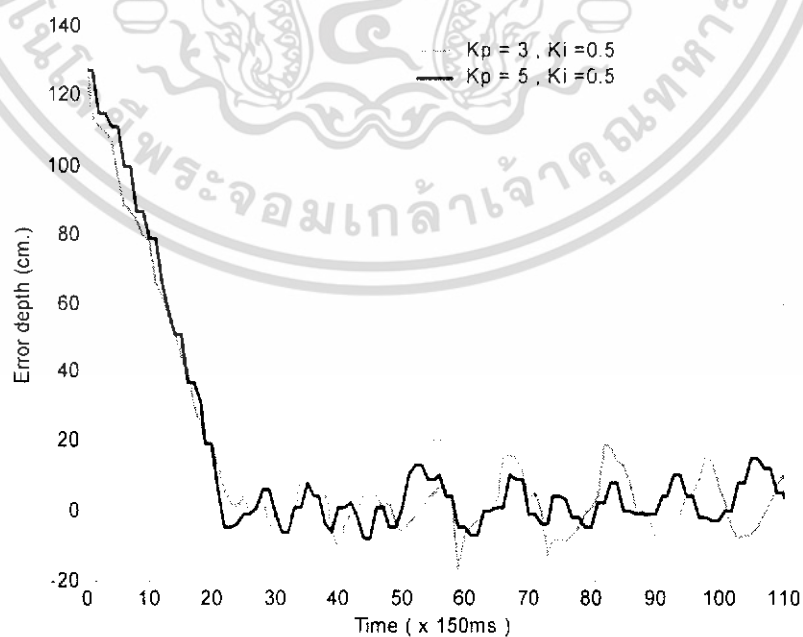
จากรูปที่ 4.3 เป็นการทดลองเพิ่มค่า $K_p = 3$ และ $K_p = 5$ จะเห็นได้ว่าที่ $K_p = 3$ จะมีค่าความผิดพลาดมากกว่า $K_p = 5$ และระบบที่มีค่า K_p มากจะมีเวลาได้ขึ้นเร็วกว่าระบบที่มีค่า K_p น้อย

จากรูปที่ 4.4 เป็นสัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีจะเห็นได้ว่าคอมมานด์ยังไม่อิมิตว์ที่ K_p ค่าน้อยและเมื่อ K_p มากขึ้นคอมมานด์ก็จะเพิ่มตามไปด้วย



รูปที่ 4.4 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพี

4.2.2 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

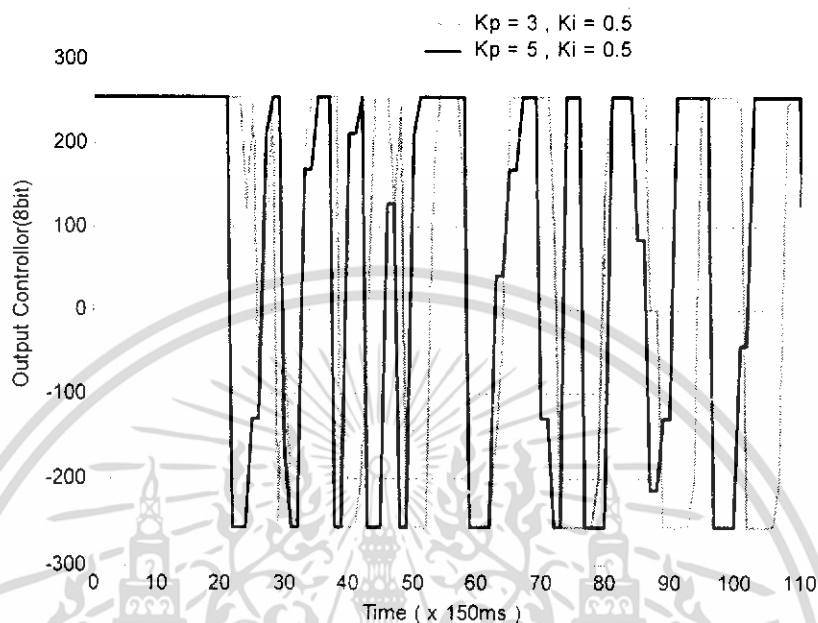


รูปที่ 4.5 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_p

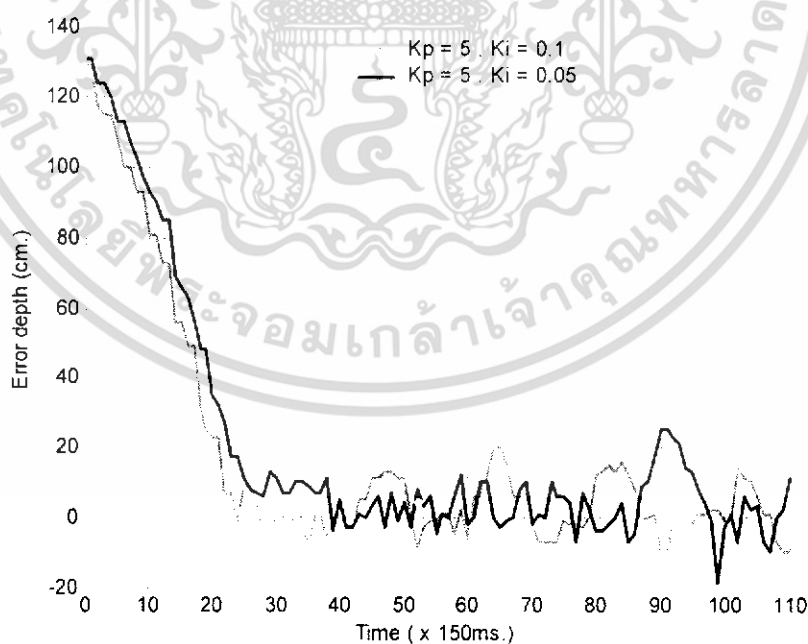
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 เป็นการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p เมื่อค่า K_i คงที่ที่จะเห็นได้ว่าที่ค่า K_p มีค่ามากจะมีช่วงการแกว่งของสัญญาณน้อยกว่า K_p ที่มีค่าน้อย

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าคอมมานด์เริ่มจะอิมตัวแล้วเพราะ K_p มีค่ามากเกินไป



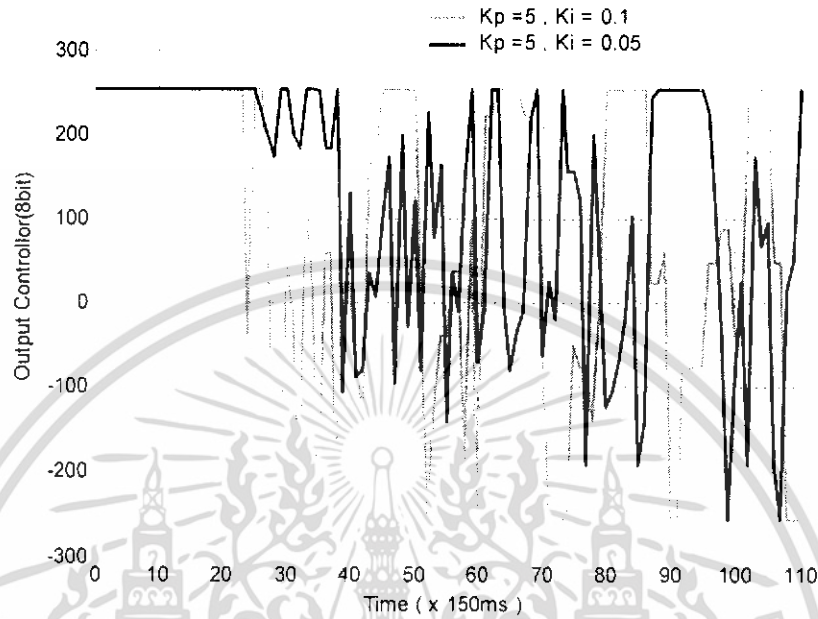
รูปที่ 4.6 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p



รูปที่ 4.7 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i

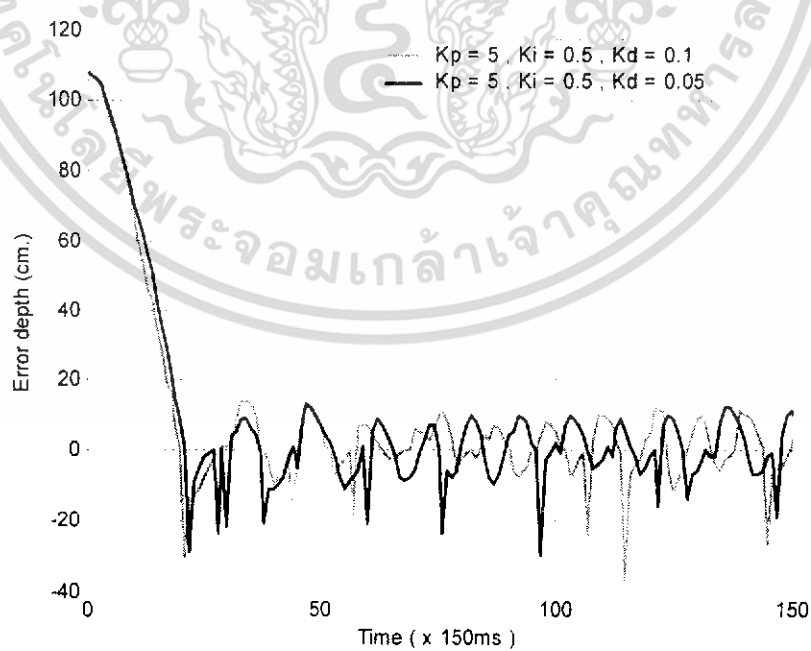
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 เป็นการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_i เมื่อค่า K_p คงที่ จะเห็นได้ว่าที่ค่า K_i มีค่ามากจะมีเวลาได้ขึ้นเร็วและจะเกิดค่าพุ่งเกินมากกว่าระบบที่มีค่า K_i น้อย



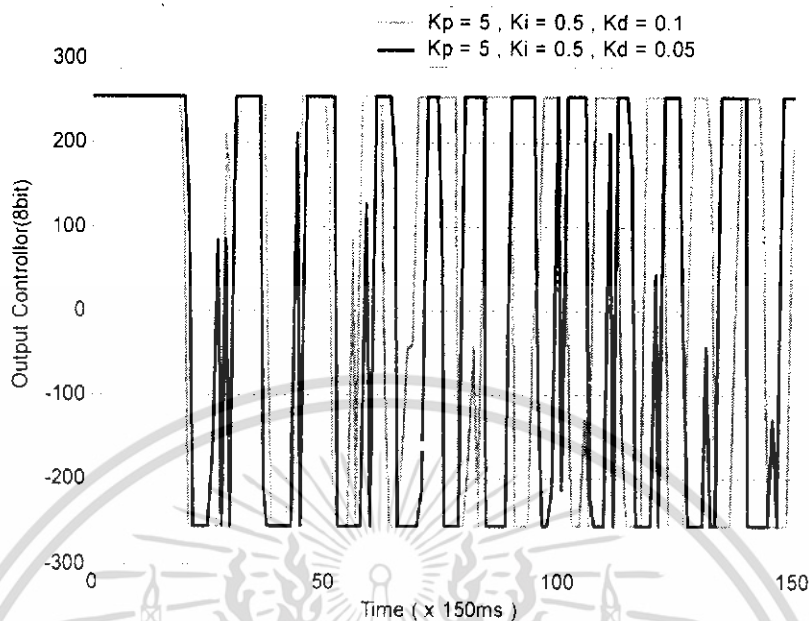
รูปที่ 4.8 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_i

