


การควบคุมระดับความลึกของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติ

Automatic Depth Control of Remotely Operated Vehicle



ธนพงศ์ ทองโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมระดับความลึกของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติ

ธนพงศ์ ทองโชติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

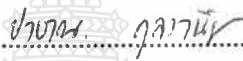
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมระดับความลึกของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติ
Automatic Depth Control of Remotely Operated Vehicle
ชื่อ - นามสกุล นายธนพงศ์ ทองโชติ
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์ปายาณ กุลวานิช, Ph.D.)



กรรมการ

(อาจารย์มนูศักดิ์ जानทอง, Dr.-Ing.)



กรรมการ

(อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

| | |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมระดับความลึกของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติ |
| ชื่อ-นามสกุล | นายธนพงศ์ ทองโชติ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D. |
| ปีการศึกษา | 2557 |

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุม สำหรับ หุ่นยนต์ดำน้ำ ให้เหมาะสม นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง ในการทำงานภาคสนาม ที่ช่วยรักษาตำแหน่งในสภาพที่มีความแปรปรวนจากกระแสน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการออกแบบระบบควบคุมโดยใช้ แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ ส่วนที่ 2 เป็นการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำแบบ 4 ใบพัด

ในการทดสอบระบบควบคุมโดยใช้ แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ ได้ประยุกต์ใช้ สมการพลศาสตร์ของ VideoRayIII และใช้การควบคุมแบบสไลด์คั้งโหมด และ พีไอดี เพื่อเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพในการควบคุมรักษาระดับความลึกในแนวแกน z ส่วนในระนาบ x-y นั้นใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม ทั้ง 2 แบบ เพื่อให้สามารถรักษาระดับในแนวตั้งให้อยู่ที่ระดับความลึกที่ต้องการที่ ดีที่สุด จากผลการจำลอง การควบคุม ระดับความลึกด้วย สมการทางพลศาสตร์ ระบบควบคุมแบบ สไลด์คั้งโหมด จะให้ผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิด การกวัดแกว่ง ส่วนระบบควบคุมแบบ พีไอดี จะมีผลตอบสนอง ที่กวัดแกว่ง แต่จะ สามารถควบคุมความลึกใน ระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำกว่า

ในการสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำ มี 2 ใบพัดในแนวตั้ง และ อีก 2 ใบพัดในแนวราบ ที่สามารถหมุนได้ ทางเดียว และ โครงสร้างหุ่น สามารถดำน้ำลึกได้มากที่สุด 7 เมตรตามความยาวของสายที่ควบคุมโดยใช้ จอยสติ๊ก และ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมความเร็วของใบพัด และ มีเซ็นเซอร์วัดความดันเพื่อ ป้อนกลับระดับความลึก โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เก็บไว้ในถังที่กั้นน้ำ 2 ถัง ทางด้านบนของหุ่น เพื่อ สร้างแรงลอยตัว ผลการทดสอบในสระน้ำ หุ่นยนต์ดำน้ำสามารถรักษาระดับความลึกในแนวตั้ง ได้ตาม คำสั่งโดยใช้การควบคุมแบบ พีไอดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ของระดับความลึก อยู่ที่ ± 5 เซนติเมตร เนื่องจากเซ็นเซอร์มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะกระแสน้ำ

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ดำน้ำ การควบคุมความลึก ระบบควบคุมแบบสไลด์คั้งโหมด
ระบบควบคุมแบบพีไอดี

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Automatic Depth Control of Remotely Operated Vehicle |
| Name-Surname | Mr. Thanapong Tongchote |
| Program | Mechanical Engineering |
| Thesis Advisor | Mr.Pradya Prempraneerach, Ph.D. |
| Academic Year | 2014 |

ABSTRACT

Proper control design of Remotely Operated Vehicle (ROV) is especially important for holding position in the field operation within uncertain environment from strong current. This research can be mainly divided into 2 parts: 1) controller design using the ROV dynamics simulation, 2) design and construction of ROV with 4 propellers.

The dynamics models of the VideoRayIII underwater robot are used for testing and comparing the depth control in the z-direction between Sliding Mode Control (SMC) and Proportional Integral Derivative control (PID). While ROV horizontal motion on x-y plane is controlled by PID control. Furthermore, parameters of both PID and SMC controllers are tuned so that an optimized performance is obtained. According to depth-control simulation, SMC controller yields fast response in the vertical motion without overshoot. On the other hand, the response in the vertical motion using PID controller becomes more oscillatory and drives steady-state error to zero.

