

หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลและควบคุมความลึก

REMOTELY OPERATED VEHICLE WITH DEPTH CONTROL



สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลฉะบuri

หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลและควบคุมความลึก

สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อปริญญานิพนธ์	หุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกลและควบคุมความลึก
ชื่อ-นามสกุล	นายสุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เน้นการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกลที่ขับเคลื่อนด้วย 4 ไบพัดและควบคุมด้วยจอยสติ๊กผ่านสายสัญญาณ RS-485 ระบบทั้งหมดนี้สามารถขนย้ายได้ง่ายและสะดวก สามารถสำรวจได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็มพร้อมทั้งความสามารถในการรักษาระดับความลึกด้วยการใช้การควบคุมแบบ PID ระบบควบคุมของหุ่นยนต์ค้ำน้ำใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์เข็มทิศ เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม พร้อมกล้องวิดีโอ เพื่อที่จะให้สามารถนำค่ามาประมาณทิศทางการหันเหได้ทั้งใน 3 ทิศทางอิสระใต้น้ำและ ผู้ปฏิบัติการยังสามารถเห็นสิ่งแวดล้อมจากใต้น้ำนี้ได้จากจอมอนิเตอร์

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนแรกจะเป็นการทดสอบแรงที่ได้จากไบพัดด้วยช่วยในการออกแบบหุ่นยนต์ค้ำน้ำ ในส่วนที่สองจะเป็นการทดลองควบคุมรักษาระดับความลึกของหุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกลด้วยระบบควบคุมแบบ PID โดยป้อนกลับระดับความลึกจากเซนเซอร์วัดความดัน โดยส่งงานผ่านจอยสติ๊ก ส่วนที่สามได้ใช้วิธีการกรองสัญญาณแบบคาร์มาน (Kalman Filter) มาช่วยประมาณค่าองศาการหันเหใน 3 ทิศทางโดยใช้ MATLAB ในการทดลองได้ประมาณค่าองศาการหันเหโดยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล

แรงที่ได้จากไบพัดนั้นมีความเป็นเชิงเส้นตามค่าสัญญาณพัลส์ที่ป้อน โดยมีความแม่นยำ 95 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบจริงในสระว่ายน้ำ หุ่นยนต์ค้ำน้ำสามารถรักษาระดับความลึกได้ตามคำสั่ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณร้อยละ 20 เนื่องจากเซนเซอร์มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมและลักษณะการวางตำแหน่งของเซนเซอร์และไบพัด ส่วนการประมาณค่าขององศาการหันเหด้วยวิธีการกรองสัญญาณแบบคาร์มาน ได้ทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB และไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถประมาณทิศทางการหมุนใน 3 แกน มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ 0.4773 เปอร์เซ็นต์ ในสถานะคงที่

คำสำคัญ: ยานค้ำน้ำควบคุมระยะไกล การควบคุมความลึก กรองสัญญาณแบบคาร์มาน

Thesis Title	Remotely Operated Vehicle with Depth Control
Name-Surname	Mr. Surasak Timpitak
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr.Pradya Prempraneerach, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This research focuses on designing and building Remotely Operated Vehicle (ROV) driven by four propellers and controlled by tethered joystick through RS-485. The entire system can be transported very easily and used to survey in both fresh and salt water. To increase this ROV's capacity, a depth control has been developed to maintain a constant depth using a PID control. The control system in this robot is implemented by microcontroller using a pressure sensor, digital compass, accelerometer and gyroscope sensors, and video camera so that the orientation in 3 degrees of freedom can be estimated and underwater environment can be monitored by a user.

The experiments can be separated into 3 parts. The first part of experiments is to measure force from thruster for a ROV-design guidance. In the second part, the depth control of ROV is performed by the PID control with depth feedback from the pressure sensor and received the reference command from the joystick. In the third part, the kalman filter is used to estimate the 3-axis orientation using MATLAB. The experiments fuse the information from the gyroscope and digital compass sensors to estimate the 3-axis orientation.

Thrust force produced by the thruster increases linearly with input motor-drive pulse signal with accuracy of 95%. From experimental tests of ROV in a swimming pool, ROV can be controlled at specified depth according to operator's command with 20% position error because of noise from sensor and environment as well as sensors location relative to thruster location. The orientation estimation with kalman filter using MATLAB and Microcontroller can estimate rotation angles in 3 axes. Kalman Filter yields a steady state angular error of 0.4773%.

Keywords: remotely operate vehicle, depth control, kalman filter

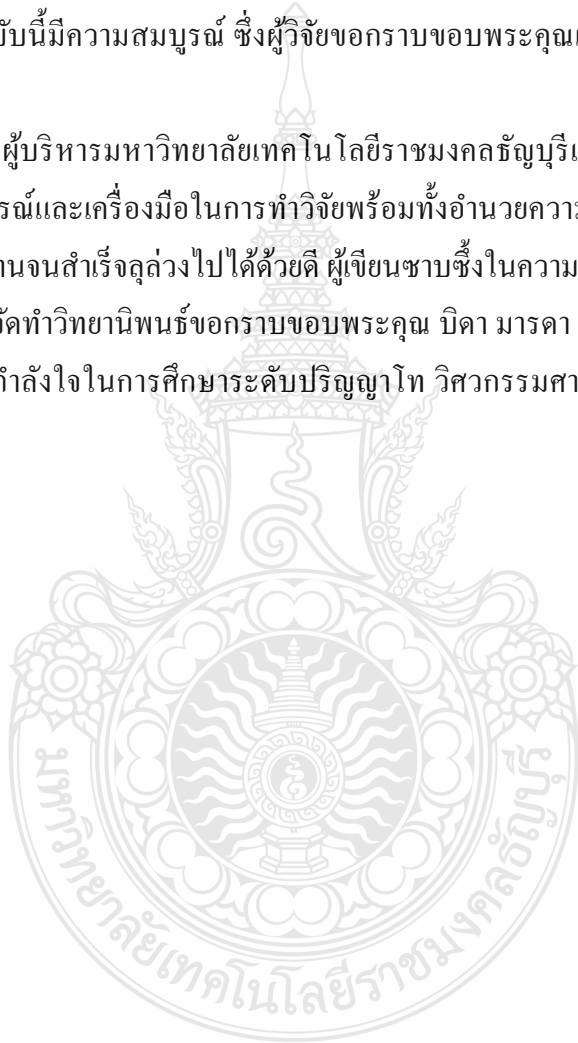
กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.มนุศักดิ์ จานทอง กรรมการสอบ ดร.ปายาณ กุลวานิช ผู้ทรงคุณวุฒิจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยและมีกำลังใจทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์



สารบัญ

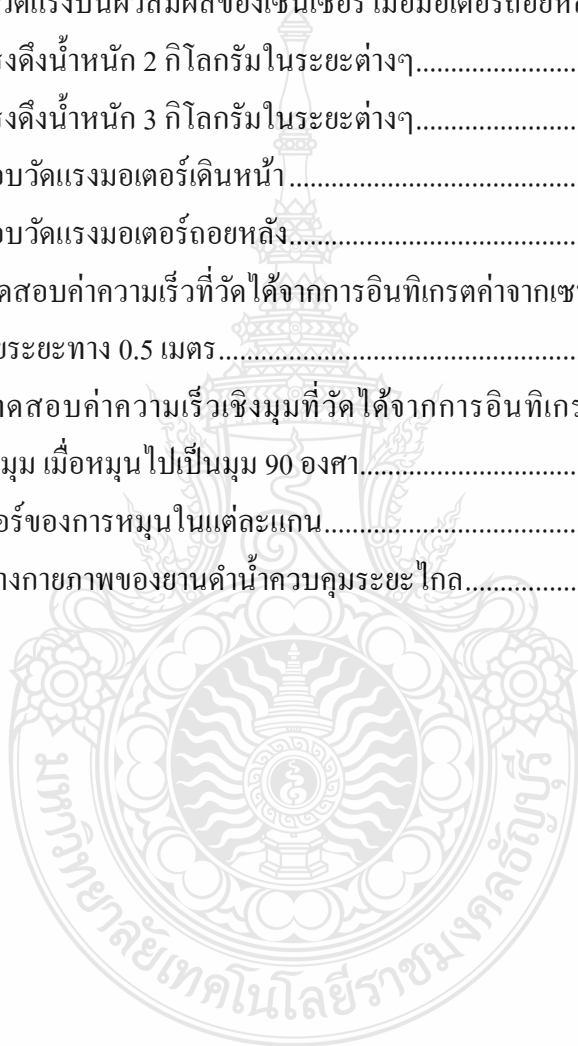
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	4
1.3 สมมติฐานการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำ.....	5
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller).....	6
2.3 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR).....	8
2.4 ทฤษฎีระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID.....	11
2.5 แรงลอยตัว (Buoyant Force).....	12
2.6 เสถียรภาพ (Stable).....	14
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพกับพื้นที่เสื่อน้ำ.....	15
2.8 การทดลองการไหลภายนอก.....	17
2.9 เทคนิค Kalman Filter.....	26
2.10 เทคนิค Extended Kalman Filter.....	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	33
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	33
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
3.3 การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล	37
3.4 เซนเซอร์ในการทดสอบค่า	39
3.5 ผลการคำนวณจากการออกแบบ	43
3.6 ระบบป้อนกลับแบบลูปปิด.....	46
3.7 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter).....	47
4 การทดลอง	49
4.1 การสร้างตัวหุ่น	49
4.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	49
4.3 การติดตั้งและทดสอบมอเตอร์เทียบค่าแรงมอเตอร์จากโมเมนต์.....	50
4.4 การตั้งค่าสูงสุด และต่ำสุดของมอเตอร์	58
4.5 ทดลองวัดความดันจากเซนเซอร์วัดความดัน	59
4.6 การ Calibrate เซนเซอร์.....	61
4.7 การแก้ไขพารามิเตอร์ ด้วยวิธีของ Kalman Filter.....	63
4.8 การทดสอบการควบคุมแบบ PID	71
5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	74
5.1 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง.....	74
5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัย	75
5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาในงานวิจัย.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	79
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	83
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แผนการดำเนินงาน 33
3.2	รายละเอียดการออกแบบ 35
4.1	การทดสอบวัดแรงบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์เดินหน้า 52
4.2	การทดสอบวัดแรงบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์ถอยหลัง 52
4.3	ทดสอบที่แรงดึงน้ำหนัก 2 กิโลกรัมในระยะต่างๆ..... 55
4.4	ทดสอบที่แรงดึงน้ำหนัก 3 กิโลกรัมในระยะต่างๆ..... 56
4.5	ตารางทดสอบวัดแรงมอเตอร์เดินหน้า..... 57
4.6	ตารางทดสอบวัดแรงมอเตอร์ถอยหลัง..... 57
4.7	ตารางการทดสอบค่าความเร็วที่วัดได้จากการอินทิเกรตค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งเมื่อเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 0.5 เมตร..... 62
4.8	ตารางการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากการอินทิเกรตค่าจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เมื่อหมุนไปเป็นมุม 90 องศา..... 63
4.9	ค่าพารามิเตอร์ของการหมุนในแต่ละแกน..... 66
5.1	คุณสมบัติทางกายภาพของยานดำน้ำควบคุมระยะไกล..... 74



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 The SeaBotixLBV300-6 is a powerful MiniROV	1
1.2 VideoRay Pro 4	2
1.3 ยานใต้น้ำอัตโนมัติ	3
1.4 ThaiXPole Underwater Robot	3
2.1 การควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์	6
2.2 การออกแบบคอนโทรลเลอร์	8
2.3 การกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์	9
2.4 การใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน	9
2.5 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง	10
2.6 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าคิวดีซีเกิดของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่	11
2.7 ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ	12
2.8 หลักการสองวิธีที่นำไปหาแรงลอยตัวของวัตถุจม	14
2.9 ความสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของวัตถุลอย	14
2.10 การคำนวณหาจุดศูนย์กลางเมตา M ของวัตถุลอยซึ่งแสดงได้สามกรณี	16
2.11 การลอยตัววัตถุเมื่อเอียงผ่านมุม θ เล็กน้อย	16
2.12 บทนิยามของแรงและโมเมนต์บนวัตถุที่จมในการไหลแบบเอกรูป	18
2.13 แรงต้านจะเกิดขึ้นถ้าการไหลขนานกับทั้งสองระนาบที่สมมาตรกัน	19
2.14 แรงต้านของเส้นการไหลทรงกระบอกสองมิติที่ $Re = 106$	20
2.15 การไหลผ่านทรงกระบอกกลม	22
2.16 การไหลแยกตัวเป็นชั้นและปั่นป่วนบนลูกโบว์ลิ่ง 216 มิลลิเมตร น้ำ 7.6 เมตร/วินาที ..	22
2.17 การไหลเพื่อลดแรงต้านของวัตถุ ค่า C_D สัมพันธ์กับพื้นที่ฉายด้านหน้า	23
2.18 สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุเรียบที่เลขมัคต่ำ	24
2.19 ข้อมูลแรงต้านบนพื้นที่ฉายด้านหน้าของวัตถุสองมิติที่ค่า $Re_d \geq 10^4$	25
2.20 แรงต้านของวัตถุสามมิติที่ $Re_d \geq 10^4$	26
2.21 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman Filter ที่เวลา t ใดๆ	27
3.1 หุ่นยนต์ดำน้ำที่ประกอบเสร็จ	35
3.2 แผนภาพอุปกรณ์หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.3	หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล..... 37
3.4	ถังเก็บแสงวงจรควบคุม 38
3.5	โครงสร้างและแท่นจับยึดมอเตอร์ 38
3.6	แท่งโฟม..... 39
3.7	เซนเซอร์วัดความดัน..... 40
3.8	เข็มทิศแบบดิจิตอล (Digital Compass)..... 41
3.9	เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelometer) ของ Pololu 41
3.10	หลักการพื้นฐานของการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่ง 42
3.11	เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) ของ Pololu 42
3.12	แผนบล็อกไดอะแกรมระบบป้อนกลับแบบ PID..... 46
4.1	หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลและตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์..... 49
4.2	เซนเซอร์ 3 แกนที่ใช้ในการวัดค่า 50
4.3	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล 50
4.4	แรงผลัดในแกน y ของมอเตอร์ที่มีค่าเป็นบวกและค่าเป็นลบเมื่อป้อน สัญญาณ PWM ในช่วง (1-1.5) มิลลิวินาทีหรือมี-duty cycle อยู่ในช่วง (0-50%) และในช่วง (1.5-2.0) มิลลิวินาที หรือมี-duty cycle อยู่ในช่วง (50-100%) ตามลำดับ..... 51
4.5	การติดตั้งและอุปกรณ์ในการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงในระยะเวลาต่างๆ 53
4.6	ทำการเทียบเพื่อทดสอบค่าแรงจากโมเมนต์หารด้วยระยะทางต่างๆ..... 54
4.7	มอเตอร์ขับเคลื่อนเดินหน้า (PWM = 1.388) และถอยหลัง (PWM = 1.611)..... 58
4.8	ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่า duty cycle ของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่..... 59
4.9	การทดสอบเซนเซอร์วัดความดันที่ระดับความลึก 30 40 และ 90 ซม..... 60
4.10	ประมาณค่าในช่วงของข้อมูลที่ได้แบบโพลีโนเมียลกำลัง 1 2 และ 3..... 61
4.11	ค่าที่ออกมาจากเซนเซอร์ขณะอยู่กับที่เพื่อ Offset Value..... 61
4.12	การตั้งแกน 3 แกน (X, Y และ Z) และองศาการหมุน Roll(ψ), Pitch(θ), Yaw(ϕ)..... 65
4.13	เปรียบเทียบแสดงการหมุนรอบแกน “X” ในทิศตามเข็มนาฬิกาจากการประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter..... 67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.14 เปรียบเทียบแสดงการหมุนรอบแกน “Y” ในทิศทวนเข็มนาฬิกาจากการประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter.....	68
4.15 เปรียบเทียบของสากการหมุนรอบแกน “X” ระหว่างเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain และเข็มทิศ (HMC6343) และค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter	69
4.16 เปรียบเทียบของสากการหมุนรอบแกน “Y” ระหว่างเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain และเข็มทิศ (HMC6343) และค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter	69
4.17 ค่าความผิดพลาดขององศาการหมุนรอบแกน “X” เมื่อเทียบของสากจากเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain กับการประมาณค่าด้วย Kalman Filter	70
4.18 ค่าความผิดพลาดขององศาการหมุนรอบแกน “Y” เมื่อเทียบของสากจากเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain กับการประมาณค่าด้วย Kalman Filter	70
4.19 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบ PID เพื่อควบคุมความถี่โดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน.....	71
4.20 การทดลองในสื่อน้ำการควบคุมระดับความถี่แบบลูปปิดด้วยระบบควบคุมแบบ PID	72
4.21 คำสั่งจากจอยควบคุมและค่าอนาล็อกที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน	73
4.22 สัญญาณ PWM จากระบบควบคุมป้อนกลับ PID ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

ปัจจุบันความหมายของคำว่าหุ่นยนต์ยังไม่มีข้อยุติ มีการนิยามต่างกันไป NECTEC ได้จำกัดความ “หุ่นยนต์” ว่าหมายถึงเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวได้ โดยมีการทำงานจากโปรแกรมการตัดสินใจและสามารถปรับเปลี่ยน โปรแกรมการทำงานให้ทำงานได้หลากหลายหน้าที่เพื่อตอบสนองข้อมูลหรือสัญญาณที่ได้จากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะให้สามารถใช้ทำงานแทนมนุษย์ได้ด้วยตนเอง หรือทำงานตามขั้นตอนที่มีการตั้งไว้ล่วงหน้า โดยคำว่าหุ่นยนต์ Robot มาจากคำว่า Robata ในภาษาเช็ก ซึ่งแปลว่าการทำงานเสมือนทาส สำหรับคนทั่วไปเมื่อได้ยินคำว่า “หุ่นยนต์” (Robot) อาจทำให้นึกถึงภาพยนตร์หลายเรื่อง เช่น Transformers ผู้นำกลุ่มออโตบอตส์ที่ช่วยมนุษย์ต่อสู้กับหุ่นยนต์จากต่างดาว Terminator ที่หุ่นยนต์ที่ลุกขึ้นมาครองโลกและการต่อต้านมนุษย์ในลักษณะหน่วยรบใต้ดิน และยังอีกหลายเรื่องจินตนาการถึงหุ่นยนต์ในลักษณะแตกต่างกันไป



ภาพที่ 1.1 The SeaBotixLBV300-5 is a powerful MiniROV [1]

ทั้งหมดเป็นสิ่งยืนยันว่า มนุษย์ได้รู้จักหุ่นยนต์มานานแล้ว โดยเฉพาะการที่ได้ทำความรู้จักผ่าน “โลกจินตนาการ” จากผลงานของนักเขียนการ์ตูนและผู้สร้างภาพยนตร์ ซึ่งในโลกความเป็นจริงช่วงเวลา 4-5 ปีที่ผ่านมา จึงเริ่มได้ยินข่าวคราวและเรื่องราวเกี่ยวกับหุ่นยนต์มากขึ้นเมื่อเยาวชนไทยหลายทีม

ประดิษฐ์หุ่นยนต์หลายประเภท เช่น หุ่นยนต์กู้ภัย รถอัจฉริยะ หุ่นยนต์สำรวจใต้น้ำ ฯลฯ และยานดำน้ำควบคุมระยะไกลในตอนนี้ได้มีการพัฒนาการนำไปใช้งานหลากหลายประเภทดังแสดงในภาพที่ 1.1 และ 1.2 เช่น สำรองน้ำจืดและใต้ท้องทะเล เก็บตัวอย่างน้ำและใช้ในการกักเก็บ ซึ่งยานดำน้ำที่มีการควบคุมการปฏิบัติงานผ่านสายเชื่อมโยงนี้เป็นที่รู้จักกันใน



ภาพที่ 1.2 VideoRay Pro 4 [2]

ชื่อ หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล Remotely Operatd Vehicle (ROV) การควบคุมหุ่นยนต์ดำน้ำเป็นหนึ่งในหัวข้อที่น่าสนใจซึ่งในการออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลนั้นประกอบด้วยหลากหลายแง่มุม เช่น รูปลักษณะและโครงสร้าง [3-4] การหาค่าตัวแปรทางไดนามิกส์ [5] การออกแบบระบบควบคุม [6] และการทดสอบประสิทธิภาพในการทดลองปฏิบัติงานจริง และการดัดแปลงให้เหมาะสมกับภารกิจเฉพาะด้าน จันทรานิคมิต [3] ได้สร้างและออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์วัดความดันเซนเซอร์เข็มทิศ กล้องวีดีโอแบบ CCD และสามารถใช้งานใต้น้ำที่มีความลึกได้ถึง 15 เมตร ดังนั้นสภาพแวดล้อมใต้น้ำสามารถแสดงภาพผ่านจอมอนิเตอร์เพื่อการสำรวจและตรวจสอบ



ภาพที่ 1.3 ยานใต้น้ำอัตโนมัติ [5]

บุณชิตและเปรมปราณีรัชต์ [5] ได้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานดำน้ำที่แสดงในภาพที่ 1.3 โดยใช้เทคนิค Least - Square ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติของยานดำน้ำ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของมวลที่เพิ่มจากน้ำและค่าความหน่วงได้ใช้แรงผลักดันที่ที่กระทำในทิศทางเคลื่อนที่ของยานทางด้านหน้า ด้านข้าง และขึ้นลงในแต่ละแกนสมมาตรสุทธกร, โชนไฟวงส์ และโอวัลไซพงษ์ [4] ได้พัฒนายานใต้น้ำที่มีชื่อเรียกว่า “ThaiXPole” ดังแสดงในภาพที่ 1.4 และได้นำไปสำรวจที่ขั้วโลกใต้ (Antarctica) ที่มีสิ่งแวดล้อมทางทะเลในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำมากอย่างรุนแรง ยานใต้น้ำนี้สามารถเก็บข้อมูลและนำข้อมูลมาให้ให้นักวิทยาศาสตร์วิจัยได้



ภาพที่ 1.4 ThaiXPole Underwater Robot [4]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างยานค้ำน้ำหนักเล็ก

1.2.2 เพื่อออกแบบการควบคุมระยะไกลด้วยจอยสติ๊กและสร้างระบบควบคุมความลึกในขณะเคลื่อนที่

1.2.3 เพื่อพัฒนาระบบจอแสดงผลของยานค้ำน้ำหนักเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งและหันเหในทิศทางใด

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

ระบบควบคุมตำแหน่งแบบ PID สามารถควบคุมได้โดยนำข้อมูลจากคำสั่งและเซนเซอร์มาป้อนกลับนำค่ามาตั้งตัวควบคุมเพื่อให้มอเตอร์ทำงานตามตำแหน่งที่ต้องการ แต่ต้องอาศัยเวลาในการทดลองปรับจูนค่า Gain เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการควบคุมความลึกของตัวยานค้ำน้ำหนักให้อยู่ในระดับความลึกที่ต้องการและการหาพิกัดตำแหน่งของยานค้ำน้ำหนักขณะอยู่ใต้น้ำด้วยเซนเซอร์วัดความเร็ว เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม และเข็มทิศดิจิทัล โดยนำข้อมูลมาบูรณาการเข้าด้วยกัน เพื่อหาและทิศทางของหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักควบคุมระยะไกล

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักสามารถทนแรงดันน้ำได้ความลึกมากที่สุด 10 เมตรค้ำน้ำได้ทั้งน้ำจืดและน้ำเค็มที่ความลึกไม่เกิน 10 เมตร

1.4.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักในน้ำนิ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที

1.4.3 เซนเซอร์วัดความดันสามารถวัดความดันได้ลึกสูงสุดที่ 3 เมตร

1.4.4 เซนเซอร์วัดมุมเอียงมีย่านความแม่นยำของความเร็วเชิงมุม ± 250 องศาต่อวินาที

1.4.5 เซนเซอร์วัดความเร็วมีย่านความแม่นยำของความเร็ว ± 19.62 เมตรต่อวินาที²

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้หุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักควบคุมระยะไกลขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ในการสำรวจสิ่งมีชีวิตใต้น้ำตามที่ต้องการได้

1.5.2 ได้สร้างระบบควบคุมและการแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ปฏิบัติการบังคับควบคุมหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักได้ง่ายขึ้น

1.5.3 สามารถนำไปสำรวจจริงใต้น้ำในแม่น้ำและทะเลได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ จำเป็นต้องมีการออกแบบการสร้างโดยคำนึงถึงหลักการทางวิศวกรรม โดยในการสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ ต้องวิเคราะห์การเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะต้องเกิดแรงต้านของน้ำน้อยที่สุด ปัจจัยอีกอย่างที่ช่วยในการเคลื่อนที่ คือการลอยตัว หากหุ่นยนต์ไม่มีเสถียรภาพในการลอยตัวอาจส่งผลกระทบต่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ ในการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ จะใช้หลักการควบคุมมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งมอเตอร์จะต่อเข้ากับแบตเตอรี่ เมื่อมอเตอร์ทำงานจะทำให้เกิดแรงผลัก ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในน้ำได้ทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำ

2.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำ [6]

การออกแบบหุ่นยนต์พื้นฐาน สามารถให้นิยามได้เป็น วิทยาศาสตร์หรือการศึกษาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ โครงสร้าง ทฤษฎี และการประยุกต์ของหุ่นยนต์ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

2.1.1 การออกแบบตัวหุ่น

- 1) วางแผนการเลือกวัสดุอุปกรณ์ ในการทำหุ่น
- 2) วางแผนการออกแบบโครงสร้าง การขับเคลื่อนของระบบ โครงสร้างว่าเป็นแบบใด และมีกลไกการทำงานอะไรบ้าง

2.1.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

ต้องทราบของลักษณะการทำงานของหุ่นว่าจะต้องมีการควบคุมแบบใด ถ้าหากควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ จะต้องมีการเขียน โปรแกรม ให้หุ่นนั้นสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไข

2.1.3 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

- 1) เครื่องมือในการสร้างและเครื่องมือช่าง
- 2) วัสดุ อุปกรณ์ มอเตอร์ และวงจร

2.1.4 ส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์

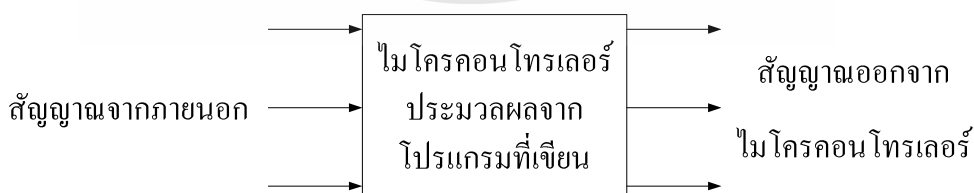
- 1) หลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

- 2) การออกแบบและการบัดกรี
- 2.1.5 ส่วนประกอบทางเครื่องจักรกล
วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์และกลไก
- 2.1.6 วัสดุการสร้าง
การเลือกวัสดุในการทำ เช่น ส่วนไหนต้องเบาและส่วนไหนต้องรับแรง
- 2.1.7 การเขียนโปรแกรมพื้นฐาน
เรียนรู้การเขียนโปรแกรมควบคุม เช่น ภาษาซี

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) [7]

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่เราเขียนหรือตั้งโปรแกรมไว้ โดยที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เองสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ทันที (แล้วแต่เบอร์และคุณสมบัติของเบอร์นั้นๆ) เราจึงสามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมต่างๆ มากมาย เช่น การควบคุมมอเตอร์ การควบคุมหลอดไฟ หรือการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เป็นต้น แต่หลายคนคงเคยได้ยินว่า ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือโปรเซสเซอร์มาแล้ว แต่ไมโครโปรเซสเซอร์โดยทั่วไปจะทำหน้าที่ประมวลผล และทำงานเร็วมาก แต่ไม่เหมาะนำมาทำงานในลักษณะการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ (สามารถทำได้แต่ต้องใช้อุปกรณ์รอบข้างเสริมมาก เช่น เบอร์ Z80 เป็นต้น) ดังนั้นในงานควบคุมขนาดเล็กเรานิยมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาใช้งานมากกว่าด้วยสาเหตุไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายค่ายหลายเบอร์ให้เลือกใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็ก และราคาถูก ไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบันสามารถเขียนโปรแกรมได้หลายภาษา เช่น C เป็นต้น

ทำให้เรียนรู้ได้เร็ว มีเครื่องมือสนับสนุนในการทำงานมากมาย ปัจจุบันมีหนังสือให้ความรู้ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์มากมายทั้งภาษาไทย และต่างประเทศมีใช้ในการสอนตั้งแต่ระดับ ปวช. ปวส. และปริญญาตรี



ภาพที่ 2.1 การควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ [8]

2.2.1 ส่วนประกอบภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

ภายในตัวของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เองจะโครงสร้างต่างๆ ดังนี้

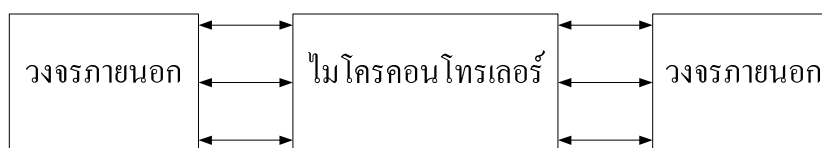
- 1) ส่วนประมวลผล (Processing unit) ทำหน้าที่คำนวณทางคณิตศาสตร์และการตัดสินใจแบบมีเงื่อนไข (Logic)
- 2) ส่วนเก็บข้อมูล (Memory) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น
 1. เก็บแบบชั่วคราว (Ram) จะเก็บได้เมื่อมีไฟเลี้ยงอยู่ และเมื่อไม่มีไฟเลี้ยงข้อมูลจะสูญหาย
 2. เก็บแบบถาวร (Eprom) จะใช้ในการเก็บ Code เป็นส่วนใหญ่ ข้อมูลไม่หายเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง
- 3) ส่วนเชื่อมต่อ หรือ Port ต่างๆ ซึ่งทำหน้าที่รับ-ส่งสัญญาณให้กับอุปกรณ์ภายนอกได้
- 4) ส่วนกำเนิดสัญญาณนาฬิกา โดยที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะสามารถทำงานได้เมื่อมีสัญญาณนาฬิกา ส่วนมากเราจะใช้ คริสตอล (X-TAL) มาเป็นตัวกำเนิดสัญญาณจากภายนอกก่อนส่งไปภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

2.2.2 การเรียนรู้การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

การใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเราไม่อาจจะนำตัวไอซีชนิดนี้ไปใช้งานเดี่ยวๆ ได้ แต่จะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกต่อร่วมด้วยเสมอ ดังนั้นการที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดั่งนั้น จำเป็นต้องมีพื้นฐานของการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเช่นกัน นอกจากความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แล้วยังต้องมีความเข้าใจลักษณะสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นๆ รวมทั้งการมีเครื่องมือในการทดลองและทดสอบการเขียนโปรแกรม

ภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบันมีตัวคอมไพเลอร์ภาษาต่างๆ ให้เลือกใช้ เช่นภาษาแอสเซมบลี ภาษา C ภาษาเบสิก เป็นต้น ส่วนจะเลือกใช้ภาษาไหนก็แล้วแต่ตามใจชอบภาษาแอสเซมบลี เป็นภาษาที่มีความสามารถสูง แต่ใช้เวลาศึกษานาน เป็นภาษาแรกๆ ในการใช้งาน

สมัยก่อนหน้านี้ ภาษาเบสิก เป็นภาษาที่เขียนได้ง่าย ใช้เวลาเรียนรู้ได้เร็ว ภาษา C เช่นเดียวกับภาษาเบสิก คือ เขียนง่าย มีความสามารถใกล้เคียงกับ แอสเซมบลี เรียนรู้ได้เร็ว เนื่องจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายตระกูล และหลายเบอร์แต่ละเบอร์ก็มีความสามารถแตกต่างกันไป ดังนั้น หากต้องการศึกษาเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ใด สามารถศึกษาได้จาก Datasheet ของเบอร์นั้นๆ



ภาพที่ 2.2 การออกแบบคอนโทรลเลอร์ [8]