4.2.3 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 4.9 การควบคุมระดับความลึกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_d

จากการทดลองปรับค่าเกน K_p ที่ค่าต่าง ๆ นั้น จะพบว่า ถ้ายังปรับค่าอัตราขยายตัวนี้ให้มีค่ามากเท่าไร จะทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้นเท่านั้นแต่ในขณะเดียวกัน ถ้าปรับค่าเกนตัวนี้เพิ่มขึ้นมากๆ ก็จะทำให้ผลตอบสนองจะเกิดการแกว่งอยู่ระหว่างค่าเซตพอยท์ที่กำหนด

เมื่อพิจารณาการปรับเปลี่ยนเฉพาะค่า K_i นั้น จะช่วยกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัว แต่ถ้า K_i มากจะมีผลตอบสนองเร็วและมีค่าพุ่งเกิน จากการทดลองพบว่าหากใช้ค่า K_i ที่สูงพอ จะทำให้ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนสุดท้ายน้อยที่สุด แต่ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะเกิดการแกว่งของสัญญาณ

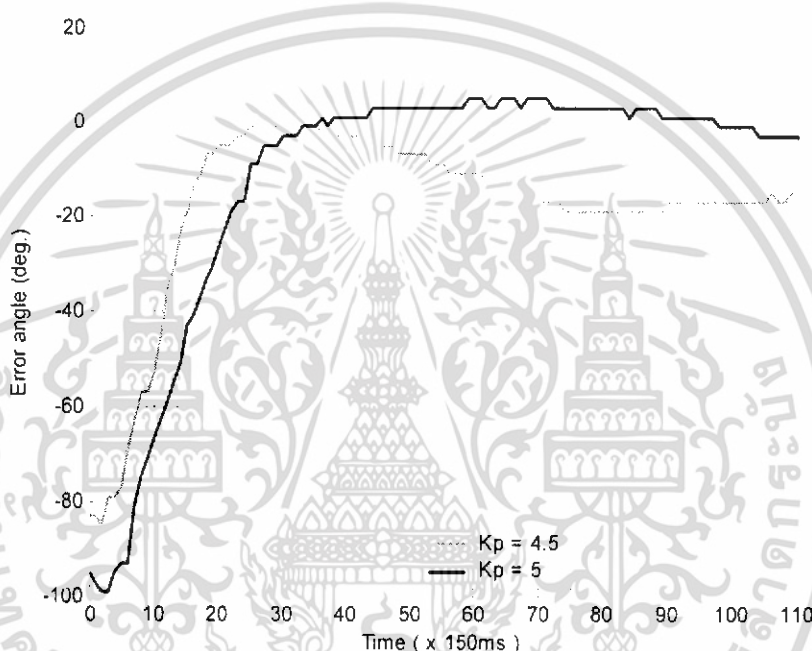
และเมื่อทำการทดลองโดยใส่ตัวควบคุมแบบดิ่งไป ทำให้ได้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี จะพบว่าจะช่วยทำให้สัญญาณนิ่งขึ้นแต่จะมีสัญญาณรบกวน

จากการทดลองการควบคุมระดับความลึกเรพพบว่าระบบนี้สามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือพีไอดีก็ได้

4.3 การทดสอบการควบคุมทิศทางแบบวงปิด (Closed-loop)

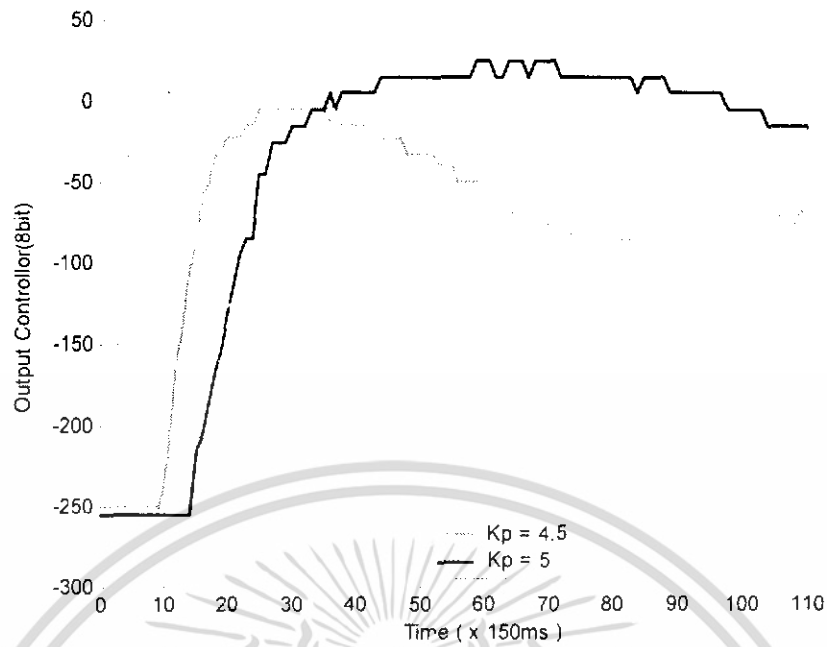
การทดลองนี้ เป็นการทดสอบเพื่อสังเกตการเคลื่อนที่เชิงมุมของเรือโดยใช้ตัวควบคุมแบบต่างๆ ด้วยค่าเกนที่ต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบและหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่เชิงมุมของยานสำรวจได้นำ ด้วยสมการของตัวควบคุมแบบต่างๆ ได้แก่ ตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอและตัวควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอและแบบดี โดยเคลื่อนที่จากมุม 90 องศาไปยังมุม 180 องศา

4.3.1 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพี



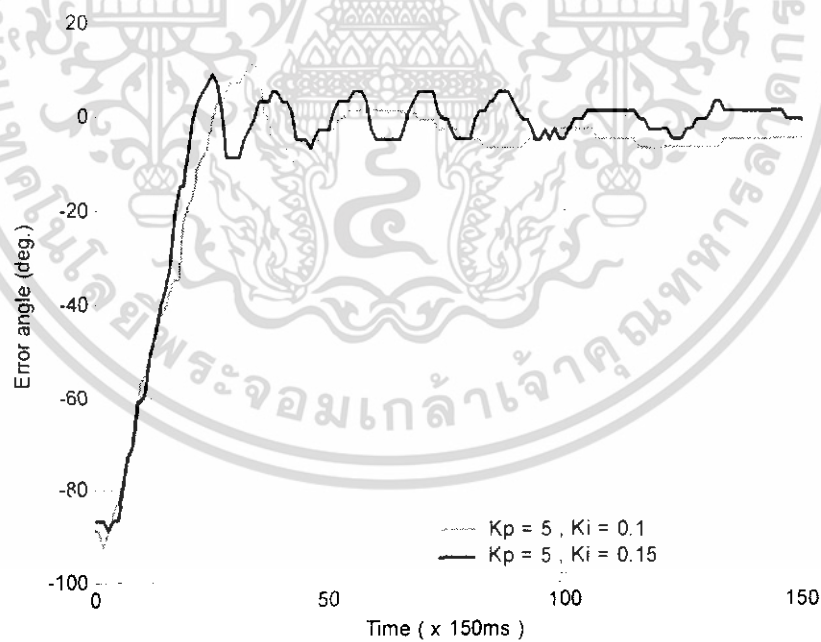
รูปที่ 4.11 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพี

จากรูปที่ 4.11 เป็นการทดลองแปรค่า $K_p = 4.5$ และ $K_p = 5$ จะเห็นได้ว่าที่ $K_p = 4.5$ จะมีความผิดพลาดมากกว่า $K_p = 5$ และระบบที่มีค่า K_p มากจะมีเวลาไต่ขึ้นเร็วกว่าระบบที่มีค่า K_p น้อย และจะเกิดค่าพุ่งเกิน



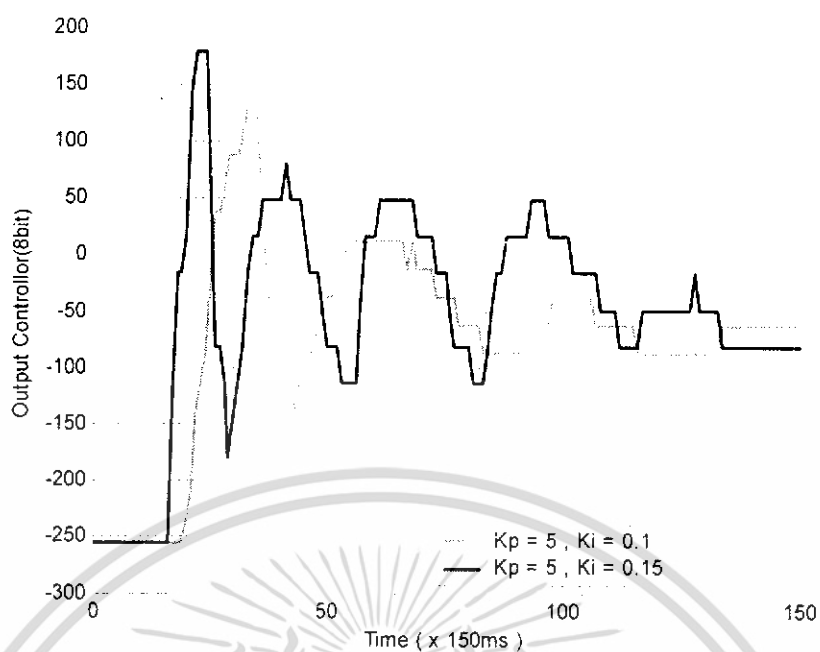
รูปที่ 4.12 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพี

4.3.2 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



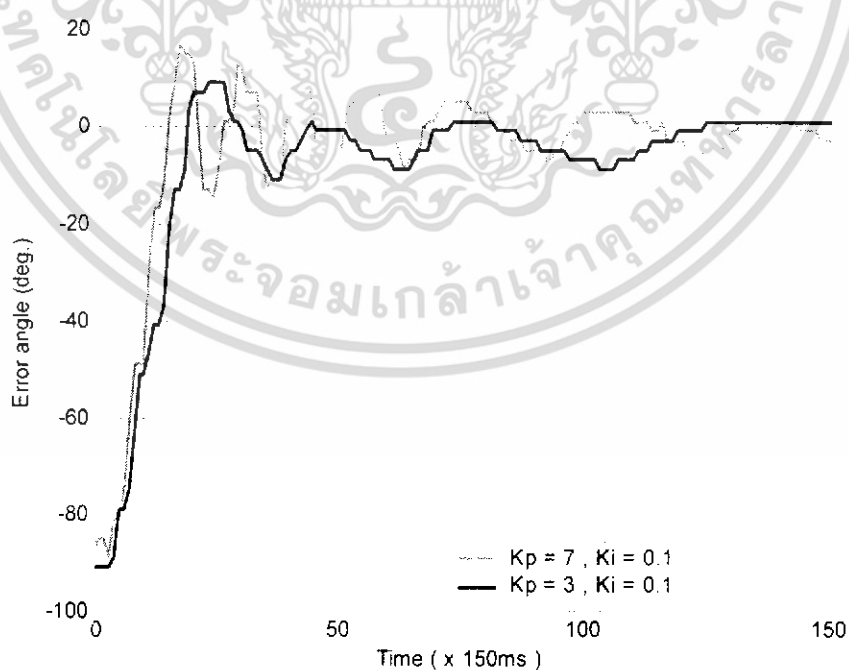
รูปที่ 4.13 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



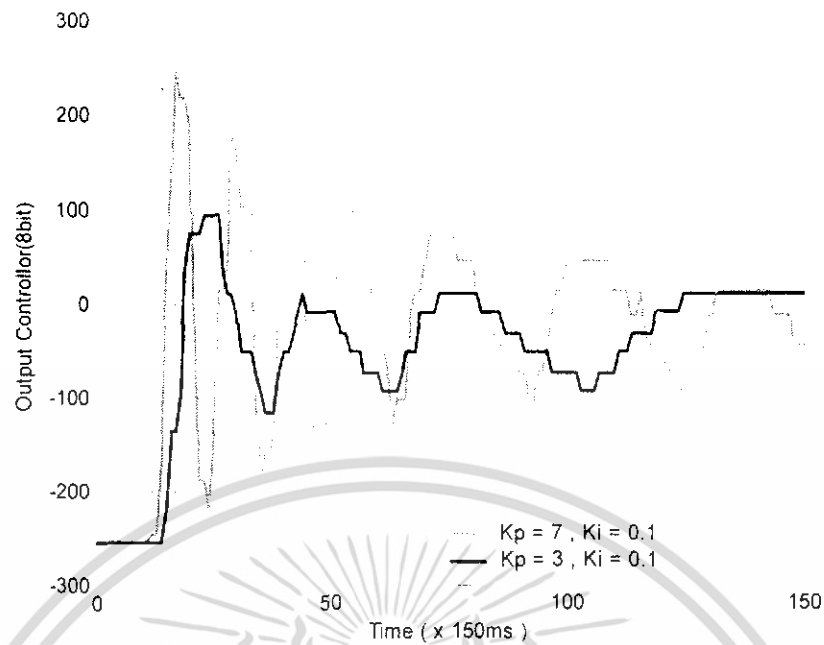
รูปที่ 4.14 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_i

จากรูปที่ 4.13 เป็นการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_i เมื่อค่า K_p คงที่ที่จะเห็นได้ว่าที่ค่า K_i มีค่ามากส่งผลทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณและจะมีเวลาได้ขึ้นเร็วกว่าตัวควบคุมที่มีค่า K_i น้อย



รูปที่ 4.15 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_p

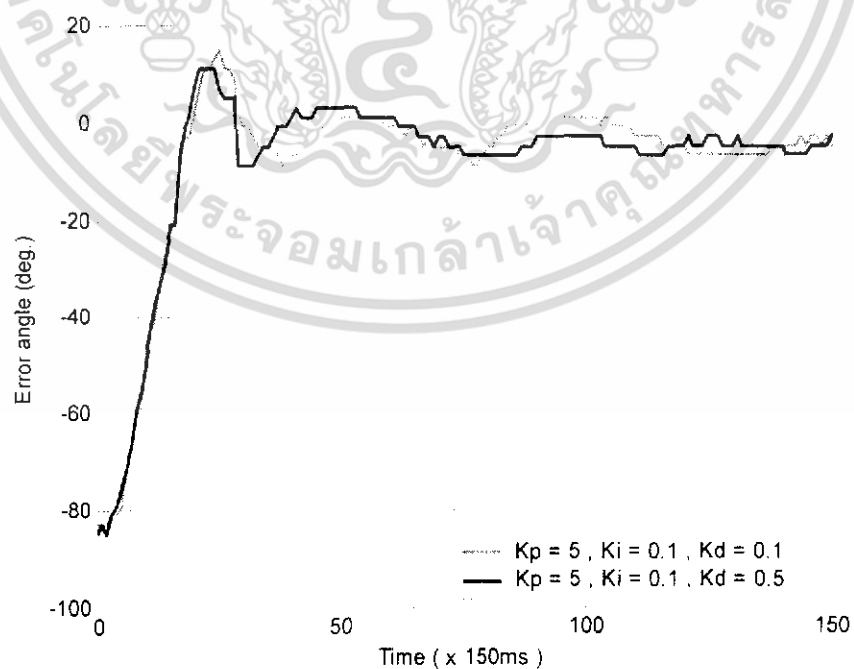
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอโดยแปรค่า K_p

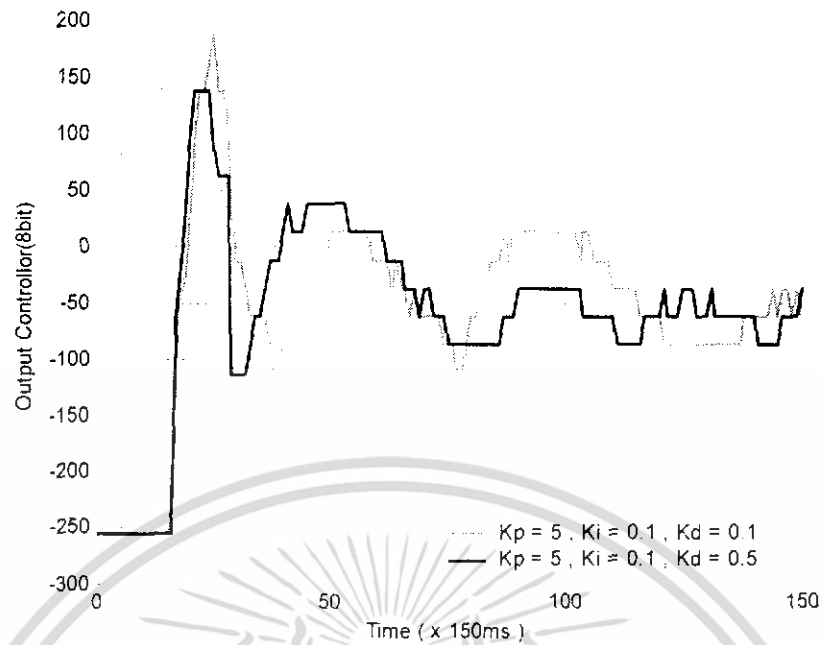
จากรูปที่ 4.15 เป็นการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอ โดยแปรค่า K_p เมื่อค่า K_p คงที่ จะเห็นได้ว่าที่ค่า K_p มีค่ามากจะมีเวลาไต่ขึ้นเร็วขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้มีค่าพุ่งเกินสูงขึ้นด้วย

4.3.3 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี



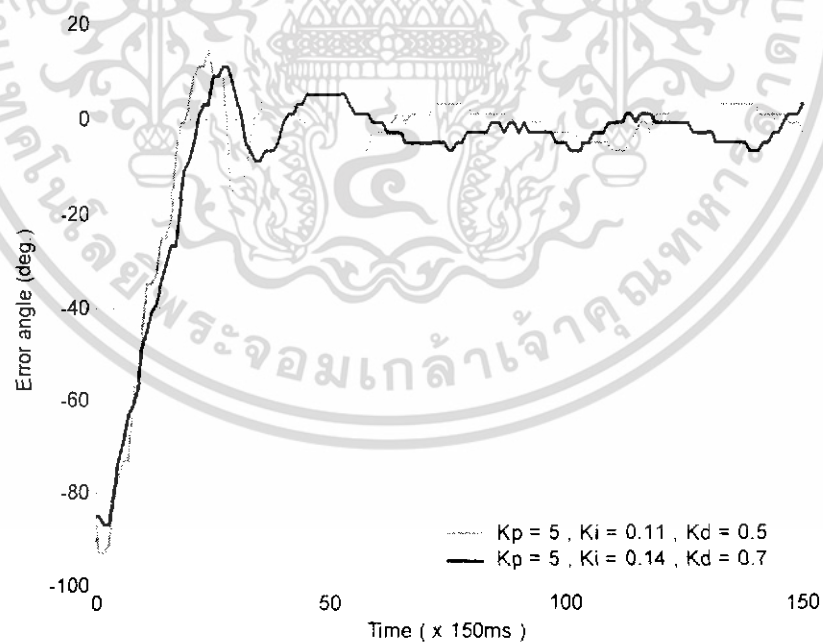
รูปที่ 4.17 การควบคุมทิศทางด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



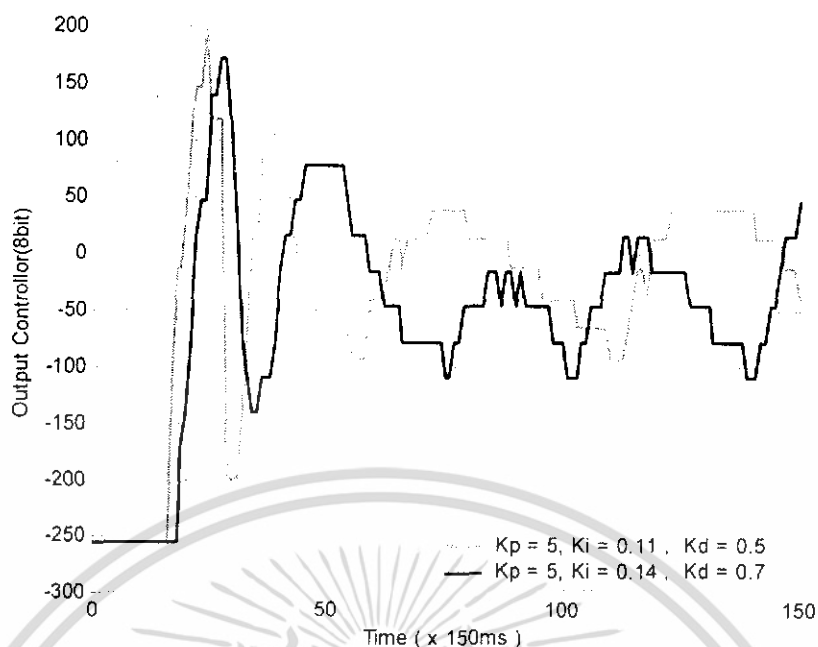
รูปที่ 4.18 สัญญาณอินพุตของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_d