Construction of 4-propeller ROV is composed of a pair of propellers aligning along the z-direction and the other pair of propellers, laying horizontally, all propellers can propel only in forward direction. ROV structure can dive upto 7-m depth because of a limitation of control-cable length. Using a microncontroller, propellers' speed can be manually controlled with a joystick and water depth is feedbacked with a pressure sensor. All electronics are contained inside 2 waterproof tanks, producing buoyancy force on top of ROV structure. Experiments in pond show that ROV can automatically maintain its vertical position according to depth command using PID controller with accuracy of $\pm 5\%$, since there exists pressure-sensor measurement noise, particularly from current.

Keywords: underwater robot, depth control, sliding mode control, PID control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ได้ เนื่องจากความกรุณาและความช่วยเหลือเป็นอย่างยิ่งจาก ดร .ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง รวมทั้งอุปการะที่ให้การประกอบการทำวิจัย ซึ่งผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร .พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร .มนุศักดิ์ จานทอง และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ดร .ประยามกุลวานิช ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปการะและเครื่องมือในการทำวิจัยพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยและมีกำลังใจทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ธนพงศ์ ทองโชติ

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | (3) |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | (4) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (5) |
| สารบัญ..... | (6) |
| สารบัญตาราง..... | (10) |
| สารบัญรูป..... | (11) |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... | (14) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 15 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย..... | 15 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 18 |
| 1.3 สมมุติฐานการวิจัย..... | 18 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย..... | 19 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 19 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 20 |
| 2.1 พลศาสตร์ของยานพาหนะใต้น้ำ..... | 21 |
| 2.2 เสถียรภาพของยานใต้น้ำ (Stability of Underwater Vehicles)..... | 23 |
| 2.2.1 เสถียรภาพแบบวงเปิด (Open-Loop Stability)..... | 23 |
| 2.2.2 การควบคุมแบบลููปปิด (Closed-Loop Tacking control)..... | 24 |
| 2.3 การออกแบบการควบคุมแบบฟีดแบ็ค..... | 25 |
| 2.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control; P)..... | 25 |
| 2.3.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control; I)..... | 26 |
| 2.3.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control; D)..... | 26 |
| 2.3.4 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (Proportional plus integral Control; PI)..... | 27 |
| 2.3.5 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus derivative Control; PD)..... | 28 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|----|
| 2.3.6 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ (Proportional plus integral plus derivative control; PID) | 30 |
| 2.3.7 การควบคุมแบบสไลด์ิง โมด (Sliding Mode Control) | 32 |
| 2.4 แรงลอยตัว (Buoyant force)..... | 34 |
| 2.5 ขั้นตอนการออกแบบ โครงสร้างยานดำน้ำ..... | 36 |
| 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)..... | 36 |
| 2.7 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR) | 38 |
| 2.7.1 การขับและกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)..... | 39 |
| 2.7.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง | 41 |
| 2.7.3 วิธีการมอดูเลชันทางความกว้างของพัลส์ (PWM)..... | 41 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 43 |