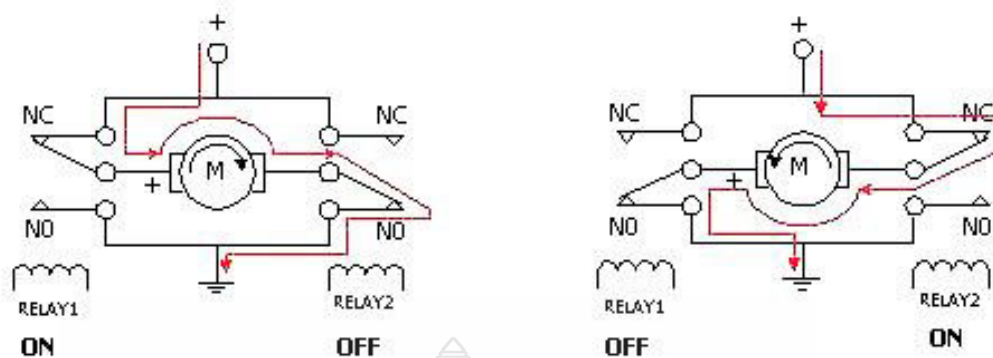
2.3 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR) [8]

มอเตอร์กระแสตรงจะมีหลักการทำงาน โดยวิธีการผ่านกระแสให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก โดยส่วนของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับกระแสและกำลังของสนามแม่เหล็กทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กจะเกิดจากแท่งแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ 2 ชั้นที่ขึ้นภาพเป็นแบบโค้งยึดติดกับตัวถังได้พอดี เพื่อให้จะให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ใจกลางของมอเตอร์ได้ ดังนั้นความเข้มของแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแม่เหล็กด้วย ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งไปบนตัวถังโลหะ กระแสไฟฟ้าในขดลวดที่พันกับขั้วมอเตอร์ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และต้านกับสนามแม่เหล็กถาวร จึงเกิดเป็นแรงบิดเพื่อที่จะหมุนขั้วมอเตอร์ ให้ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีแรงมากกว่า กระแสก็จะไหลผ่านไปยังขั้วมอเตอร์ โดยผ่านแปรงถ่าน ซึ่งจะสัมผัสกับแหวนตัวนำในขั้วมอเตอร์ และแหวนคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 เซกเมนต์เพื่อที่จะทำหน้าที่นำกระแสเข้าขดลวดนั่นเอง

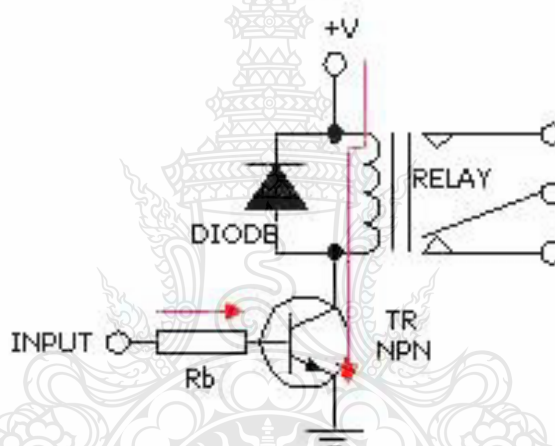
2.3.1 การขับและกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)

ในการใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการหมุน และทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงนั้น เราจะต้องมีส่วนของวงจร ที่เรียกว่าวงจรขับมอเตอร์ (Driver) ในส่วนของวงจรถับทิศทางของมอเตอร์นั้น สามารถที่จะใช้รีเลย์ต่อวงจร สวิตช์เพื่อกลับทิศทางของขั้วไฟกระแสตรง หรืออาจใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นวงจรขับกำลังเช่น ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต แล้วแต่วิธีที่เราจะเลือกใช้งาน

จากภาพเป็นการใช้รีเลย์ควบคุมการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยการควบคุมการปิด - เปิดที่รีเลย์ 2 ตัว ซึ่งจะทำหน้าที่กลับทิศทางของขั้วไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยการสลับการทำงานของรีเลย์ เช่น ให้รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน (ON) และรีเลย์ตัวที่ 2 หยุดทำงาน (OFF) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางซ้าย และในทำนองเดียวกันถ้าหากรีเลย์ตัวที่ 1 หยุดทำงาน (OFF) และรีเลย์ตัวที่ 2 ทำงาน (ON) ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา

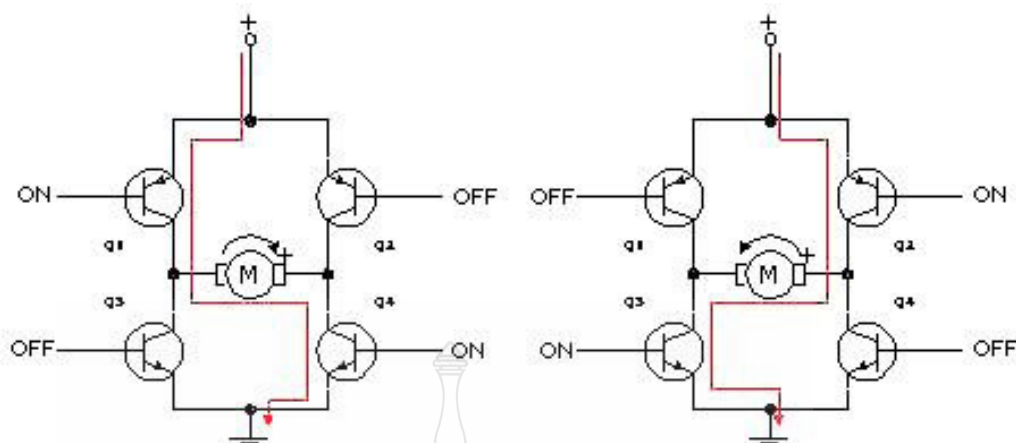


ภาพที่ 2.3 การกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์



ภาพที่ 2.4 การใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน

จากภาพเป็นวงจรขับรีเลย์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแส ด้วยเหตุผลเพราะไม่สามารถจะใช้ขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนกระแสไฟที่ขดลวดของรีเลย์โดยตรงได้ เนื่องจากว่ากระแสที่จ่ายออกมาจากขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราจึงต้องมีส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อที่จะทำการขยายกระแสให้เพียงพอในการป้อนให้กับขดลวดของรีเลย์ ส่วนไดโอดนำมาต่อไว้สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในขณะที่เกิดการขุดตัว ซึ่งอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้



ภาพที่ 2.5 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรถับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง

จากภาพเป็นวงจรลิเนียร์บริดจ์แอมป์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 4 ตัวที่ทำหน้าที่ขับ และควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ถ้าหากกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q4 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์จากซ้ายไปขวา โดยผ่านมอเตอร์กระแสตรงทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา ในทำนองเดียวกันถ้าหากเราทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าก็จะไหลจากทางขวาไปทางซ้ายซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนจากทางขวาไปทางซ้าย

2.3.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งอาจจะใช้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานทั่วไปเช่นการควบคุมด้วยวิธีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าโดยต่ออนุกรมกับมอเตอร์ หรือใช้วิธีการ

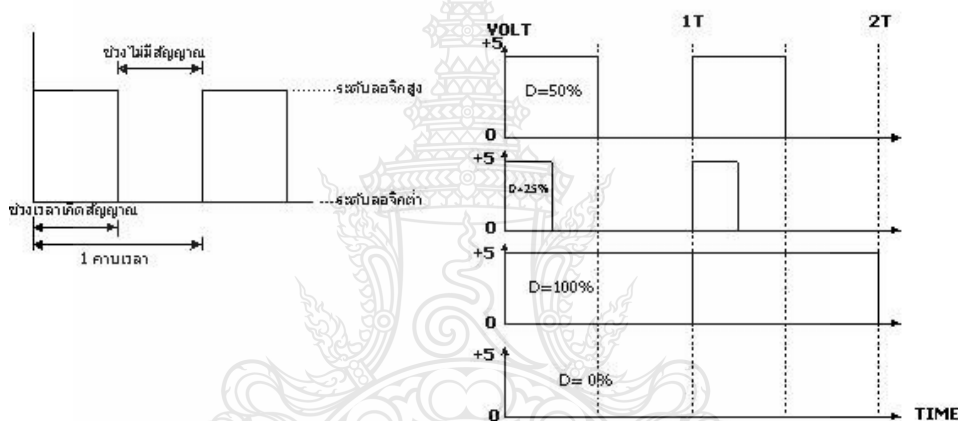
การควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่การควบคุมในวิธีดังกล่าวถึงแม้ว่าจะควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ได้ แต่ที่ความเร็วต่ำจะส่งผลให้แรงบิดต่ำไปด้วย ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เป็นช่วงๆ โดยอาศัยกระแสไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ซึ่งเราเรียกว่าวิธีการของมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation)

2.3.3 วิธีการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (PWM)

การมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วน และความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มี

เปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) นั้นเอง ซึ่งค่าของดิวตี้ไซเคิลคือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ก็หมายถึงใน 1 ภาพสัญญาณพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่ง ดังภาพและในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น หากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ก็หมายความว่า จะไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย ซึ่งค่าดิวตี้ไซเคิลสามารถ จะหาได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

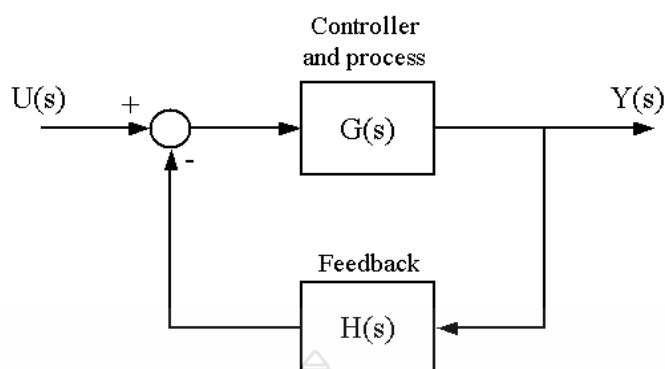
$$\text{ค่าดิวตี้ไซเคิล} = (\text{ช่วงของสัญญาณพัลส์/คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ}) \times 100\%$$



ภาพที่ 2.6 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดิวตี้ไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่ [8]

2.4 ทฤษฎีระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID [8]

การใช้งานระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback) หรือควบคุมแบบลูปปิด (Close-Loop Control) จะกระทำเพื่อมั่นใจว่าระบบมีลักษณะที่ดี ทั้งนี้เพื่อความเชื่อมั่นพื้นฐานว่าระบบจะทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ ระบบจะทำงานอย่างน่าเชื่อถือภายใต้การควบคุม ด้วยอินพุตที่เราทราบ คือระบบที่ใช้ประโยชน์ได้ดีจะต้องมีเสถียรภาพ (Stable) ทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ และระบบที่แท้จริง ในความเป็นจริงไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดๆ ที่จะต้องสมบูรณ์แบบโดยธรรมชาติแล้วแบบจำลองก็จะมีผลผิดพลาดในพารามิเตอร์



ภาพที่ 2.7 ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ [8]

หรือในสมการทางคณิตศาสตร์ปรากฏด้วยเสมอ (Model Errors) ความผิดพลาดของแบบจำลองอาจอยู่ในภาพความไม่แน่นอนในค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เมื่อระบบทำงานในสภาพแวดล้อมจริง นอกจากระบบจะได้รับอินพุตอ้างอิงที่ป้อนให้ระบบแล้วยังมีสัญญาณหรือพลังงานอื่นๆ จากภายนอกเข้าไปกระทำกับระบบอีกด้วย สัญญาณที่แทรกเข้ามาจากภายนอกเหล่านี้รวมเรียกว่า การรบกวน

ในการออกแบบและใช้งานระบบควบคุมนั้น ส่วนใหญ่เราจะใช้ระบบแบบลูปปิด (Close-Loop) เพราะระบบจะใช้สัญญาณป้อนกลับมาช่วยในการหาค่าความผิดพลาดที่จะใช้ในการควบคุม เพื่อให้ระบบดำเนินงานเองโดยอัตโนมัติได้ เอาต์พุตของระบบจะเปลี่ยนแปลงไปตามอินพุตตลอดเวลาด้วยกลไกการป้อนกลับ (Feedback) ซึ่งอาศัยเซนเซอร์ $H(s)$ ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นตัวป้อนสัญญาณกลับ

$$Y(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} U(s) \quad (2.1)$$

2.5 แรงลอยตัว (Buoyant Force) [9]

หลักการของแรงดันอุทกสถิตบนผิวโค้งสามารถนำมาใช้คำนวณแรงดันสุทธิบนวัตถุจมิดหรือวัตถุลอยในของเหลวได้ ซึ่งเป็นกฎของการลอยตัวที่ค้นพบโดยอาร์คิมิดีส (Archimedes) คือ

2.5.1 วัตถุที่จมในของเหลว แรงลอยตัวแนวตั้งจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่

2.5.2 วัตถุที่ลอยจะเข้าแทนที่เท่ากับน้ำหนักของวัตถุเองในของเหลวที่วัตถุลอยอยู่

แรงลอยตัวจะเป็นแรงแนวตั้งบนชิ้นประกอบส่วนแบ่งแนวตั้งของวัสดุที่ขึ้นกับแรงดันอุทกสถิตจะได้เป็น

$$F_B = \int_{body} (p_2 - p_1) dA_H = \gamma \int (z_2 - z_1) dA_H (\gamma) \quad \text{ปริมาตรของวัตถุ} \quad (2.2)$$

สมการที่ 2.1 กำหนดว่าของไหลที่มีน้ำหนักจำเพาะคงตัวแนวการกระทำของแรงลอยตัวจะผ่านจุดศูนย์กลางปริมาตรของวัตถุที่เข้าไปแทนที่ซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ จุดที่แรงลอยตัว Buoyant Force; FBกระทำเรียกว่าจุดศูนย์กลางการลอยตัว (Center of Buoyant) ซึ่งกำหนดเป็นจุด B ปกติจุด B อาจจะตรงหรือไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ซึ่งอาจจะมีการแปรผันกับความหนาแน่นได้

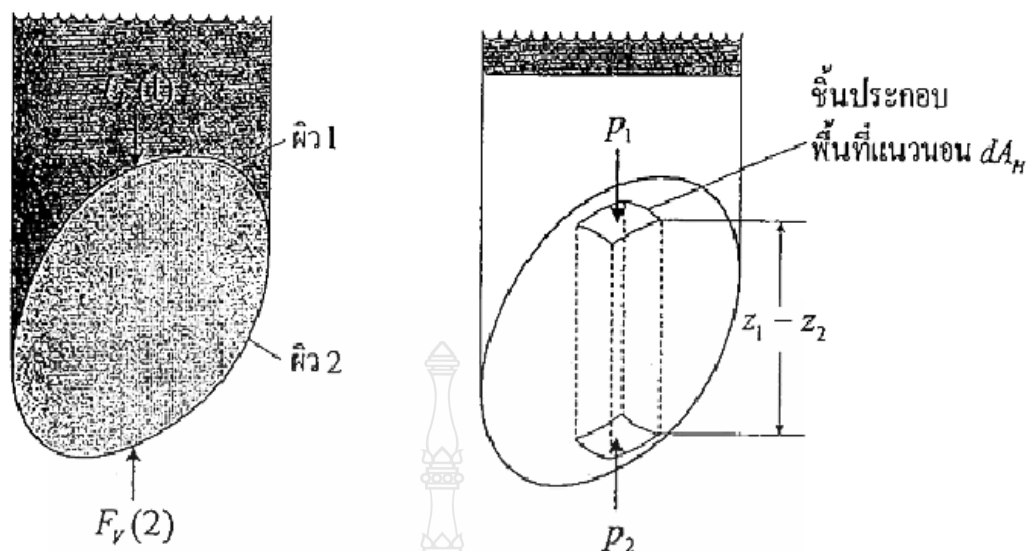
สมการที่ 2.1 สามารถประยุกต์ใช้กับชั้นของไหลโดยรวมน้ำหนักของแต่ละชั้นความหนาแน่น ρ_i ที่เข้าแทนที่ของวัตถุที่จม จะได้

$$(F_B)_{LF} = \sum \rho_i g (\text{Displace volume})_i \quad (2.3)$$

แต่ละชั้นที่ถูกแทนที่จะมีศูนย์กลางปริมาตรนั้น และมีการรวมแรงโมเมนต์ของแรงลอยตัวที่เพิ่มขึ้น หากจุดศูนย์กลางของการลอยตัวของวัตถุจมอีกกรณีหนึ่งคือวัตถุจมเพียงบางส่วนโดยที่จะมีส่วนที่โผล่พ้นจากผิวอิสระดังแสดงในภาพที่ 2.9 เมื่อส่วนเงาคือปริมาตรที่เข้าแทนที่ในของเหลว สมการที่ 2.1 สามารถนำมาใช้กับปริมาตรส่วนนี้จะได้

$$F_B = (\gamma) (\text{ปริมาตรที่ถูกแทนที่}) = \text{น้ำหนักของวัตถุที่ลอย} \quad (2.4)$$

ไม่เพียงแต่แรงลอยตัวจะเท่ากับน้ำหนักวัตถุ แต่แรงลอยตัวยังอยู่ในแนวเส้นตรง (Collinear) เดียวกันกับน้ำหนัก เนื่องจากไม่เกิดโมเมนต์สุทธิในการสมดุลทางออก



(ก) แรงบนผิวโค้งบนและล่าง

(ข) การรวมแรงดันแนวตั้งของชั้นประกอบ

ภาพที่ 2.8 หลักการสองวิธีที่นำไปหาแรงลอยตัวของวัตถุจม



ภาพที่ 2.9 ความสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของวัตถุลอย [10]

2.6 เสถียรภาพ (Stable) [9]

วัตถุลอยดังแสดงในภาพที่ 2.10 ตำแหน่งของการลอยตัวอาจพลิกคว่ำที่จังหวะแรกของการลอย ซึ่งเรียกว่าการลอยแบบไม่เสถียรภาพ (Unstable) แต่ถ้ามีการกระทบเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้วัตถุมาอยู่ในตำแหน่งสมดุลนั้น จะเรียกว่าการลอยตัวแบบเสถียรภาพ (Stable) ดังนั้นวิศวกรจึงต้องออกแบบเพื่อหลีกเลี่ยงการลอยที่ไม่เสถียรภาพ ทางเดียวที่จะบอกว่าการลอยเป็นเสถียรภาพหรือไม่ จะดูที่ว่ามีโมเมนต์กลับคืนมาอยู่ที่ตำแหน่งเดิมหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่าลอยอยู่อย่างเสถียรภาพ ถ้า

ไม่เช่นนั้นก็คือว่าไม่เสถียรภาพ หลักการพื้นฐานการคำนวณเสถียรภาพจะพิจารณาจากภาพที่ 2.10 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

2.6.1 ระบุตำแหน่งแรงลอยตัวที่คำนวณจากสมการที่ 2.9 จุดศูนย์กลางมวลของวัตถุคือจุด G และจุดศูนย์กลางการลอยตัวคือจุด B

2.6.2 วัตถุเอียงเป็นมุมเล็กน้อย $\Delta\theta$ เกิดเส้นน้ำ (Waterline) ใหม่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่ลอยตัวใหม่ที่จุด B' โดยนำมาใช้ในการคำนวณโดยลากเส้นตั้งขึ้นจากจุด B' ตัดกับเส้นสมมาตรที่จุด M ซึ่งเรียกว่า จุดศูนย์กลางเมตา (Metacenter)

2.6.3 ถ้าจุด M อยู่เหนือจุด G เส้นความสูงจุดศูนย์กลางเมตา (Metacenter Height) เส้นตรง MG จะเป็นบวกและจะเกิดโมเมนต์กลับคืนลอยในตำแหน่งเดิมซึ่งถือว่าเป็นเสถียรภาพ แต่ถ้าจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G เส้นตรง MG จะเป็นลบ วัตถุจะลอยอย่างไม่เสถียรภาพและจะพลิกคว่ำเสถียรภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อเส้น MG เพิ่มขึ้น

ดังนั้นความสูงจุดศูนย์กลางเมตาเป็นสมบัติของภาคตัดและจะใช้แสดงเสถียรภาพของวัตถุลอยสำหรับวัตถุหลายๆภาคตัดและรูปร่าง เช่น เรือ การคำนวณจุดศูนย์กลางเมตาจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุอย่างเด่นชัด

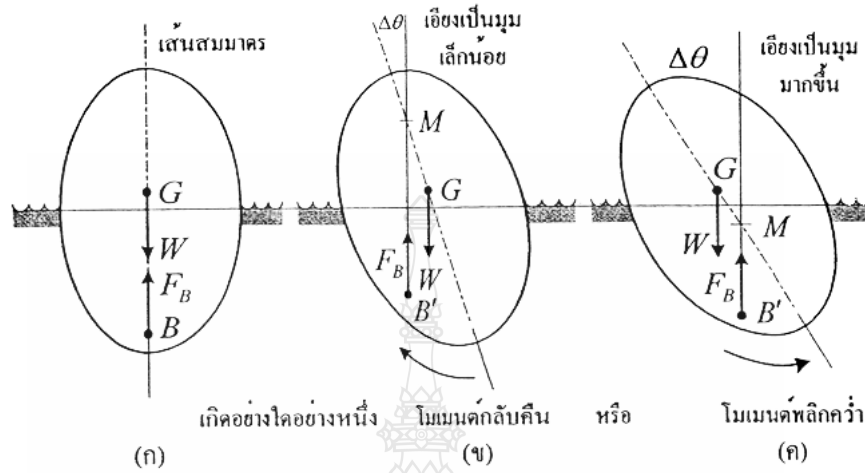
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเสถียรภาพกับพื้นที่เส้นน้ำ

เสถียรภาพจากภาพที่ 2.11 นำไปสู่การคำนวณอย่างง่ายเกี่ยวกับโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่เส้นน้ำ (Waterline Area) รอบแกนเอียงพิจารณา ภาพที่ 2.11 แกน y ของวัตถุกำหนดเป็นเส้นสมมาตร วัตถุเอียงทำมุม θ เล็กน้อย จากนั้นจึงเป็นรูปสี่เหลี่ยม Obd และโผล่ขึ้นเท่ากับคิม cOa จุด B' ใหม่ของจุดศูนย์กลางการลอยตัวคำนวณเป็นจุดเซนทรอยด์ของส่วนจม aObde ของวัตถุจะได้

$$\begin{aligned}\overline{xv}_{abOde} &= \int_{cOdea} xdv + \int_{Obd} xdv - \int_{cOa} xdv = 0 + \int_{Obd} x(LdA) - \int_{cOa} x(LdA) \\ &= 0 + \int_{Obd} xL(x \tan \theta dx) - \int_{cOa} xL(-x \tan \theta dx) = \tan \theta \int_{waterline} x^2 dA_{waterline} \\ &= I_0 \tan \theta\end{aligned}\quad (2.5)$$

โดยที่ I_0 คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่รอยเส้นน้ำ (Waterline Footprint) ของวัตถุรอบแกนเอียง O ทำการหาปริพันธ์พจน์แรก แต่จะหายไปเพราะว่าความสมมาตรของส่วนจมเดิม cOdea แต่ยังคงอยู่ สองปริพันธ์รูปสี่เหลี่ยม ซึ่งนำมารวมกันเป็นค่า I_0 เมื่อ Ldx เท่ากับชั้นประกอบของพื้นที่เส้นน้ำ ดังนั้นจะหาระยะจุด M ถึงจุด B จะได้

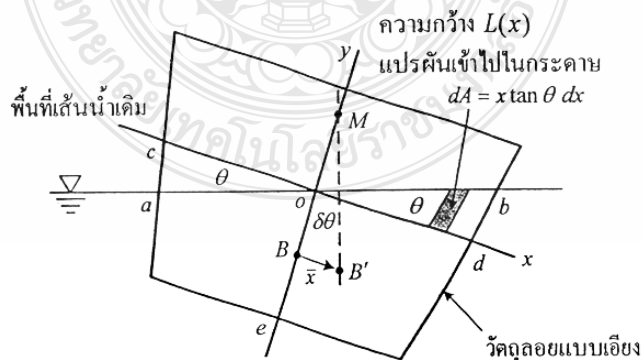
$$\frac{\bar{x}}{\tan \theta} = \overline{MG} = I_0 / V_{submerged} = \overline{MG} + \overline{GB} \quad \text{หรือ} \quad \overline{MG} = (I_0 / V_{submerged}) - \overline{GB} \quad (2.6)$$



- (ก) วัตถุเอียงทำมุม $\Delta\theta$ เล็กน้อย
- (ข) B'เคลื่อนออกห่าง (จุด M อยู่เหนือจุด G แสดงว่าเสถียรภาพ)
- (ค) B'เคลื่อนเล็กน้อย (จุด M อยู่ต่ำกว่า G แสดงว่าไม่เสถียรภาพ)

ภาพที่ 2.10 การคำนวณหาจุดศูนย์กลางเมตา M ของวัตถุลอยซึ่งแสดงได้สามกรณี

วิศวกรจะหาระยะจากจุด G ถึงจุด B จากรูปร่างพื้นฐานและการออกแบบการลอยวัตถุและทำการคำนวณค่า I_0 และปริมาตรส่วนจม V_{sub} ถ้าความสูงจุดศูนย์กลางเมตาเส้น \overline{MG} เป็นบวก วัตถุจะลอยตัวอย่างเสถียรภาพเมื่อมีการรบกวนเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 2.11 การลอยตัววัตถุเมื่อเอียงผ่านมุม θ เล็กน้อย

2.8 การทดลองการไหลภายนอก [9]

ทฤษฎีชั้นขอบเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่ทำให้เข้าใจพฤติกรรมของการไหลแบบหนืด แต่เนื่องจากการไหลแยกตัว ทฤษฎีจึงไม่เพียงพอในการคำนวณปริมาณของสนามการไหล แรงบนวัตถุที่จมในการไหลที่เลขเรย์โนลด์แบบไม่เจาะจง ดังนั้นการทดลองจึงเป็นกุญแจสำคัญของการไหลภายนอก

ข้อมูลการทดลองของการไหลแบบหนืดภายนอกมีเป็นจำนวนมาก หัวข้อนี้จึงให้การบรรยายเบื้องต้นของปัญหาการไหลภายนอก

1) แรงต้านของวัตถุสองหรือสามมิติ

1. วัตถุทู่
2. รูปร่างเส้นกระแสการไหล

2) สมรรถนะของวัตถุยกตัวได้

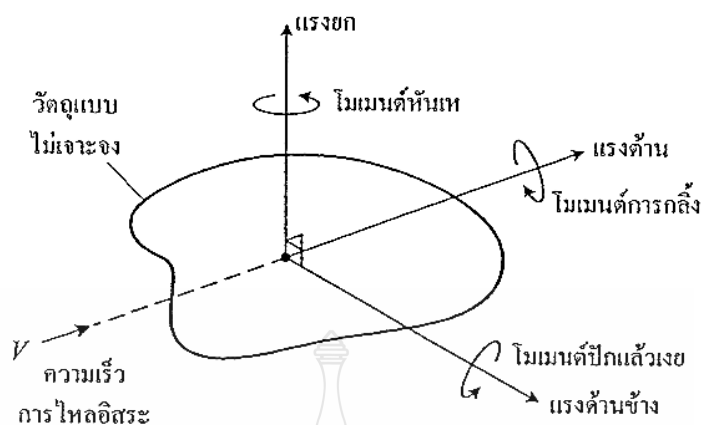
1. ปีกเครื่องบินและเครื่องบิน
2. กระสุนและวัตถุมีครีป
3. นกและแมลง

2.8.1 แรงต้านของวัตถุจมในการไหล

วัตถุมีรูปร่างแบบไม่เจาะจงเมื่อจมในการไหลของของไหลจะพบแรงและโมเมนต์เนื่องจากการไหล ถ้าวัตถุมีรูปร่างแบบไม่เจาะจงและมีการหมุน การไหลจะมีแรงและโมเมนต์รอบแกนพิคัดสามแกนดังแสดงในภาพที่ 2.12 แกนขนานกับการไหลอิสระและเป็นบวกทางด้านท้ายการไหล แรงบนวัตถุตามแกนนี้เรียกว่า แรงต้าน (Drag) และโมเมนต์รอบแกนนี้เป็นโมเมนต์การกลิ้ง (Rolling Moment) แรงต้านทำให้เกิดการสูญเสียการไหลที่สำคัญและจะต้องเอาชนะให้ได้ถ้าวัตถุต้องการเคลื่อนที่ขึ้นการไหล

แรงสำคัญอีกแรงหนึ่งที่ตั้งฉากกับแรงต้านและปรกติการแสดงการใช้งานในลักษณะของการแบกรับน้ำหนักของวัตถุเรียกว่า แรงยก (Lift) โมเมนต์รอบแกนนี้เรียกว่า การหันเห (Yaw)

แรงสุดท้ายเป็นแรงด้านข้าง (Side Force) และโมเมนต์รอบแกนนี้เป็นโมเมนต์ปักแล้วงย (Pitching Moment)



ภาพที่ 2.12 บทนิยามของแรงและโมเมนต์บนวัตถุที่จมในการไหลแบบเอกรูป

เมื่อวัตถุมีความสมมาตรรอบแกนยกและแกนด้าน ดังเช่น เครื่องบิน เรือ และรถยนต์ที่เคลื่อนที่ตรงเข้าไปในการไหล แรงด้านข้าง โมเมนต์การหักเห และ โมเมนต์การก่อกวังจะหายไปและปัญหาจะลดลงเป็นสองมิติ และมีสองแรงคือแรงยกและแรงด้าน และหนึ่ง โมเมนต์หักเห

ขั้นสุดท้ายเมื่อวัตถุมีสองระนาบที่สมมาตรกันดังในภาพที่ 2.13 ถ้าการไหลอิสระขนานกับการตัดขวางของสองระนาบนี้เรียกว่า เส้นคอร์ดหลักของวัตถุ (Principle Chord Line of The Body) วัตถุจะมี

เพียงแรงด้านโดยที่ไม่มีแรงยก แรงด้านข้างหรือ โมเมนต์จะก่อเกิดแรงด้านหนึ่งแรง แต่ถ้าการไหลอิสระไม่ขนานกับเส้นคอร์ดวัตถุจะมีการหมุนแบบไม่สมมาตรแรงและ โมเมนต์จะเกิดขึ้นทั้งหมด

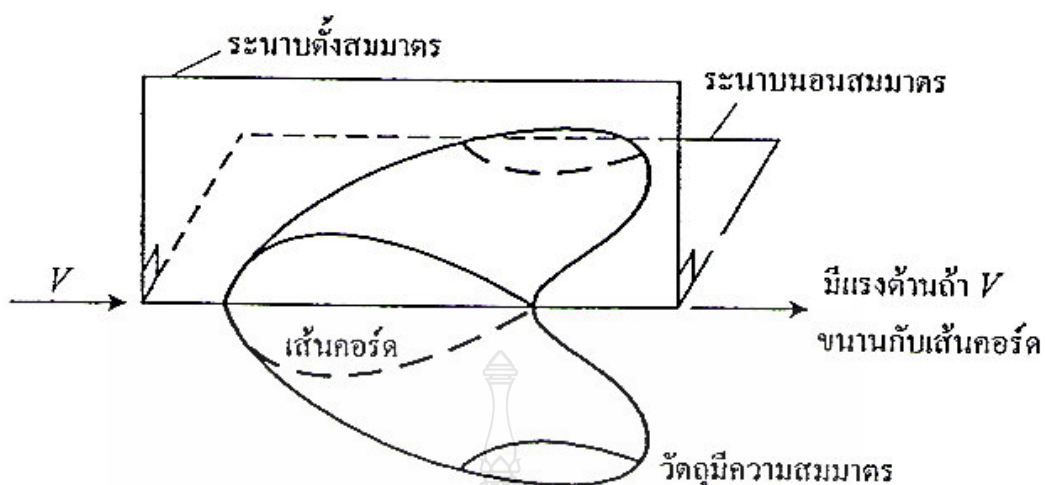
ในการไหลความเร็วต่ำผ่านรูปร่างที่เหมือนกับที่มีเอกลักษณ์การหมุนและความสัมพันธ์กับความขรุขระ สัมประสิทธิ์แรงด้านจะเป็นฟังก์ชันของเลขเรย์โนลด์วัตถุเป็น

$$C_D = f(\text{Re}) \quad (2.7)$$

เลขเรย์โนลด์ขึ้นอยู่กับความเร็วการไหลอิสระ V และคุณลักษณะความยาว L ของวัตถุ ปกติเส้นคอร์ดหรือความยาวของวัตถุจะขนานกับการไหลเป็น

$$\text{Re} = VL/V \quad (2.8)$$

สำหรับทรงกระบอก ทรงกลม และแผ่นจาน คุณลักษณะความยาวเป็นเส้นผ่านศูนย์กลาง D



ภาพที่ 2.13 แรงต้านจะเกิดขึ้นถ้าการไหลขนานกับทั้งสองระนาบที่สมมาตรกัน

2.8.2 คุณลักษณะของพื้นที่

สัมประสิทธิ์แรงต้านกำหนดโดยใช้คุณลักษณะของพื้นที่ A ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างวัตถุเป็นตัวประกอบ $\frac{1}{2}$ เป็นของออยเลอร์และเบอร์นูลลี พื้นที่ A ปกติใช้เพียงหนึ่งลักษณะจากสามลักษณะคือ

$$C_D = \frac{\text{drag}}{\frac{1}{2}\rho VA} \quad (2.9)$$

- 1) พื้นที่ฉายด้านหน้า (Frontal Area) เป็นการมองเห็นวัตถุจากการไหล เหมาะสำหรับวัตถุรูปทู่ (Stubby) เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก รถยนต์ จรวด กระสุนปืน และจรวดนำวิถี
- 2) พื้นที่ขนานกับทิศทางการไหล (Planform Area) เป็นพื้นที่ที่วัตถุที่มองจากข้างบน เหมาะสำหรับความกว้าง วัตถุรูปแบน เช่น ปีก และปีกติดเรือ
- 3) พื้นที่ผิวเปียก (Wetted Area) เป็นพื้นที่ๆ สัมผัสกับของไหล เหมาะสำหรับผิวเรือและเรือบรรทุก