จากรูปที่ 4.17 เป็นการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยแปรค่า K_d ส่วนค่า K_p และ K_i คงที่ จะเห็นได้ว่าที่ค่า K_d มากทำให้ระบบมีค่าพุ่งเกิน และการแกว่งลดลง



รูปที่ 4.19 การควบคุมทิศทางของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_i และ K_d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณอินพุทของมอเตอร์ในการควบคุมแบบพีไอดีโดยแปรค่า K_p และ K_d

จากการทดลองปรับค่าเกน K_p ที่ค่าต่าง ๆ นั้น จะพบว่า ถ้ายังปรับค่าอัตราขยายตัวนี้ให้มีค่ามากเท่าไร จะทำให้ผลตอบสนองเร็วขึ้นเท่านั้นแต่ในขณะเดียวกัน ถ้าปรับค่าเกนตัวนี้เพิ่มขึ้นมากๆ ก็จะทำให้ผลตอบสนองจะเกิดการแกว่งอยู่ระหว่างค่าเซตพอยท์ที่กำหนด

เมื่อพิจารณาการปรับเปลี่ยนเฉพาะค่า K_p นั้น จะช่วยกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัว แต่ถ้า K_p มากจะมีผลตอบสนองเร็วและมีค่าพุ่งเกิน จากการทดลองพบว่าหากใช้ค่า K_p ที่สูงพอ จะทำให้ระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนสุดท้ายน้อยที่สุด แต่ ถ้ามีค่ามากเกินไปจะเกิดการแกว่งของสัญญาณ

และเมื่อทำการทดลองโดยใส่ตัวควบคุมแบบดีลงไป ทำให้ได้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอดีจะพบว่าจะช่วยลดค่าพุ่งเกินและทำให้ระบบเร็วขึ้น

จากการทดลองการควบคุมทิศทางรถเคลื่อนที่เรพบว่ระบบนี้สามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือพีไอดีก็ได้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 ผลสัมฤทธิ์โครงการ

การพัฒนาขานสำรวจได้นำจากในรุ่นแรกที่เป็นการใช้ถังอับเฉาเพื่อการควบคุมการดำขึ้นและค่าลงของเรือ มาเป็นการใช้มอเตอร์โดยอาศัยแรงดูดและเป่าน้ำเข้า-ออก ของมอเตอร์เพื่อการเคลื่อนที่ทั้งแนวตั้งและแนวราบในรุ่นที่ 2 และ 3 จนทำให้เกิดความคิดที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือแบบอัตโนมัติในรุ่นปัจจุบันซึ่งเป็นรุ่นที่ 4 โดยโครงการในรุ่นที่ 4 นี้เป็นการพัฒนาในส่วนของ การควบคุมขานสำรวจได้นำให้เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ซึ่งมีการใช้อุปกรณ์วัดค่ามุมเป็นตัวตรวจจับมุมหันหน้าของเรือ และอุปกรณ์วัดความดันมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับระดับความลึก แล้วนำเอาค่าสถานะปัจจุบันที่ได้และค่าที่ผู้ใช้กำหนด มาทำการประมวลผลและออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อให้สามารถควบคุมการหันหน้าของตัวเรือ และระดับความลึกได้

เนื่องจากใช้มอเตอร์ที่มีคุณลักษณะเหมือนกัน ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์แต่ละตัวนั้น มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันเป็นผลให้การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวเรือทำได้ง่ายขึ้น โดยในส่วนการดำน้ำ แรงดันอินพุตของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะมีค่าเท่ากัน ส่วนการเลี้ยวแรงดันอินพุตของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะมีค่าเท่ากัน แต่จะสลับทิศทางกัน

จากการทดลองในส่วนของการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิด พบว่าตัวควบคุมแบบพีจะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัว ตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อใช้ค่าอัตราขยายที่เหมาะสมจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่สภาพคงตัวหมดไป ส่วนตัวควบคุมแบบพีไอดี พบว่ามีสัญญาณรบกวนจึงสรุปได้ว่าการควบคุมระดับความลึกแบบวงปิดนั้นตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดคือตัวควบคุมแบบพีไอ ส่วนการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่แบบวงปิดจะพบว่าระบบนี้สามารถใช้ตัวควบคุมแบบพีไอหรือพีไอดีก็ได้

5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข

ในส่วนของอุปกรณ์ เนื่องจากอุปกรณ์วัดค่ามุมถูกสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากมอเตอร์รบกวน จึงทำให้การวัดค่ามุมผิดพลาดในบางครั้ง แนวทางในการแก้ไขอาจทำได้โดยนำแผ่นโลหะมาครอบตัวถังมอเตอร์เพื่อไม่ให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมารบกวนอุปกรณ์วัดค่ามุม หรือโดยการปรับตำแหน่งการวางอุปกรณ์วัดค่ามุมให้อยู่ห่างจากมอเตอร์มากยิ่งขึ้น

ในด้านสถานที่เนื่องจากการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของเรื่อนั้น จะสามารถทำได้เฉพาะที่สระว่ายน้ำของสถาบันฯ และสามารถใช้ได้เฉพาะวันจันทร์เท่านั้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการทดลองมีเวลาจำกัด อีกทั้งความลึกสูงสุดก็แค่เพียง 1.6 เมตร ซึ่งจากข้อจำกัดของตัวอุปกรณ์วัดความดันในข้างต้นทำให้ตัวอุปกรณ์วัดความดันไม่สามารถวัดความลึกในช่วงนี้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

5.3 แนวทางในการค้นคว้าและพัฒนา

ในส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่นั้น ขณะนี้ทำการควบคุมแบบอัตโนมัติได้เฉพาะเพียงการควบคุมการหมุนหรือมุมหันหน้าและระดับความลึกเท่านั้น แต่การเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติทั้งในแนวราบและแนวตั้งพร้อมกันยังไม่สามารถทำได้ เนื่องจากปัญหาที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 5.2 นอกจากนั้นอาจติดตั้งและประยุกต์ใช้อุปกรณ์วัดอื่นๆ ร่วมด้วยเพื่อทำให้สมรรถนะของยานสำรวจได้น้ำดียิ่งขึ้น อาทิการใช้อุปกรณ์วัดมุมเอียงเพื่อใช้ในการควบคุมความเอียงของยานสำรวจได้น้ำ

ในส่วนของกล้องและภาพ อาจจะมีการประยุกต์ซอฟต์แวร์ในส่วนของการประมวลผลภาพ (Image Processing) ให้ดียิ่งขึ้น เพื่อการประยุกต์ใช้งานใหม่ๆ และอาจนำเทคโนโลยีเกี่ยวกับภาพมาร่วมใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่

เอกสารอ้างอิง

- [1] กิตติ ภัคดีวัฒนกุล, จำลอง ครูอุตสาหะ. *Visual Basic 6 ฉบับโปรแกรมเมอร์*. พิมพ์ครั้งที่ 12. กรุงเทพมหานคร: เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์. 2547.
- [2] ประจัน พลังสันติกุล. *เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษา C ควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC*. กรุงเทพมหานคร: อินโนเวทีฟ เอ็ดจิวเรียมেন্ট. 2547.
- [3] นพพงษ์ เมธาประสิทธิ์, นรุตม์ วิศิษฎ์วุฒิพงศ์. “ยานสำรวจใต้น้ำด้วยเครื่องควบคุมระยะไกล.” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2546.
- [4] สุตติกร พงษ์พันธุ์, ปัทมาภรณ์ อินทรประสิทธิ์. “การควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ.” *ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2547.
- [5] Remotely Operated Vehicle of the Marine Technology Society. **“ROV Background.”** [Online]. Available : <http://www.rov.org/info.cfm>. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

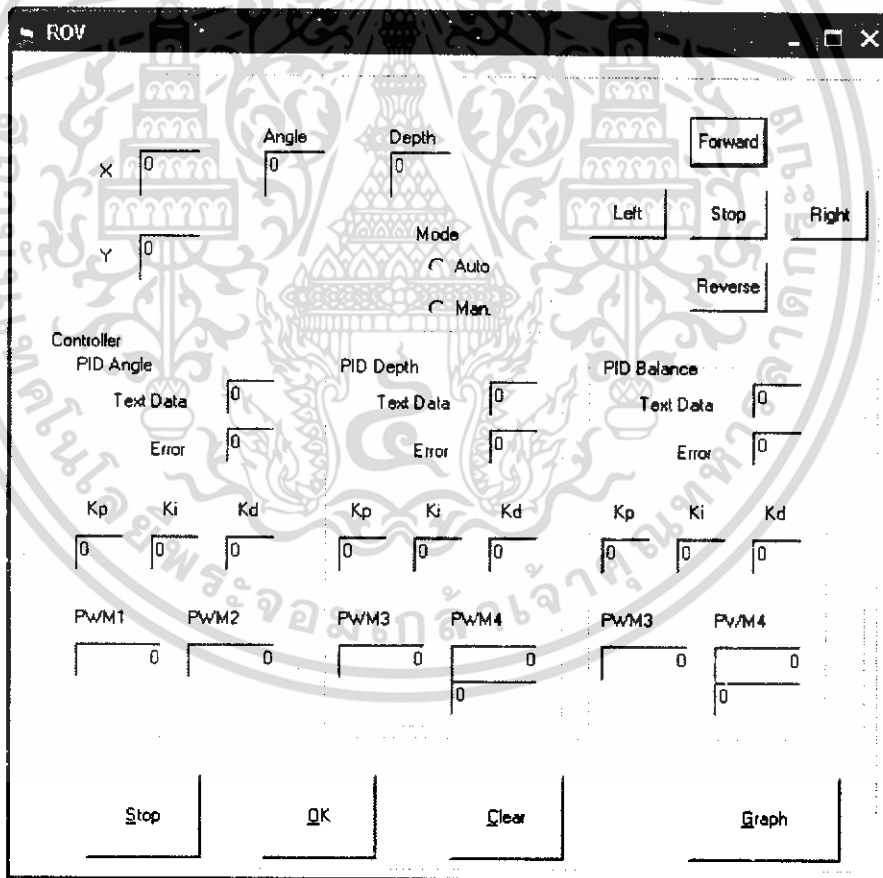
ภาคผนวก ก.