| 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย | 43 |
| 3.2 การออกแบบและสร้างหุ่นดำน้ำที่ใช้ในการทดลอง | 44 |
| 3.2.1 ออกแบบถังเก็บแก๊สแรงจลน์ | 44 |
| 3.2.2 โครงสร้างยานดำน้ำพร้อมแท่นจับยึดมอเตอร์ขับเคลื่อน | 45 |
| 3.3 เซนเซอร์ในการทดสอบค่า | 46 |
| 3.3.1 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) | 46 |
| 3.3.2 เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล (Digital Compass)..... | 47 |
| 3.3.3 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) | 47 |
| 3.3.4 รายละเอียดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560..... | 48 |
| 3.3.5 รายละเอียดมอเตอร์ขับเคลื่อน รุ่น Crust Crawler 400 HFS | 49 |
| 3.3.6 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ | 50 |
| 3.3.7 รายละเอียดของชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน | 51 |
| 3.4 ผลการคำนวณจากการออกแบบ | 52 |
| 3.4.1 ปริมาตรถังเก็บแก๊สแรงจลน์..... | 52 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 3.4.2 แรงลอยตัว..... | 53 |
| 3.4.3 น้ำหนักของโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้น้ำ | 54 |
| 3.4.4 วิธีคำนวณหาตำแหน่งถ่วงน้ำหนักเพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบแกน X | 54 |
| 3.4.5 วิธีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบแกน Y | 56 |
| 3.4.6 วิธีการคำนวณหาโมเมนต์ของมอเตอร์ในแนวตั้ง..... | 57 |
| 3.4.7 ความเร็วเคลื่อนที่ | 58 |
| บทที่ 4 การทดลอง..... | 59 |
| 4.1 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ | 59 |
| 4.1.1 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน | 60 |
| 4.1.2 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง | 61 |
| 4.2 จำลองระบบควบคุมความถี่แบบ PID | 62 |
| 4.3 จำลองระบบควบคุมระดับความถี่แบบ SMC | 63 |
| 4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมระดับความถี่แบบ PID กับแบบ SMC ในส่วนของเวลาที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์..... | 64 |
| 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ต่อผลการแปรปรวนของพารามิเตอร์ M_{33} และ Z_w และ Z_{ww} เป็นปริมาณ +20% และ +50% จากค่าประมาณ | 65 |
| 4.6 การเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแบบ PID กับการควบคุมแบบ SMC ในการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ | 66 |
| 4.7 การทดสอบและผลการทดสอบ | 68 |
| 4.7.1 ทดสอบการรบกวนของถังเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ | 69 |
| 4.7.2 การหล่อซิลิโคนสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนและการทดสอบการกันน้ำ..... | 69 |
| 4.7.3 ขั้นตอนการประกอบโครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ได้สร้างขึ้นตามการออกแบบ รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในกล่องกันน้ำ | 71 |
| 4.7.4 การควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ดำน้ำด้วยจอยสติ๊ก | 73 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.7.5 การทดสอบควบคุม ชุด ไลพ์ซั่มมอเตอร์ขับเคลื่อน | 73 |
| 4.7.6 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน | 74 |
| 4.7.7 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล | 76 |
| 4.7.8 ทดสอบหาจุดหมุนที่อยู่ระหว่างใบพัดของหุ่นยนต์ดำน้ำในแนวตั้ง | 76 |
| 4.8 การออกแบบระบบควบคุม PID และการทดสอบการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้งของ หุ่นยนต์ดำน้ำ | 78 |
| 4.8.1 ออกแบบระบบควบคุม PID สำหรับ Motor ในแนวแกน Z | 78 |
| 4.8.2 การทดสอบการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้งของหุ่นยนต์ดำน้ำ | 79 |
| บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง | 80 |
| 5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลจำลองระบบควบคุม | 80 |
| 5.2 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง | 81 |
| 5.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา | 83 |
| บรรณานุกรม | 84 |
| ภาคผนวก | 86 |
| ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ | 104 |