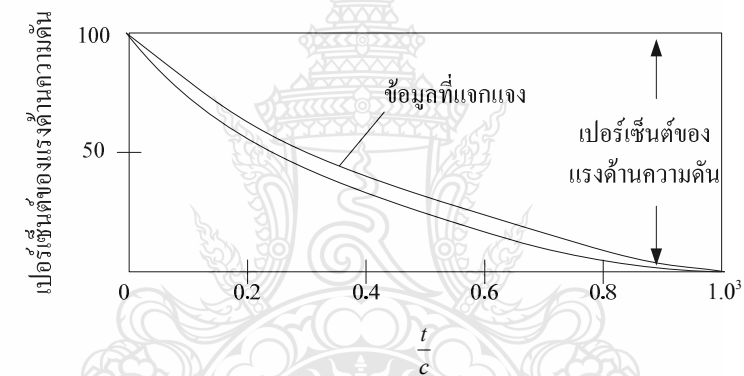
2.8.3 แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดัน

ทฤษฎีแรงต้านมีน้อยไม่เพียงพอในที่นี้ ยกเว้นสำหรับแผ่นราบ เพราะว่าวัตถุที่มีรูปร่างอื่นๆ จะเกิดการไหลแยกตัว ทฤษฎีชั้นขอบสามารถทำนายจุดไหลแยกตัวได้ แต่ไม่สามารถประมาณได้

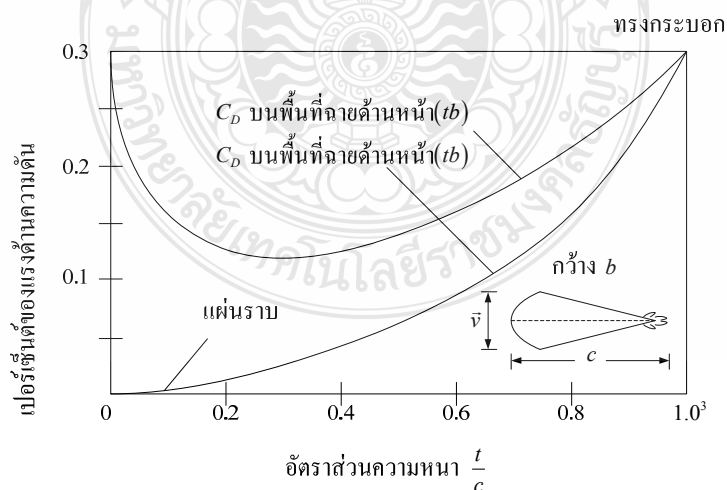
แน่นอนตรงจากการแจกแจงความดันในเขตการแยกตัวมีความแตกต่างระหว่างความดันสูงในเขตด้านหน้าสแตกเนชันและความดันต่ำในเขตหลังการแยกตัว ซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านขนาดใหญ่ เรียกว่า แรงต้านความดัน (Pressure Drag) ซึ่งเป็นการรวมกันของแรงต้านเสียดทานวัตถุ

$$C_D = C_{D,press} + C_{D,fric} \quad (2.10)$$

แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดันจะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของวัตถุ ภาพที่ 2.14 แสดงข้อมูลแรงต้านสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกที่มีความลึกลับมาก (เข้าไปในกระดวย) ที่ความหนาเป็นศูนย์กลางวัตถุมีลักษณะเป็นแผ่นราบและแรงต้านเสียดทานเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่ความหนาเท่ากับความยาวคอรั๊ดซึ่งเรียนแบบทรงกระบอกกลม แรงต้านเสียดทานจะเป็นเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ แรงต้านเสียดทานและแรงต้านความดันเท่ากับที่ความหนา $t/c = 0.25$



(ก) ผลของอัตราส่วนความหนาบนเปอร์เซ็นต์ของแรงต้าน



(ข) แรงต้านรวมเทียบกับความหนาเมื่อสองพื้นที่แตกต่างกัน

ภาพที่ 2.14 แรงต้านของเส้นการไหลทรงกระบอกสองมิติที่ $Re_c = 106$

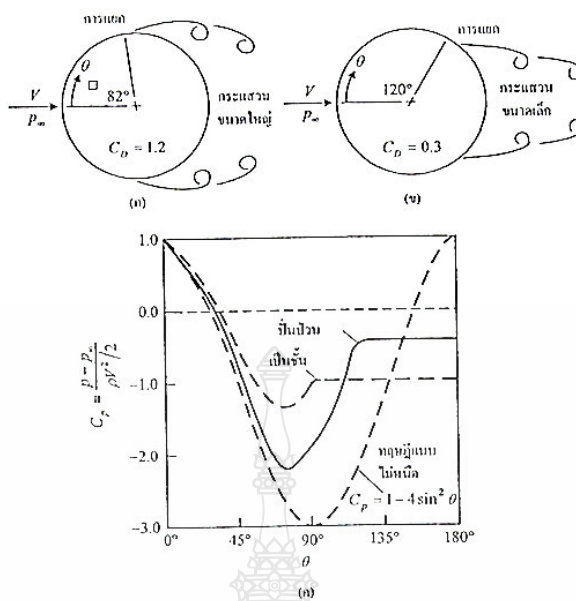
ในภาพที่ 2.15 แสดงผลที่เกิดขึ้นนับพลังของการไหลแยกตัวและความล้มเหลวของทฤษฎีชั้นขอบทฤษฎีการแจกแจงความดันแบบไม่หนืดบนทรงกระบอกจับพลังลมแสดงดังเส้นประในภาพที่ 2.15 (ค) ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านความดันเป็น

$$C_p = (p - p_\infty) / (1/2) \rho V^2 = 1 - 4 \sin^2 \theta \quad (2.11)$$

โดยที่ P_∞ และ V คือความดันและความเร็วการไหลอิสระตามลำดับ การแจกแจงความดันชั้นขอบการไหลเป็นแบบชั้นและแบบปั่นป่วน ในภาพที่ 2.15 (ค) แตกต่างจากทฤษฎีนี้ การไหลแบบเป็นชั้นจะเป็นแบบไม่เสถียรจนไปสู่ความชันในช่วงด้านการไหลบนด้านท้ายของทรงกระบอกและการแยกตัวเกิดขึ้นที่มุม $\theta = 82$ องศา เกิดการไหลวนขนาดใหญ่และความดันต่ำมากในเขตการไหลแยกตัวแบบเป็นชั้นซึ่งก่อให้เกิดแรงต้านขนาดใหญ่มีค่า $C_D = 1.2$

ชั้นขอบปั่นป่วนในภาพที่ 2.8 (ข) มีความต้านทานสูง และการแยกตัวจะเกิดขึ้นช้าจนกระทั่งมีมุม $\theta = 120$ องศาและมีผลการไหลวนน้อยมาก ความดันสูงบนด้านหลังและแรงต้านน้อยกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ $C_D = 0.3$

ความแตกต่างของรูปร่างที่เหมือนกันระหว่างการไหลแยกตัวเป็นชั้นที่ไม่เสถียรและแรงต้านการไหลแยกตัวปั่นป่วนสามารถเห็นได้ของทรงกลมในภาพที่ 2.15 การไหลแบบเป็นชั้นภาพที่ 2.15 (ค) แยกตัวที่ 80 องศา มีค่า $C_D = 0.5$ ขณะที่การไหลแบบปั่นป่วนภาพที่ 2.15 (ข) แยกตัวที่ 120 องศา มีค่า $C_D = 0.2$ ที่เลขเรย์โนลด์เดียวกันและชั้นขอบปั่นป่วนเกิดขึ้นด้วยการปะทะเข้ากับจุกของลูกบอล ลูกกอล์ฟที่ลอยในช่วงเลขเรย์โนลด์นี้เจตนาทำเป็นหลุม ก็เพื่อนำไปสู่ชั้นขอบปั่นป่วนที่มีแรงต้านต่ำนั่นเอง



- (ก) การแยกตัวสำหรับการไหลแบบชั้น
- (ข) การแยกตัวสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน
- (ค) ทฤษฎีและการแจกแจงความดันผิวจริง

ภาพที่ 2.15 การไหลผ่านทรงกระบอกกลม

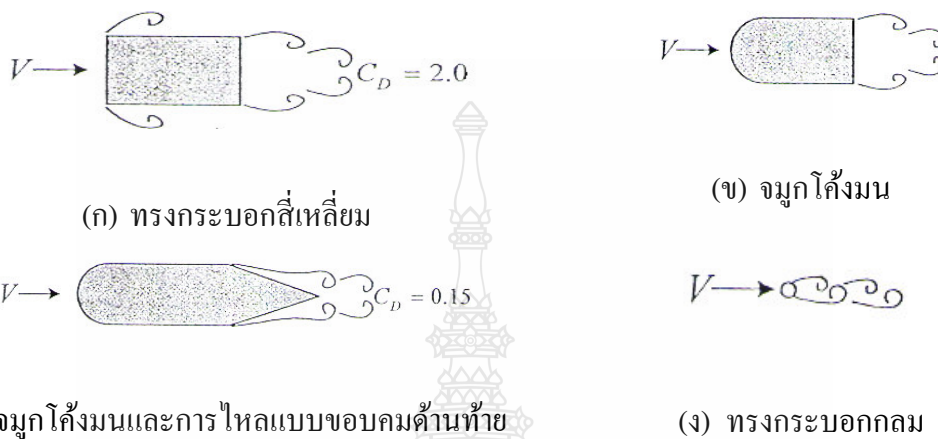


- (ก) ลูกบอลผิวเรียบ ชั้นขอบเป็นแบบชั้น
- (ข) ลูกบอลผิวขรุขระจากทราย การไหลแบบปั่นป่วน

ภาพที่ 2.16 การไหลแยกตัวเป็นชั้นและปั่นป่วนบนลูกโบว์ลิ่ง 216 มิลลิเมตร น้ำ 7.6 เมตร/วินาที

โดยทั่วไปไม่สามารถเน้นการไหลตามรูปร่างเพื่อลดแรงต้านที่เลขเรย์โนลด์ 100 ดังแสดงในภาพที่ 2.10 ทรงกระบอกสี่เหลี่ยมภาพที่ 2.10 (ก) มีการแยกตัวที่ทุกมุมคมและมีแรงต้านสูงมาก ส่วนโค้งมนแบบจมูกภาพที่ 2.10 (ข) จะลดแรงต้านลงไป 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ค่า C_D ยังสูงอยู่ การไหล

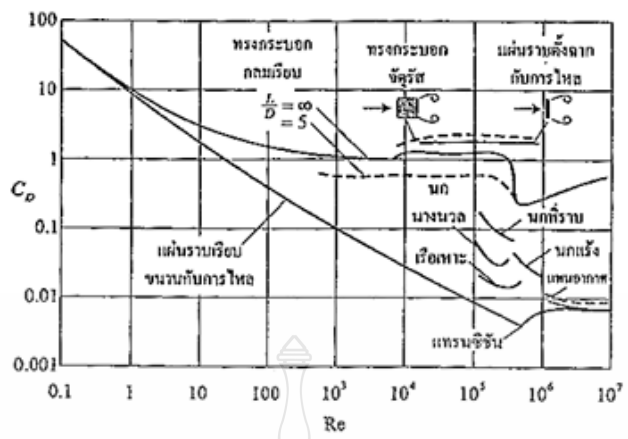
ด้านหลังถึงขอบด้านท้ายแหลมคมภาพที่ 2.10 (ค) จะลดแรงต้านลงไป 85 เปอร์เซ็นต์ ถึงค่าต่ำสุดดังเทียบกับทรงกระบอกกลมในภาพที่ 2.10 (ง) ที่มีความหนาเพียงหนึ่งในแปด และหนึ่งในสามพันเมื่อผ่านน้ำตัด (ค) ภาพที่ 2.10 (ค) ซึ่งมีแรงต้านเหมือนกับรถยนต์ประสิทธิภาพสูง



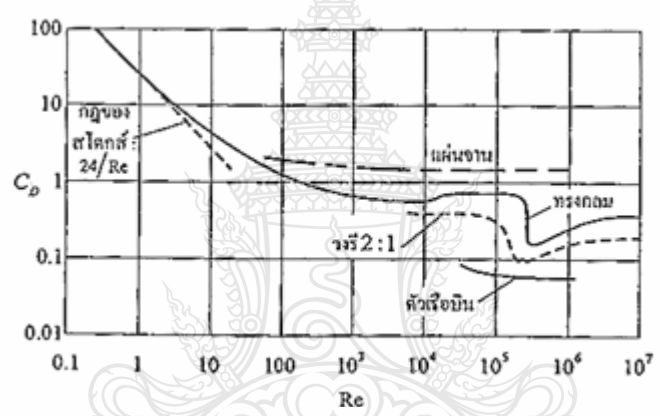
ภาพที่ 2.17 การไหลเพื่อลดแรงต้านของวัตถุ ค่า C_D สัมพันธ์กับพื้นที่ฉายด้านหน้า

2.8.4 วัตถุสองมิติ

แรงต้านของวัตถุที่มีความกว้าง (Wide Span) แบบสองมิติเทียบกับเลขเรย์โนลด์ดังแสดงในภาพที่ 2.18 (ก) วัตถุมีค่า C_D สูงที่ความเร็วแบบคิบคลานที่มีค่า $Re \leq 1.0$ การแยกตัวเกิดขึ้นที่เลขเรย์โนลด์สูง ค่า C_D สัมพันธ์กับพื้นที่ระนาบ








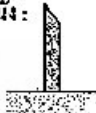





(ก) วัตถุสองมิติ



(ข) วัตถุสามมิติ

ภาพที่ 2.18 สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุเรียบที่เลขมัคต่ำ



รูปร่าง	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	รูปร่าง	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	รูปร่าง	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า
ทรงกระบอกจตุรัส:	2.1	ครึ่งทรงกลม:	1.2	แผ่นราบ:	2.0
→ 		→ 		→ 	
→ 	1.6	→ 	1.7	แผ่นราบบางตั้งฉากกับหนึ่ง:	1.4
ท่อค้ำซีก:	1.2	สามเหลี่ยมด้านเท่า:	1.6	→ 	
→ 		→ 		หกเหลี่ยม:	1.0
→ 	2.3	→ 	2.0	→ 	0.7

รูปร่าง	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า																						
หน้าตัดขยุกไถ้งนม:	<table border="1"> <tr> <td>L/H:</td> <td>0.5</td> <td>1.0</td> <td>2.0</td> <td>4.0</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>C_D:</td> <td>1.16</td> <td>0.90</td> <td>0.70</td> <td>0.68</td> <td>0.64</td> </tr> </table>					L/H :	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	C_D :	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64						
L/H :	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0																		
C_D :	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64																		
หน้าตัดขยุกเรียบ:	<table border="1"> <tr> <td>L/H:</td> <td>0.1</td> <td>0.4</td> <td>0.7</td> <td>1.2</td> <td>2.0</td> <td>2.5</td> <td>3.0</td> <td>6.0</td> </tr> <tr> <td>C_D:</td> <td>1.9</td> <td>2.3</td> <td>2.7</td> <td>2.1</td> <td>1.8</td> <td>1.4</td> <td>1.3</td> <td>0.9</td> </tr> </table>					L/H :	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0	C_D :	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9
L/H :	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0															
C_D :	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9															
ทรงกระบอการี:	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>แนวเป็นซี่</th> <th>ป้านวน</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:1</td> <td>1:2</td> <td>0:3</td> </tr> <tr> <td>2:1</td> <td>0:6</td> <td>0:2</td> </tr> <tr> <td>4:1</td> <td>0:35</td> <td>0:15</td> </tr> <tr> <td>8:1</td> <td>0:25</td> <td>0:1</td> </tr> </tbody> </table>						แนวเป็นซี่	ป้านวน	1:1	1:2	0:3	2:1	0:6	0:2	4:1	0:35	0:15	8:1	0:25	0:1			
	แนวเป็นซี่	ป้านวน																					
1:1	1:2	0:3																					
2:1	0:6	0:2																					
4:1	0:35	0:15																					
8:1	0:25	0:1																					

ภาพที่ 2.19 ข้อมูลแรงต้านบนพื้นที่ฉายด้านหน้าของวัตถุสามมิติที่ค่า $Re_d \geq 10^4$

2.8.5 วัตถุสามมิติ

สัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุสามมิติดังแสดงในภาพที่ 2.20

วัตถุ	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	วัตถุ	C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า
ลูกบาศก์:	1.07	กรวยกลม:	$\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ C_D : [0.50 0.40 0.55 0.65 0.80 1.05 1.15]
→		การไหลรอบเป็นชั้น	
→	0.81	แผ่นทรงกระบอกตั้ง:	L/D : 1 2 3 5 10 20 40 ∞ C_D : [0.64 0.68 0.72 0.74 0.82 0.91 0.98 1.20]
→	1.4	จานรูปดาวโรตา	
→	0.4	พินรูปทรง:	$22.72 \pm 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ C_D : [1.42 1.33 1.28 1.05 0.95 0.82]
แผ่นจาน:	1.17	รูปสี่เหลี่ยมคางหมู:	$C_{D,A} = 0.8^2 \uparrow C_{D,A} = 1.2 \Omega^2$
→		→	
วงจรีฐ (รูปรี):	1.2	จั๊วเสา:	$U, m/s$: 10 20 30 40 C_D : [1.2 ± 0.2 1.0 ± 0.2 0.7 ± 0.2 0.5 ± 0.2]
เส้นทางการไหลรอบไฟ (ประมาณการแทนที่ 5 อันดับ):	$C_{D,A} = 8.5 m^2$	หัวเสาทรงกรวย:	ไม่มีอุปกรณ์ห้ามชน: 0.96 มีอุปกรณ์ห้ามชน: 0.76
→		→	
โถงงาน:			
→			
ตุ้มน้ำหนัก: $C_{D,A} = 0.51 m^2$ 10 เซนติเมตร: $C_{D,A} = 0.30 m^2$			

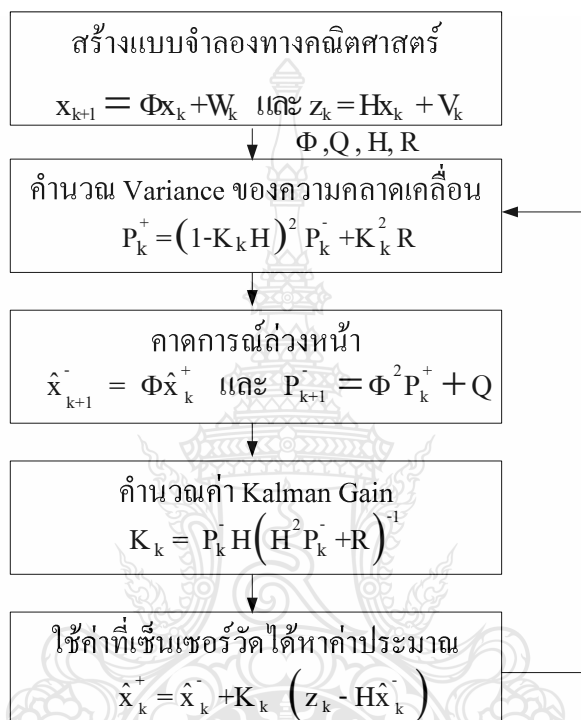
วัตถุ	อัตราส่วน C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า	วัตถุ	อัตราส่วน C_D บนพื้นที่ฉายด้านหน้า
แผ่นวางรูปสี่เหลี่ยม:	b/h : 1 1.18 5 1.2 10 1.3 20 1.5 ∞ 2.0	ทรงกระบอกตีความหัวเรียบ:	L/d : 0.5 1.15 1 0.90 2 0.85 4 0.87 8 0.90
รูปกลมไข่:	L/d : 0.75 0.5 0.2 1 0.47 0.2 2 0.27 0.1 4 0.25 0.1 8 0.2 0.08	ทรงกลมที่มีแรงกดต่อผิว: $C_D = 0.95$ $1.55 < Re_p < 11.5$	
2 : 1	0 : 6 0 : 2		
4 : 1	0 : 35 0 : 15		
8 : 1	0 : 25 0 : 1		

ภาพที่ 2.20 แรงต้านของวัตถุสามมิติที่ $Re_d \geq 10^4$

2.9 เทคนิค Kalman Filter [11]

ตัวกรองคาลมานเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกตั้งชื่อตาม รูดอล์ฟ อี คาลมาน (Rudolf E.Kalman) มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการประมาณค่าจากการวัดที่ถูกสังเกตในการประมาณค่าจากช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณรบกวนในรูปแบบสุ่ม และมีค่าความไม่แม่นยำต่างๆ และค่าที่ผลิตได้จากการกรองแบบคาลมานจะมีความใกล้เคียงค่าที่แท้จริงมากกว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าคำนวณที่

เกี่ยวข้องกับต่างๆของการวัด ตัวกรองคาลมานมีการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การลดสัญญาณรบกวน และอื่นๆ เทคนิคการกรองสัญญาณแบบคาลมานสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเชื่อมโยงดังในภาพที่ 2.19 เทคนิค Kalman Filter จะประกอบด้วย สองส่วนหลัก คือ การคาดการณ์ และการแก้ไขค่า



ภาพที่ 2.21 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman Filter ที่เวลา t ใดๆ

2.9.1 การคาดการณ์

การคาดการณ์นั้นเป็นขั้นตอนแรกของเทคนิค Kalman Filter ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ (Predicted State) หรือที่เรียกว่าตัวแปรสถานะเบื้องต้น (Priori State) ถูกคำนวณโดยไม่ได้สนใจสัญญาณรบกวนทางพลศาสตร์และแก๊สมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ

$$\dot{x}^-(t) = F \cdot x^-(t) \quad (2.12)$$

เวกเตอร์ตัวแปรสถานะที่เวลา t สามารถแสดงโดยอนุกรม Taylor เมื่อเทียบกับตัวแปรสถานะ $x^-(t_0)$

$$x^-(t) = x^-(t_0) + \dot{x}^-(t_0)(t-t_0) + \frac{1}{2}\ddot{x}^-(t_0)(t-t_0)^2 + \dots \quad (2.13)$$

โดยใช้สมการที่ 2.13 นี้ ดังนั้นสมการด้านบนสามารถเขียนได้เป็น

$$x^-(t) = x^-(t_0) + F \cdot x^-(t_0)(t-t_0) + \frac{1}{2}F^2 x^-(t_0)(t-t_0)^2 + \dots \quad (2.14)$$

ดังนั้นผลลัพธ์ $x^-(t)$ ของสมการเชิงอนุพันธ์ หรืออีกนัยหนึ่ง ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ที่แท้จริงเป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะเริ่มต้นที่ $x^-(t_0)$

$$x^-(t) = \Phi'_0 \cdot x^-(t_0) \quad (2.15)$$

Φ'_0 ถูกเรียกว่า เมตริกซ์การถ่ายโอนตัวแปรสถานะ ซึ่งแปลงตัวแปรสถานะเริ่มต้นใดๆ $x(t_0)$ ไปเป็นตัวแปรสถานะที่สอดคล้องกัน $x(t)$ ที่เวลา t จากสมการที่ 2.15 และ 2.16

$$x^-(t) = F \cdot x^-(t) = F \cdot \Phi'_0 \cdot x^-(t_0) \quad (2.16)$$

และโดยการใช้สมการที่ 2.13 อีกครั้ง ก็จะได้

$$\dot{x}^-(t) = \frac{d}{dt} x^-(t) = \frac{d}{dt} [\Phi'_0 \cdot x^-(t_0)] = \left[\frac{d}{dt} \Phi'_0 \right] \cdot x^-(t_0) \quad (2.17)$$

โดยเปรียบเทียบ สมการที่ 2.15 และ 2.16 จะได้

$$\frac{d}{dt} \Phi'_0 = F \cdot \Phi'_0 \neq \Phi'_0 \quad (2.18)$$

โดยใช้เมตริกซ์เริ่มต้นที่ $\Phi_0^0 = I$ ได้มาเนื่องจาก $x(t_0) = I \cdot x(t_0)$

และเมตริกซ์ความแปรปรวน (Covariance Matrix) $P^-(t_i)$ ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์จะได้ตามกฎของการแพร่กระจายของค่าความผิดพลาด

$$P^-(t_i) = \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} \cdot P(t_{i-1}) \cdot (\Phi_{t_{i-1}}^{t_i})^T + Q \quad (2.19)$$

ในรูปแบบทั่วไปแล้ว เมตริกซ์ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน Q เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นเมตริกซ์ความแปรปรวนจะเป็นดังนี้

$$P^-(t_i) = \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} \cdot P(t_{i-1}) \cdot (\Phi_{t_{i-1}}^{t_i})^T + \int_{t_i}^{t_i} Q(t) dt \quad (2.20)$$

2.9.2 การแก้ไขค่า

ในขั้นตอนการแก้ไขค่า เวกเตอร์ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ $X^-(t_i)$ ถูกปรับปรุงด้วยค่าสังเกตการณ์ ที่วัดได้ในช่วงเวลา t_i ดังนั้นตัวแปรสถานะหลังการแก้ไข (Posterior State) มีรูปแบบเป็น

$$x^+(t_i) = x^-(t_i) \quad (2.21)$$

โดยใช้เมตริกซ์ความแปรปรวน

$$P^+(t_i) = P^-(t_i) + \Delta P(t_i) \quad (2.22)$$

เหมือนที่กล่าวไปแล้ว Kalman Filter เป็นตัวกรองสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด นี้หมายความว่า การแปรปรวนของตัวแปรสถานะในเมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสถานะ P^+ จะมีค่าที่น้อยที่สุดขณะที่ P^- ได้คำนวณมาจากขั้นตอนจากการคาดการณ์ จะได้ ΔP ที่เป็นค่าที่น้อยที่สุด

$$\Delta P(t_i) = E[\Delta x(t_i) \Delta x(t_i)^T] \quad (2.23)$$

ซึ่งเงื่อนไขนี้จะสอดคล้องกับ

$$\Delta x(t_i) = P^- H^T (HP - H^T + R(t_i))^{-1} \cdot (l(t_i) - Hx^-(t_i)) \Rightarrow \Delta x(t_i) = K(t_i) \cdot (l(t_i) - l^-(t_i)) \quad (2.24)$$

$$\text{และ } K(t) = P^- H^T (HP - H^T + R(t_i))^{-1} \quad (2.25)$$

K ถูกเรียกเป็นเมตริกซ์อัตราขยาย (Gain Matrix) ค่าความแตกต่างของ $I(t_i) - I^-(t_i)$ นั้นถูกเรียกว่า ค่าที่เหลือจากการวัด (Measurement Residual) ซึ่งมันแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการวัดที่ได้จากการคาดการณ์ $I(t_i) = Hx^-(t_i)$ และการวัดที่ได้จริง $I(t_i)$ สุดท้ายตัวแปรสถานะที่ถูกแก้ไขจะได้จากการคำนวณดังนี้

$$x^+(t_i) = x^-(t_i) + K(t_i) \cdot (I(t_i) - I^-(t_i)) \quad (2.26)$$

ในสมการนี้ตัวแปรสถานะที่ถูกประมาณค่าและค่าที่วัดได้นั้นจะถูกแบ่งความสำคัญตามน้ำหนักแล้วนำมารวมกันเพื่อคำนวณตัวแปรสถานะที่ถูกแก้ไขค่าซึ่งหมายความว่า ถ้าค่าความแปรปรวนจากการวัดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนของตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์ น้ำหนักของการวัดจะสูงกว่าและตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์จะต่ำ และดังนั้นความไม่แน่นอนจะสามารถลดลงได้เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสถานะหลังการแก้ไข (Posteriori) จะได้จากกฎของค่าแพร่กระจายของค่าความผิดพลาดดังนี้

$$P^+(t_i) = P^-(t_i) - K(t_i)HP^-(t_i) = (I - K(t_i)H)P^-(t_i) \quad (2.27)$$

2.10 เทคนิค Extended Kalman Filter

ในหัวข้อที่แล้วเทคนิค Kalman Filter นั้นจะใช้กับระบบเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแบบจำลองทางพลศาสตร์หรือการสังเกตการณ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น หนึ่งในเทคนิคของ Kalman Filter สำหรับปัญหาที่ไม่เชิงเส้น นั้นจะถูกเรียกว่า Extended Kalman Filter ซึ่งถูกค้นพบโดย Stanley F. Schmidt หลังจากที่ Kalman ได้นำเสนอผลลัพธ์ของเขาที่ได้จาก Kalman Filtering หลังจากนั้น Schmidt ได้เริ่มนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้สำหรับปัญหาการนำทางอวกาศในทันทีสำหรับ โครงการ Apollo เพื่อส่งมนุษย์ไปทำการสำรวจโลกพระจันทร์ และ เขาได้คิดค้น Extended Kalman Filter ในเทคนิค Kalman Filter จะประมาณค่าแบบเชิงเส้นรอบๆตัวแปรสถานะปัจจุบัน ดังนั้นระบบจะจำเป็นต้องถูกแสดงด้วยฟังก์ชันเชิงอนุพันธ์แบบต่อเนื่อง

ข้อเสียหนึ่งของเทคนิคนี้ของ Kalman Filter สำหรับระบบไม่เชิงเส้น มันต้องใช้การคำนวณที่ใช้เวลานานการดำเนินการสำหรับระบบเชิงเส้น จะสามารถทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นโดยการคำนวณเมตริกซ์ทางพลศาสตร์ (F) ไล่ล่วงหน้าเมตริกซ์การการถ่ายโอนตัวแปรสถานะ (Φ) และเมตริกซ์การสังเกตการณ์ (H) แต่สำหรับระบบไม่เชิงเส้น เมตริกซ์เหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะและจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆช่วงเวลาและจะไม่สามารถคำนวณไว้ล่วงหน้าก่อนได้

2.10.1 การคาดการณื

ในกรณีที่เป็นระบบไม่เชิงเส้น เมตริกซ์ทางพลศาสตร์ (F) จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะซึ่งจะถูกประมาณค่า ดังนั้นตัวแปรสถานะจากการคาดการณืจะถูกคำนวณ โดยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้านล่างนี้

$$\dot{x}^-(t) = f(x^-(t)) \quad (2.28)$$

โดยแทนสมการนี้ด้วยอนุกรม Taylor เมื่อเทียบกับ x แล้วแทนค่าตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณื $x^-(t_i)$ และสมมติว่าพจน์ที่มีอันดับสูงนั้นสามารถตัดทิ้งได้ เมตริกซ์ทางพลศาสตร์ที่เวลา t_i หรือ $F(t_i)$ จะสามารถถูกคำนวณโดย

$$F(t_i) = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{x=x^-(t_i)} \quad (2.29)$$

และขั้นตอนอื่นๆของการคาดการณืจะสามารถถูกคำนวณได้ดังแสดงใน สมการที่ 2.26 และ 2.27 แต่ควรจะสังเกตว่าเมตริกซ์ที่ถูกใช้ไม่เป็นค่าคงที่เหมือนในกรณีระบบแบบเชิงเส้น แต่จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลา

$$\frac{d}{dt} \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} = F(t_i) \cdot \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} - 1 \quad (2.30)$$

$$P^-(t_i) = \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} \cdot P(t_{i-1}) \cdot (\Phi_{t_{i-1}}^{t_i})^T + \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q(t) dt \quad (2.31)$$

2.10.2 การแก้ไขค่า

เหมือนกับสมการเชิงอนุพันธ์ในขั้นตอนจากการคาดการณื สมการการสังเกตการณืที่ไม่เชิงเส้นที่สอดคล้องกัน จะถูกทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้อนุกรม Taylor รอบๆตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณื $x^-(t_i)$ และพจน์อันดับสูงจะถูกตัดทิ้งไปดังนั้นเมตริกซ์การสังเกตการณืที่ถูกประมาณจะได้เป็น

$$H(t_i) = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x=x^-(t_i)} \quad (2.32)$$