โปรแกรมที่ใช้ในโครงการ

ในบทนี้จะอธิบายถึงส่วนของโปรแกรมต่างๆ ที่ใช้ในโครงการนี้ ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล และส่วนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมยานสำรวจ

ก.1 โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม

โปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุมบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งในโครงการนี้เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Basic นั้น ประกอบด้วยส่วนสำคัญสองส่วน คือส่วนหน้าต่างโปรแกรมที่ใช้งานเพื่อเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (User Interface) และโค้ด (Code) โปรแกรม

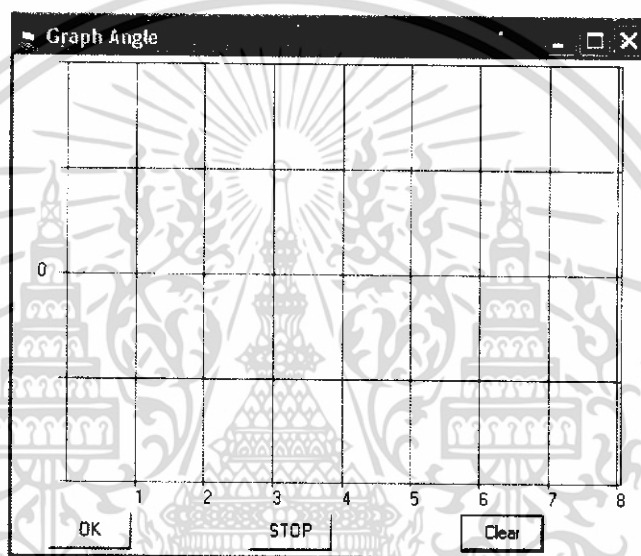


รูปที่ ก.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ควบคุม

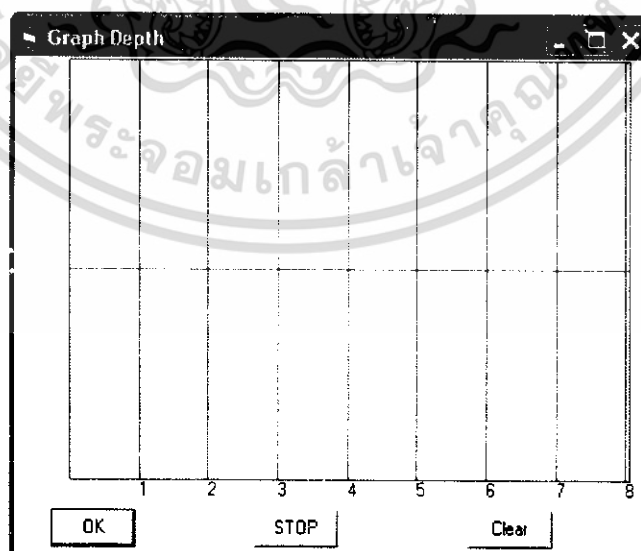
ส่วนหน้าต่างโปรแกรมที่ใช้งานส่วนแรกคือหน้าต่างหลัก ซึ่งจะถูกเปิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยสามารถเลือกโหมดการใช้งานได้ 2 โหมดคือโหมด Manual และโหมดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Auto โดยในโหมด Manual นั้น สามารถควบคุมทิศทางได้โดยการกดปุ่ม Forward , Reverse, Left หรือ Right และเมื่อต้องการให้หยุดการเคลื่อนที่ให้กดปุ่ม Stop และในโหมด Auto นั้น สามารถกำหนดค่ามุมและระดับความลึกที่ต้องการได้ ในช่อง Text Data และสามารถระบุใส่ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีในการใช้งานได้ โดยทั้ง 2 โหมดการใช้งานนี้ โปรแกรมจะแสดงค่ามุมปัจจุบันและความลึกปัจจุบันอยู่ที่ตำแหน่ง Angle และ Depth ตามลำดับ

ในหน้าต่างหลักข้างต้น หากเลือกเปิดปุ่ม Graph โปรแกรมจะเปิดหน้าต่างรองขึ้นสองหน้าต่าง คือหน้าต่างแสดงกราฟทิศทางของยานสำรวจ ดังรูปที่ ก.2 และหน้าต่างแสดงกราฟความลึกของยานสำรวจ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.2 หน้าต่างรองของโปรแกรมแสดงกราฟทิศทางของยานสำรวจ



รูปที่ ก.3 หน้าต่างรองของโปรแกรมแสดงกราฟความลึกของยานสำรวจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนโค้ดสำคัญๆ ของโปรแกรม มีรายละเอียดของโปรแกรมหดังนี้

```

pom1_s = Comm1.Input
Text1.Text = pom1_s

t = Text1.Text // นำข้อมูลที่ส่งมาให้มาให้ทั้งหมดเก็บไว้ในตัวแปร t
c = Len(t)

searchPattern$ = "a" // ค้นหาตัวอักษร "a"
pos1 = InStr(t, searchPattern$)

searchPattern$ = "b" // ค้นหาตัวอักษร "b"
pos2 = InStr(t, searchPattern$)

searchPattern$ = "c" // ค้นหาตัวอักษร "c"
pos3 = InStr(t, searchPattern$)

If pos1 > 0 And pos2 > 0 Then
x1 = pos2 - pos1
If x1 > 0 Then
a = Mid$(t, pos1 + 1, x1 - 1) // นำข้อมูลวัดค่ามุมเก็บไว้ในตัวแปร a
sensor_angle = a
End If
End If

*****

If pos2 > 0 And pos3 > 0 Then
x2 = pos3 - pos2
If x2 > 0 Then
b = Mid$(t, pos2 + 1, x2 - 1) // นำข้อมูลวัดค่ามุมเก็บไว้ในตัวแปร b
sensor_depth = b
End If
End If

*****

error_angle = data_angle - sensor_angle // หากค่าความผิดพลาดของมุม
If error_angle > 0 And error_angle < 180 Then
error_angle2 = error_angle * -1

'Text16.Text = error_angle2

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

End If

If error_angle < 0 And error_angle > -180 Then
error_angle2 = error_angle * -1
End If

If error_angle >= 180 And error_angle <= 360 Then
error_angle2 = ((359 - data_angle) + sensor_angle)
End If

If error_angle <= -180 And error_angle >= -360 Then
error_angle2 = ((359 - sensor_angle) + data_angle) * -1
End If

// คำนวณค่า controller PID ของเซ็นเซอร์วัดค่ามุม
Ka1_M1 = Ka1_text * error_angle2
Ki1_M1 = Ki1_M1_old + (Ki1_text * (Ts / 2 * (error_angle2 + eM1_old)))
Ki1_M1_old = Ki1_M1
Kd1_M1 = ((error_angle2 - eM1_old) / Ts) * Kd1_text
PID_M1 = ((Ka1_M1) + Ki1_M1 + Kd1_M1) + go_speed1
If PID_M1 <> 0 Then
If PID_M1 > 255 Then PID_M1 = 255
If PID_M1 < -255 Then PID_M1 = -255
End If
Text11.Text = PID_M1
motor1 = PID_M1
// ส่งข้อมูลไปให้ Pic #2
Data = "c" + Chr(PID_M1) + Chr(PID_M2) + Chr(Control1) + Chr(Control2) + "d"
Comm1.Output = Data
error_depth = (data_Depth - sensor_depth)
Text13.Text = error_depth

// คำนวณค่า controller PID ของเซ็นเซอร์วัดค่าความลึก
Ka2_M1 = Ka2_text * error_depth
Ki2_M1 = Ki2_M1_old + (Ki2_text * (Ts / 2 * (error_depth + eM2_old)))
Ki2_M1_old = Ki2_M1
Kd2_M1 = ((error_depth - eM2_old) / Ts) * Kd2_text

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PID2_M1 = ((Ka2_M1) + Ki2_M1 + Kd2_M1)
If PID2_M1 <> 0 Then
If PID2_M1 > 255 Then PID2_M1 = 255
If PID2_M1 < -255 Then PID2_M1 = -255
End If
Text17.Text = PID2_M1
motor3 = PID2_M1
// ส่งข้อมูลไปให้ Pic #1
Data = "a" + Chr(PWM_M1) + Chr(PWM_M2) + Chr(Control1) + Chr(Control2) + "b"
Comm1.Output = Data

```

ก.2 โปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงการนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC โดยเลือกใช้เบอร์ PIC 16F877 ซึ่งนำมาใช้งานในโครงการนี้จำนวน 3 ตัว โดยที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC1 และ PIC2 ทั้ง 2 ตัวจะทำหน้าที่รับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์และส่งสัญญาณไปขับมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดของวงจรได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 3.2.2 ส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC3 ทำหน้าที่รับค่าจากอุปกรณ์วัดค่ามุมและอุปกรณ์วัดความดันแล้วส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งรายละเอียดของวงจรได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.2.3

ในการโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ในโครงการนี้จะใช้โปรแกรมภาษาซีเป็นตัวโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้ง 3 ตัว ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมนี้นี้

ก.2.1 โปรแกรมสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ของ PIC1 และ PIC2

```

#include <16f877a.h>
#define TxD    PIN_C6
#define RxD    PIN_C7
#define CLOCK_SP 20000000
#fuses hs
#fuses NOLVP, NOWDT
#fuses NOPROTECT
#use delay(clock=20000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=TxD, rcv=RxD)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

#bit    cren=0x18.4
int i;
int8 k,pwm[6],control,control1,control2;
int16 pwmX,pwmZ;
char strz,data[6];
void main(void)
{
for(k=0; k<=5; k++)
{
data[k] = 0;
}
while(true)
{
while(true)
{
cren=0;
delay_ms(0.01);
cren=1;
strz=getch();
if (strz == 'a')
break;
}
for(k=1; k<=5; k++)
{
data[0]='a';
data[k]=getch();
}
if(((data[0]=='a')&(data[5]=='b')))
{
pwm[1]= data[1] ;
pwm[2]= data[2] ;
pwm[3]= data[3] ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

pwm[4]= data[4] ;
control1 = pwm[3];
control2 = pwm[4];
output_b(control1);
setup_ccp1(ccp_pwm);
setup_ccp2(ccp_pwm);
setup_timer_2(t2_div_by_16,150,1);
set_pwm1_duty(pwm[1]);
set_pwm2_duty(pwm[2]);
}
}
}