สารบัญตาราง

| | หน้าที่ |
|--|---------|
| ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน..... | 43 |
| ตารางที่ 3.2 น้ำหนักชิ้นส่วนต่างๆของหุ่น | 54 |
| ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของหุ่นยนต์ VideoRayIII..... | 61 |
| ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่สร้างขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เปรียบเทียบกับคำสั่ง (POS) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino | 74 |
| ตารางที่ 4.3 แสดงค่าวัดความดันกับตัวถังที่อ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino | 75 |
| ตารางที่ 4.4 ตารางทดสอบการทำงานเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลอ่านค่าโดย Microcontroller | 76 |
| ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการถ่วงน้ำหนักในแนวแกน x | 77 |



สารบัญรูป

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 1.1 VideoRayIII | 16 |
| รูปที่ 1.2 Remotely Operated Vehicle with Depth Control[2] | 16 |
| รูปที่ 1.3 หุ่นดำน้ำควบคุมระยะไกล[5]..... | 17 |
| รูปที่ 1.4 ยานใต้น้ำอัตโนมัติ [6]..... | 18 |
| รูปที่ 2.1 ระบบพิกัด | 20 |
| รูปที่ 2.2 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอ | 28 |
| รูปที่ 2.3 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย | 28 |
| รูปที่ 2.4 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีดี | 29 |
| รูปที่ 2.5 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีดี เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย..... | 29 |
| รูปที่ 2.6 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอดี | 31 |
| รูปที่ 2.7 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย | 31 |
| รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบสไลดิงโหมด | 32 |
| รูปที่ 2.9 หลักการสองวิธีที่นำไปหาแรงลอยตัวของวัตถุจม [6]..... | 35 |
| รูปที่ 2.10 ความสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของวัตถุที่ลอยปริ่มผิวน้ำ | 35 |
| รูปที่ 2.11 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่าย | 37 |
| รูปที่ 2.12 การออกแบบคอนโทรลเลอร์..... | 38 |
| รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทั่วไปของมอเตอร์กระแสตรง | 39 |
| รูปที่ 2.14 แสดงการกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์ 2 ตัว | 40 |
| รูปที่ 2.15 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน | 40 |
| รูปที่ 2.16 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรถับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์ กระแสตรง [7] | 41 |
| รูปที่ 2.17 แสดงความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าตัวชี้ไขเคลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่ | 42 |
| รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์ดำน้ำ..... | 44 |
| รูปที่ 3.2 ถังเก็บแผงวงจรควบคุม | 45 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.3 โครงสร้างยานดำน้ำ | 45 |
| รูปที่ 3.4 เซนเซอร์วัดความดัน | 46 |
| รูปที่ 3.5 เข็มทิศแบบดิจิตอล (Digital Compass) [9]..... | 47 |
| รูปที่ 3.6 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) [9] | 48 |
| รูปที่ 3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 [10] | 49 |
| รูปที่ 3.8 มอเตอร์ขับเคลื่อน [12]..... | 50 |
| รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงการต่อวงจรควบคุมภายในถังเก็บแก๊ส | 50 |
| รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงการต่อวงจรควบคุมภายนอกถังเก็บแก๊ส | 51 |
| รูปที่ 3.11 ชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน | 51 |
| รูปที่ 3.12 การต่อวงจรของชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน | 52 |
| รูปที่ 3.13 ขนาดถังเก็บแก๊สควบคุม..... | 52 |
| รูปที่ 3.14 แสดงวิธีแบ่งส่วนคำนวณหาปริมาตรถัง | 53 |
| รูปที่ 3.15 แสดงแนวทางของแรงที่กระทำในแนวแกน X..... | 55 |
| รูปที่ 3.16 แสดงแนวทางของแรงที่กระทำในแนวแกน Y..... | 56 |
| รูปที่ 3.17 แสดงความสมดุลของแนวทางของแรงที่กระทำในแนวตั้ง | 57 |
| รูปที่ 4.1 การตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay[1] | 59 |
| รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย k_i , k_p และ k_d | 63 |
| รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย K , λ และ k_d | 63 |
| รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบเวลาที่ทำให้ค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์สำหรับระบบควบคุมแบบ PID และแบบ SMC | 64 |
| รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อระดับความลึกนั้นถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน เช่น กระแสน้ำ | 65 |
| รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID และ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33} , Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ | 66 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33}, Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ | 66 |
| รูปที่ 4.8 ความเร็วในแนวแกน x (u), ความเร็วเชิงมุม (r) และการเคลื่อนที่ในแนวแกน z(w) จากการควบคุมแบบ PID และ SMC | 67 |
| รูปที่ 4.9 แรงในแกน x โมเมนต์รอบแกน z(N) และแรงในแกน z จากการควบคุมแบบ PID และ SMC | 67 |
| รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติ เมื่อใช้ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID และ SMC | 68 |
| รูปที่ 4.11 การทดสอบการรั่วซึม | 69 |
| รูปที่ 4.12 ชุดอุปกรณ์สำหรับหล่ออย่างซิลิโคน | 70 |
| รูปที่ 4.13 แสดงขั้นตอนการผสมกาว | 70 |
| รูปที่ 4.14 มอเตอร์หล่ออย่างซิลิโคน | 71 |
| รูปที่ 4.15 การประกอบโครงสร้างของหุ่นยนต์ดำน้ำ (ซ้าย) การประกอบชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนและถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ขวา) | 71 |
| รูปที่ 4.16 การประกอบโครงสร้างกับเข้ากับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน (ซ้าย) และ การประกอบถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับหุ่นยนต์ดำน้ำ (ขวา) | 72 |
| รูปที่ 4.17 หุ่นยนต์ดำน้ำที่ได้ประกอบเสร็จแล้ว พร้อมใช้ในการทดสอบ | 72 |
| รูปที่ 4.18 แผนภาพการบังคับมอเตอร์ขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ดำน้ำด้วยจอยสติ๊ก | 73 |
| รูปที่ 4.19 กราฟการทดสอบเพื่อหาค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ความดัน | 75 |
| รูปที่ 4.20 ตำแหน่งวางน้ำหนักซ้ายและขวาวิธีการสังเกตหุ่นยนต์ดำน้ำในแนวตั้ง | 77 |
| รูปที่ 4.21 แสดงระยะห่างจากจุด O ถึงจุด B ที่ส่วนหัวและส่วนท้ายอยู่ในระนาบ | 78 |
| รูปที่ 4.22 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) สำหรับควบคุมการหมุนของ 2 ใบพัดในแนวตั้ง หรือ ในแนวแกน Z | 78 |
| รูปที่ 4.23 การแสดงข้อมูลสัญญาณแบบอนาล็อกที่ป้อนกลับค่าจากเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) ที่อ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ | 79 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