ในกรณีนี้การวัดจากการคาดการณ์ $l^-(t_i)$ หารับการคำนวณค่าที่เหลือจากการวัด $(l(t_i) - l^-(t_i))$ เป็น

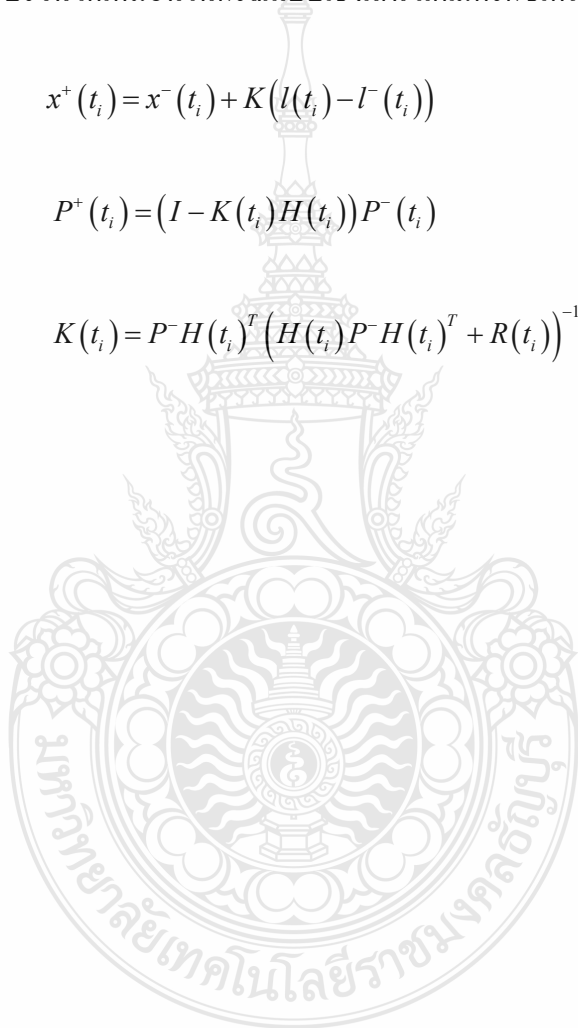
$$l^-(t_i) = h(x^-(t_i)) \quad (2.33)$$

นอกจากนี้ เราสามารถใช้สูตรเดียวกันอีกครั้งในการคำนวณตัวแปรสถานะจากการแก้ไขค่า และเมตริกซ์ความแปรปรวนได้เหมือนในกรณีแบบเชิงเส้น แต่เมตริกซ์เหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของเวลา

$$x^+(t_i) = x^-(t_i) + K(l(t_i) - l^-(t_i)) \quad (2.34)$$

และ
$$P^+(t_i) = (I - K(t_i)H(t_i))P^-(t_i) \quad (2.35)$$

กับ
$$K(t_i) = P^-H(t_i)^T (H(t_i)P^-H(t_i)^T + R(t_i))^{-1} \quad (2.36)$$



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

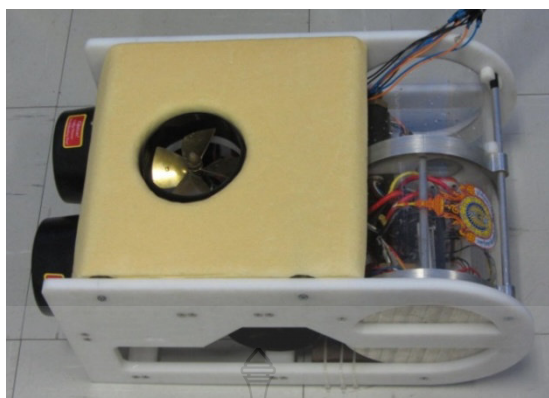
กิจกรรม	2554			2555						2556	
	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.	พ.ค. มี.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.
1.ศึกษาและรวบรวมข้อมูล											
2.ออกแบบตัวหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักควบคุมระยะไกลด้วยโปรแกรม SolidWorks											
3.สร้างหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนักวัสดุ Delrin และติดตั้งอุปกรณ์											
4.ออกแบบและสร้างถังอะคริลิกถึงเก็บอุปกรณ์ควบคุมในตัวหุ่นยนต์ค้ำน้ำหนัก											
5.เรียนรู้และออกแบบโปรแกรม Arduino จากจอยควบคุม											

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน(ต่อ)

กิจกรรม	2554			2555				2556			
	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.	พ.ค. มิ.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.
6.ออกแบบ โปรแกรมระบบ ควบคุมระดับความ ลึกแบบป้อนกลับ											
7.ศึกษาและทดลอง เซนเซอร์ (Gyro, Accelometr, Compass)											
8.ศึกษาและทดลอง Kalman filter											
9.วิเคราะห์และ แก้ปัญหา											
10.สรุปและจัดพิมพ์ รายงาน											

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

โครงสร้างทั้งหมดของหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลตัวนี้ได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks ซึ่งเกณฑ์การออกแบบได้เน้นไปที่ความกระชับรัดกุมลดแรงต้านจากน้ำด้วยทรงกระบอกโค้งมนทางด้านหน้า และท่อนโพนอยู่ตรงส่วนกลางตัวหุ่นยนต์ดำน้ำ ซึ่งโพนที่ติดอยู่ด้านบนโครงสร้างให้เสถียรภาพการลอยตัวให้กับหุ่นยนต์ดำน้ำและเพื่อที่จะให้หุ่นยนต์ดำน้ำลอยอยู่ในระดับผิวน้ำขณะหยุดนิ่ง โครงสร้างส่วนใหญ่ของตัวหุ่นยนต์ดำน้ำได้เลือกใช้วัสดุ Delrin ที่มีความยืดหยุ่นและทนต่อการกัดกร่อนจากน้ำเค็มทำให้สามารถทำงานได้ทั้งในสภาวะน้ำเค็มและน้ำจืดภาพที่ 3.1 แสดงถึงภาพของตัวหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลหลังจากที่ได้ประกอบสมบูรณ์แล้วและได้ถ่วงน้ำหนักในการลอยตัวด้วย



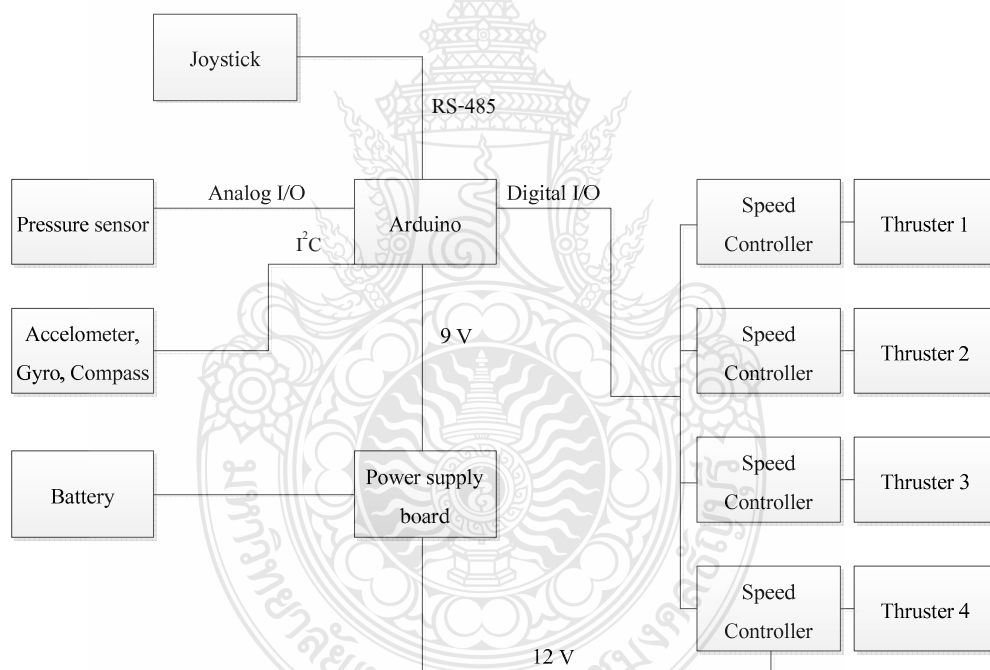
ภาพที่ 3.1 หุ่นยนต์ดำน้ำที่ประกอบเสร็จ

ซึ่งคุณสมบัติของหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 มอเตอร์จำนวน 4 ตัวจาก Crust Crawler รุ่น High Flow 400 HFS ได้ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนหลักของหุ่นยนต์ดำน้ำนี้ สำหรับคุณสมบัติของมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นสามารถดำลึกลงไปได้สูงสุดที่ความลึก 50 เมตร และให้กำลังขับเคลื่อนที่ 8 ปอนด์ เมื่อใช้ไฟเลี้ยง 12 โวลต์ ติดตั้งพร้อมกับชุดขับเคลื่อนเพื่อควบคุมรอบมอเตอร์จาก Castles รุ่น Hydra 120 ทั้ง 4 ตัว มอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวนอนเพื่อเดินหน้า, ถอยหลัง ซึ่งติดตั้งอยู่ด้านหลังของหุ่นยนต์ดำน้ำและสามารถสร้างให้เกิดเป็นโมเมนต์รอบแกน Z เพื่อให้หุ่นยนต์ดำน้ำเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวา แสดงไว้ดังภาพที่ 3.1 ส่วนมอเตอร์ตัวที่ 3 ได้ติดตั้งไว้ในแนวดิ่งเพื่อให้เคลื่อนที่ในการดำขึ้นหรือลง ส่วนมอเตอร์ตัวที่ 4 ได้ติดตั้งให้ตั้งในแนวนอนให้ตั้งฉากกับมอเตอร์ 2 ตัวแรก เพื่อให้หุ่นยนต์ดำน้ำเลี้ยวซ้าย - ขวา ในแนวนอนได้โดย

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการออกแบบ

ความเร็วสูงสุด	1 เมตร/วินาที
ความลึกที่ทำได้	10 เมตร
ขนาด	260 × 440 × 200 (มิลลิเมตร)
น้ำหนัก	7.5 กิโลกรัม
ใบพัดขับเคลื่อน	4 High Flow 400 HFS thrusters
เซนเซอร์	เซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์เข็มทิศ เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม
แบตเตอรี่	12 โวลต์

มอเตอร์สั่งให้ทำงานได้โดยสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ที่สร้างขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino แบบ 8 บิต รุ่น Mega 2560 นอกจากนี้ยังมีเซ็นเซอร์วัดความดัน เข็มทิศ แบบดิจิทัลและเซ็นเซอร์วัดมุมเอียงต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ด้วยสัญญาณอะนาล็อก และ สัญญาณ I²C ตามลำดับ เพื่อจะทำให้หุ่นยนต์ดำน้ำนี้สามารถควบคุมระดับความลึกในการดำน้ำได้ และสามารถวัดข้อมูลทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งข้อมูลนี้จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติการสามารถบังคับและสามารถประมาณค่าทิศทางการหันเหของหุ่นยนต์ดำน้ำได้ เมื่อปฏิบัติงานอยู่ในน้ำที่มีความขุ่นมาก เช่นในแม่น้ำ ในอ่างเก็บ แหล่งจ่ายพลังงานหลักของหุ่นยนต์ดำน้ำใช้แบตเตอรี่ 12 โวลต์ แบบให้พลังงานต่อเนื่องได้นาน (Deep Cycle) ระบบอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดที่ใช้ได้รับกระแสไฟฟ้าผ่านตัวควบคุม โวลต์ตามระดับ โวลต์ของอุปกรณ์แต่ละชนิดที่ระบุไว้ กระบอกอะคริลิกใต้น้ำด้านหน้าของหุ่นยนต์ดำน้ำใช้ในการติดตั้งกล้องวิดีโอแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ทั้งหมดได้แสดงดังภาพที่ 3.2

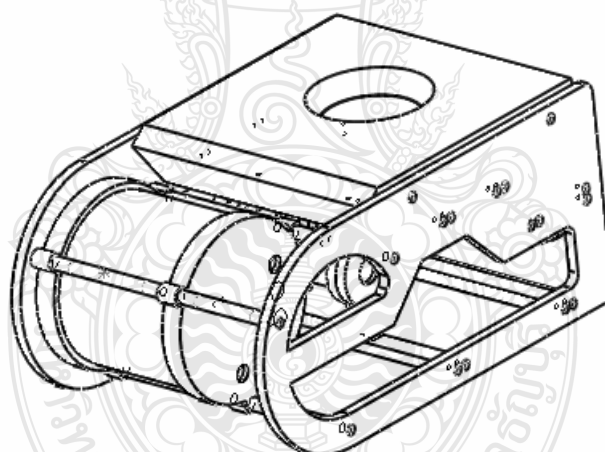


ภาพที่ 3.2 แผนภาพอุปกรณ์หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล

3.3 การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล

จากการศึกษาทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหลแล้วจึงได้ดำเนินการออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำขนาดเล็กให้ระบบทั้งหมดสามารถขนย้ายได้ง่ายและสะดวก โดยการออกแบบได้ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Works และมีเกณฑ์การออกแบบรายละเอียดในการออกแบบ คือ

- 1) ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำจะต้องประสบกับผลกระทบจากแรงต้านของน้ำน้อยที่สุด
- 2) หุ่นยนต์ดำน้ำต้องมีเสถียรภาพในการลอยตัวเพื่อให้การควบคุมจากผู้บังคับสามารถควบคุมได้ง่าย
- 3) หุ่นยนต์ดำน้ำต้องมีระบบกันน้ำที่ดีเพื่อไม่มีน้ำรั่วซึมเข้าไปในแผงควบคุมได้
- 4) และในรายละเอียดในการออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล ได้มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วนหลัก คือ ถังเก็บแผงวงจรควบคุม โครงสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำพร้อมแท่นจับยึดมอเตอร์ขับเคลื่อนทั้ง 4 มอเตอร์ และแท่งโฟม ดังต่อไปนี้

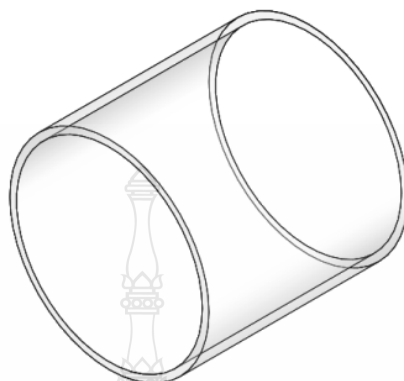


ภาพที่ 3.3 หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกล

3.3.1 ถังเก็บแผงวงจรควบคุม

ถังเก็บแผงวงจรควบคุม โดยทำจากอะคริลิก (Acrylic) ใสทรงกระบอกกลางซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนจากสารเคมี มีรัศมี 0.15 เมตร และหนา 0.005 เมตร ชั้นวางทำจาก Delrin ออกแบบให้มีขนาดเล็กพอดีกับบอร์ดวงจรควบคุม ทำการจัดวางบอร์ดต่างๆ ในการควบคุมเอาไว้ด้วยกันฝาปิดถึง

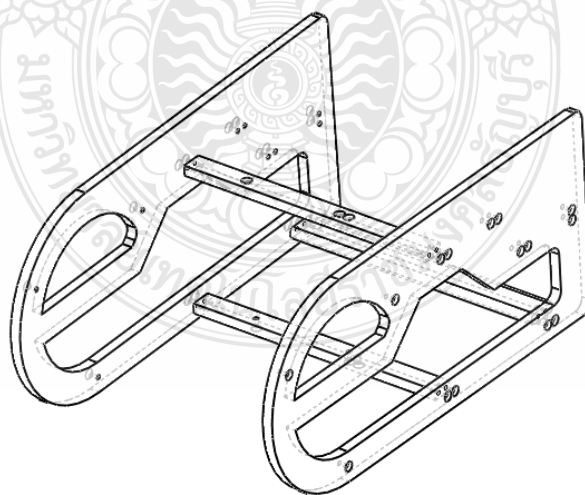
เก็บแผงวงจรควบคุมพร้อมทั้งกลิ้งช่องใส่โอริงจำนวน 2 ช่อง เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมเข้าไปภายในถัง โดยฝาปิดทำจาก อะลูมิเนียม (Aluminium)



ภาพที่ 3.4 ถังเก็บแผงวงจรควบคุม

3.3.2 โครงสร้างหุ่นยนต์ค้ำน้ำพร้อมแท่นจับยึดมอเตอร์ขับเคลื่อน

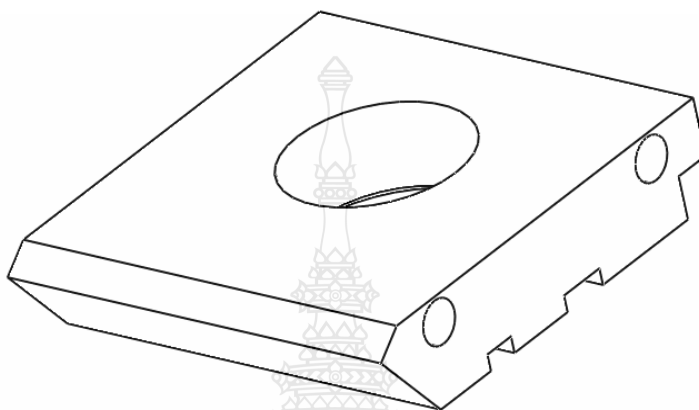
โครงสร้างหุ่นยนต์ค้ำน้ำทำจาก Delrin ซึ่งมีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่นในตัว ทนทานต่อการเสียดสีโครงสร้างเพื่อความแข็งแรงออกแบบให้มีความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อสามารถยึดหนี้ออกได้กับแท่นจับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวได้อย่างแข็งแรง



ภาพที่ 3.5 โครงสร้างและแท่นจับยึดมอเตอร์

3.3.3 แท่งโฟม

โฟมมีหน้าช่วยในการเพิ่มแรงลอยตัวให้แก่ตัวหุ่น เพื่อให้หุ่นรักษาระดับอยู่ในระดับผิวน้ำ ช่วยแก้ปัญหาเมื่อตัวหุ่นเกิดการขัดข้องระหว่างการปฏิบัติงาน หุ่นจะลอยขึ้นมาสู่ผิวน้ำเพื่อง่ายในการเก็บมาซ่อมแซม และยังช่วยในการรักษาจุดศูนย์กลางมวล ทำให้ตัวหุ่นไม่เกิดโมเมนต์พลิกคว่ำอีกด้วย



ภาพที่ 3.6 แท่งโฟม

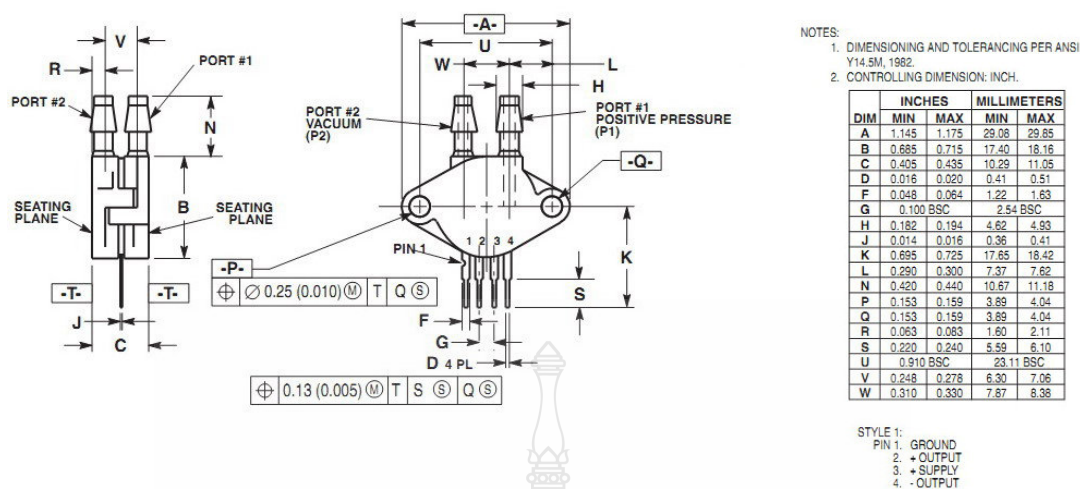
3.4 เซนเซอร์ในการทดสอบค่า

ปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานขึ้นอยู่กับปริมาณธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัดและนำมาใช้ในการควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึงราคา ความน่าเชื่อถือตลอดจนคุณภาพของข้อมูลที่ทำกรวัดนอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก เช่นความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ เซนเซอร์วัดค่า อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่างๆ เช่นอุณหภูมิเสียง แสง แรงทางกล (Force) ความดันบรรยากาศ (Pressure) ระยะกระจัด (Displacement) ความเร็ว (Speed) อัตราเร่ง (Acceleration) ระดับของของเหลว (Liquid Level) และอัตราการไหล (Flow Rate) จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณออกหรือเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้

3.4.1 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor) [12]

เซ็นเซอร์วัดความดันส่วนใหญ่ที่ใช้กันทั่วไปในทางปฏิบัติของอุตสาหกรรมเป็นเซนเซอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสภาพแวดล้อมระบบอัตโนมัติต่างๆ ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการ

อนุรักษ์น้ำและไฟฟ้าพลังน้ำ ทางรถไฟขนส่ง อาคารอัจฉริยะอัตโนมัติ การผลิต การบิน ทหาร ปิโตรเคมีน้ำมัน การต่อเรือเครื่องมือกล ท่อและอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกมากมาย



ภาพที่ 3.7 เซนเซอร์วัดความดัน [12]

เซนเซอร์วัดความดันชนิดนี้สามารถทนแรงดันได้ที่ 50 kiloPascal และที่อุณหภูมิ -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ว่าที่แรงดันสูงสุดสุดของเซนเซอร์ทนได้ คือ

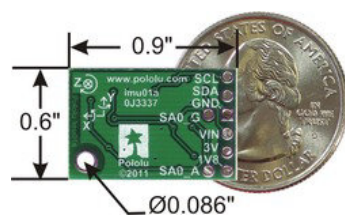
น้ำมีความหนาแน่น $\rho = 1000$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

น้ำสูง 1 เมตร หรือ 1000 มิลลิเมตร มีความดัน $9807 \text{ Pa} = 9.807 \text{ kPa}$

ดังนั้นแรงดันที่เซนเซอร์วัดความดันสามารถทนได้เท่ากับ $\frac{50 \text{ kPa}}{9.807 \text{ kPa}} = 5.098 \text{ m}$

3.4.2 เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล (Digital Compass) [13]

เซนเซอร์ คือเครื่องมือสำหรับใช้หาทิศทาง มีเข็มแม่เหล็กที่แกว่งไกวได้อิสระในแนวนอน ทอดตัวในแนวเหนือและใต้ ตามแรงดึงดูดของแม่เหล็ก และเข็มทิศจะชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ เมื่อทราบทิศเหนือแล้วก็ย่อมหาทิศอื่นได้โดยหันหน้าไปทางทิศเหนือ ด้านขวามือเป็นทิศตะวันออก ด้านซ้ายมือเป็นทิศตะวันตก ด้านหลังเป็นทิศใต้ การบอกทิศทางในแผนที่โดยทั่วไป คือการบอกเป็นทิศที่สำคัญ 4 ทิศ คือทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก หรืออาจจะบอกละเอียดขึ้นอีกก็ได้



(ก) รุ่น Pololu



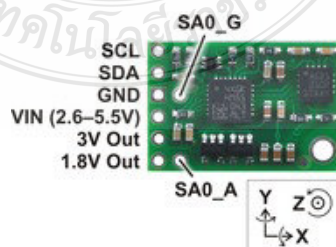
(ข) รุ่น HMC6343

ภาพที่ 3.8 เข็มทิศแบบดิจิทัล (Digital Compass) [13]

เซนเซอร์ Pololu นั้นจะประกอบไปด้วยไอซี L3G4200D และ LSM303 ซึ่งเป็นเซนเซอร์แบบวัดมุมเอียง (Gyro), เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล (Digital Compass) รวมอยู่ในตัวเดียวกัน มีขนาดกว้าง 0.6 นิ้ว ยาว 0.9 นิ้ว มีขนาดเล็กต้องใช้ไฟเลี้ยงเซนเซอร์อยู่ที่ 3.3 – 5 โวลต์ และเซนเซอร์เข็มทิศรุ่น HMC6343 นั้นประกอบด้วยขนาดความกว้าง 0.80 นิ้ว ยาว 0.82 นิ้ว เป็นเข็มทิศเพียงอย่างเดียว ส่วนทางด้านการส่งข้อมูลออกจากเซนเซอร์ที่ผ่านได้ใช้ร่วมกันคือ สัญญาณ I²C ที่ช่วยให้ทั้งสองเซนเซอร์ส่งผ่านข้อมูลไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้เลือกใช้คือ บอร์ด Arduino Mega 2560 โดยทิศทางการหมุนอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 360 องศา

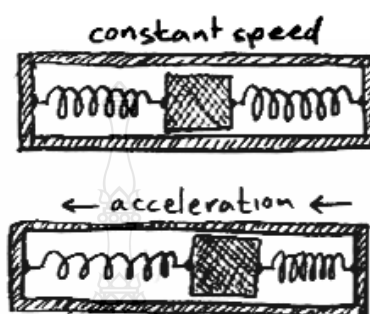
3.4.3 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) [13]

เซนเซอร์วัดความเร่ง คือ เครื่องวัดความเร่ง จากการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยหลักการทำงาน ให้นึกถึงห้องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่ทุกด้านของกำแพงจะมีสปริงติดอยู่เวลาที่ห้องนี้เอียงไปทางใดทางหนึ่งสปริงก็จะยุบไปด้านนั้นๆ โดยคิดว่าแรงดันของสปริงมีน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลกและใช้วงจรไฟฟ้าในการดึงสัญญาณเอาต์พุตออกมาใช้งาน Output ของ Accelerometer จะขึ้นกับแรงโน้มถ่วง นั่นหมายถึงค่า Output ของ Accelerometer ไม่มีทางหยุดนิ่งเลย แม้ปล่อยทิ้งไว้ สัญญาณก็จะวิ่งขึ้นๆ ลงๆ สั่นไปสั่นมา



ภาพที่ 3.9 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ของ Pololu [13]

เราจะใช้ Accelerometer สำหรับเป็นตัวชี้ว่าอยู่ในสถานะนิ่งๆ หรือเคลื่อนไหวทันทีทันใด หรือหยุดทันทีทันใด นั้นทำให้ Accelerometer เป็นเซนเซอร์สำหรับบอกสถานะวัดความเร่งได้ทั้งใน แกน X แกน Y และแกน Z โดยจะส่งสัญญาณผ่าน I²C ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560

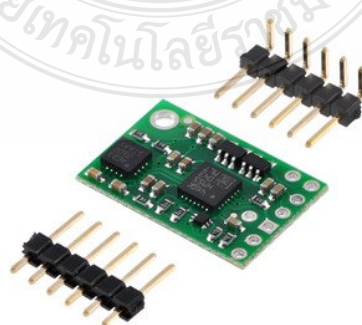


ภาพที่ 3.10 หลักการพื้นฐานของการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่ง

ค่าความเร่งที่ได้มานั้นอาจมีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งอาจจะต้องใช้โปรแกรมในการตัดสัญญาณรบกวนและใช้เทคนิคการประมาณค่า เพื่อกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนนั้นออกไป เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน และสามารถนำมาอินทิเกรต เพื่อประมาณค่าความเร็ว และตำแหน่งต่อไป ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบที่จะนำไปใช้

3.4.4 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) [13]

เซนเซอร์ Gyro จะทำหน้าที่วัดความเร็วเชิงมุม ก็คือความเร็วในการหมุนเชิงมุม (Ω) ในวิชาฟิสิกส์ยกตัวอย่างถ้าเราจับ Gyro มาเอียงแล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตเราจะพบว่าสัญญาณจาก Gyro จะออกก็ต่อเมื่อเกิดการเอียง หรือกำลังจะเอียงหรือเกิดการเคลื่อนไหว เมื่อวัดอยู่นิ่งค่าจาก Gyro จะมีค่าใกล้ศูนย์ เพราะไม่มีความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่



ภาพที่ 3.11 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) ของ Pololu

Gyro ที่ปล่อยทิ้งไว้ให้อยู่ร่วมกับที่ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะเกิดการแกว่งไปมาเนื่องจากสัญญาณรบกวนและถ้าเรานำค่า Output ของ Gyro มาหาปริพันธ์ หลังจากที่ได้กรองหรือตัดสัญญาณรบกวนออกไปก็จะสามารถคำนวณหามุมการหมุนได้ (เพราะเอาต์พุตของ Gyro เป็นความเร็วเชิงมุม ถ้าอินทิเกรตจะได้ องศาการหมุน)

ส่วนกรรมวิธีในการหาปริพันธ์ในโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์เราจะใช้เทคนิคการหาปริพันธ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Integral) หรือเป็นการหาผลรวมหรือการบวกรวมของสัญญาณแล้วคูณด้วยช่วงเวลาในไมโครคอนโทรลเลอร์ ไปจนครบจำนวนครั้ง ถ้ามองกลับไปทีรากฐานของการอินทิเกรต เมื่อมีกราฟของสัญญาณของความเร็วเชิงมุมที่เป็นฟังก์ชันของเวลาทำให้ ค่าอินทิเกรตได้ก็คือพื้นที่ใต้กราฟเราจะอินทิเกรตซึ่งทำได้โดยแบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นช่วงเล็กๆ แล้วหาพื้นที่เล็กๆ นั้น จากนั้นก็จับมารวมกันถ้าเราแบ่งพื้นที่เล็กๆ นั้นด้วยเวลา $t_0, t_1, t_2, \dots, t_n$ นั่นก็คือเอาพื้นที่ ระหว่างเวลา t_0 กับ t_1 มารวมกับพื้นที่ ระหว่างเวลา t_1 กับ t_2 เอาพื้นที่ไปรวมกับพื้นที่ระหว่างเวลา t_2 กับ t_3 ไปไปเรื่อยๆ ถึง t_{n-1} กับ t_n โดยไม่สนใจว่าพื้นที่นั้นมีค่าเป็นบวกหรือลบสุดท้ายแล้วคำตอบจะบอกเราเองว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการหาปริพันธ์ของความเร็วเชิงมุม จะมีมุมที่ชี้ไปในทิศทางใด ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีอื่นอีกมาก เช่น Kalman Filter และ Complementary Filter

3.5 ผลการคำนวณจากการออกแบบ

3.5.1 แรงลอยตัว

แรงลอยตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_B = \rho g V \quad (3.1)$$

เมื่อ	F_B	คือ แรงลอยตัว (นิวตัน)
	F_{w1}	คือ แรงเนื่องจากน้ำหนักของถังเก็บแผงวงจรควบคุม (นิวตัน)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (ประมาณเท่ากับ 1000 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
	g	คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (เมตร/วินาที ²)
	V	คือ ปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในน้ำ (ลูกบาศก์เมตร)

คำนวณหาแรงลอยตัว (F_B) ของถังอะคริลิก

โดยที่	เส้นผ่านศูนย์กลางถัง (D)	0.15 เมตร
	ความยาวของถัง (L)	0.15 เมตร

แรงลอยตัวของถัง

$$F_B = \left[1000 \times 9.81 \times \frac{\pi}{4} \times 0.15^2 \times 0.15 \right] = 26 \text{ นิวตัน}$$

น้ำหนักของถังเก็บแผงวงจร

$$F_{w1} = 4.299 \text{ นิวตัน}$$

3.5.2 น้ำหนักรวมโดยประมาณ

น้ำหนักรวมโดยประมาณของตัวหุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$m = \rho AL \quad (3.2)$$

เมื่อ m คือ น้ำหนัก (กิโลกรัม)

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของวัสดุ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่ของวัสดุ (ตารางเมตร)

L คือ ความยาวของวัสดุ (เมตร)

คำนวณหาน้ำหนักของโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ใต้น้ำ

มวลฝาปิดถังเก็บแผงวงจรควบคุม = 0.8508 กิโลกรัม

มวลโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ใต้น้ำ = 1.6861 กิโลกรัม

มวลแท่นจับมอเตอร์ขับเคลื่อน = 0.3446 กิโลกรัม

มวลรวมของโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ใต้น้ำ = 2.8815 กิโลกรัม