```

ก.2.2 โปรแกรมรับค่าและส่งข้อมูลจากอุปกรณ์วัดค่าทั้ง 2 ตัวไปยังคอมพิวเตอร์ของ PIC3

```

#include <16f877A.h>
#define TxD PIN_C6
#define RxD PIN_C7
#define CLOCK_SP 2000000
#fuses HS
#fuses NOLVP, NOWDT
#fuses NOPROTECT
#device ADC=10
#use delay(clock=CLOCK_SP)
#use rs232(baud=9600, xmit=TxD, rcv=RxD)
#use fast_io(A)
#use fast_io(b)

#define Vbe 0.0048875855327468230694037145650049

int data[16];
int16 degree[16];
int d,i,f;
int16 data_real;
int16 data_degree;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#int_ccp1                                //interrupt compass-module
void capture_re(){
d=1;
}

void main(void){
int16 value1,value2,value3;              //start pressure
float volt;
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
do {
set_adc_channel(0);
delay_us(20);
value1=Read_ADC();
set_adc_channel(1);
delay_us(20);
value2=Read_ADC();
set_adc_channel(2);
delay_us(20);
value3=Read_ADC();
set_tris_b(0x3d);
d=0;
i=0;
data_degree=0;
data_real=0;
output_high(pin_b1);                     //pin-P/C
output_low(pin_b1);
delay_ms(15);                             //0.05*delay .015 sec
output_high(pin_b1);
setup_ccp1(ccp_capture_re);
enable_interrupts(int_ccp1);
enable_interrupts(global);
while(true){

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if(d==1){
data[i]=input(pin_b5);
i++;
d=0;
}
if(i>=16)
break;
}
degree[6]=data[6]*200; //data[6]=msb
degree[7]=data[7]*100;
degree[8]=data[8]*80;
degree[9]=data[9]*40;
degree[10]=data[10]*20;
degree[11]=data[11]*10;
degree[12]=data[12]*8;
degree[13]=data[13]*4;
degree[14]=data[14]*2;
degree[15]=data[15]*1; //data[15]=lsb
for (f=6;f<=15;f++){
data_degree=data_degree+degree[f];
data_real=data_degree;
}
for (f=6;f<=16;f++){
degree[f]=0;
data[f]=0;
}
//output_high (pin_d1);
printf("a%d ", data_real); // Send Data of Angle
printf("b%d",value1); // Send Data of depth Pin a0 Pin
number 2
printf("c%d", "");
printf("e");

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//output_low (pin_d1);  
d=0;  
i=0;  
f=0;  
data_degree=0;  
data_real=0; //2*delay.015sec  
delay_ms(15);  
} while(TRUE);  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

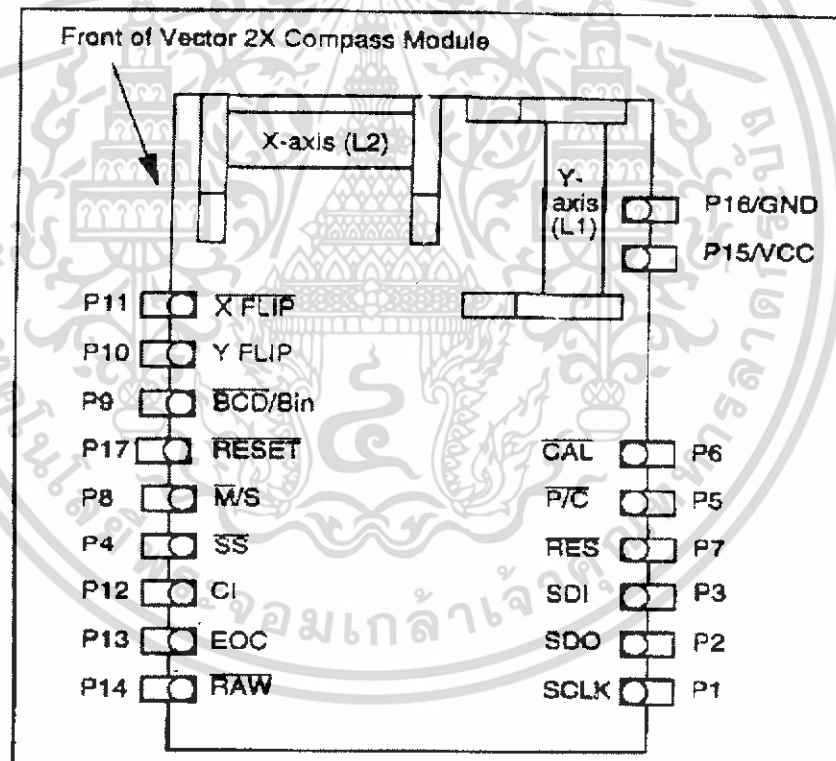
ภาคผนวก ข.

คู่มือประกอบการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในโครงการ

ในส่วนของภาคผนวก ข. จะอธิบายในรายละเอียดสำคัญของ อุปกรณ์วัดค่ามุม อุปกรณ์วัดความดัน และอุปกรณ์ที่ประกอบอยู่ภายในส่วนต่างๆวงจรที่ได้สร้างขึ้นเพื่อควบคุมยานสำรวจใต้น้ำ

ข.1 อุปกรณ์วัดค่ามุม

อุปกรณ์วัดค่ามุมนี้จะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรรวมชุดเซนเซอร์ ซึ่งรูปของวงจรแสดงในรูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดค่ามุมที่นำมาใช้ในโครงการนี้เป็นรุ่น Vector 2X (V2X) ซึ่งผลิตโดยบริษัท Precision Navigation, Inc.



รูปที่ ข.1 ตำแหน่งขาต่างๆของอุปกรณ์วัดค่ามุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pin	Name	Description	Input or Output
P1	SCLK	Serial Clock Input: Data valid on rising clock edge	Input/Output
P2	SDO	Serial Data Output	Output
P3	SDI	Serial Data Input	No Connect
P4	SS	Slave Select: Active Low	Input
P5	P/C	Poll / Continuous: Active when P/C = Low	Input
P6	CAL	Calibrate Select: Active when CAL = Low	Input
P7	RES	Resolution: Low Resolution when RES = Low	Input
P8	M/S	Master/Slave select: Master Mode when M/S = Low	Input
P9	BCD/Bin	BCD/ Binary select: BCD when BCD/Bin = Low	Input
P10	Y FLIP	Flip Y-axis direction. Low = Normal Direction	Input
P11	X FLIP	Flip X-axis direction. High = Normal Direction	Input
P12	CI	Calibrate indicator signal: Active High	Output
P13	EOC	End of Conversion signal: Conversion complete on rising edge of EOC	Output
P14	RAW	Raw data mode select pin: Active Low	Input
P15	VCC	5 volt power input	
P16	GND	Power supply return	
P17	RESET	Reset pin: Active Low	Input

รูปที่ ข.2 Vector 2X FUNCTION DESCRIPTION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันนี้จะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรรวมชุดเซนเซอร์ ซึ่งรูปของวงจรถูกแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดความดัน รุ่น PT150 ผลิตโดยบริษัท Winters Instruments



รูปที่ ข.3 อุปกรณ์วัดความดัน

Specification:

- Electrical Output Signal: 4-20mA, 2 wire (0.5-4.5Vdc, 0.5-5.5 Vdc, 1-5 Vdc 3 wire) available
- Electrical Connection: Mini DIN 43650 style (4pin) connection includes mate (other options available)
- Excitation Voltage: 8-38 Vdc Housing: 316 stainless steel
- Wetted Parts/Connection: 316 stainless steel, (1/4" npt male)
- Proof Pressure: 2X full scale
- Burst Pressure: 3X full scale
- Normal Operating Temp. Range: -30F to 200F (-35C to 100C)
- Compensated Temperature Performance: 0F to 185F (-18C to 85C) Ambient Temp.
Effect on Zero: Less than +/-1.5% FSO per 100F (37.7C)
- Response Time: Less than and equal to 5 milliseconds
- Accuracy: $\pm 0.25\%$ FSO ($\pm 0.1\%$ available)
- Long Term Stability: Less than +/-0.25 FS per annum Weight: 10 oz. (283g)

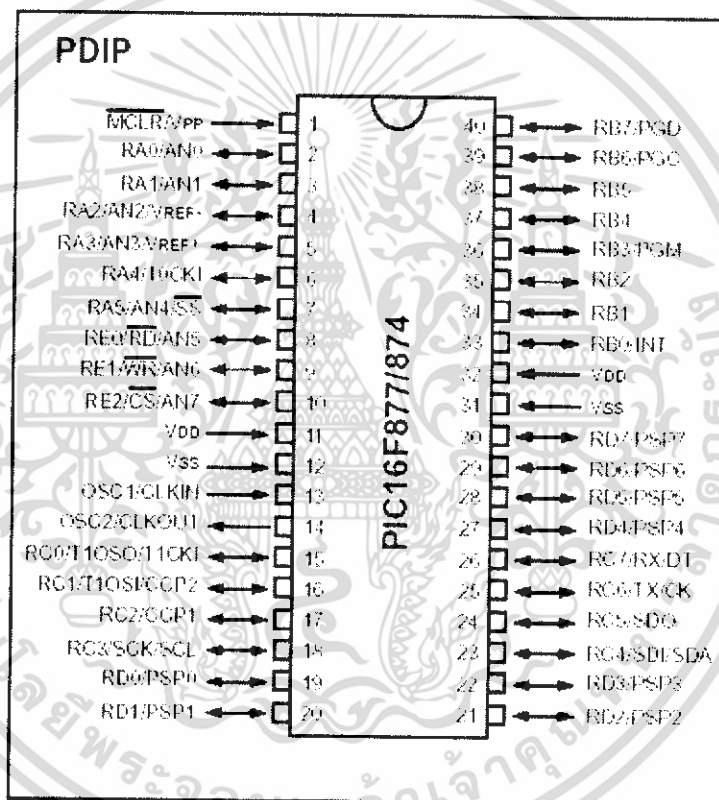
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 อุปกรณ์ต่างๆที่ประกอบในวงจร

เป็นอุปกรณ์ใช้ในวงจรควบคุมยานสำรวจใต้น้ำซึ่งจะประกอบอยู่ในส่วนต่างๆ ของวงจร เป็นไอซีและทรานซิสเตอร์

ข.3.1 ไอซี PIC16F877A

ไอซี PIC16F877A นี้จะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรรวมชุดเซนเซอร์เป็นตัวควบคุมการรับส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์และเป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งรูปของวงจรแสดงในรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9 โดยขาต่างๆของ PIC16F877A แสดงไว้ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 ไอซี PIC16F877A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3.2 ไอซี CNY17-1