เรือดำน้ำ เป็นเรือที่ใช้ในสงคราม สร้างจากเหล็กแต่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ภายใต้ผิวน้ำ เรือดำน้ำถูกนำมาใช้ในการสงครามและการค้นคว้าสำรวจใต้ทะเลลึกในบริเวณที่มนุษย์เราไม่สามารถดำลงไปได้ด้วยการสวมเพียงชุดดำน้ำ ด้วยคุณสมบัติที่พิเศษเหนือกว่ายานพาหนะชนิดอื่นคือ มันสามารถที่จะอยู่ใต้ทั้งบนผิวน้ำและใต้น้ำ นับตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1620 ที่เรือดำน้ำลำแรกถูกสร้างขึ้นมา ขณะนั้นเรือดำน้ำสามารถจมน้ำได้เพียง 12 คน ดำน้ำได้ลึกเพียง 4.5 เมตร และเคลื่อนที่ใต้น้ำได้เพียง 8 กิโลเมตรก่อนที่จะต้องขึ้นสู่ผิวน้ำ ปัจจุบันเรือดำน้ำสามารถจมน้ำได้ถึง 150 คน สามารถอยู่ใต้น้ำได้นานนับเดือน ด้วยขนาดที่ใหญ่โตจนสามารถจมน้ำได้มากกว่าขนาดนี้ เรือดำน้ำมีวิธีการอย่างไรที่จะทำให้ตัวมันดำลงใต้น้ำได้และกลับขึ้นสู่ผิวน้ำได้อีก เรือดำน้ำถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถอยู่ในน้ำลึกได้ด้วยตัวลำเรือที่ถูกออกแบบให้มีผนังสองชั้น เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ลูกเรือสามารถอยู่ในเรือได้อย่างปกติ แม้จะอยู่ในระดับความลึกมากเพียงใดก็ตาม และสามารถอยู่ใต้นานจนกว่าอากาศและอาหารจะไม่เพียงพอ

ปัจจุบันเรือดำน้ำถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เราสร้างเรือดำน้ำขนาดที่เล็กสามารถดำน้ำในระดับที่ลึกมาก เพื่อทำงานเฉพาะกิจบางอย่าง เช่น การสำรวจซากเรือโบราณ, การวางสายเคเบิลใต้น้ำ, การหาร่องรอยของแผ่นดินไหว และการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตใต้ทะเล ซึ่งทำให้มนุษย์เราสามารถจะเข้าถึงโลกใต้ทะเลที่เราไม่เคยสัมผัสมาก่อน

รูปที่ 1.1 คือหุ่นยนต์ใต้น้ำ VideoRay III [1] ที่ถูกวิจัยและพัฒนาได้นำวิธีการควบคุมแยกกันอิสระในแต่ละแนวแกนเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมมาใช้กับหุ่นยนต์ ซึ่งสามารถติดตั้งเซนเซอร์ได้หลากหลายงาน เช่น เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำ หรือเซนเซอร์คลื่นเสียง



รูปที่ 1.1 VideoRayIII

นายสุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์[2] ออกแบบหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยสี่ใบพัดและควบคุมบังคับทิศทางโดยใช้อุปกรณ์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ (จอยสติ๊ก) แบบมีสาย ในขณะที่หุ่นยนต์จะถูกควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมกับเซนเซอร์วัดความดัน วัดความเร็ว และวัดมุมเอียง นอกจากนี้ตัวหุ่นยนต์ยังมีกล้องวิดีโอติดอยู่ ทำให้สามารถส่งภาพขึ้นมาที่จอมอนิเตอร์เพื่อให้ผู้ควบคุมที่อยู่บนบกทราบถึงตำแหน่ง ทั้งนี้หุ่นยนต์ดำน้ำสามารถใช้ทำการสำรวจได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม มีการพัฒนาความสามารถในการควบคุมระดับความลึกคงที่ ได้ในระดับความลึกที่ 10 เมตร



รูปที่ 1.2 Remotely Operated Vehicle with Depth Control[2]

Zhaodong Tang[3] จำลองการควบคุมความลึกของหุ่นAUV ด้วยวิธีการ Optimal Integral Sliding Mode Controller (ISMC) แสดงให้เห็นว่า การควบคุมแบบ ISMC ตอบสนองได้ไวและมีเปอร์เซ็นต์ของการ overshoot น้อยกว่า PID ในการควบคุมความลึก แต่การควบคุมแบบ PID จะสามารถควบคุมองศาการก้ม-เงย(pitch angle)ได้ดีกว่า Heping LIU [4] ออกแบบจำลองการหันเหของหุ่นยนต์โดยใช้การควบคุมแบบ SMC โดยออกแบบหุ่นยนต์ที่มีสองใบพัดใช้สำหรับควบคุมระดับความลึกอีกสองใบพัดใช้ผลักดันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและสองอีกใบพัดใช้ควบคุมการหันเหซ้ายขวา โดยทำการทดสอบในสระว่ายน้ำ ซึ่งผลการทดลองระบบควบคุมแบบ SMC สามารถใช้ได้กับการทดลองนี้