แทนค่าสมการ

ดังนั้น น้ำหนักของโครงสร้าง $F_{w2} = mg$

$$F_{w2} = 2.8815 \times 9.81$$

$$F_{w2} = 28.2675 \text{ นิวตัน}$$

คำนวณน้ำหนักของมอเตอร์ขับเคลื่อน

น้ำหนักมอเตอร์ขับเคลื่อน 4 ตัว $F_{WT} = 4 \times 4.905$

$$F_{WT} = 19.62 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้น น้ำหนักของตัวหุ่นยนต์รวมทั้งหมคว่าประมาณ

$$F_T = F_{w1} + F_{w2} + F_{WT} = 4.299 + 28.2675 + 19.62 = 52.186 \text{ นิวตัน หรือประมาณ } 5.31$$

กิโลกรัมและแรงลอยตัวมีค่าประมาณ $F_B = 26$ นิวตัน

จะเห็นว่าแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวหุ่น F_T มีค่ามากกว่าแรงลอยตัว F_B ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาตรให้กับตัวหุ่นยนต์โดยการเพิ่มโพนัมเพื่อช่วยในการลอยตัว

3.5.3 ความเร็วเคลื่อนที่

ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ น้ำจะใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งมีแรงผลักสูงสุด 35.67 นิวตัน โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงมีความต่างศักย์ 12 โวลต์ มอเตอร์จำนวน 2 ตัว ทำให้ได้แรงผลักในการเคลื่อนที่รวมเท่ากับ 71.34 นิวตัน แรงต้านจะเท่ากับแรงผลัก ดังนั้น ในที่นี้จะใช้แรงต้านเท่ากับ 71.34 นิวตัน การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A_F C_D \quad (3.3)$$

เมื่อ F_D	คือ แรงต้านของน้ำจากมอเตอร์ 2 ตัว (นิวตัน)
ρ_w	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
A_1	คือ พื้นที่ของวัสดุถึงอะคริลิกที่ปะทะกับน้ำ (ตารางเมตร)
A_2	คือ พื้นที่ของวัสดุปลั๊กต่อไฟกันน้ำที่ปะทะกับน้ำ (ตารางเมตร)
V	คือ ความเร็วในการเคลื่อน (เมตร/วินาที)
C_{D1}	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านถึงอะคริลิกด้านหน้า = 0.64
C_{D2}	คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านปลั๊กต่อไฟกันน้ำด้านหน้า = 0.68
F_{D1}	คือ แรงต้านของถึงอะคริลิกด้านหน้า
F_{D2}	คือ แรงต้านของปลั๊กไฟกันน้ำด้านหน้า
F_D	$= F_{D1} + F_{D2}$
F_D	$= \left[\left(\frac{1}{2} \rho V^2 A_1 C_{D1} \right) + \left(3 + \frac{1}{2} \rho V^2 A_2 C_{D2} \right) \right]$
F_D	$= \frac{1}{2} \rho V^2 (A_1 C_{D1} + 3A_2 C_{D2})$

แทนค่าสมการ

$$71.34 = \frac{1}{2} \times 1000 \times V^2 \left[(0.15 \times 0.15 \times 0.64) + (3 + 0.050 \times 0.0254 \times 0.68) \right]$$

$$71.34 = \frac{1}{2} \times 1000 \times V^2 (0.0144 + 0.0026)$$

ดังนั้น $V = 2.89$ เมตร/วินาที

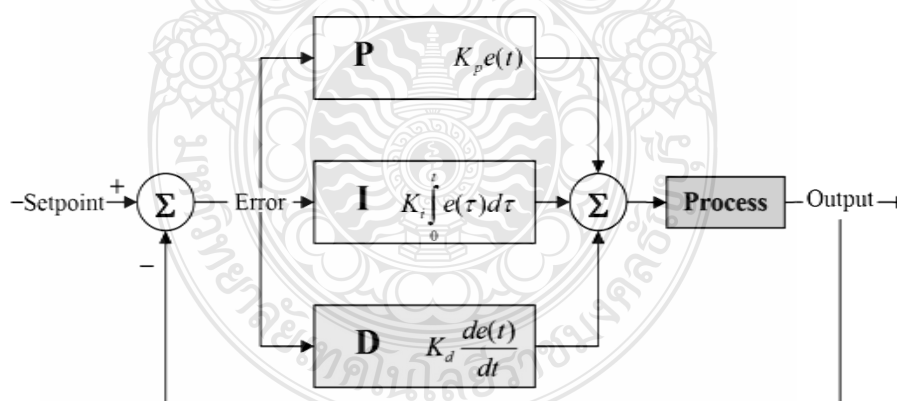
3.6 ระบบป้อนกลับแบบรูปปิด

เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบนั้นสามารถแสดงได้โดยสมการ ดังนี้

$$PWM = \left(K_p + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt \right) \quad (3.4)$$

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุม

จนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) โดยการปรับสัดส่วนของค่าคงที่แบบแปรผันตรง (K_p) ค่าคงที่แบบอนุพันธ์ (K_d) และค่าคงที่แบบปริพันธ์ (K_i) ซึ่งค่าความผิดพลาด (Error) ที่ป้อนกลับนั้นเป็นค่าความแตกต่างระหว่างคำสั่งที่ส่งมาจากผู้ใช้งาน และค่าจากสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์เมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ซึ่งแผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID ที่ได้ใช้ในการป้อนคำสั่งแสดงดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 แผนบล็อกไดอะแกรมระบบป้อนกลับแบบ PID [8]

3.7 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) [14]

โดยทั่วไปรูปแบบการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์นั้นจะนำมาประยุกต์ใช้กับการทำงานของเซนเซอร์ภายใต้การรบกวนของสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณรบกวนแบบสุ่มที่มีความถี่ไม่คงที่ ฉะนั้นจะทำให้เกิดผลเสียต่อข้อมูลทางเอาต์พุตของระบบถ้าไม่มีการกรองสัญญาณรบกวนออกเมื่อต้องการทราบข้อมูลที่แท้จริง จึงจำเป็นต้องใช้ตัวกรองสัญญาณที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ และยังคงค่าสัญญาณที่แท้จริงอยู่ได้

ขั้นตอนในการคำนวณหาค่าอัตราขยาย (Gain) ของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนดังนี้

1) กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น

ค่าประมาณของค่าอคติเริ่มต้น (Bias Estimate) : $be = 0$

ค่าประมาณขององศาการหมุนเริ่มต้น (Quaternion Estimate): $qe = 0$

และคำนวณหาเมตริกซ์ A เพื่อหาทิศทางการหักเหแต่ละตำแหน่ง

หา $A(q) = \Xi^T(q) \Psi(q)$ จะได้เมตริกซ์ขนาด 3×3

โดย $\Xi^T(q)$ เป็นเมตริกซ์ขนาด 3×4 ; โดย $\Psi(q)$ เป็นเมตริกซ์ขนาด 4×3

$$A(\vec{q}) \equiv \begin{bmatrix} q_4 & q_3 & -q_2 & -q_1 \\ -q_3 & q_4 & q_1 & -q_2 \\ q_2 & -q_1 & q_4 & -q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 & q_3 & -q_2 \\ -q_3 & q_4 & q_1 \\ q_2 & -q_1 & q_4 \\ -q_1 & -q_2 & -q_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

จะได้

$$A(\vec{q}) \equiv \begin{bmatrix} (q_4^2 - q_3^2 - q_2^2 + q_1^2) & (2q_3q_4 + 2q_2q_1) & (2q_1q_3 - 2q_4q_2) \\ (2q_1q_2 - 2q_3q_4) & (q_4^2 - q_3^2 + q_2^2 - q_1^2) & (2q_3q_2 + 2q_4q_1) \\ (2q_1q_3 + 2q_4q_2) & (2q_3q_2 - 2q_4q_1) & (q_4^2 + q_3^2 - q_2^2 - q_1^2) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

2) คำนวณหาอัตราขยาย (Gain)

จากสมการในบทที่ 2 จะมีสมการของอัตราขยาย ดังนี้

$$K_k = P_k^- h_k^T (\hat{X}_k^-) P_k^{-1} \left(h_k (\hat{X}_k^-) P_k^- h_k^T (\hat{X}_k^-) + R_1 \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ P เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนขององศาการหันเหและ h เป็นเวกเตอร์ของสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์และ R เป็นเมตริกซ์ของค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์

$$\text{เมื่อกำหนด } poa = 3.0432 \times 10^{-6}, \text{ pog} = 9.4018 \times 10^{-13}$$

$$P_k^- = \begin{bmatrix} 0.3046 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3046 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3046 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.000000094 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000000094 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000000094 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

จาก

$$[\alpha]X = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_3 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & 0 & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad h_k(\hat{X}_k^-) = \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_1 \\ \vdots & \vdots \\ A(\hat{q}^-) & r_n \end{bmatrix} \Big|_{t_k} \quad (3.6)$$

$$\text{จาก} \quad H_k(\hat{X}_k^-) = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_1 \end{bmatrix} & 0_{3 \times 3} \\ \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_2 \end{bmatrix} & 0_{3 \times 3} \\ \vdots & \vdots \\ \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_n \end{bmatrix} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \Big|_{t_k} \quad (3.7)$$

$$\text{และ} \quad \hat{y}_k = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_2 \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} A(\hat{q}^-) & r_n \end{bmatrix} \end{bmatrix} \Big|_{t_k} + \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \Big|_{t_k} \quad (3.8)$$

บทที่ 4

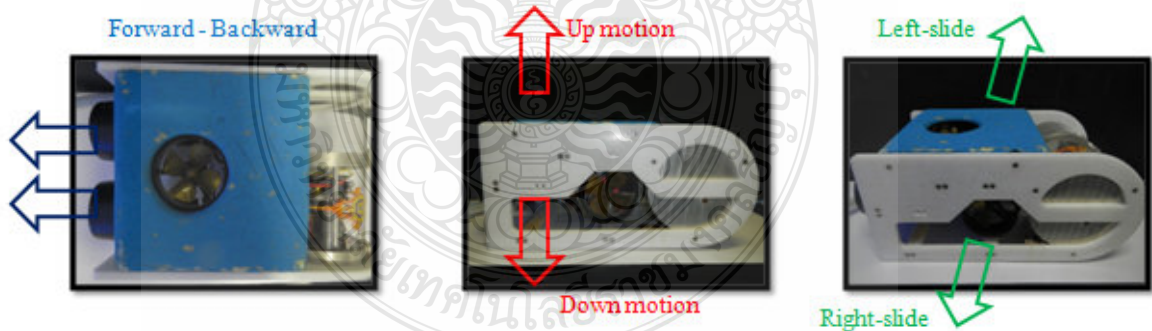
การทดลอง

ในบทนี้เป็นการทดสอบหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ที่ได้น้ำที่ได้จากการออกแบบเพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบตัวหุ่นยนต์และปัญหาจากระบบควบคุม เพื่อนำปัญหาดังกล่าวมาแก้ไขและปรับปรุงให้ตัวหุ่นยนต์ดำนํ้ามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ในหัวข้อนี้เราได้แบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆดังนี้ คือ เป็นการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ประกอบด้วยการวัดเทียบค่าของเซนเซอร์ และวัดแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ของ Crust Crawler การพัฒนาโปรแกรมการพัฒนาระบบควบคุมความลึกและการทดสอบหุ่นยนต์ดำนํ้าในภาคสนาม

4.1 การสร้างตัวหุ่น

การออกแบบหุ่นยนต์ สามารถให้นิยามได้เป็น วิทยาศาสตร์หรือการศึกษาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ โครงสร้าง ทฤษฎี และการประยุกต์ของหุ่นยนต์ โดยมีส่วนประกอบต่างๆ การออกแบบตัวหุ่น การออกแบบซอฟต์แวร์ เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ ส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์ส่วนประกอบทางเครื่องจักรกล วัสดุการสร้าง และการเขียนโปรแกรม เป็นต้น

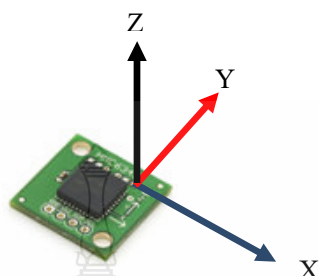


ภาพที่ 4.1 หุ่นยนต์ดำนํ้าควบคุมระยะไกลและตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์

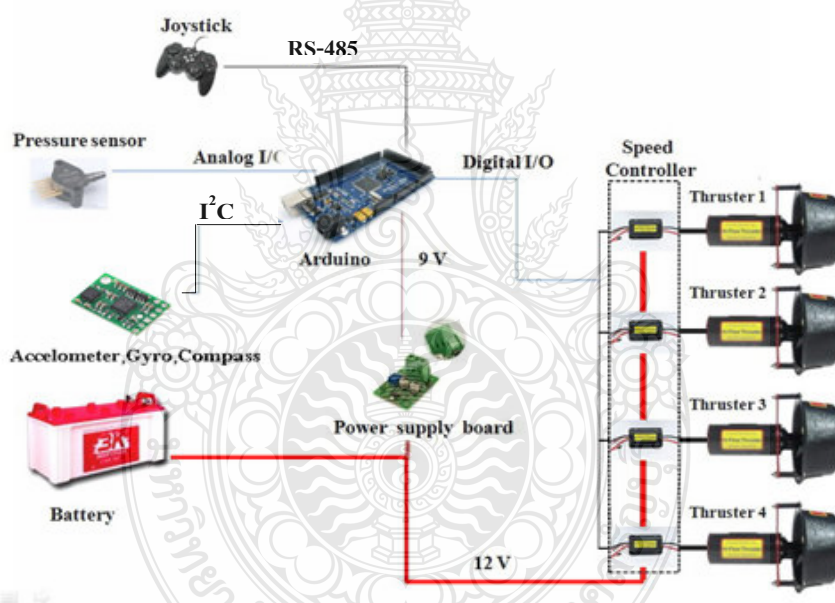
4.2 การติดตั้งชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ออกแบบวงจรและเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ดำนํ้า ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมเซนเซอร์ ซึ่งได้ปรับแต่งระบบควบคุมที่มีความเสถียรภาพและประยุกต์สำหรับในการใช้งานต่างๆ

โดยมีเซนเซอร์วัดองศาการหมุนที่มีการตั้งแกนการหมุนในการทดลองดังภาพที่ 4.2 และหุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกลเป็นแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบทั้งหมดที่ติดตั้งภายในตัวหุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกล ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.2 เซนเซอร์ 3 แกนที่ใช้ในการวัดค่า

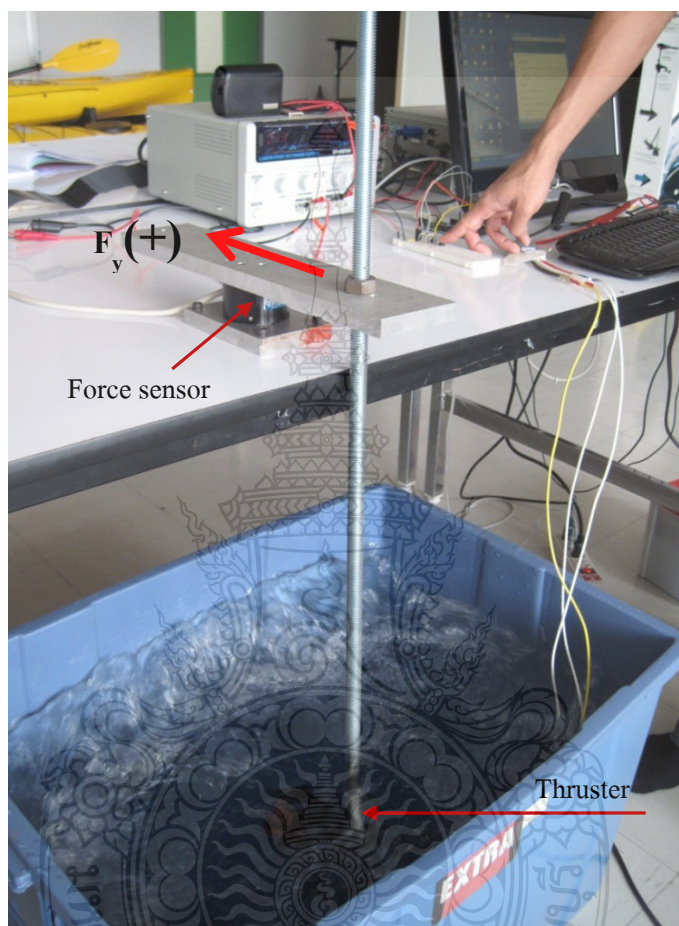


ภาพที่ 4.3 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายในหุ่นยนต์ค้ำน้ำควบคุมระยะไกล

4.3 การติดตั้งและทดสอบมอเตอร์เทียบค่าแรงมอเตอร์จากโมเมนต์

การวัดแรงขับเคลื่อนหรือแรงผลึกจากมอเตอร์ขับเคลื่อน (Thruster) เพื่อให้ทราบถึงขนาดของแรงที่จะใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ค้ำน้ำ แรงผลึกที่ได้จากมอเตอร์ รุ่น High Flow 400 HFS ที่มีทออัตราทดเกียร์ 4.28:1 นั้นจะถูกวัดด้วยเซนเซอร์วัดแรงแบบ 3 แกน เมื่อให้ช่วงค่าคำสั่ง

แบบ PWM ของมอเตอร์ที่แตกต่างกันไป แกนอ้างอิงของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังภาพที่ 4.4 ส่วนค่าที่ได้จากการทดลองวัดแรงบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์เมื่อมอเตอร์เดินหน้าและมอเตอร์ถอยหลังมีค่าดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2



ภาพที่ 4.4 แรงผลักในแกน y ของมอเตอร์ที่มีค่าเป็นบวกและค่าเป็นลบเมื่อป้อน สัญญาณ PWM ในช่วง (1-1.5) มิลลิวินาทีหรือมีดิวตี้ไซเคิลอยู่ในช่วง (0-50%) และในช่วง (1.5-2.0) มิลลิวินาที หรือมีดิวตี้ไซเคิลอยู่ในช่วง (50-100%) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การทดสอบวัดแรงบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์เดินหน้า

PWM	Duty Cycle (%)	แรงที่วัดได้จากผิวสัมผัส (นิวตัน)		
		การทดลอง 1	การทดลอง 2	ค่าเฉลี่ยทดลอง
1.388	6.94	142.0811	140.7353	141.4082
1.400	7.00	131.4973	131.3733	131.4353
1.416	7.08	84.1884	83.2467	83.7175
1.427	7.14	68.9893	69.1706	69.0799
1.444	7.22	34.1823	34.2661	34.2242

ตารางที่ 4.2 การทดสอบวัดแรงบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์ถอยหลัง

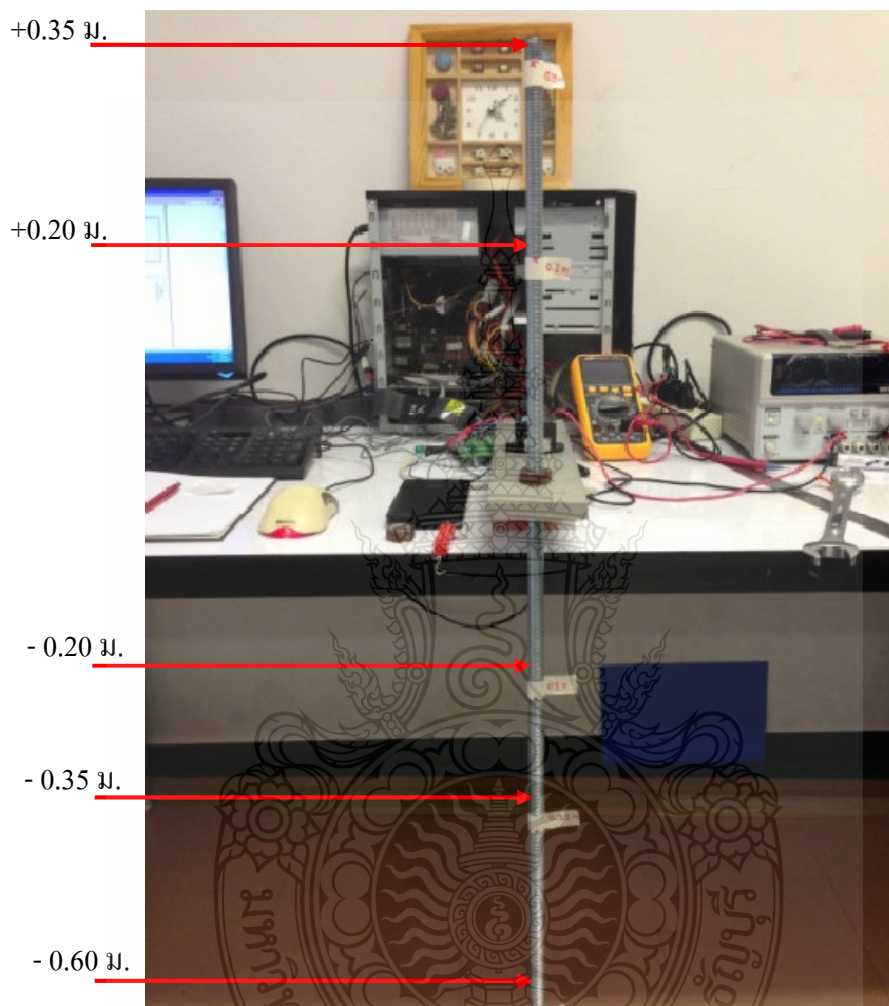
PWM	Duty Cycle (%)	แรงที่วัดได้จากผิวสัมผัส (นิวตัน)		
		การทดลอง 1	การทดลอง 2	ค่าเฉลี่ยทดลอง
1.611	8.05	63.17	61.62	62.3978
1.600	8.00	46.01	46.57	46.29
1.583	7.91	37.08	36.35	36.71
1.572	7.86	33.89	35.58	34.74
1.555	7.77	18.95	19.36	19.15

ผู้ปฏิบัติงานสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ด้วยปุมสวิตช์ 2 ปุม โดยมีการเชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino ที่สร้างสัญญาณ PWM ง่ายให้แก่ชุดขับมอเตอร์ รุ่น Hydra-120 เพื่อควบคุมความเร็ว ชุดการทดลองสำหรับการวัดแรงของมอเตอร์ได้แรงผลักที่เป็นบวก (+Fy) และที่เป็นลบ (-Fy) ซึ่งแสดงให้เห็นผลตอบสนองในช่วงเริ่มเคลื่อนที่และในช่วงหยุดการเคลื่อนที่

การทดสอบแรงมอเตอร์ของเซนเซอร์วัดแรง มีความผิดพลาดเนื่องจากเซนเซอร์วัดแรงนั้นจะวัดที่จุดศูนย์กลางของเซนเซอร์ในแต่ละแกน ไม่ใช่แรงที่กระทำบนผิวสัมผัสของเซนเซอร์ ซึ่งในการทดลองแรกได้วัดแรงมาจากจุดที่กระทำบนผิวสัมผัสจึงทำให้ค่าแรงที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง ดังนั้นจึงได้ทำการปรับค่าการวัดแรงจากมอเตอร์ใหม่โดยนำค่าโมเมนต์ที่ได้รอบแกน x มาคำนวณหา

แรงในแกน y ดังในสูตรด้านล่างแล้วนำมาเทียบกับแรงที่ผิวสัมผัสของเซนเซอร์และแรงที่ได้จากโหลดหรือมวลน้ำหนักที่ออกแรงกระทำกับเซนเซอร์

$$\text{โมเมนต์รอบแกน } x = \text{แรงในแกน } y \times \text{ระยะทางของแกนโมเมนต์} \quad (4.1)$$



ภาพที่ 4.5 การติดตั้งและอุปกรณ์ในการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงในระยะต่างๆ

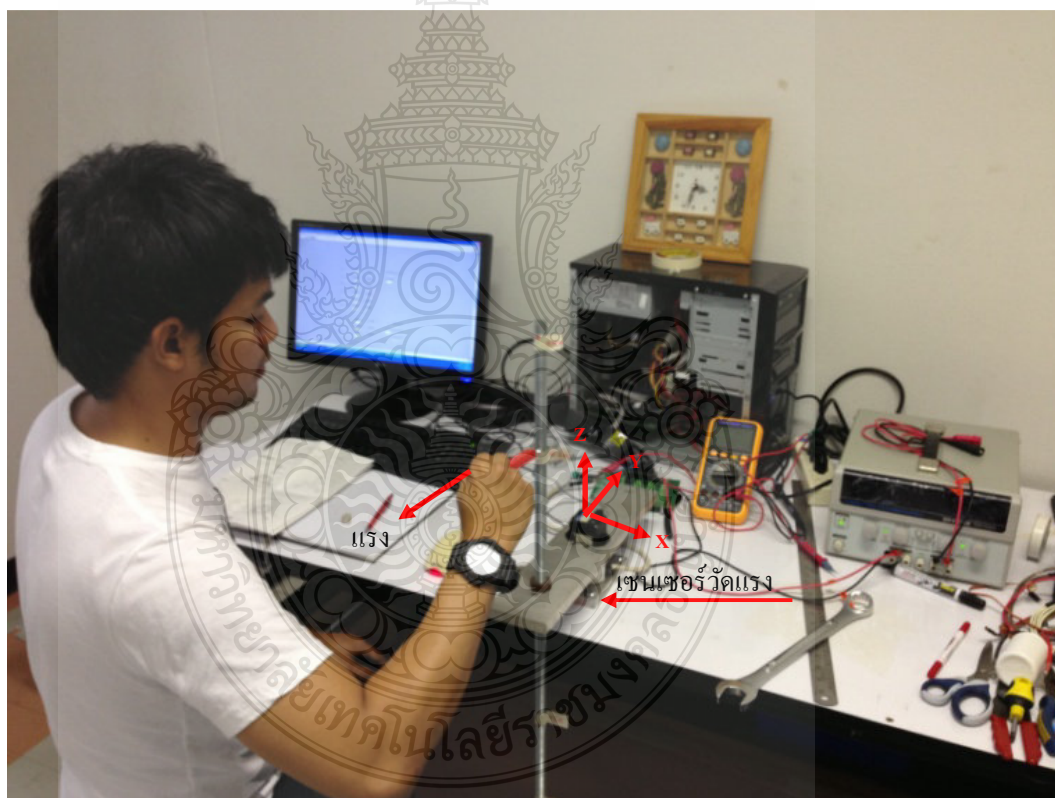
ดังนั้นการที่จะนำค่าโมเมนต์มาใช้เพื่อหาค่าแรง จึงต้องทำการทดลองเพื่อให้เห็นได้ว่าสามารถนำมาใช้ได้จริง โดยการให้แรงกระทำที่จุดแต่ละจุดที่ความสูงต่างๆดังในภาพที่ 4.5 และเทียบค่าที่ได้จากการนำโมเมนต์การหมุนที่หารด้วยระยะตั้งฉากถึงจุดหมุนเพื่อหาค่าแรงตามที่ทดสอบในระยะตำแหน่งต่างๆ เพื่อดูค่าความแม่นยำของแรงที่วัดได้ โดยรับค่าโมเมนต์และแรงที่วัดได้ผ่าน

โปรแกรม Labview และนำไปใช้คำนวณแรงจากโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบมอเตอร์จริง
ในขั้นตอนต่อไป

$$\therefore \text{แรงจากโมเมนต์} = \frac{\text{โมเมนต์}}{\text{ระยะทาง}} \quad (4.2)$$

นอกจากนี้ยังได้ติดตั้งเซนเซอร์วัดมุมเอียงไว้ด้านบนของเซนเซอร์วัดแรงเพื่อนำมุมเอียง
ของเซนเซอร์มาช่วยแก้ไขค่าแรงในแกน y ดังสมการด้านล่าง

$$\therefore \text{แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง} = \text{แรงที่กระทำ} \times \cos(\text{มุมที่เปลี่ยนในแกน } x) \quad (4.3)$$



ภาพที่ 4.6 ทำการเทียบเพื่อทดสอบค่าแรงจากโมเมนต์หารด้วยระยะทางต่างๆ

จากการทดสอบได้ทำการทดสอบออกแรงดึงในแนวแกน y ที่ 19.62 นิวตัน และ 29.43 นิวตัน โดยกระทำเป็นมุมตั้งฉากกับแกน z ซึ่งกระทำที่ระยะ 5 ตำแหน่ง คือ +0.35 +0.20 -0.20 -0.35 และ -0.60 เมตร ตามลำดับ และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ทดสอบที่แรงดึงน้ำหนัก 2 กิโลกรัมในระยะต่างๆ

น้ำหนัก 2 กิโลกรัม (19.62 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 1					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.20 ม.	+0.35 ม.	-0.20 ม.	-0.35 ม.	-0.60 ม.	
แรงผิวสัมผัส เซนเซอร์	-17.8865	-40.6093	47.0919	67.9599	105.9139	184.874
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	19.6200	19.6200	19.6194	19.6196	19.6189	0.0021
แรงจากโมเมนต์	19.0472	19.1143	-18.9256	-18.4228	-18.4850	4.1846

น้ำหนัก 2 กิโลกรัม (19.62 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 2					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.2 ม.	+0.35 ม.	-0.20 ม.	-0.35 ม.	-0.60 ม.	
แรงผิวสัมผัส เซนเซอร์	17.3913	41.2799	46.7523	68.6419	106.2555	185.750
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	19.6200	19.6200	19.6195	19.6193	19.6186	0.0027
แรงจากโมเมนต์	19.0840	19.0909	-19.1212	-18.7051	-18.4839	3.6849

น้ำหนัก 2 กิโลกรัม (19.62 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 3					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.2 ม.	+0.35 ม.	-0.20 ม.	-0.35 ม.	-0.60 ม.	
แรงผิวสัมผัส เซนเซอร์	-17.6854	-41.5465	47.1784	67.8260	105.6859	185.343
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	19.6200	19.6200	19.6193	19.6190	19.6183	0.0035
แรงจากโมเมนต์	18.6091	19.2308	-19.2673	-18.2450	-18.3879	4.4443

ตารางที่ 4.4 ทดสอบที่แรงดึงน้ำหนัก 3 กิโลกรัมในระยะต่างๆ

น้ำหนัก 3 กิโลกรัม (29.43 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 1					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.2 ม.	+0.35 ม.	- 0.20 ม.	- 0.35 ม.	- 0.60 ม.	
แรงพิวสั่มผัส เซนเซอร์	-27.4553	-59.4536	75.1329	103.4986	164.3766	-192.162
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	29.4300	29.4297	29.4290	29.4281	29.4274	0.0039
แรงจากโมเมนต์	28.8987	27.8328	-29.3969	-27.9748	-28.5128	3.0812

น้ำหนัก 3 กิโลกรัม (29.43 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 2					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.2 ม.	+0.35 ม.	- 0.20 ม.	- 0.35 ม.	- 0.60 ม.	
แรงพิวสั่มผัส เซนเซอร์	-26.0711	-58.3641	71.2899	103.9920	161.2959	-186.111
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	29.4300	29.4295	29.4290	29.4283	29.4278	0.0037
แรงจากโมเมนต์	28.6951	27.5413	-29.4096	-28.2346	-28.0546	3.5439

น้ำหนัก 3 กิโลกรัม (29.43 นิวตัน)	การทดลองครั้งที่ 3					ความผิดพลาด เฉลี่ย (%)
	+0.2 ม.	+0.35 ม.	- 0.20 ม.	- 0.35 ม.	- 0.60 ม.	
แรงพิวสั่มผัส เซนเซอร์	-25.9453	-58.4788	72.1902	103.3648	159.0461	-184.760
แรงแก้ค่าด้วยมุมเอียง	29.4300	29.4299	29.4283	29.4292	29.4283	0.0029
แรงจากโมเมนต์	28.1105	27.5699	-29.7461	-28.0589	-27.6915	4.0592

จากการหาค่าเทียบค่าความคลาดเคลื่อนได้ จึงนำค่าโมเมนต์ที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรง มาคำนวณหาค่าแรง โดยนำโมเมนต์ที่ได้มาคูณกับค่าระยะห่างจากเซนเซอร์ถึงจุดที่ติดตั้งมอเตอร์ (ระยะ 0.6 เมตร) และทดสอบที่ค่า Duty Cycle ต่างๆ ทั้งหมดแสดงให้เห็นผลตอบสนองของแรงที่

กระทำต่อเซนเซอร์ จากตารางเทียบให้เห็นถึงการทดลองจากค่าเซนเซอร์วัดแรงโดยตรง และจากเซนเซอร์วัดแรงโดยนำค่าโมเมนต์มาคำนวณ ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยจากการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ 4.5 ตารางทดสอบวัดแรงมอเตอร์เดินหน้า