เป็นไอซีออปโตไดโอดใช้สำหรับแยกกราวด์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า 5V กับแรงดันไฟฟ้า 12V ออกจากกันเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนซึ่งจะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรขยายสัญญาณ PWM ดังรูปของวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.10

DESCRIPTION
The CNY17 series consists of a Gallium Arsenide IRED coupled with an NPN phototransistor.

FEATURES

- CNY17-1/2/3 are also available in white package by specifying -M suffix (e.g., CNY17-2-M)
- UL recognized (File # E90700)
- VDE recognized
 - 102497 for white package
 - File #102497
 - File #94766
- Current transfer ratio in select groups
- High BV_{CEO} —70V minimum

APPLICATIONS

- Power supply regulators
- Microprocessor inputs
- Industrial controls
- Digital logic inputs
- Appliance sensor systems

CNY17-1	CNY17-3
CNY17-2	CNY17-4

SCHEMATIC

WHITE PACKAGE (-M SUFFIX)

BLACK PACKAGE (NO -M SUFFIX)

Parameters	Symbol	Device	Value	Units
TOTAL DEVICE				
Storage Temperature	T_{stg}	All	-55 to +150	$^{\circ}C$
Operating Temperature	T_{oper}	All	-55 to +100	$^{\circ}C$
Lead Solder Temperature	T_{solder}	All	250 for 10 sec	$^{\circ}C$
Total Device Power Dissipation @ 25 $^{\circ}C$ (LED plus detector)				
Derate Linearly From 25 $^{\circ}C$	P_D	-M	250	mW
		non -M	260	
		-M	2.94	mW/ $^{\circ}C$
		non -M	3.50	
EMITTER				
Continuous Forward Current	I_F	-M	60	mA
		non -M	90	
Reverse Voltage	V_R	All	5	V
Forward Current - Peak (1 μs pulse, 300 dips)	$I_{F(pk)}$	-M	1.5	A
		non -M	3.0	
LED Power Dissipation 25 $^{\circ}C$ Ambient				
Derate Linearly From 25 $^{\circ}C$	P_D	-M	120	mW
		non -M	135	
		-M	1.41	mW/ $^{\circ}C$
		non -M	1.8	
DETECTOR				
Detector Power Dissipation @ 25 $^{\circ}C$				
Derate Linearly from 25 $^{\circ}C$	P_D	-M	150	mW
		non -M	200	
		-M	1.76	mW/ $^{\circ}C$
		non -M	2.67	

รูปที่ ข.5 ไอซี CNY17-1


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3.3 ไอซี SN74LS125A

เป็นไอซีบัฟเฟอร์ใช้สำหรับตัดต่อสัญญาณการทำงานของสัญญาณ PWM และเป็นตัวตัดต่อการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ซึ่งจะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรขยายวงจรถ่ายสัญญาณ PWM ดังรูปของวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.10

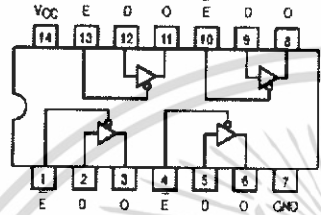
SN74LS125A, SN74LS126A

Quad 3-State Buffers

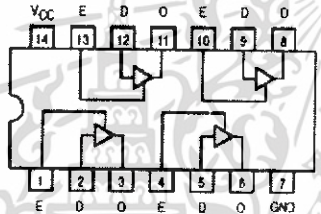


ON Semiconductor™
http://onsemi.com


LOW POWER SCHOTTKY




LS125A




LS126A



PLASTIC DIP SUFFIX CASE 646



SOIC D SUFFIX CASE 751A



SOEIAJ M SUFFIX CASE 965

TRUTH TABLES

INPUTS		OUTPUT
E	D	
L	L	L
L	H	H
H	X	(Z)

INPUTS		OUTPUT
E	D	
H	L	L
H	H	H
L	X	(Z)

L = LOW Voltage Level
H = HIGH Voltage Level
X = Don't Care
(Z) = High Impedance (off)

GUARANTEED OPERATING RANGES

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V _{CC}	Supply Voltage	4.75	5.0	5.25	V
T _A	Operating Ambient Temperature Range	0	25	70	°C
I _{OH}	Output Current - High			2.6	mA
I _{OL}	Output Current - Low			24	mA

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
SN74LS125AN	14 Pin DIP	2000 Units/Box
SN74LS125AD	SOIC-14	55 Units/Rail
SN74LS125ADR2	SOIC-14	2500/Tape & Reel
SN74LS125AM	SOEIAJ-14	See Note 1
SN74LS125AMEL	SOEIAJ-14	See Note 1
SN74LS126AN	14 Pin DIP	2000 Units/Box
SN74LS126AD	SOIC-14	55 Units/Rail
SN74LS126ADR2	SOIC-14	2500/Tape & Reel
SN74LS126AM	SOEIAJ-14	See Note 1
SN74LS126AMEL	SOEIAJ-14	See Note 1


* For ordering information on the EIAJ version of the SOIC package, please contact your local ON Semiconductor representative.

รูปที่ ข.6 ไอซี SN74LS125A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3.4 ทรานซิสเตอร์ TIP122


เป็นทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแสให้สูงขึ้นซึ่งจะประกอบอยู่ในส่วนของวงจรขยาย วงจรขยายสัญญาณ PWM ดังรูปของวงจรที่แสดงในรูปที่ 3.10



TIP120/121/122

Medium Power Linear Switching Applications

• Complementary to TIP125/126/127



TO-220

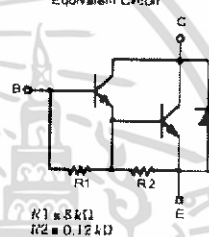
1 Base 2 Collector 3 Emitter

NPN Epitaxial Darlington Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units		
V_{CB0}	Collector-Base Voltage	TIP120 TIP121 TIP122	60 80 100	V	
	V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	TIP120 TIP121 TIP122	60 80 100	V
		V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	5	V
I_C		Collector Current (DC)	5	A	
I_{CP}	Collector Current (Pulse)	8	A		
I_B	Base Current (DC)	120	mA		
P_C	Collector Dissipation ($T_J=25^\circ\text{C}$)	2	W		
	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	65	W		
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$		
T_{STG}	Storage Temperature	-65 - 150	$^\circ\text{C}$		

Equivalent Circuit



$R1 = 8k\Omega$
 $R2 = 0.12k\Omega$

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Max.	Units
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Sustaining Voltage	$I_C = 100\text{mA}, I_B = 0$	60 80 100		V
I_{CEO}	Collector Cut-off Current	$V_{CE} = 30\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
		$V_{CE} = 40\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
		$V_{CE} = 50\text{V}, I_B = 0$		0.5	mA
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB} = 60\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
		$V_{CB} = 80\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
		$V_{CB} = 100\text{V}, I_E = 0$		0.2	mA
I_{EBO}	Emitter Cut-off Current	$V_{BE} = 5\text{V}, I_C = 0$		2	mA
h_{FE}	* DC Current Gain	$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 0.5\text{A}$	1000		
		$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 3\text{A}$	1000		
$V_{CE(sat)}$	* Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 3\text{A}, I_B = 12\text{mA}$ $I_C = 5\text{A}, I_B = 20\text{mA}$		2.0 4.0	V
$V_{BE(on)}$	* Base-Emitter ON Voltage	$V_{CE} = 3\text{V}, I_C = 3\text{A}$		2.5	V
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CE} = 10\text{V}, I_E = 0, f = 0.1\text{MHz}$		200	pF