ภักพงศ จันทเปรมจิตต์[5]ได้นำเสนอวิธีการการควบคุมมีประสิทธิภาพสำหรับหุ่นดำน้ำแบบAUVที่ใช้ระบบควบคุมแบบสไลด์มอดที่ให้การควบคุมที่ถูกต้องและมีความผิดพลาดน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะคงที่(Steady state) นอกจากนั้น ภักพงศ จันทเปรมจิตต์[5]ได้ออกแบบและพัฒนาหุ่นดำน้ำควบคุมระยะไกลด้วยระบบขับเคลื่อน 4 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 1.3 ผู้ควบคุมจะใช้จอยสติ๊กกำหนดการเคลื่อนที่ได้ 3 รูปแบบ คือ เคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวตั้ง เดินหน้า-ถอยหลัง หันซ้าย-หันขวา โดยมีชุดคอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมและรับข้อมูลจากเซนเซอร์คือ เซนเซอร์วัดความดัน ไอเอ็มยู และเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งมีกล้องวิดีโอที่สามารถรับภาพใต้น้ำส่งมายังผู้ใช้งานเพื่อเก็บข้อมูลได้ มีระบบแสงสว่างสำหรับงานในที่มืด น้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม



รูปที่ 1.3 หุ่นดำน้ำควบคุมระยะไกล[5]

ขุนจิตและเปรมปราณีรัชต์ [6] ได้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานดำน้ำที่แสดงในรูปที่ 1.4 โดยใช้เทคนิค Least - Square ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติของยานดำน้ำ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของมวลที่เพิ่มจากน้ำ และค่าความหน่วงได้ใช้แรงดูดคงที่ที่กระทำในทิศทางเคลื่อนที่ของยานทางด้านหน้า ด้านข้าง และขึ้นลงในแต่ละแกนสมมาตร



รูปที่ 1.4 ยานดำน้ำอัตโนมัติ [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำโดยควบคุมความเร็ว ความลึก ศึกษาพฤติกรรมทางพลวัตแบบไม่เชิงเส้นของของหุ่นยนต์ใต้น้ำ

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำ ที่ขับเคลื่อนด้วย 4 ใบพัด

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 แรงลอยตัวกับน้ำหนักของหุ่นยนต์จะต้องสมดุลกันเสมอซึ่งจะทำให้หุ่นอยู่ในจุดสมดุลที่มีมุม roll(ϕ ,p) และ pitch(θ ,q)มีค่าเท่ากับศูนย์

1.3.2 ระบบควบคุมตำแหน่งแบบพีไอดี (PID) และแบบสไลด์ดิ้งโหมด (SMC) สามารถควบคุมได้โดยนำข้อมูลจากคำสั่งและเซนเซอร์มาป้อนกลับนำค่ามาสั่งตัวควบคุมเพื่อให้มอเตอร์

ทำงานตามตำแหน่งที่ต้องการ แต่ต้องอาศัยเวลาในการทดลองปรับจูนค่าอัตราขยาย (gain) เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการควบคุมความลึก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและสร้างยานดำน้ำที่มี 4 ใบพัด ที่มีใบพัดสองตัวในแนวตั้ง และ ใบพัดอีกสองใบอยู่ในแนวราบ ที่สามารถดำน้ำลึกมากที่สุด 10 เมตร

1.4.2 จำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองหุ่นยนต์ใต้น้ำด้วยสมการทางพลศาสตร์ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID) และแบบสไลด์คิงโหมค (SMC)

1.4.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำจะไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที

1.4.4 ควบคุมการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้งของหุ่นยนต์ใต้น้ำโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID) ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยป้อนกลับความลึกด้วยเซนเซอร์วัดความดัน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวราบนั้นควบคุมผ่านจอยสติ๊ก

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ใช้ในการศึกษาที่เกี่ยวกับเรื่องการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น