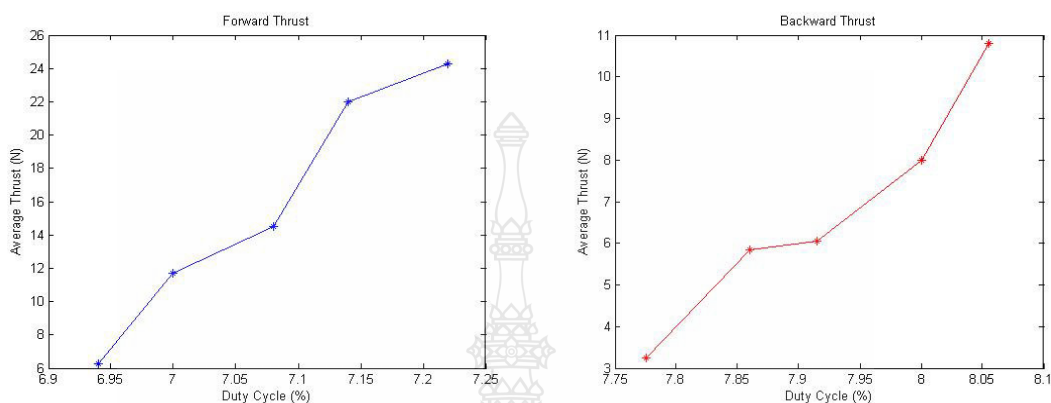
PWM	Duty Cycle (%)	แรงมอเตอร์ (นิวตัน)			
		การทดลอง 1	การทดลอง 2	ค่าเฉลี่ยจากโมเมนต์	ค่าเฉลี่ยจากฟิวส์สัมผัส
1.388	6.94	24.2823	24.2099	24.2461	141.4082
1.400	7.00	22.2756	21.7678	22.0217	131.4353
1.416	7.08	14.5444	14.4318	14.4881	83.7175
1.427	7.14	11.7203	11.7096	11.7149	69.0799
1.444	7.22	6.2246	6.2466	6.2356	34.2242

ตารางที่ 4.6 ตารางทดสอบวัดแรงมอเตอร์ถอยหลัง

PWM	Duty Cycle (%)	แรงมอเตอร์ (นิวตัน)			
		การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2	ค่าเฉลี่ยจากโมเมนต์	ค่าเฉลี่ยจากฟิวส์สัมผัส
1.611	8.05	-10.7466	-10.8734	-10.8100	-62.3978
1.600	8.00	-7.9485	-8.0293	-7.9889	-46.2944
1.583	7.91	-6.1178	-6.0001	-6.0589	-36.7176
1.572	7.86	-5.7352	-5.9700	-5.8526	-34.7414
1.555	7.77	-3.2033	-3.2710	-3.2372	-19.1587

จากการทดลองแรงมอเตอร์ด้วยเซนเซอร์วัดแรงแบบ 3 แกน ได้เห็นว่าแรงที่กระทำกับเซนเซอร์ต้องอยู่ในตำแหน่งกลางของเซนเซอร์จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนของแกน x และแกน y โดยจากการทดลอง ได้แก้ไขโดยการนำค่าโมเมนต์ที่ได้มาใช้ในการคำนวณหาแรงและนำค่าแรงที่ได้มา

เปรียบเทียบกับค่าแรงสูงสุดของมอเตอร์ที่ระบุในรายละเอียดซึ่งมีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงกว่าการทดลองครั้งแรกในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 คือที่ 12 โวลต์มอเตอร์ให้แรงสูงสุดที่ 35.67 นิวตัน (8ปอนด์) เทียบจากค่าทดสอบจริงสูงสุดอยู่ที่ 24.2823 นิวตัน

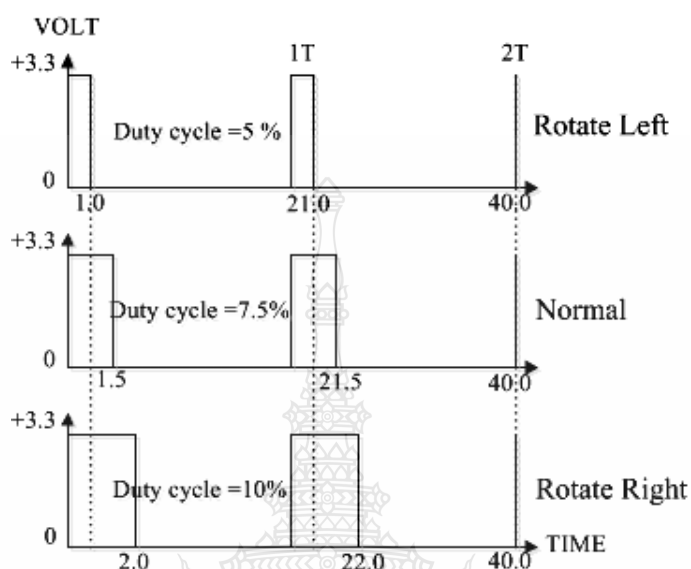


ภาพที่ 4.7 มอเตอร์ขับเคลื่อนเดินหน้า (PWM = 1.388) และถอยหลัง (PWM = 1.611)

4.4 การตั้งค่าสูงสุด และต่ำสุดของมอเตอร์

การมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วน และความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดยความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) นั้นเอง ซึ่งค่าของดิวตี้ไซเคิลคือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ก็หมายถึงใน 1 วัฏจักรของพัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่ง ดังภาพที่ 4.8 และในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น หากค่าดิวตี้ไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ก็หมายความว่า จะไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย ซึ่งค่าดิวตี้ไซเคิลสามารถ จะหาได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

ค่าความถี่พัลส์ = (ช่วงของสัญญาณพัลส์/คาบเวลาทั้งหมดของสัญญาณ) $\times 100\%$



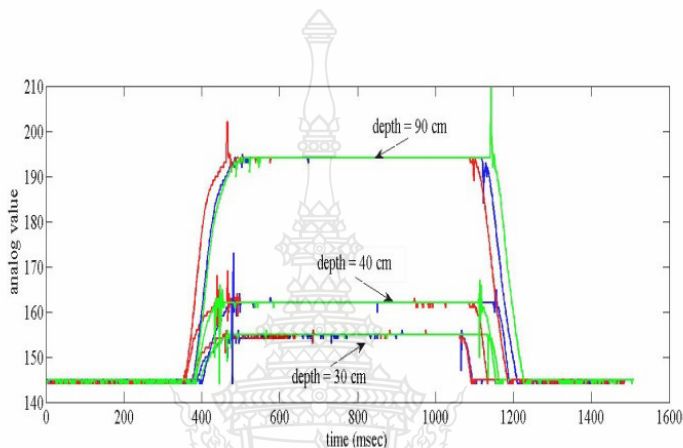
ภาพที่ 4.8 ความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าความถี่พัลส์ของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่

มอเตอร์ Crust Crawler รุ่น High Flow 400 HFS ติดตั้งพร้อมกับชุดขับมอเตอร์ขับเคลื่อน เพื่อควบคุมรอบมอเตอร์จาก Castles รุ่น Hydra 120 โดยใช้ความถี่ของสัญญาณพัลส์ ซึ่งค่าของความถี่พัลส์ คือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด โดยได้ใช้ค่าลอจิกสูงที่อยู่ในช่วงระหว่าง 1.388 ms และ 1.611 ms

4.5 ทดลองวัดความดันจากเซนเซอร์วัดความดัน

การทดสอบเทียบค่าของเซนเซอร์วัดความดันรุ่น (MPX2053DP) ที่วัดค่าผลต่างของความดันได้ทดสอบที่ในการวัดระดับความลึก ในน้ำต่างๆกัน ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอะนาล็อกที่ได้จากเซนเซอร์ และความลึกของน้ำที่จะมาใช้ในการควบคุมความดันสัมพัทธ์(หรือผลต่างของความดัน)ซึ่งจะเป็นผลต่างความดันระหว่างน้ำภายนอกถังและอากาศภายในถังอะคริลิกที่ได้ทำการชดกันน้ำ สัญญาณของเซนเซอร์วัดความดันนั้นจะถูกขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ LM324 และสัญญาณอะนาล็อกที่ขยายแล้วจะถูกส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 การทดสอบ

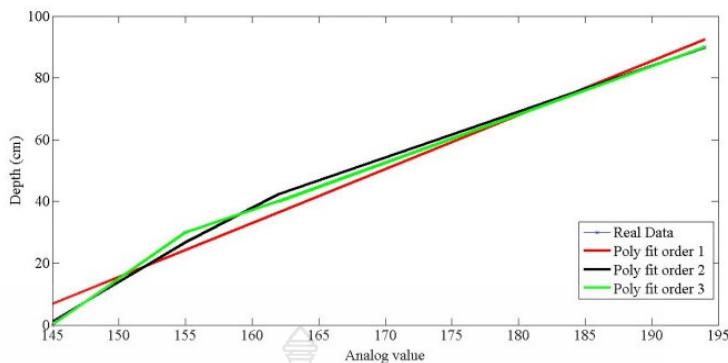
เซนเซอร์วัดความดันกระทำโดยขับเคลื่อนหุ่นยนต์ดำน้ำให้จมลงในระดับค่าความลึกที่แตกต่างกันโดยมอเตอร์ขับเคลื่อนไม่หมุน ค่าข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันเป็นค่าแบบอนาล็อกดังแสดงในภาพที่ 4.9 ซึ่งได้ทดสอบที่ระดับความลึก 30 40 และ 90 เซนติเมตร และทำการวัด 3 ครั้งในแต่ละระดับความลึกเพื่อความเชื่อมั่นในค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ ค่าความดันที่วัดได้จากเซนเซอร์จะเป็นค่าคงที่ (Steady State) ในช่วงระหว่าง 600-1000 ms ซึ่งในการทดสอบทั้ง 3 ครั้งข้อมูลค่าความดันในแต่ละค่าในแต่ละระดับความลึกจะซ้อนทับกัน



ภาพที่ 4.9 การทดสอบเซนเซอร์วัดความดันที่ระดับความลึก 30 40 และ 90 ซม.

เพื่อการเปลี่ยนค่าอนาล็อกที่ได้จากเซนเซอร์วัดความดันมาเป็นค่าระดับความลึกของน้ำ จะใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) แบบโพลิโนเมียลกำลัง 1 2 และ 3 แสดงดังภาพที่ 4.10 ซึ่งโพลิโนเมียลกำลัง 3 นั้นให้ประมาณค่าที่ดีที่สุดเพราะฉะนั้นความลึกจริง (D) สามารถคำนวณจากค่าอนาล็อก (a) โดยใช้สมการแปลงค่าจากเซนเซอร์วัดความดันที่อ่านค่าความลึกได้เป็นความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นดังสมการด้านล่างนี้

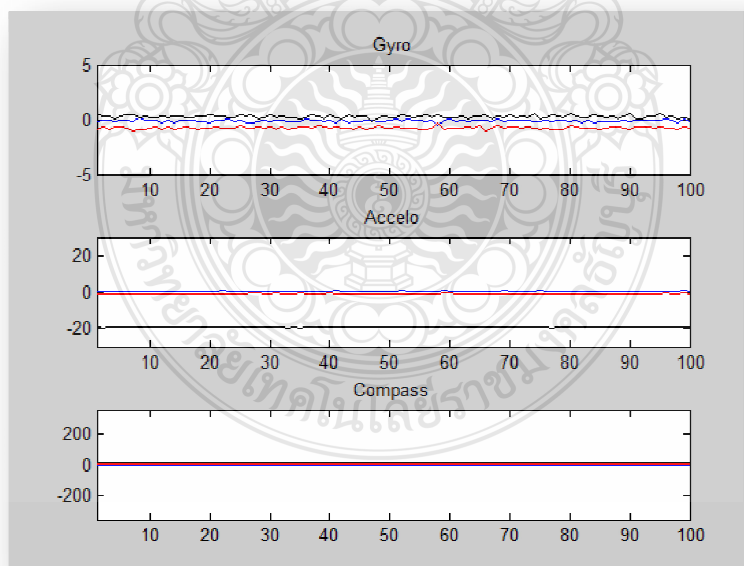
$$D = 0.002a^3 - 0.996a^2 + 169.793a - 9636.228 \quad (4.4)$$



ภาพที่ 4.10 ประมาณค่าในช่วงของข้อมูลที่ได้แบบโพลิโนเมียลกำลัง 1 2 และ 3

4.6 การ Calibrate เซนเซอร์

การ Calibrate เซนเซอร์ทำด้วยวิธีการอ่านค่าเซนเซอร์ที่อยู่นิ่งเข้ามาเป็นจำนวนหลายๆครั้ง แล้วนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาหารด้วยจำนวนครั้งที่อ่านเซนเซอร์เพื่อมาคำนวณค่ากลางหรือค่าเฉลี่ย หรือเรียกว่าค่า Offset โดยจากตัวอย่าง อ่านค่าจากเซนเซอร์เข้ามาจำนวน 100 ค่า แล้วก็นำค่าที่ได้ทั้งหมดมาบวกรวมกันแล้วหารด้วย 100 ซึ่งจะได้ค่า เฉลี่ยในขณะที่อยู่นิ่งออกมาเพื่อนำไปใช้ในการปรับแก้ค่าตอนเริ่มต้นให้มีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 4.11 ค่าที่ออกมาจากเซนเซอร์จะอยู่กับที่เพื่อ Offset Value

จากการทดลองเก็บค่าเซนเซอร์วัดความเร่งและวัดความเร็วเชิงมุม ทั้ง 3 แกน โดยแต่ละแกนทดลองแกนละ 3 ครั้งและนำค่าช่วงที่เปลี่ยนแปลงโดยที่นำค่าความเร่งมาอินทิเกรตเพื่อให้ได้เป็นค่าความเร็ว โดยจับช่วงเวลาที่มียค่าการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ (Δt) นำมาหารกับค่าระยะทางที่เคลื่อนที่จริง 0.5 เมตรจะได้ $V_{จริง}$ (m/s) แล้วส่วนค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์มาหารกับความจริงจะได้อัตราส่วนออกมาหรือที่เรียกว่าอัตราส่วนขยาย (Scaling Factor) ดังสมการด้านล่าง แล้วนำค่าอัตราส่วนไปคูณกับค่าที่วัดได้ โดยแสดงจากตารางที่ 4.7 และตารางที่ 4.8

$$\text{อัตราส่วนขยาย} (Sf_v) = \frac{V_{จริง}}{V_{วัดได้}} \quad (4.5)$$

$$\text{อัตราส่วนขยาย} (Sf_{\omega}) = \frac{\omega_{จริง}}{\omega_{วัดได้}} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.7 ตารางการทดสอบค่าความเร็วที่วัดได้จากการอินทิเกรตค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งเมื่อเคลื่อนที่ด้วยระยะทาง 0.5 เมตร

แกน	Δt ($t_1 - t_2$)	$V_{จริง}$ (m/s)	$V_{วัดได้}$ (m/s)	$Sf_v = \frac{V_{จริง}}{V_{วัดได้}}$	Sf_v เฉลี่ย	$V_{วัดได้} \times Sf_v$ เฉลี่ย
X 1.)	5.146-4.781 = 0.365	1.369	26.935	0.051	0.046	1.252
X 2.)	4.799-4.429 = 0.370	1.351	34.031	0.039		1.582
X 3.)	4.675-4.379 = 0.296	1.689	34.527	0.048		1.605
Y 1.)	6.235-5.865 = 0.370	1.351	33.022	0.041	0.041	1.337
Y 2.)	5.023-4.654 = 0.369	1.355	31.369	0.043		1.270
Y 3.)	6.234-5.863 = 0.371	1.347	36.048	0.037		1.460
Z 1.)	4.268-3.821 = 0.447	1.118	21.599	0.051	0.048	1.030
Z 2.)	4.254-3.954 = 0.300	1.667	33.824	0.049		1.623
Z 3.)	4.403-4.030 = 0.373	1.340	31.302	0.042		1.502

ตารางที่ 4.8 ตารางการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากการอินทิเกรตค่าจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เมื่อหมุนไปเป็นมุม 90 องศา

แกน	Δt ($t_1 - t_2$)	ω จริง (rad/s)	ω วัดได้ (rad/s)	$Sf_{\omega} =$ ω จริง / ω วัดได้	Sf_{ω} เฉลี่ย	ω วัดได้ $\times Sf_{\omega}$ เฉลี่ย
X 1.)	6.398-5.226 = 1.172	1.340	5.442	0.246	0.2523	1.373
X 2.)	6.949-5.637 = 1.312	1.1973	4.686	0.255		1.182
X 3.)	6.095-4.851 = 1.244	1.2627	4.946	0.255		1.248
Y 1.)	6.719-5.797 = 0.922	1.7037	6.772	0.251	0.2546	1.728
Y 2.)	6.235-5.239 = 0.996	1.57321	5.997	0.262		1.527
Y 3.)	5.771-4.639 = 1.132	1.3876	5.562	0.249		1.416
Z 1.)	5.719-4.884 = 0.935	1.6800	7.064	0.237	0.2486	1.756
Z 2.)	5.888-4.460 = 1.428	1.100	4.364	0.252		1.085
Z 3.)	5.136-4.294 = 0.842	1.885	7.286	0.256		1.811

4.7 การแก้ไขพารามิเตอร์ ด้วยวิธีของ Kalman Filter

เนื่องจากการเก็บค่าจากเซนเซอร์ของเข็มทิศ (HMC6343) นั้นได้มีสัญญาณรบกวน (Noise) จึงได้ใช้วิธีการนำค่าจากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Pololu) เข้ามาช่วยประมาณค่าเปลี่ยนเป็นค่ามุมของแกน X, Y และ Z ซึ่งได้นำค่าทั้งสามแกนมาประมาณค่าเพื่อช่วยในการวัดมุมของแต่ละมุมให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

ค่าพารามิเตอร์จากการทดลองที่ได้มาจากเซนเซอร์ นำมาเข้าในสมการของ Kalman Filter ซึ่งประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ ดังต่อไปนี้

r = ค่าความแปรปรวนจากการวัดของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Measurement Covariance) [(3×s)×(3×s)]

$sigu$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอคติของสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro Bias Noise Standard Deviation) [3×3]

$sigv$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro Noise Standard Deviation) [3×3]

poa = ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดของมุมเบื้องต้น

(Initial Error Covariance of Attitude) [3×3]

pog = ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดของค่าอคติของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมเบื้องต้น (Initial Error Covariance of Gyro Bias) [3×3]

ค่าความแปรปรวนจากเซนเซอร์วัดความเร่ง (Measurement Covariance of Accelerometer : r)

ค่าพารามิเตอร์ของ Bias Accelerometer ได้มาจากค่าของเซนเซอร์วัดความเร่งที่อยู่กับที่หลายๆ โดยค่าจะเปลี่ยนแปลงไปมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเสถียรภาพของเซนเซอร์นั้นๆ ซึ่งเซนเซอร์ที่ได้นำมาทดลองได้มีค่าในแกน x y และแกน z เป็น เมตริกซ์แบบทแยงมุม ดังนี้

$$r = \begin{bmatrix} -0.0337 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0202 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0063 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอคติของสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro Bias Noise Standard Deviation : Sigu)

คือ ค่าที่ได้จากการหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) จากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม Gyro โดยอยู่ทุกๆ ซึ่งได้ทดลองและเก็บค่าของแกน 3 แกน x y และ z มาเพื่อใส่ค่าเป็นเมตริกซ์ทแยงมุม ดังนี้

$$\text{sig } u = \begin{bmatrix} 0.0266 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0401 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0110 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro Noise Standard Deviation : Sigv)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมซึ่งได้มาจากค่าที่ทดลองวัดค่าจากเซนเซอร์ Gyro ที่อยู่กับที่แล้วนำค่ามาหาค่าความชัน

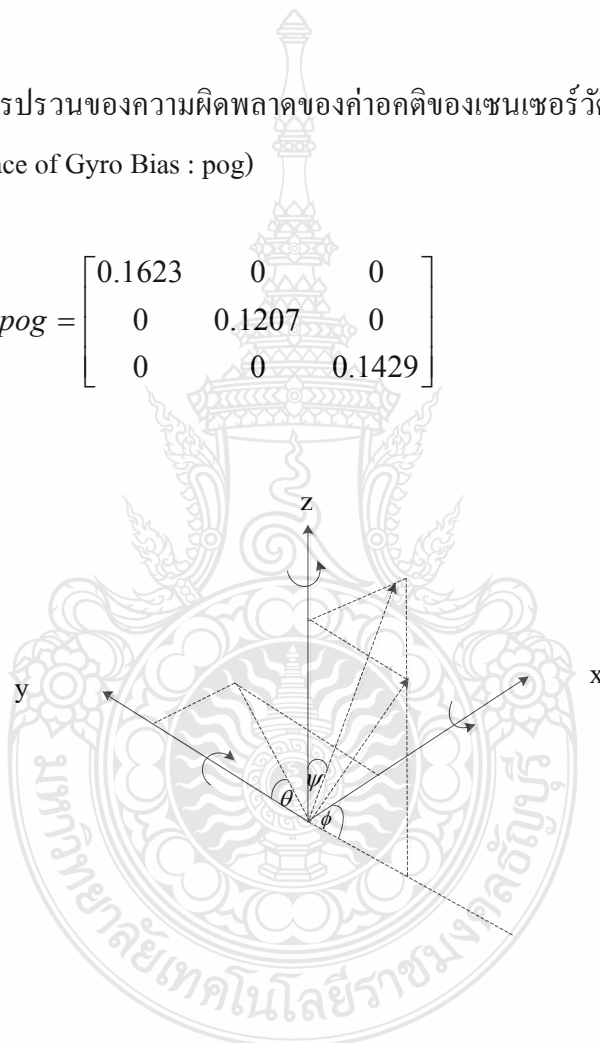
$$\text{sig } v = \begin{bmatrix} -0.0110 & 0 & 0 \\ 0 & 0.146955 & 0 \\ 0 & 0 & 0.126814 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดของมุมเบื้องต้น (Initial Error Covariance of Attitude : poa)

$$poa = \begin{bmatrix} 282.2129 & 0 & 0 \\ 0 & 278.1343 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7004 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

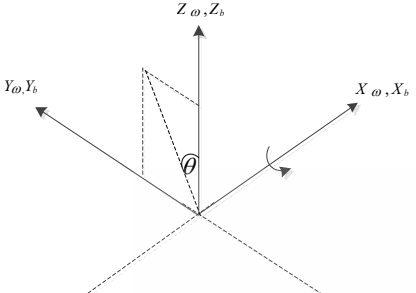
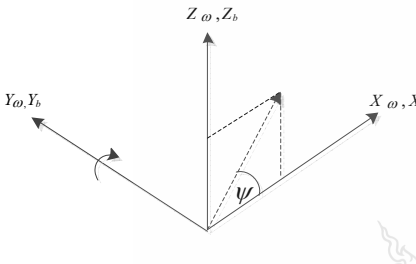
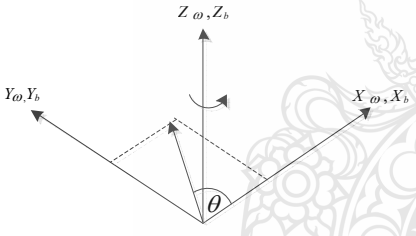
ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดของค่าอคติของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมเบื้องต้น (Initial Error Covariance of Gyro Bias : pog)

$$pog = \begin{bmatrix} 0.1623 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1207 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1429 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$



ภาพที่ 4.12 การตั้งแกน 3 แกน (X Y และ Z) และองศาการหมุน Roll(ψ), Pitch(θ), Yaw(Φ)

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ของการหมุนในแต่ละแกน

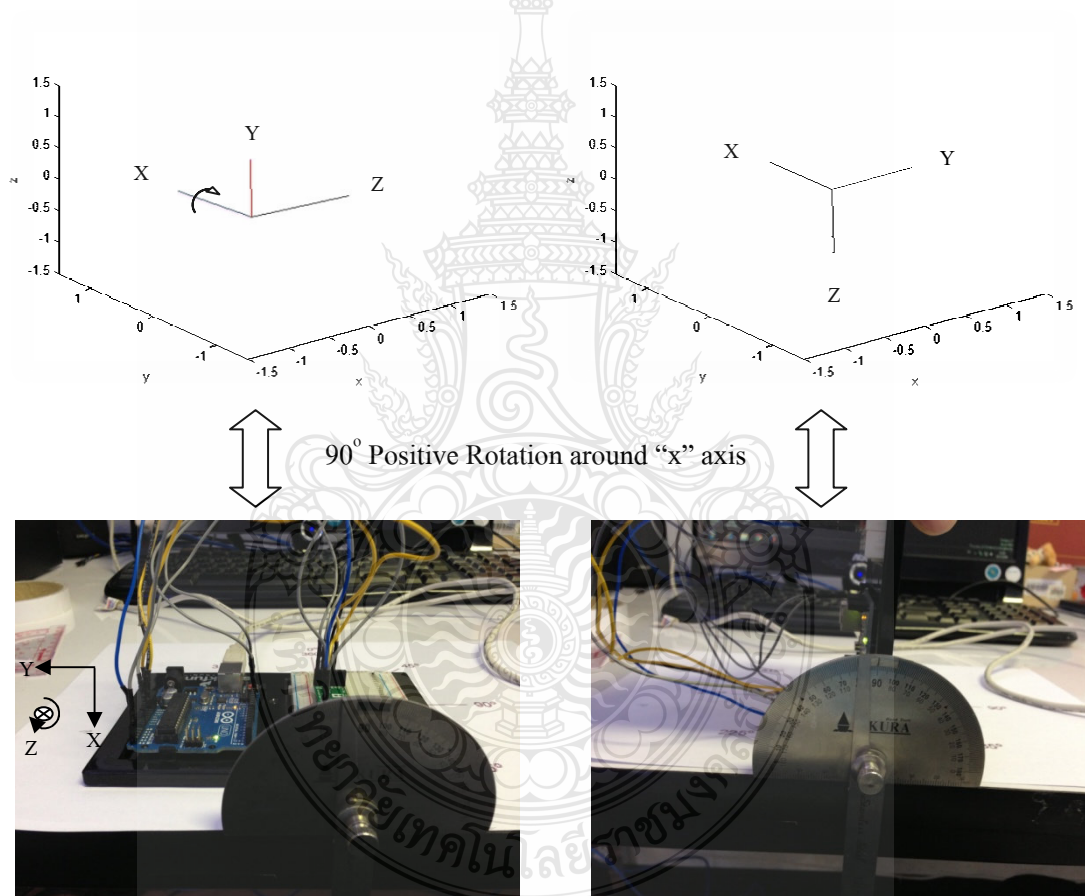
<p>การหมุนรอบแกน X (Rotate X)</p> 	$bm = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T ; im = \begin{bmatrix} \cos \\ 0 \\ \sin \end{bmatrix}^T$
<p>การหมุนรอบแกน Y (Rotate Y)</p> 	$bm = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T ; im = \begin{bmatrix} \sin \\ 0 \\ \cos \end{bmatrix}^T$
<p>การหมุนรอบแกน Z (Rotate Z)</p> 	$bm = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T ; im = \begin{bmatrix} \cos \\ \sin \\ 0 \end{bmatrix}^T$

ซึ่งค่า P_k คือค่าเมทริกซ์ของค่าความแปรปรวนรวม ซึ่งมีขนาด 6×6 โดยนำค่าของ poa และ pog มารวมเป็นเมทริกซ์เดียวกัน

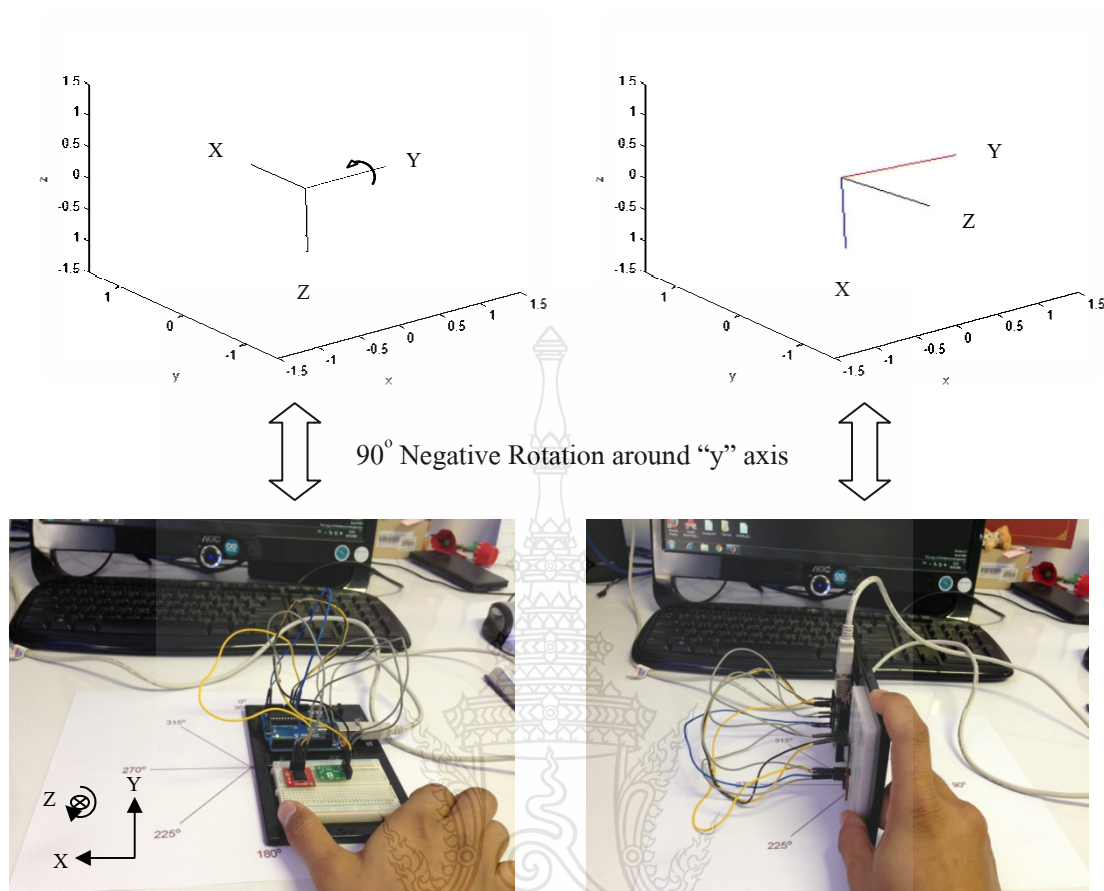
$$P_k = \begin{bmatrix} 282.2129 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 278.1343 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7004 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1623 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1207 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1429 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ซึ่งได้นำค่าจากการทดลองที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและเข็มทิศมาใส่เป็นค่าพารามิเตอร์ใน Kalman Filter แล้วนำการทดลองโดยการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แกนด้วยความเร็วคงที่ และมีมุมในการหมุนได้สูงสุด 360 องศา

การนำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากเซนเซอร์ทั้งหมดข้างต้น นำค่าที่ได้มาใส่ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อการประมาณค่าและกรองสัญญาณด้วยเทคนิค Kalman Filter ในการหาองศาการหมุน โดยได้ทำการทดลองโดยโปรแกรม MATLAB ทำให้เห็นได้ว่าเมื่อนำค่าความความเร็วเชิงมุมมาช่วยประมาณค่าการหมุน นั้นสามารถหมุนได้ตามทิศทางตามเข็มรอบแกน X และทวนเข็มรอบแกน Y ได้ถูกต้อง แสดงดังภาพที่ 4.13 และภาพที่ 4.14 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.13 เปรียบเทียบแสดงการหมุนรอบแกน "X" ในทิศตามเข็มนาฬิกาจากการประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter

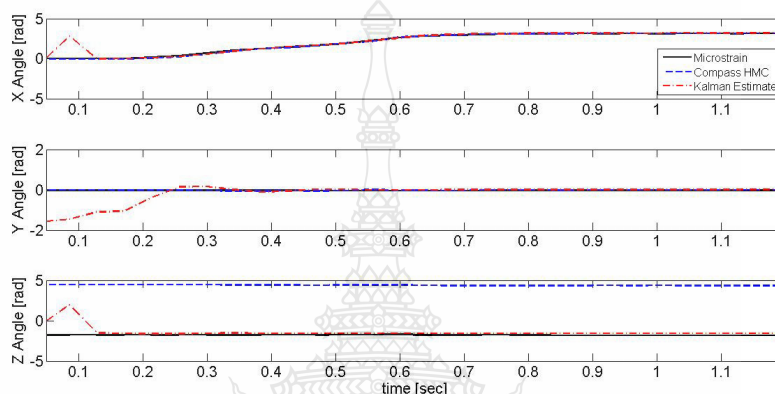


ภาพที่ 4.14 เปรียบเทียบแสดงการหมุนรอบแกน “Y” ในทิศทางเข็มนาฬิกาจากการประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter

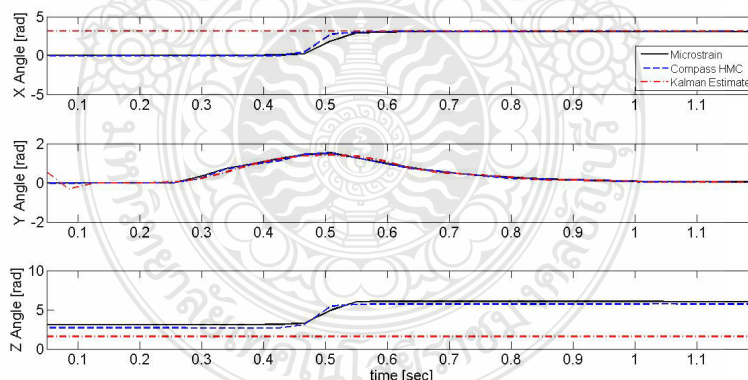
เพื่อความแม่นยำในการทดลองได้นำค่าที่ได้จากการประมาณค่า (Kalman Filter) มาทำการเปรียบเทียบกับเซนเซอร์วัดมุมจาก Microstrain ที่มีความแม่นยำสูงเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงและช่วยคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตัวแปรและสมการที่นำมาใช้ ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นได้จากการทดลองเซนเซอร์มีความเร็วในการตอบสนองจากการเคลื่อนที่ และมีความแม่นยำในการประมาณค่าด้วยสมการของ Kalman Filter โดยจากภาพที่ 4.18 ได้แสดงผลการทดสอบการหมุนรอบแกน “X” เป็นมุม 180 องศา โดยทำการเปรียบเทียบค่าองศา 3 ค่าที่ได้จากจากเซนเซอร์เข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain เซนเซอร์เข็มทิศ (HMC6343) และการประมาณค่าองศาด้วยสมการ Kalman Filter

ซึ่งการหมุนรอบทั้งสองแกนที่ทดสอบคือแกน “X” และ “Y” นั้นมีค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter ที่ใกล้เคียงกับเซนเซอร์เข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain และเข็มทิศ

HMC6343 ที่นำมาเปรียบเทียบ และยังคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนขององศาการหมุนจากการหมุนของเซนเซอร์ที่นำค่าพารามิเตอร์ความเร็วเชิงมุมและองศาการหมุน มาประมาณค่าด้วยสมการ Kalman Filter โดยค่าเริ่มต้นจากเซนเซอร์นั้นจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกทำให้การประมาณค่าองศา นั้นจะลู่เข้าหาองศาการหมุนของเข็มทิศ โดยใช้เวลาอยู่ที่ประมาณ 0.1-0.2 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.15 เปรียบเทียบองศาการหมุนรอบแกน “X” ระหว่างเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain และเข็มทิศ (HMC6343) และค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter

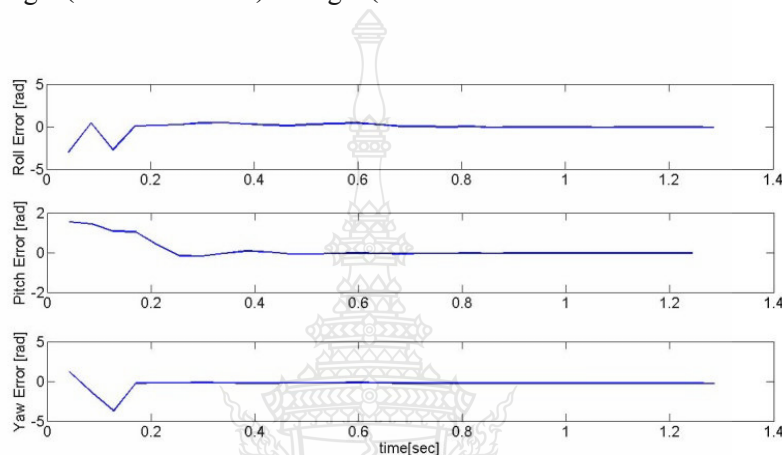


ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบองศาการหมุนรอบแกน “Y” ระหว่างเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain และเข็มทิศ (HMC6343) และค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter

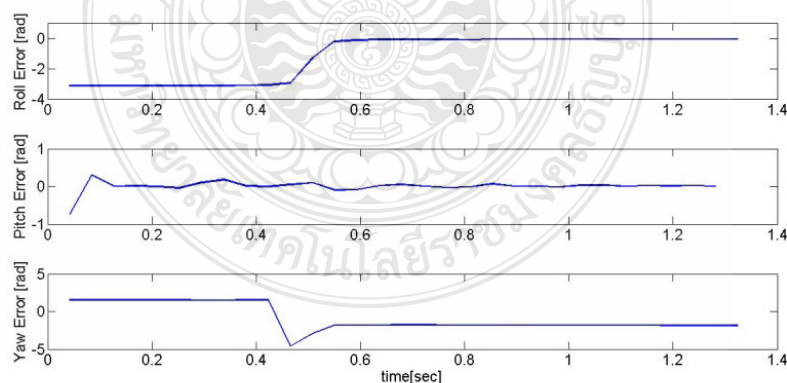
จากการนำค่าองศาที่ได้โดยการประมาณค่าด้วยสมการ Kalman Filter และค่าที่ได้จากเซนเซอร์เข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain เพื่อเปรียบเทียบหาค่าความแตกต่างหรือค่าความ

ผิดพลาด ดังสมการที่ 4.13 ของการหมุนรอบแกน“X” Roll Error [rad] ซึ่งจะห้ค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 1.8067% แสดงดังภาพที่ 4.17 และค่าความแตกต่างหรือค่าความผิดพลาด ของการหมุนรอบแกน“Y” หรือ Pitch Error [rad] ซึ่งจะห้ค่าความคลาดเคลื่อนเป็น 0.4773% แสดงดังภาพที่ 4.18

$$\text{Angle Error} = \text{Angle (จาก Microstrain)} - \text{Angle (จากการประมาณค่าด้วย Kalman Filter)} \quad (4.13)$$



ภาพที่ 4.17 ค่าความผิดพลาดขององศาการหมุนรอบแกน “X” เมื่อเทียบของสาจากเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain กับการประมาณค่าด้วย Kalman Filter



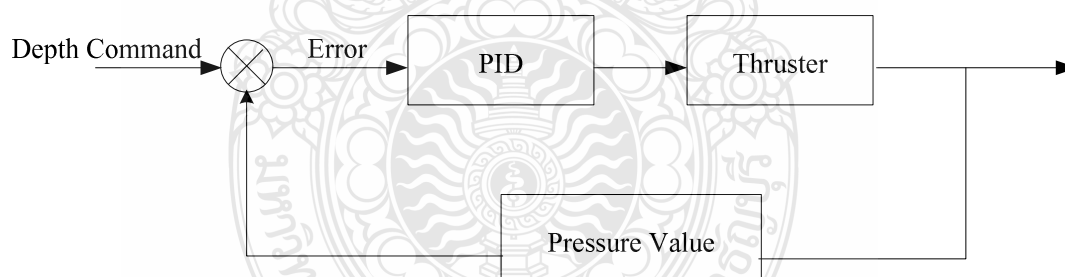
ภาพที่ 4.18 ค่าความผิดพลาดขององศาการหมุนรอบแกน “Y” เมื่อเทียบของสาจากเข็มทิศความแม่นยำสูงจาก Microstrain กับการประมาณค่าด้วย Kalman Filter

4.8 การทดสอบการควบคุมแบบ PID

โดยหลักการเบื้องต้นของการควบคุมความลึกด้วยระบบควบคุมแบบ PID นี้โดยรวมคือการลดค่าความผิดพลาดของความลึกที่ป้อนกลับให้มีค่าน้อยที่สุดหรือเป็นศูนย์โดยการปรับสัดส่วนของค่าคงที่แบบแปรผันตรง (K_p) ค่าคงที่แบบอนุพันธ์ (K_d) และค่าคงที่แบบปริพันธ์ (K_i) ฉะนั้นกฎการควบคุมความลึกแบบพีไอดี(PID)นั้นจะสามารถแสดงได้โดยสมการ ดังนี้

$$PWM = \left(K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt \right) + 1.5 \quad (4.14)$$

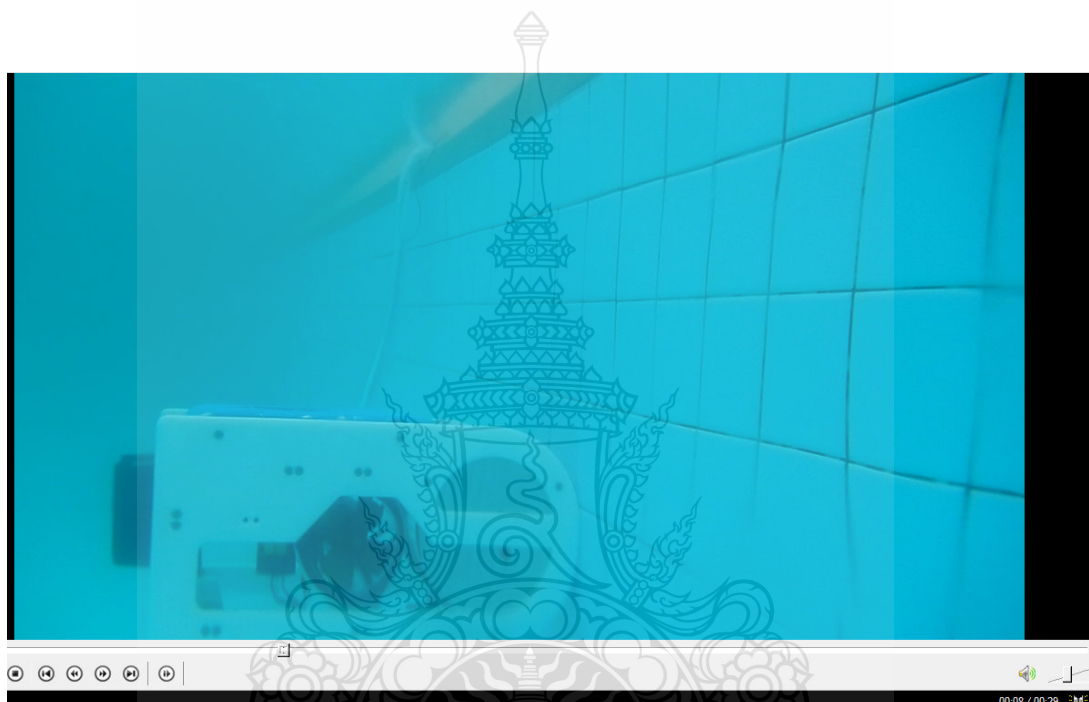
ซึ่งค่าความผิดพลาด (Error) ที่ป้อนกลับนั้นเป็นค่าความแตกต่างระหว่างคำสั่งที่ส่งมาจากผู้ใช้งาน และค่าจากสัญญาณป้อนกลับจากเซนเซอร์วัดความดันที่วัดได้ โดยเอาต์พุตจากระบบควบคุมแบบพีไอดีที่ออกมาจะถูกส่งต่อไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ในรูปแบบคำสั่งแบบ (PWM) ดังนั้นค่าคงที่ 1.5 ms จะถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อให้สัญญาณ PWM อยู่ในระดับกึ่งกลางที่ถูกต้องคือ มอเตอร์จะไม่หมุนเมื่อค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ซึ่งแผนภาพระบบควบคุมป้อนกลับแบบ PID ที่ได้ใช้ในการป้อนคำสั่งแสดงดังภาพที่ 4.19



ภาพที่ 4.19 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบ PID เพื่อควบคุมความลึกโดยใช้เซนเซอร์วัดความดัน

จากภาพหุ่นยนต์ดำน้ำได้นำมาทดสอบในสระว่ายน้ำของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ทำการทดสอบการควบคุมความลึกโดยใช้ระบบป้อนกลับแบบ PID การทำงานของหุ่นยนต์ดำน้ำนั้นก็จะประกอบไปด้วยชุดคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ที่สร้างสัญญาณอนาล็อก

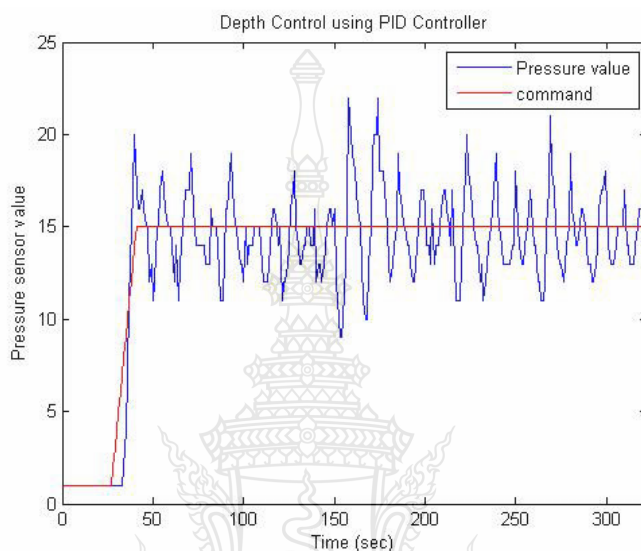
PWM เพื่อจ่ายไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งการส่งสัญญาณนั้นได้ถูกส่งผ่านมาจากจอยสติ๊ก และจะมีการป้อนคำสั่งจากจอยสติ๊กควบคุมไปยังระดับความลึก เพื่อปรับค่าคงที่ของ PID จากนั้นก็สังเกตการณ์ทำงานของค่าเซนเซอร์ความลึกที่ได้นั้น จากคำสั่งว่าค่าความลึกของหุ่นยนต์ดำนั้นอยู่ในระดับใด ซึ่งจากการทดลองที่แสดงดังภาพที่ 4.20 ได้ทดลองการเคลื่อนที่ระดับความลึกของหุ่นยนต์ดำน้ำ จากระดับผิวน้ำ สามารถรักษาระดับไปยังกระเบื้องแผ่นที่ 3 ที่อยู่ระดับความลึก 40.9 เซนติเมตร



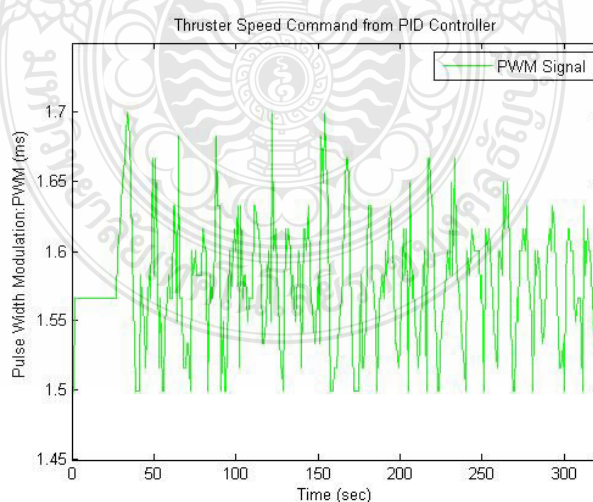
ภาพที่ 4.20 การทดลองในสระน้ำการควบคุมระดับความลึกแบบลูปปิดด้วยระบบควบคุมแบบ PID

จากการทดลองควบคุมความลึกโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID นั้นได้กระทำด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega 2560) คำสั่งอะนาล็อกของระดับความลึกที่ต้องการนั้นจะถูกส่งผ่านมาจากจอยสติ๊ก ตัวอย่างเช่น เมื่อปรับให้ค่าคงที่ของพีไอดีเป็น: $K_p = 1.5$, $K_d = 1$ และ $K_i = 0.01$ และป้อนคำสั่งจากจอยควบคุมไปที่ค่า 163 ซึ่งตรงกับระดับความลึกที่ 40.9 เซนติเมตร ซึ่งค่าเซนเซอร์วัดความลึกนั้นมีสัญญาณรบกวนทำให้สัญญาณความลึกที่ได้แกว่งไปมาอยู่ระหว่าง ± 8 แสดงดังภาพที่ 4.21 และคำสั่งตัวควบคุมรอบความเร็วของชุดขับเคลื่อนที่เป็นสัญญาณแบบ (PWM) จากการทดลองเดียวกันแสดง ในภาพที่ 4.22 ผลลัพธ์ของการควบคุมความลึกจากการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่ายานได้นำพยายามที่จะรักษาระดับให้อยู่ในช่วงประมาณความลึกที่ 40.9 เซนติเมตร

สรุปว่าค่าการควบคุมระดับความลึกมีค่าที่วัดแกว่งตลอดเวลาเนื่องจาก เซนเซอร์วัดความลึกนั้นถูกติดตั้งไว้ภายในถังกันน้ำด้านหน้า ส่วนใบพัดขับเคลื่อนขึ้นลงอยู่กลางตัวหุ่น ดังนั้นการป้อนกลับระดับความลึกนั้นไม่ได้กระทำที่จุดศูนย์กลางมวลหรือตำแหน่งใบพัดออกแรงกระทำ ทำให้เกิดการกระดกของตัวหุ่นเงยหน้าหลังไปมา



ภาพที่ 4.21 กราฟคำสั่งจากจอยควบคุมและค่าอนาล็อกที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน



ภาพที่ 4.22 สัญญาณ PWM จากระบบควบคุมป้อนกลับ PID ด้วยไมโครคอนโทรเลอร์

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

การทดลองงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเน้นไปที่ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างที่ทำให้ยานดำน้ำควบคุมระยะไกลมีขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติทางกายภาพดังในตารางที่ 5.1 พร้อมออกแบบโปรแกรมควบคุมระดับความลึกด้วยวิธีป้อนกลับแบบลูปปิด โดยในการทดลองได้รักษาระดับความลึกของยานดำน้ำควบคุมระยะไกลตามระดับที่สั่งงานโดยผู้บังคับผ่านจอยสติ๊กโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้เซนเซอร์วัดความดันป้อนกลับค่าความลึก ซึ่งยานดำน้ำควบคุมระยะไกลตัวนี้ก็สามารถควบคุมและรักษาระดับความลึกได้ตามที่ต้องการได้แต่อาจเกิดการวัดแกว่งในมุมมองเป็นองศาเล็กน้อย นอกจากนี้ในการทำงานยังสามารถมองเห็นภาพยานดำน้ำในทิศทางที่กล้องวิดีโอถ่ายภาพขึ้นมา

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติทางกายภาพของยานดำน้ำควบคุมระยะไกล

ขนาด (มิลลิเมตร)	260 × 440 × 200
น้ำหนัก	7.5 กิโลกรัม
ความเร็ว	1 เมตร/วินาที
ใบพัด	4 High Flow 400 HFS Thrusters
เซนเซอร์ที่ใช้	เซนเซอร์วัดความดัน, เซนเซอร์เข็มทิศ (HMC6343), เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม
แบตเตอรี่	12 โวลต์

ในการทดลองส่วนที่สองคือ การประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter จากการนำเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและเซนเซอร์เข็มทิศมาบูรณาการค่าเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณขององศาการหมุนและนำค่าองศาที่ประมาณค่าได้มาเทียบกับองศาการหมุนของเข็มทิศทั้ง 3 แกนเพื่อทดสอบความแม่นยำในการนำไปใช้ แต่เนื่องจากเซนเซอร์มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอกดังนั้นค่าที่ได้ออกมาจึงมีผลต่อการทดลอง จึงต้องมีการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมต่อระบบการทดลองจริงต่อไป ซึ่งค่าที่ได้จากการประมาณค่าด้วยเทคนิค Kalman Filter จะมีค่าความคลาดเคลื่อนขององศาการหมุนรอบแกน “X” อยู่ที่ 1.80 % และมีค่าความคลาดเคลื่อนขององศาการหมุนรอบแกน “Y” อยู่ที่ 0.47 %

5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัย

5.2.1 หุ่นยนต์ดำน้ำควบคุมระยะไกลคลาดเคลื่อนในการรักษาระดับความลึกจากคำสั่ง เนื่องจาก 1) ตำแหน่งการติดตั้งของเซนเซอร์และใบพัดที่ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน 2) สัญญาณรบกวนของเซนเซอร์จากภายนอก และ 3) การไหลของน้ำ ขนาดของตัวยานดำน้ำซึ่งมีขนาดเล็ก ดังนั้น เพื่อให้การทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ควรใช้เซนเซอร์วัดความลึกที่แม่นยำขึ้น และออกแบบการติดตั้งตำแหน่งเซนเซอร์ใหม่

5.2.2 เซนเซอร์วัดมุมเอียงอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง เนื่องจากการสั่นสะเทือนจากภายนอกและสัญญาณรบกวนของเซนเซอร์เข็มทิศและวัดความเร็วเชิงมุม ดังนั้นจึงควรมีการปรับเทียบ(Calibration) เซนเซอร์ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.2.3 เซนเซอร์วัดแรงมีค่าความแม่นยำสูง แต่เนื่องจากตำแหน่งที่ใช้วัดแรงบนผิวสัมผัสในแนวแกน x และในแนวแกน y โดยตำแหน่งที่วัดแรงมอเตอร์ที่ทดสอบ ไม่ได้ติดตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางของเซนเซอร์วัดแรงจะนั้นค่าแรงวัดได้จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนสูง

5.2.4 การประมาณค่าขององศาการหมุนด้วยเทคนิค Kalman Filter มีค่าความแม่นยำในช่วงสถานะคงที่ (Steady State) หลังจากช่วงประมาณ 0.2 วินาที ไปเนื่องจากช่วงต้นการทำงานค่าเงื่อนไขเริ่มต้นไม่รู้ค่าที่แน่นอนอีกทั้งเซนเซอร์มีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทำให้ค่าในช่วงต้นมีค่าความแม่นยำต่ำ

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหาในงานวิจัย

5.3.1 จากการทดสอบยานดำน้ำควบคุมระยะไกลจริงในสระว่ายน้ำ ในการควบคุมความลึก ที่เกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมความลึกเนื่องจากการทำงานของชุดควบคุมความเร็วมีช่วงห่างในการทำงานจึงทำให้มอเตอร์หมุนอย่างไม่เสถียรภาพ และเซนเซอร์วัดความดันอยู่ที่ตำแหน่งด้านข้างซึ่งอาจทำให้มีค่าคลาดเคลื่อนจากจุดรับแรงดันจากน้ำ

5.3.2 ตำแหน่งของมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ควรอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของตัวยานดำน้ำเพื่อไม่ให้เกิดโมเมนต์ในองศาปีกแล้วแยกและช่วยให้มีความเสถียรในการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง

5.3.3 เซนเซอร์วัดแรง ถ้าวัดแรงเคลื่อนออกจากตำแหน่งกึ่งกลางตัวเซนเซอร์จะได้ค่าที่ไม่ถูกต้องดังในการวัดแรงต้องอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของเซนเซอร์จึงจะได้ค่าแรงที่ถูกต้องจากเซนเซอร์ มิฉะนั้นจะต้องใช้ค่าโมเมนต์มาเพื่อช่วยหาค่าแรงดังการทดลอง

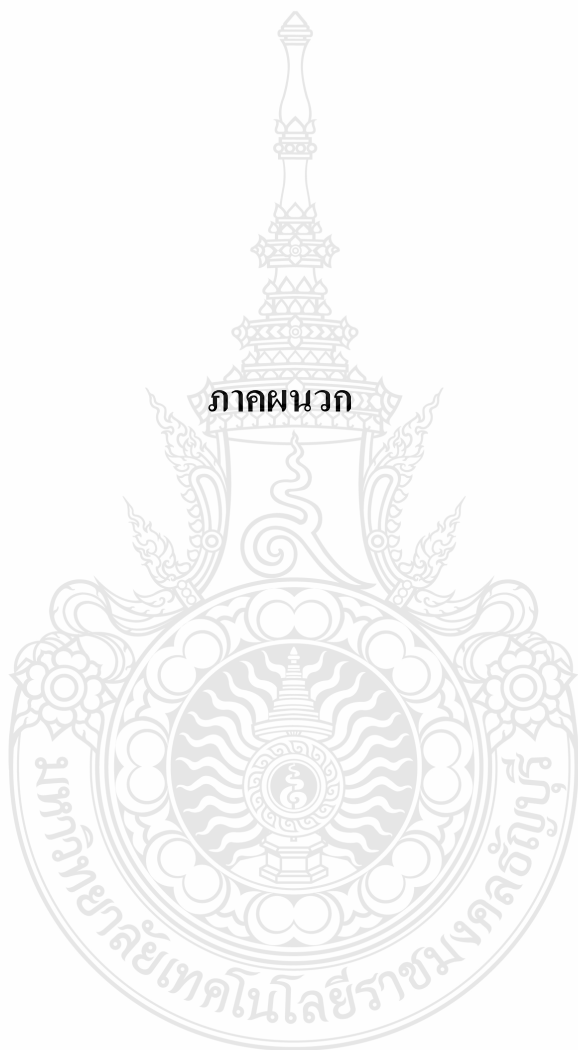
รายการอ้างอิง

- [1] SEABOTIX., **Product>LBV300-5** (Online), 2012. Available:
www.seabotix.com/products/lbv300-5.htm (20 June 2011).
- [2] Underwater Remotely Operated Vehicles., **VideoRay 4** (Online), Available:
www.videoray.com/homepage/professional-rovs/videoray-pro-4.html (12 May 2011).
- [3] Jantapremjit, P., “Design and Development of a Remotely Operated Vehicle,” **TSME International Conference on Mechanical Engineering**, The Second, 19-21 October 2011, Krabi Thailand, 2012.
- [4] Suthakorn, J. and Chuckpaiwong, I. and Owatchaiyapong., “ThaiXPole Underwater Robot for the Antarctica Exploration,” **Oceans MTS/IEEE**, 17-23 September 2005, England. 2005.
- [5] Kunchit, N. and Prempraneerach, P. “Experimental Estimation of Hydrodynamics Coefficients of Underwater Vehicle using Constant Towing Force,” **RSU Research Conference**, Ruangsit University, Pathumthani, Thailand, 2012.
- [6] Fossen, Thor I., **Guidance and Control of Ocean Vehicles**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [7] ARDUINO, **Arduino Mega 2560** (Online), Available: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>(15 March 2011).
- [8] สรวุฒิ สุจิตจร, การควบคุมอัตโนมัติ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: เพียร์สันเอ็นดูเคชั่นอินโดไชน่า, 2546.
- [9] ขวัญชัย จ้อยเจริญ, กลศาสตร์ของไหล 2. พิมพ์ครั้งที่ 1 ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2549.
- [10] Wikipedia, **Buoyancy** (Online), 2008. Available: <http://th.m.wikipedia.org/wiki/buoyancy> (22 August 2011).
- [11] น.ต.ดร.กฤษณา แสงเพชรส่อง, **Kalman Filter Algorithm** (Online), 1994. Available:
http://library.rtna.ac.th/web/RTNA_Journal/y.4c.4/05.pdf (17 January 2012).
- [12] Oser J. and Blemings H., **Practical Arduino**. United States of America, 2009.

- [13] Pololu, **MiniIMU-9 Gyro, Accelerometer, and Compass (L3G4200D and LSM303DLM Carrier)** (Online), 2001. Available: www.pololu.com/catalog/product/1265. (18 February 2011).
- [14] MathWorks., **Kalman Filtering** (Online), 1994. Available: <http://www.mathworks.com/help/control/ug/kalman-filtering.html> (10 February 2012).



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลใช้ในการเขียนโปรแกรม พร้อมรับข้อมูลค่าเซนเซอร์ต่างๆ ในการทดลองเพื่อควบคุมและพัฒนาระบบ

ก.2 มอเตอร์Crust crawler รุ่น High Flow 400 HFS

การทดลองนี้ ได้ใช้มอเตอร์กันน้ำโดยได้เขียน โปรแกรมเพื่อควบคุมความเร็วรอบและทิศทางของมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์

Motor Type	High efficiency brushless
Weight	185g. (6.5oz)
Max Power	400W
Gear Ratio	4.28:1
Shaft Diameter	5.0mm (.1969")
Maximum Case Temperature	100C (212F)
Operating Voltage	12 to 50 volts



ภาพที่ ก.1 มอเตอร์Crust crawler รุ่น High Flow 400 HFS

ก.3 ชุดขับเคลื่อนเพื่อควบคุมรอบมอเตอร์จาก Castles รุ่น Hydra 120

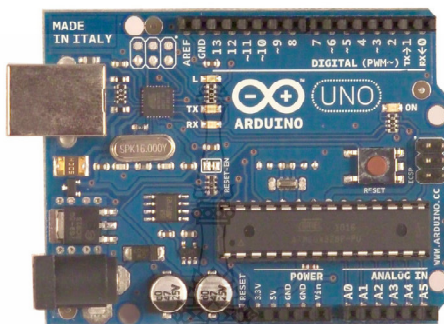
ชุดควบคุมความเร็วรอบใช้กับมอเตอร์Crust crawler รุ่น High Flow 400 HFS โดยการสร้างควมกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดีวตี้ไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่



ภาพที่ ก.2 Castles รุ่น Hydra 120

ก.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ที่ใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ AVR 8 bit ตัวประมวลผลเป็น ATmega328 มีช่องดิจิทัล 14 ช่อง และป้อนโปรแกรมผ่านสาย USB ด้วยโปรแกรม Arduino1.0 ด้วยภาษาซี



ภาพที่ ก.3 Arduino UNO

ก.5 เซนเซอร์วัดความดัน

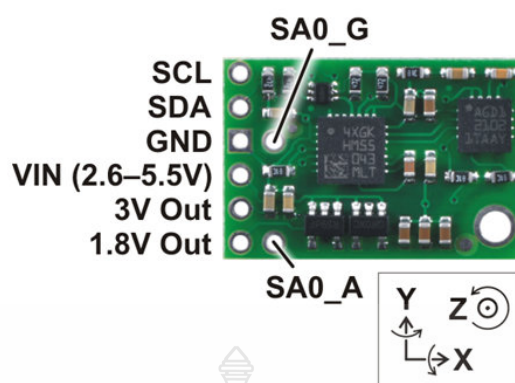
วัดความดันชนิดนี้สามารถทนแรงดันได้ที่ 50 kiloPascal และที่อุณหภูมิ -40 ถึง 125 องศาเซลเซียส หรือทนได้สูงสุดที่ความลึก 5 เมตร



ภาพที่ ก.4 เซนเซอร์วัดความดัน รุ่น MPX2053DP

ก.6 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและวัดความเร่ง

สามารถวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งได้ซึ่งต้องการไฟเลี้ยงเซนเซอร์ที่ประมาณ 2.4 ถึง 3.6 โวลต์ โดยมีตัวประมวลผล L3G4200D ของวัดความเร็วเชิงมุมและ LSM303DLM วัดความเร่ง



ภาพที่ ก.5 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและวัดความเร่ง

ก.7 เข็มทิศ 3 แกน

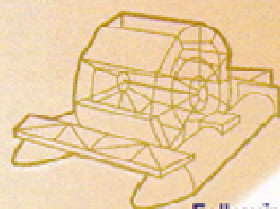
เซนเซอร์รุ่น HMC6343 โดยสามารถทนสูงสุดได้ที่อุณหภูมิ - 40 ถึง +85 องศาเซลเซียส ใช้ไฟเลี้ยงเซนเซอร์อยู่ที่ 5 โวลต์ ซึ่งส่งสัญญาณผ่าน I²C



ภาพที่ ก.6 เข็มทิศ 3 แกน

ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





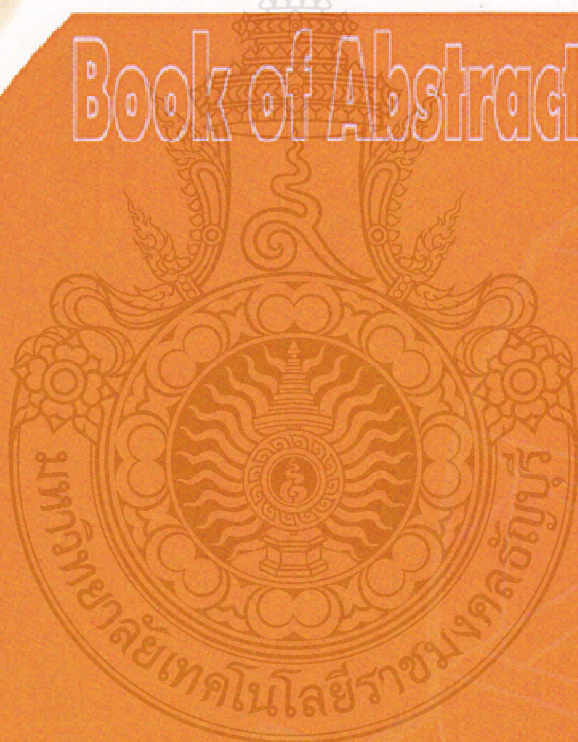
Following His Majesty's Footsteps:
Sustainable development through research



3rd TSME- ICoME

the 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering

Book of Abstracts



by

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
and The Thai Society of Mechanical Engineers

Reviewer Lists

AEC Alternative Energy and Combustion

Prof. Dr. Sumrerng Jugjai

Assoc. Prof. Dr. Karit Wattanavichien

Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk

Assoc. Prof. Dr. Thanid Madhiyanon

Assoc. Prof. Dr. Bundit Fungtammasan

Assoc. Prof. Dr. Bundit Limmeechokchai

Assoc. Prof. Dr. Satha Aphorirratana

Assoc. Prof. Dr. Somchai Chanchaona

Assoc. Prof. Dr. Suebsak Nanthavanij

Asst. Prof. Dr. Wasan Jompakdee

Prof. Dr. Ali Turan

Prof. Dr. Ashwani K. Gupta

Prof. Dr. Chou Siaw Kiang

Prof. Dr. Hiroshi Takami

Prof. Dr. Mishra D.P.