* Pulse Test: PWS300µs, Duty cycle 52%

รูปที่ ข.7 ทรานซิสเตอร์ TIP42C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

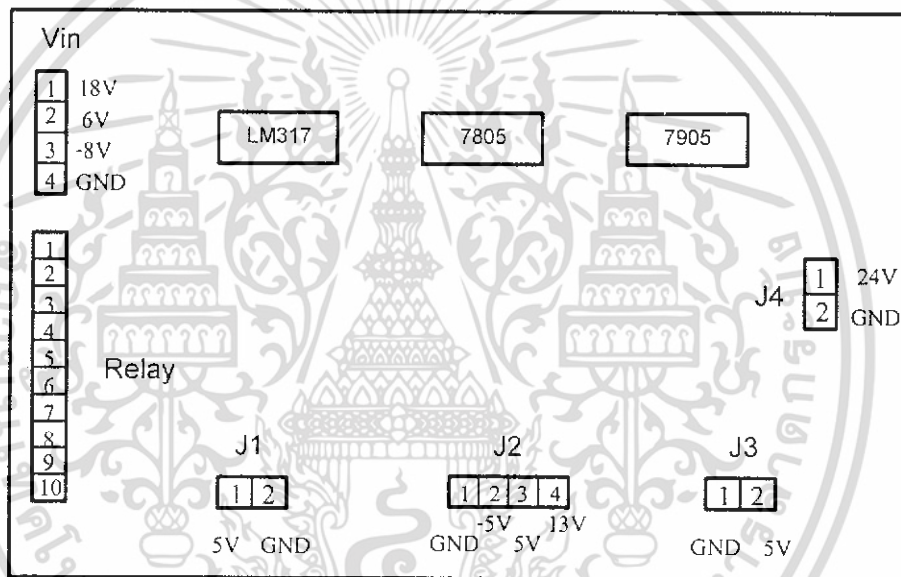
ภาคผนวก ก.

แผนผังอุปกรณ์และการเชื่อมต่อแผงวงจร

ในส่วนของภาคผนวก ก. จะประกอบด้วยแผนผังการวางอุปกรณ์แต่ละวงจรถังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 และจุดเชื่อมต่อระหว่างแผงวงจรแต่ละแผงวงจร

ก.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

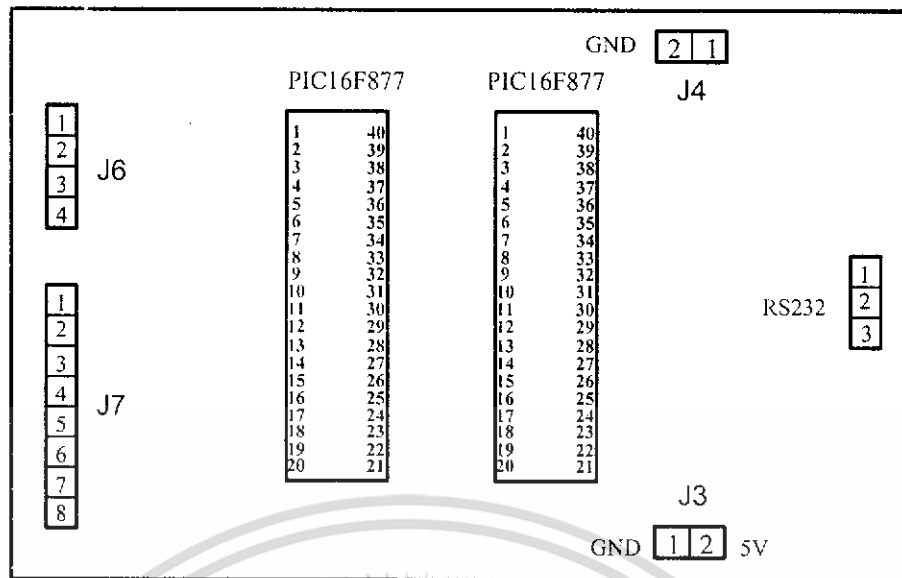
ในวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้านี้ จะประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 6 จุดคือ J1, J2, J3, J4, Vin และ Relay ซึ่งรูปวงจรถังจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.11



รูปที่ ก.1 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้า

ก.2 วงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์

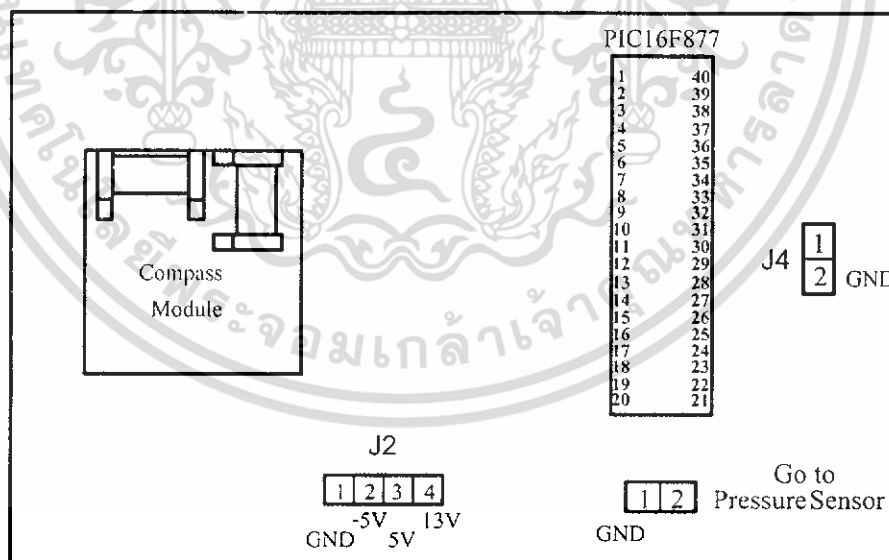
ในวงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์นี้ ประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 5 จุดคือ J3, J4, J6, J7 และ RS232 จุดเชื่อมต่อ RS232 จะนำไปเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งรูปวงจรถังจะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8



รูปที่ ค.2 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับคอมพิวเตอร์

ค.3 วงจรรวมชุดเซนเซอร์

ในวงจรรวมชุดเซนเซอร์นี้ จะประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 3 จุดคือ J2, J4 และจุดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดความดัน ซึ่งรูปวงจรรวมชุดเซนเซอร์นี้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.9

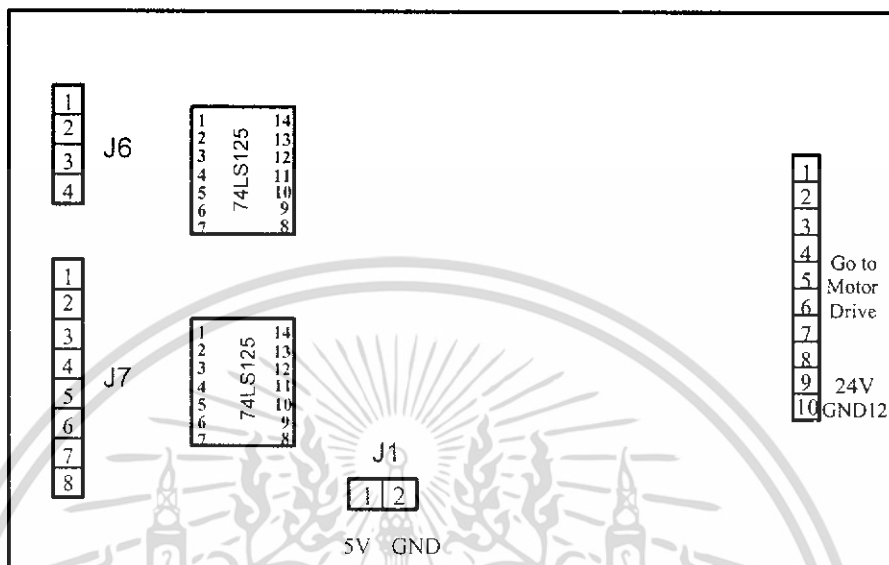


รูปที่ ค.3 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจรรวมชุดเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 วงจรขยายสัญญาณ PWM

ในวงจรขยายสัญญาณ PWM นี้ จะประกอบด้วยจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 4 จุดคือ J1, J6, J7 และ จุดเชื่อมต่อกับวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งรูปวงจขยายสัญญาณ PWM นี้จะแสดงอยู่ในรูปที่ 3.10



รูปที่ ก.4 แผนผังอุปกรณ์และจุดเชื่อมต่อของวงจขยายสัญญาณ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 รูปแบบสีแบบ RGB	6
รูปที่ 2.2 รูปแบบสีแบบ HSV โดยแสดงในรูปของกรวย	6
รูปที่ 2.3 แสดงการทำงานของ Blob Analysis โดยใช้วิธี Floodfill	7
รูปที่ 2.4 การหาตำแหน่งของมาร์กเกอร์โดยวิธี Stereopsis	8
รูปที่ 2.5 แสดงข้อมูลไฟล์ CSM	10
รูปที่ 2.6 แสดงการจัดวางตำแหน่งของกล้อง	11
รูปที่ 2.7 แสดงการทำงานของระบบ	12
รูปที่ 2.8 แผนผังแสดงการประมวลผลภาพเพื่อหาตำแหน่งของมาร์กเกอร์	13
รูปที่ 2.9 แสดงการติดตามมาร์กเกอร์	14
รูปที่ 2.10 แสดงตารางจุดสีของภาพจาก กล้องตัวที่ 1	15
รูปที่ 2.11 แสดงการเกิดการซ้อนทับกันของ Blob	16
รูปที่ 2.12 แสดงการแก้ไขจุดมาร์กเกอร์ที่ตรวจจับไม่พบ	17
รูปที่ 2.13 แสดงตารางจุดมาร์กเกอร์	18
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการทำงานของระบบ	19
รูปที่ 3.2 หน้าต่าง Select Camera	21
รูปที่ 3.3 การวางตำแหน่งกล้อง	21
รูปที่ 3.4 หน้าต่าง Render Scene	23
รูปที่ 3.5 ช่อง Render Output	24
รูปที่ 3.6 หน้าต่าง Render Output File	24
รูปที่ 3.7 หน้าต่าง AVI File Compression Setup	25
รูปที่ 3.8 ตำแหน่งและสีของมาร์กเกอร์ที่ติดกับชุดแสดงด้านหน้า	26
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งและสีของมาร์กเกอร์ที่ติดกับชุดแสดงด้านหลัง	26
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างของโครงกระดูกสำเร็จรูป (Biped)	28
รูปที่ 3.11 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างโครงกระดูกสำเร็จรูป (Biped)	28
รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างวัตถุทรงกลม (Sphere)	29
รูปที่ 3.13 แสดงโปรแกรม Motion Analysis	30
รูปที่ 3.14 แสดงการเปิดไฟล์วีดีโอ จากกล้อง	30
รูปที่ 3.15 แสดงปุ่มที่ใช้ตั้งค่าจุด Blob เริ่มต้นของโปรแกรมวีดีโอของ Camera 1	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

(ต่อ)

รูปที่ 3.16 แสดงปุ่ม Start ที่โปรแกรมวิดีโอของ Camera 1	32
รูปที่ 3.17 แสดงปุ่มที่ใช้วิเคราะห์ตำแหน่งมาร์กเกอร์	32
รูปที่ 3.18 แสดงปุ่มที่ใช้สร้างไฟล์การเคลื่อนไหว	33
รูปที่ 3.19 โมเดลตัวละคร และ โครงกระดูกสำเร็จรูปที่ทำการนำเข้าไฟล์การเคลื่อนไหวไว้	34
รูปที่ 3.20 โครงกระดูกสำเร็จรูปที่จัดรูปร่างให้เหมาะกับ โมเดลตัวละครแล้ว	35
รูปที่ 4.1 การตรวจจับตำแหน่งจุด Blob ในท่าเริ่ม	36
รูปที่ 4.2 (ก) แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 55	37
(ข) แสดงภาพที่ต้องตรวจจับในเฟรมที่ 56	37
รูปที่ 4.3 (ก) ภาพที่ได้หลังการทำ Threshold ในช่วงสีน้ำเงิน	37
(ข) ภาพที่ได้หลังการทำ Threshold ในช่วงสีชมพู	37
(ค) ภาพที่ได้หลังการทำ Threshold ในช่วงสีเขียว	38
(ง) ภาพที่ได้หลังการทำ Threshold ในช่วงสีเหลือง	38
รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 56	38
รูปที่ 4.5 (ก) แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 90	39
(ข) แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 91	39
(ค) แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 92	39
(ง) แสดงตำแหน่งจุด Blob ที่ตรวจจับได้ในเฟรมที่ 93	39
รูปที่ 4.6 (ก) ภาพจากกล้อง 1 แสดงทำการยกแขนออกทั้ง 2 ข้าง	40
(ข) ภาพจากกล้อง 2 แสดงทำการยกแขนออกทั้ง 2 ข้าง	40
(ค) ภาพจากกล้อง 3 แสดงทำการยกแขนออกทั้ง 2 ข้าง	40
(ง) ภาพจากกล้อง 4 แสดงทำการยกแขนออกทั้ง 2 ข้าง	40
(จ) ภาพท่าทางของโครงกระดูกสำเร็จรูปที่ได้จากการนำไฟล์ข้อมูลไปใช้งาน	41
รูปที่ 4.7 (ก) แสดงท่าแกว่งแขนไปตามปกติ	42
(ข) การแสดงท่าแกว่งแขนในเฟรมที่ 28 ก่อนเกิดการ ช้อนทับ	42
(ค) แสดงท่าแกว่งแขนในเฟรมที่ 29 เกิดการช้อนทับ	42
(ง) ภาพจากกล้องที่ 2 ที่มองเห็นจุด Blob	
ในเฟรมที่ 29 ในขณะที่ กล้อง 1 เกิดการช้อนทับ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

(ต่อ)

(จ) ภาพจากกล้องที่ 4 ที่มองเห็นจุด Blob	
ในเฟรมที่ 29 ในขณะที่กล้อง 1 เกิดการซ้อนทับ	42
รูปที่ 4.8 (ก) แสดงท่าทางแขนหมุนตัวตามปกติ	43
(ข) แสดงท่าทางแขนหมุนตัวและดูการติดตามจุด Blob ที่หัวด้านหลังขวา	43
(ค) แสดงท่าทางแขนหมุนตัวและเกิดการซ้อนทับที่ตำแหน่งหัวด้านหลังขวา	43
(ง) แสดงตำแหน่งของท่าทางแขนหมุนตัว	
และเกิดการซ้อนทับที่ตำแหน่งหัวด้านหลังขวา	43
(จ) แสดงตำแหน่งของท่าทางแขนหมุนตัว	
โดยจุด Blob ที่หัวด้านหลังขวาโผล่กลับมา	43