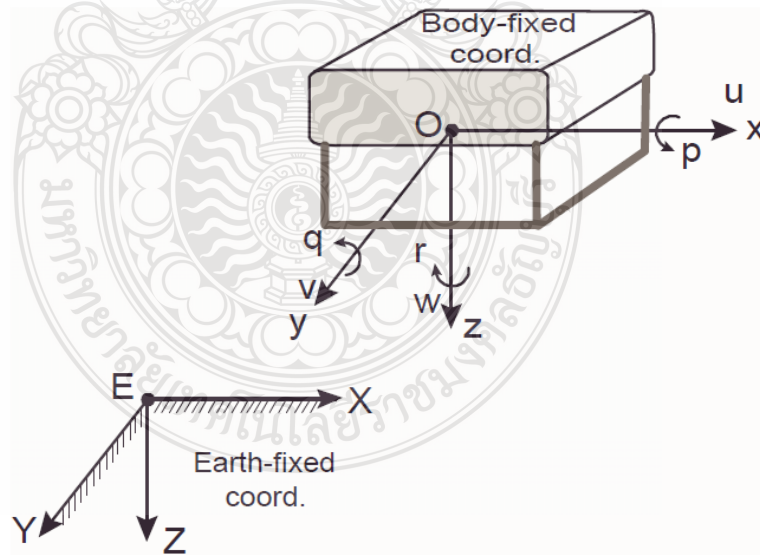
1.5.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาทางด้านการสำรวจใต้น้ำ

1.5.3 ได้ใช้ความรู้ในการออกแบบอุปกรณ์กันน้ำ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล (Remotely Operated underwater Vehicle : ROV) ที่ถูกนำมาใช้ในการทำงานใต้น้ำเพื่อใช้ในการสำรวจและเก็บข้อมูลของสิ่งมีชีวิตและทรัพยากรใต้ทะเล ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลในการศึกษานี้ถูกจัดอยู่ในรูปแบบสมการ 6 องศาอิสระ (6 degrees of freedom) การพิจารณาการเคลื่อนที่ของ ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล ถูกอ้างอิงจากสองระบบ พิกัด คือ ระบบพิกัดที่ติดกับแกนโลก (Earth-fixed) และระบบพิกัดที่ติดบนตัวยานเอง (Body-fixed) ซึ่งในระบบนี้อาจกล่าวได้ว่าจุดกำเนิด (Origin) เป็นจุดสังเกตซึ่งอาจไม่อยู่จุดเดียวกับจุด ศูนย์กลางมวล (CG) ก็ได้ตามรูปที่ 2.1 ทั้งสองระบบ พิกัดนี้สามารถแปลงจากระบบหนึ่งไป ยังอีกระบบหนึ่งได้ (Coordinate Transformation) ในการควบคุมยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล แบบมีสายควบคุม สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านระบบแกนอ้างอิงบนตัว ยานใต้น้ำ คือการสร้างแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับตัวยานใต้น้ำ แต่ในการควบคุม ต้องทราบตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ที่ถูกอ้างอิง กับแกนโลก (Earth-fixed) จึงจะสามารถออกแบบกฎการควบคุมได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัด

2.1 พลศาสตร์ของยานพาหนะใต้น้ำ

สมการแบบไดนามิก ของการเคลื่อน ที่ของยานพาหนะใต้น้ำได้รับการเสนอโดยหลาย ผู้เขียนในการศึกษานี้เราจะพิจารณารูปแบบหกอองศา อิสระเชิงจาก Fossen และ Sagatun[7] ได้ตั้งใน สมการที่(2.1)

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2.1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.2)$$

เมื่อ

$v = [u, v, w, p, q, r]^T$ คือเวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุม เมื่อเทียบกับระบบพิกัดที่ ติดกับแกนอ้างอิงของตัวยานใต้น้ำ(body-fixed reference frame)

$\eta = [X, Y, Z, \varphi, \theta, \psi]^T$ คือหมายถึงตำแหน่งและเวก เทอร์เมื่อเทียบกับระบบพิกัดที่ติด กับแกน โลก (earth-fixed reference frame)

τ คือช่วงเวลาดา(body-fixed reference frame)

$J(\eta)$ คือการแปลงองศาออยเลอร์(Euler angle transformation denoted)

M คือเมทริกซ์ความเฉื่อยรวมทั้งมวลที่เพิ่มจากน้ำ(M_A)

$C(v)$ คือเมทริกซ์ของการหมุนแบบไม่เชิง(Coriolis)

$D(v)$ คือเมทริกซ์ความหน่วง(Damping matrix)

$g(\eta)$ เป็นเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วง

และช่วงของคุณสมบัติต่อไปนี้อ้างอิงจากระบบพิกัดที่ติดกับตัวยานใต้น้ำ(Body-fixed reference frame)

$$M = M_{RB} + M_A > 0 \quad (2.3)$$

$$M = M^T > 0 \text{ ในกรณีที่ความเร็วเป็นศูนย์หรือน้อยมาก} \quad (2.4)$$

$$C(v) = -C^T(v) \quad (2.5)$$

นอกจากนี้สมการของการเคลื่อน ที่ของยานใต้น้ำสามารถแสดง ให้อยู่ในพิกัดที่ติดกับแกน โลก (earth-fixed reference frame) และการเปลี่ยนแปลง ทางจลนศาสตร์ (โดยสมมติว่า $J(\eta)$ เป็น เมทริกซ์แบบไม่เป็นเอกพจน์)