Prof. Dr. Pierre Joulain

Prof. Dr. Satoshi Matsumoto

Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong

Asst. Prof. Dr. Cattaleeya Pattamaprom

Asst. Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich

Asst. Prof. Dr. Tanet Aroonsrisopon

Asst. Prof. Dr. Wichai Siwakosit

Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai

Asst. Prof. Phichai Leelapatana

Asst. Prof. Dr. Wisanuruk Wechsotol

Dr. Jay Tawee Pukrushpan

Dr. Natt Makul

Dr. Yossapong Laonual

Dr. Isares Duchallaya

Dr. James Moran

Prof. Dr. Włodzimierz Blaziak

Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima

Assoc. Prof. Dr. Zhibin Yu

AME Aerospace and Marine Engineering

Gp. Capt. Assoc. Prof. Dr. Somchai Hangle

Assoc. Prof. Dr. Sumpun Chaitep

Asst. Prof. Dr. Bunyong Rungroungcuyboon

Asst. Prof. Dr. Boonchai Watjatrakul

Asst. Prof. Dr. Annon Ruangwiset

Asst. Prof. Dr. Chawin Chantarasenawong

AMM Applied Mechanics, Materials and Manufacturing

Emer. Prof. Dr. Variddhi Ungbhakorn

Prof. Dr. Thananchai Leephakpreeda

Assoc. Prof. Dr. Chatchapol Chungchoo

Assoc. Prof. Dr. Chaosuan Kanchanomai

Assoc. Prof. Dr. Dulyachot Cholaseuk

Assoc. Prof. Dr. Thongchai Fongsamcotr

Assoc. Prof. Dr. Thanya Kiatiwat

Asst. Prof. Dr. Vitoon Uthaisangauk

Asst. Prof. Dr. Pattaramon Jongpradist

Asst. Prof. Dr. Apiwat Muttamara

Asst. Prof. Dr. Apiwon Polchai

Asst. Prof. Dr. Arisara Chaikittiratana

Asst. Prof. Dr. Sujin Bureerat

Dr. Kummun Chooprasird

Assoc. Prof. Dr.Pongpan Kaewtatip	Asst. Prof. Dr.Chanat Ratanasumawong
Assoc. Prof. Dr. Paired Singhatanadgid	Dr. Kengkamol Wiratkasem
Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn	Dr. Kunayut Eiamsa-ard
Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmetthangoon	Dr. Jirachai Mingbunjerd
Assoc. Prof. Dr.Varunee Premanond	Dr. Kittipong Boonlong
Assoc. Prof. Dr. Sirisak Harnchoowong	Dr.Chinarong Srikunwong
Assoc. Prof. Dr. Sommai Pripem	Dr. Chaiyakorn Jansuwan
Assoc. Prof. Dr. Surapol Raadnui	Dr. Natt Makul
Assoc. Prof. Dr. Itthichai Preechawuttipong	Dr. Thanyarat Singhanart
Assoc. Prof. Dr.Pairoj Kirirat	Dr. Bumroong Puangkird
Assoc. Prof. Dr. Chanyut Kolutawong	Dr. Prapot Kunthong
Asst. Prof. Dr. Jirapong Kasivitamnuy	Dr. Paiboon Sreearunothai
Asst. Prof. Dr.Nathasak Boonmee	Dr. Rung Kittipichai
Asst. Prof. Dr.Det Damrongsak	Dr. Wiboon Lertwimolnun
Asst. Prof. Dr. Bunyong Rungrongdouyboon	Dr.Wetchayan Rangsi
Asst. Prof. Dr. Patrapon Kamonpet	Dr.Somsak Siwadamrongpong
Asst. Prof. Dr. Wiriya Thongruang	Dr. Sirivit Teachajedkadarungsri
Asst. Prof. Dr. Supasit Rodkwan	Dr.Suvanit Chitsiriphanit
Asst. Prof. Dr. Sate Sampattagul	Dr.Alongkorn Pimpin
Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee	Dr.Anchana Wongsto
Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai	Prof. Dr. Otani Yoshio
Asst. Prof. Dr. Anak Khantachawana	Prof. Dr. Fujimori Atsushi
Asst. Prof. Dr. Monchai Fruekwilailert	Asst. Prof. Dr. Shoji Koichi
Asst. Prof. Petch Jearanisilawong	Asst. Prof. Dr. Thoatsanope Kamnerdtong

BME Biomechanics

Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho	Asst. Prof. Dr. Teeranoot Chanthasopeephan
Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmethangoon	Dr. Chirdpun Vitooraporn
Assoc. Prof. Dr. Sirikul Wisutmethangoon	Dr. Teerapot Wessapan
Assoc. Prof. Dr. Anak Khantachawana	

CST Computation and Simulation Techniques

Prof. Dr. Jongjit Hirunlabh	Asst. Prof. Dr. Charoenyut Dechwayukul
-----------------------------	--

Prof. Dr. Pramote Dechaumphai	Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa
Prof. Dr. Phacungsak Rattanadecho	Asst. Prof. Dr. Tumrong Puttapitukporn
Prof. Dr. Somchart Chantasriwan	Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom
Prof. Dr. Sompong Putvisutisak	Asst. Prof. Dr. Niphon Wansophark
Assoc. Prof. Dr. Kuntinee Maneeratana	Asst. Prof. Dr. Boonchai Lertnuwat
Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charensuk	Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsam
Assoc. Prof. Dr. Thitima Jintanawan	Asst. Prof. Dr. Virat Chomkwah
Assoc. Prof. Dr. Nat Kasayapanand	Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana
Assoc. Prof. Dr. Thawatchai Onjun	Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee
Assoc. Prof. Dr. Thanya Kiatwat	Asst. Prof. Dr. Seney Sirichai
Assoc. Prof. Dr. Poranet Visuwan	Asst. Prof. Dr. Anusam Permsuwan
Assoc. Prof. Dr. Pongpan Kaewtatip	Asst. Prof. Dr. Arisara Chaikittiratana
Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvong	Asst. Prof. Dr. Angkee (Paiboon) Sripakagorn
Assoc. Prof. Dr. Perapong Tekasakul	Asst. Prof. Dr. Charoenyut Dechwayukul
Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmetthangcon	Asst. Prof. Dr. Pattaramon Jongpradist
Assoc. Prof. Dr. Varangrat Juntasaro	Asst. Prof. Dr. Petch Jearanaisilawong
Assoc. Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri	Dr. Passakorn Vessakosol
Assoc. Prof. Dr. Wiroj Limtrakarn	Dr. Sujint Suwanna
Assoc. Prof. Dr. Surachate Chutima	Dr. Suwanit Chitsiriphanit
Assoc. Prof. Dr. Ekachai Juntasaro	Dr. Attaporn Wisassint
Assoc. Prof. Gp. Capt. Somchai Hanklar	Dr. Alongkorn Pimpin
Flt. Lt. Assoc. Prof. Dr. Kontorn Chamnirasart	Dr. Apirak Hokpanna
Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong	Dr. Phongszen Pitakwatchara
Asst. Prof. Dr. Chittin Tangthieng	Prof. Dr. Khalil M. Khenefer
Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul	Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier
Prof. Dr. Satoshi Matsumoto	Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimjima
Prof. Dr. Shankar Mahalingam	

DRC Dynamic System, Robotics and Control

Prof. Dr. Stanislav S. Makhanov	Asst. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan
Prof. Dr. Thananchai Leephakpreeda	Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom
Assoc. Prof. Dr. Djiit Laowattana	Asst. Prof. Dr. Phongsaeen Pitakwatchara

Assoc. Prof. Dr. Thanu CHOUYCHAI

Assoc. Prof. Dr. Pudit Laksanacharoen

Assoc. Prof. Dr. Manukid Parnichkun

Assoc. Prof. Dr. Radom Pongvuthitham

Assoc. Prof. Dr. Ratchatin Chanchareon

Assoc. Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri

Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan

Assoc. Prof. Dr. Suwat Kuntanapreeda

Assoc. Prof. Dr. Panyarak Ngamsritragul

Capt. Assoc. Prof. Dr. Kontorn Chamniprasart

Assoc. Prof. Dr. Matthew O. T. Cole

Asst. Prof. Dr. Steven Gordon

Asst. Prof. Dr. Chak Chantalakhana

Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier

Asst. Prof. Dr. Pruittikorn Smithmaitrie

Asst. Prof. Dr. Witaya Wannasuphoprasit

Asst. Prof. Dr. Withit Chatlatanagulchai

Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana

Asst. Prof. Dr. Szathys Songschon

Asst. Prof. Dr. Saroj Saimek

Dr. Nuksit Noomwongs

Dr. Nyesunthi Apiwattanalungarn

Dr. Pairat Tangpornprasert

Dr. Pinyo Puangmali

Dr. Mana Saedan

Dr. Sawat Luengruengrit

Dr. Sappinandana Akamphon

ETM Energy Technology and Management

Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot

Prof. Dr. Pradit Terdtoon

Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho

Prof. Dr. Somchart Chantasiriwan

Assoc. Prof. Dr. Chukiat Kooptanond

Assoc. Prof. Dr. Thanakorn Soontornchainacksaeng

Assoc. Prof. Dr. Thawatchai Onjun

Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvongse

Assoc. Prof. Dr. Withaya Yongchareon

Assoc. Prof. Dr. Satha Aphornratana

Assoc. Prof. Dr. Supachart Chungpaibulpatana

Assoc. Prof. Dr. Somrote Komolavanij

Assoc. Prof. Dr. Smith Aemsaard

Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul

Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsirirot

Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin

Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan

Assoc. Prof. Dr. Asil Bunyajitradulya

Asst. Prof. Dr. Kriengkrai Assawamartbunlue

Asst. Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich

Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana

Asst. Prof. Dr. Charnarong Assavatesanupap

Asst. Prof. Dr. Tul Manewattana

Asst. Prof. Dr. Nuparb Yamtraipat

Asst. Prof. Dr. Malee Santikunaporn

Asst. Prof. Dr. Watit Pakdee

Asst. Prof. Dr. Somchai Maneewan

Asst. Prof. Dr. Udomkiat Nontakaew

Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai

Dr. Chirdpun Vitooraporn

Dr. Pramote Laipradit

Prof. Dr. Joseph Khedari

Assoc. Prof. Dr. Suebsak Nanthavanij

Prof. Dr. Fujimori Atsushi

Prof. Dr. Otani Yoshio

Prof. Dr. Satoshi Matsumoto

Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan

Dr. Amornrat Kaevpradap

Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima

Asst. Prof. Dr. Shoji Koichi

TSF Thermal Systems and Fluid Mechanics

Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho

Prof. Dr. Sornchai Wongwises

Prof. Dr. Somsak Chaiyapinunt

Assoc. Prof. Dr. Chamlong Prabkeao

Assoc. Prof. Dr. Jumlong Limtragool

Assoc. Prof. Dr. Chawalit Kittichaikarn

Assoc. Prof. Dr. Chairote Kunpanitchakit

Assoc. Prof. Dr. Chaisin Chinporncharoenpong

Assoc. Prof. Dr. Chinaruk Tianpong

Assoc. Prof. Dr. Tawit Chitsomboon

Assoc. Prof. Dr. Bundit Limmeechokchai

Assoc. Prof. Dr. Prakob Surawattanawan

Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvongse

Assoc. Prof. Dr. Perapong Takasakul

Assoc. Prof. Dr. Paisarn Naphon

Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongroj

Assoc. Prof. Dr. Montri Thumrongpirun

Assoc. Prof. Dr. Manit Thongprasert

Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul

Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai

Prof. Dr. Hiroshi Takami

Prof. Dr. Kambiz Vafai

Prof. Dr. Khalil M Khanafar

Prof. Dr. Otani Yoshio

Prof. Dr. S. Sablani

Prof. Dr. S.J. Kowalski

Assoc. Prof. Dr. Satha Aphornratana

Assoc. Prof. Dr. Sornchai Norasethasopon

Assoc. Prof. Dr. Somnuk Theragulpisut

Assoc. Prof. Dr. Sombat Teekasap

Assoc. Prof. Dr. Somrat Kerdsuwan

Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin

Assoc. Prof. Dr. Santi Laksitanonta

Assoc. Prof. Sinchai Chinvorarat

Assoc. Prof. Suebsak Nanthavanij

Assoc. Prof. Surachai Radagan

Assoc. Prof. Anusorn Chinsuwan

Assoc. Prof. Asi Bunyajitradulya

Assoc. Prof. Issaree Hunsacharoonroj

Assoc. Prof. Richakorn Chirakalwasan

Assoc. Prof. Veera Charvattana

Assoc. Prof. Samruad Inban

Asst. Prof. Dr. Wisanuruk Wechsator

Dr. Yossapong Laoonual

Dr. Atikorn Wongsatanawarid

Prof. Dr. Satoshi Matsumoto

Prof. Dr. Shankar Mahalingam

Prof. Dr. Tim, A.G. Langrish

Prof. Dr. Xiao Dong Chen

Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier

Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima

CST: Computation and Simulation Techniques

CST1002	Development of CFD Software for Predicting Three-Dimensional Complex Geometry Flows	57
CST1004	Design of Insert Molds for Flow Stress Determination of Steel Tube in Hydroforming Bulge Test	58
CST1010	Cooling Optimization Simulation with Finite Element Method Used for Manufacturing of Polycarbonate Lens.	59
CST1011	Application of Space-Time Finite Element Method for Two-Dimensional Heat Conduction Problems	60
CST1015	Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in a Circular Tube with Orifices Plate	61
CST1016	3D Analysis of Laminar Flow, Pressure Loss and Heat Transfer in a Tube with U-Inclined Thin Ribs	62
CST1018	Brake Force Control Scheme for Integration of Conventional and Regenerative Braking Systems of Retrofitted Electric Vehicles	63
CST1019	Development of Adaptive Meshing within LS-DYNA with Application to Impact Mechanics	64
CST1020	Finite Element Analysis of an Electric Bus Body Structure in Real Driving Conditions	65
CST1023	Improved Structural Solution Accuracy with Adaptive Quadrilateral Elements by Flux-based Formulation	66
CST1027	Three-dimensionality of vortex cell flow: Effects of oblique incoming boundary layer.	67

DRC: Dynamic System, Robotics and Control

DRC1001	Development of an Intelligent Steering System for Light Passenger Car	68
DRC1002	Robust Inverse Dynamics Control and Vibration Rejection for Inertial Stabilization Systems	69
DRC1003	An Improved Visual Tracking Algorithm for An Inertial Stabilization System	70
DRC1004	Multiple Objects Tracking using a Kalman Filter on a PC-Cluster based Multi-Camera System	71
DRC1005	Control of a Telemanipulator using Freehand and Force/Visual Feedback	72
DRC1007	Directing Mobile Robot Roaming Path Based on the Skinner Automation	73
DRC1009	Control of a Two-Degree of Freedom Cable Driven Compound Joint System: Preliminary Results	74
DRC1013	Robust and Quadratic Stabilization of TORA System via Dynamic Surface Control Technique	75
DRC1017	Design of a Hospital Stretcher with a Semi-Active Vibration Absorption System	76
DRC1018	Tire Test for Drifting Dynamics of a Scaled Vehicle	77
DRC1020	Parabolic Backstepping Boundary Control : An Application to One-dimensional Heat-generating Rod Temperature Control	78
DRC1024	Development of Driving Simulator for Eco-Driving Evaluation	79
DRC1026	Wearable Wireless Fall Detector for the Elderly	80
DRC1027	Frontage Camera System for Passenger Car	81
DRC1030	Compliant Control of CRS Manipulator Arm	82
DRC1032	Remotely Operated Vehicle with Depth Control	83
DRC1033	Three-Wheel Robot Driven by Inertial Actuator	84



Remotely Operated Vehicle with Depth Control

Surasak Timpitak, Pradya Prempraneerach*

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathumthani, Thailand 12110

*Corresponding Author: ppradya@gmail.com, 02-549-4415

Abstract

This research focuses on designing and building Remotely Operated Vehicle (ROV) driven by four propellers and controlled by tethered joystick. The entire system can be transported very easily. This ROV can be used to survey in both fresh and salt water. To increase this ROV's capacity, a depth control has been developed to maintain a constant depth using a PID control. The control system in this robot is implemented by microcontroller along with a pressure sensor, accelerometer and gyroscope, and video camera so that the orientation in 6 degree of freedom can be estimated and underwater environment can be monitored by a user.

Keywords: (ROV) Remotely Operate Vehicle, Depth control, PID control

1. Introduction

Recently, underwater vehicles have been employed in several operations; such as, ocean and fresh-water surveying, water sampling, and rescuing operations. The tethered underwater vehicles with manual operation are known as Remotely Operated Vehicle (ROV). ROV control design is one of the very interesting fields. The ROV design consists of many aspects: structural design [2,4], dynamic parameter identification [1], controller design [3] as well as experimental test and modification to suit the specified applications.

Jantapremjit [2] designed and built a small ROV that consists of pressure, compass, IMU sensors and CCD camera and can submerge upto 15 meter depth; as a result, underwater environment can be monitored. Kunchit and Prempraneerach [1] performed an estimation of ROV hydrodynamic coefficients by using a least-square technique so that added mass and damping parameters in surge, sway and heave motion can be accurately measured using a constant towing force. Suthakorn, Chuckpaiwong and Owatchaiyapong [4] developed "ThaiXPole" underwater robot to explore the Antarctica, so marine environment in an extreme condition can be explored and collected by scientists.

In this paper, Section 2 introduces ROV structural design and instrumental hardware that equips inside ROV. Experimental results, including thruster force measurement, pressure sensor measurement, software development for digital compass, and depth control using PID controller, are describes in Section 3. Lastly, Section 4 states conclusion and future work.

2. Design and Hardware

All structures and main instruments of ROV are designed within Solid Work, as shown in Fig. 1. Main criteria for this design are focus on compactness, drag reduction with cylindrical front, and neutral buoyancy when thrusters are at rest. Foam is added at the top of ROV structure to balance buoyancy as well as to increase floatation stability. Most of the ROV structures are built with Delrin, which is a corrosion resistance material and suitable to operate in both fresh and salt water. Fig. 2 shows a fully assembly of the ROV after performing a buoyancy balance so that this ROV is neutrally buoyant.

Overall specification for this ROV is given in Table 1. Four High Flow 400 HFS thrusters, used as main propulsion for this ROV, can operate underwater with a maximum depth of 50 meter and can produce maximum torque of 8 pound using 12-V power supply. These four thruster drives are Hydra-120 Castles. The first two thrusters are located horizontally at the back of ROV to provide thrust for a surge motion and a yaw moment, as shown in Fig. 2. The third thruster is installed in the vertical direction for a heave motion. The fourth thruster is attached perpendicular to the first two thrusters on the horizontal plane for a sway motion. Furthermore, these thrusters are operated by the Pulse Width Modulation (PWM) that generated from a 8-bit Arduino Mega 2560 microcontroller [6]. Also, pressure sensor and digital compass are connected to Arduino through analog and I²C channels, respectively, such that ROV depth and orientation information can be measured. This



information can help the operator to maneuver this ROV in water resources with high turbidity, like in river or reservoir. Main power source of this ROV is supplied by a 12-V deep-cycle battery. All electrical components receive their specified power from voltage regulators. Moreover, a small CMOS camera for underwater monitoring is installed inside a clear-acrylic cylindrical compartment at the ROV front. An instrumental connection diagram is shown in Fig. 3.

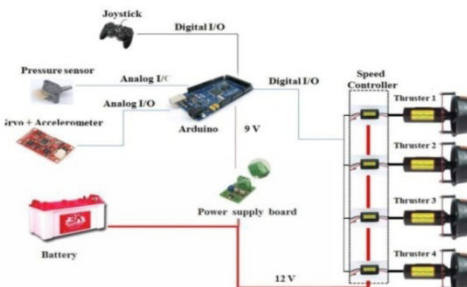


Fig. 3 ROV instrumentation diagram

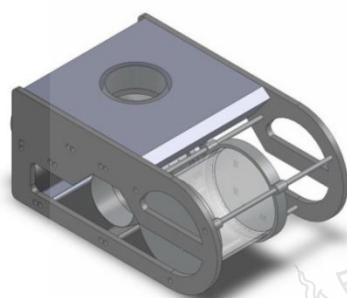


Fig. 1 ROV structural design within SolidWorks



Fig. 2 Fully assembled ROV

Table 1 Design specifications

Maximum Speed	1 m/s
Designated depth	10 m
Dimension (mm)	260x440x200
Weight	7.5 kg
Thrusters	4 High Flow 400 HFS thrusters
Sensors	Pressure sensor, Digital compass (HMC6343)
Battery	12 volt

3. Experimental Result

In this section, we divided into five topics that are composed of sensor and actuator calibrations, software development, depth control implementation, and ROV field test.

3.1) Thrust force measurement

Thrust measurement is performed to obtained actuator force that can be used for control purpose and for basic understanding of thruster operation. The thrust force from the High Flow 400 HFS thrusters, with a 4.28:1 gear reduction, is measured by a three-axis force sensor for different PWM levels. According to axis coordinate in Fig. 4, positive and negative thrust force can be obtained from PWM signal with [1-1.5] millisecond or [0-50%] duty cycle and [1.5-2.0] millisecond or [50-100%] duty cycle, respectively. The operator can control thruster speed using an on-off push button connecting to Arduino, which is used to generate the PWM signal to Hydra 120 speed control. The experimental setup for thrust force measurement is shown in Fig. 4. The positive thrust force (+F_y) and negative thrust force (-F_y) with a constant PWM signal of 1.388 ms and of 1.611 ms from two experimental runs are displayed in Fig. 5 and 6, respectively, when the thruster starts from rest at 10 seconds. The thrust measurement shows that for different PWM level thrust force are maintained at constant level with a transient response less than 2 seconds.



Fig.4 Experimental setup for thrust force measurement.

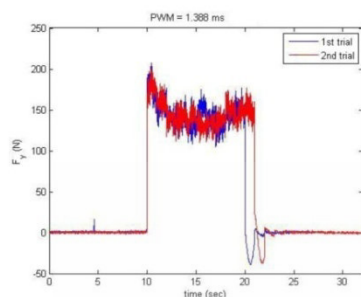


Fig.5 Thrust from High Flow 400 HFS thruster in positive direction with PWM = 1.388 ms

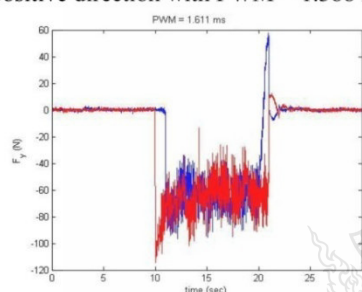


Fig.6 Thrust from High Flow 400 HFS thruster in negative direction with PWM = 1.611 ms

3.2) Pressure measurement

To calibrate MPX2010DP differential pressure transducer, the measurement must be collected at different water depth such that the relation between the sensor value and depth can be obtained. Relative pressure measurement is a difference between outside water pressure and inside seal acrylic cylinder. Signal from pressure sensor is amplified by a LM324 op-amp and then the analog signal is sent to Arduino Mega 2560 microcontroller. The experimental tests are done by submerging ROV down to different depth without turning on any thruster. The analog values from this pressure transducer are shown in Fig. 6 for three depths: 30, 40 and 90 cm. For each depth level, three measurements are taken to test a reliability of sensor reading. According to Fig. 7, in steady-state condition between 60-100 ms, all three measurements overlay on top of each other at different depth.

To convert the analog value from the pressure sensor reading to the water depth, a polynomial interpolation is used to fit the analog or real data using three different polynomial orders: 1st, 2nd and 3rd orders, as shown in Fig. 8. The 3rd order polynomial interpolation yield the best fit among the first three orders. Therefore, the water depth (d) can be calculated from the analog value (a) using the following formula:

$$d = 0.002a^3 - 0.996a^2 + 169.793a - 9636.228 \quad (1)$$

Using this pressure sensor, the conversion of the depth from the sensor reading is a nonlinear relation.

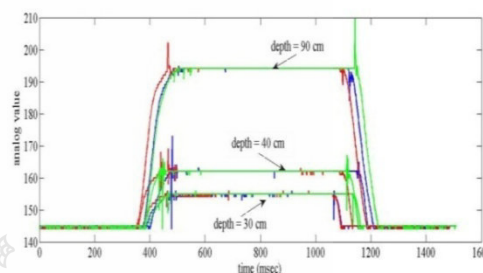


Fig.7 Pressure measurement for three depths : 30, 40 and 90 cm. Red, Blue and Green colors represent the first, second and third measurements.

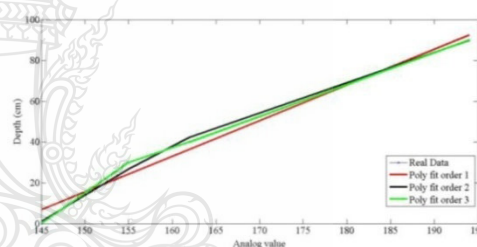


Fig.8 Data fitting using the polynomial interpolation with three different polynomial orders: 1st, 2nd and 3rd.

3.3) Digital Compass and Software Development

To obtain ROV orientation, 3-axis digital compass with tilt compensation (HMC6343) is used such that the operator can estimate ROV movement. Signal from digital compass transmit to Arduino microcontroller through I²C, then sensor reading is transmitted to the processing program through RS-232. To easily visualize the information from this compass, the visualization software has been developed to show roll, pitch, and yaw (heading) angles using the processing program. Fig. 9 exhibits three dials for each rotation axis that vary between 0 to 360 degrees.

To test the operation of this visualization software, first the compass is set in the horizontal plane, as shown in Fig. 9, the yaw, pitch and roll angles are 90, 180 and 180 degrees, respectively. Second, the compass is rotated 90 degrees in both yaw and roll axes, as demonstrated in Fig. 10. From these tests, HMC6343 compass can provide accurate orientation with small angle errors.

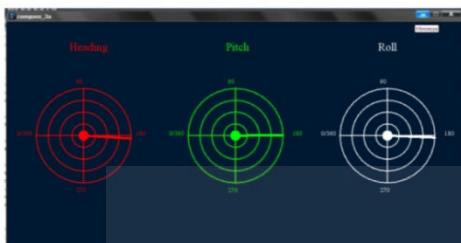


Fig.9 Visualization software to show roll, pitch, and yaw angles of ROV, measured by digital compass.

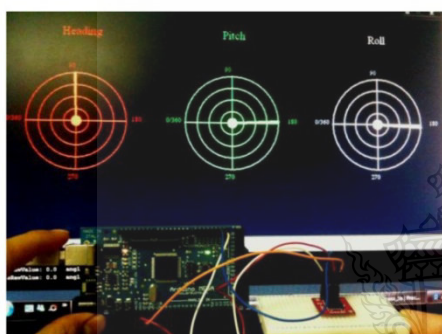


Fig.10 Initial position of the digital compass



Fig.11 Digital compass rotates in both yaw and roll axes by 90 degrees

3.4) Depth Control using PID controller

A basic principle of PID controller is to minimize a feedback error to zero by tuning the proportional gain (K_p), derivative gain (K_d), and integral gain (K_i). A PID control law for a depth control is given by the following formula:

$$PWM = \left(K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_i \int e dt \right) + 1.5 \quad (2)$$

where the feedback error (e) is a difference between the depth command from user and the feedback signal from pressure sensor measurement. Output from PID controller is provided to the Castle thruster drive in a form of PWM command, thus 1.5 ms must be added to

adjust a correct level. The block diagram of the closed-loop system using PID controller is shown in Fig. 12.

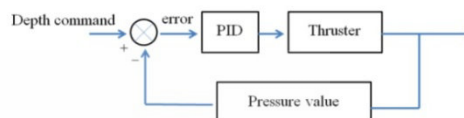


Fig. 12 Block diagram of the depth control using PID controller

The depth control using PID controller is implemented in the Arduino microcontroller [6]. The analog value of a desired depth, used as the depth command, is received from the joystick. With $K_p = 1.5$, $K_d = 1$ and $K_i = 0.01$, when the depth command is set to 163, corresponding to 40.9 cm depth, the feedback pressure value oscillates around 156, as shown in Fig. 13. The PWM thruster speed command is demonstrated in Fig. 14. These results reveal that the depth controller tries to maintain ROV at a constant depth of about 31 cm.

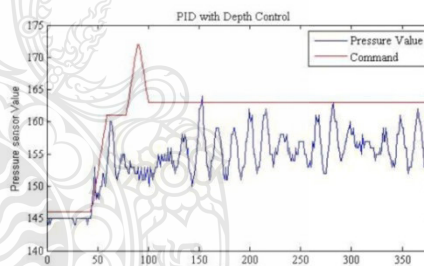


Fig.13 The depth command and the pressure sensor measurement

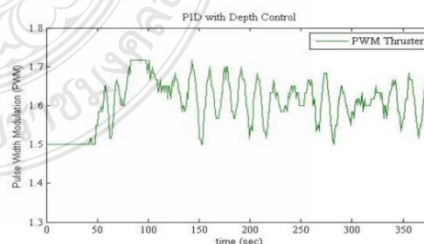


Fig.14 PWM command or the output from PID controller

3.5) ROV Field Test

Fig. 15 and 16 demonstrate the ROV operation in a swimming pool at Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT). ROV speed is measured by timing the surge motion along a given straight path. The ROV

speed that can be achieved with two thrusters operated at 10% duty cycle of PWM thruster command is approximately 1 m/s.

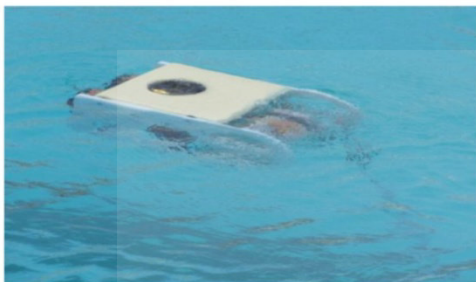


Fig. 15 Experimental test of ROV in RMUTT swimming pool.

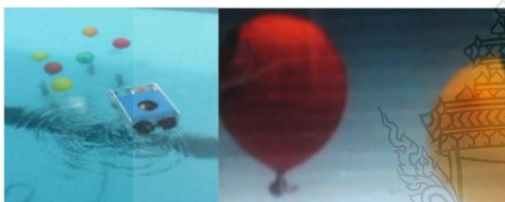


Fig. 16 Demonstration of search operation using color ballon in RMUTT swimming pool (Left) and video transmission from the CCD camera to computer screen (Right).

4. Conclusion

This research is focus on the design and construction of small ROV as well as the depth control using the Arduino microcontroller. Using the pressure sensor, ROV depth can be controlled and maintained at desired level. Moreover, the operator can visualize ROV orientation through the video camera and the visualization program using the signal from the digital compass.

5. Future Work

For additional improvements, tether communication must be upgraded to increase reliability in the data transmission and power source and power connection should be increase to achieve higher thrust force from all thrusters.

6. Acknowledgement

Authors would like to thank the National Research Council of Thailand (NRCT) for a research grant 2554 to support this research.

7. References

- [1] Kunchit, N. and Prempraneerach, P. (2011). Experimental Estimation of Hydrodynamics Coefficients of Underwater Vehicle using

Constant Towing Force, paper presented in *RSU Research Conference 2012*, Pathumthani, Thailand

- [2] Jantapremjit, P. (2011). Design and Development of a Remotely Operated Vehicle, paper presented in *The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October, 2011*, Krabi, Thailand
- [3] Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, ISBN: 0 471 94113 1 , John Wiley & Sons, New York.
- [4] Suthakorn, J., Chuckpaiwong, I., Owatchaiyapong, P. (20) Development of the .ThaiXPole. Underwater Robot for the Antarctica Exploration, paper presented in *Oceans, 2005. Proceeding of MTS/IEEE 17-23 september, 2005*, England.
- [6] Getting Started with Arduino (2012). URL: <http://www.arduino.cc/>, access on 2012.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	18 สิงหาคม 2530
ที่อยู่	35/343 ม.3 ต.คลองสาม อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2554	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการทำงาน	
2554-ปัจจุบัน	ตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ความชำนาญเฉพาะทาง	วิเคราะห์และเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ภาษาซี