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.6)$$

$$v = J^{-1}(\eta) \dot{\eta} \quad (2.7)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)\dot{v} + \dot{J}(\eta)v \quad (2.8)$$

$$\dot{v} = J^{-1}(\eta)[\dot{\eta} - \dot{J}(\eta)J^{-1}(\eta)\dot{\eta}] \quad (2.9)$$

เพื่อจัด \dot{v} และ v จาก สมการที่ 2.1

$$M_\eta(\eta) = J^{-T}(\eta)MJ^{-1}(\eta) \quad (2.10)$$

$$C_\eta(v, \eta) = J^{-T}(\eta)[C(v) - MJ^{-1}(\eta)\dot{J}(\eta)]J^{-1}(\eta) \quad (2.11)$$

$$D_\eta(v, \eta) = J^{-T}(\eta)DJ^{-1}(\eta) \quad (2.12)$$

$$g_\eta(\eta) = J^{-T}(\eta)g(\eta) \quad (2.13)$$

$$\tau_\eta = J^{-T}(\eta)\tau \quad (2.14)$$

เมื่อได้ทำการแปลงจากสมการที่ 2.1 จะได้

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta \quad (2.15)$$

$M_\eta(\eta)$ คือเมทริกซ์ความเฉื่อยรวมทั้งความเฉื่อยที่เพิ่มจากอุทกพลศาสตร์ที่เป็นบวกและมีความสมมาตร

$C_\eta(v, \eta)$ คือเมทริกซ์ของการหมุนแบบไม่เชิงเส้นที่ (Coriolis) ที่สัมพันธ์กับความเฉื่อยที่เพิ่มขึ้น

$D_\eta(v, \eta)$ คือเมทริกซ์ของความหน่วง (Damping)

โดยมีเงื่อนไขความสัมพันธ์แบบสมมาตรเอียง

$$x^T [\dot{M}_\eta(\eta) - 2C_\eta(v, \eta)] x = 0 \quad (2.16)$$

$$M_\eta(\eta) = M_\eta^T(\eta) > 0 \quad (2.17)$$

$$D_\eta(v, \eta) > 0 \quad (2.18)$$

2.2 เสถียรภาพของยานใต้น้ำ (Stability of Underwater Vehicles)

เสถียรภาพของยานใต้น้ำ คือความสามารถในการที่จะ ควบคุมการเคลื่อนไหว ของ ยานพาหนะให้อยู่ในสถานะที่สมดุล ถึงแม้จะมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่นแรงผลัดจาก กระแสน้ำ

2.2.1 เสถียรภาพแบบวงเปิด (Open-Loop Stability) [7]

การวิเคราะห์เสถียรภาพ แบบวงเปิดเป็นการพิจารณา ความมั่นคงของ ยานพาหนะ ใต้น้ำที่จะขึ้นอยู่กับอนุพันธ์อุทกพลศาสตร์ ในการ ใช้วิธีจำลองแบบเชิงเส้นเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างง่ายที่ รู้จักกันดี โดยวิเคราะห์จาก Routh และ Hurwitz แต่ในส่วนนี้แสดงวิธีการ วิเคราะห์บนพื้นฐานของ ลีอาปูนอฟ (Lyapunov) โดยตรงวิธีนี้จะสามารถนำมาใช้ กับในกรณีที่ระบบเป็นแบบ ไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับยานพาหนะ ใต้น้ำ ฟังก์ชันของลีอาปูนอฟ (Lyapunov) หรือ V จะสามารถเลือกที่จะเป็น ตัวแทนของพลังงานกลของระบบ ในที่นี้ได้เลือกที่ฟังก์ชันลีอาปูนอฟ (Lyapunov) เป็น

$$V(\eta, \dot{\eta}) = \frac{1}{2} \dot{\eta}^T M_\eta(\eta) \dot{\eta} + \int_0^\eta g_\eta^T(z) dz \quad (2.19)$$

เมื่อจุดสมดุลของพลังงานที่ $\eta = 0$ และ $\dot{\eta} = 0$, V จะแปรผันไปตามเวลา (สมมติให้ $M_\eta = M_\eta^T > 0$) จะได้ว่า

$$\dot{V} = \dot{\eta}^T [M_\eta(\eta) \ddot{\eta} + g_\eta(\eta)] + \frac{1}{2} \dot{\eta}^T \dot{M}_\eta \dot{\eta} \quad (2.20)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\dot{V} = \dot{\eta}^T [M_\eta(\eta) \ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta) \dot{\eta} + g_\eta(\eta)] + \frac{1}{2} \dot{\eta}^T [\dot{M}_\eta - 2C_\eta(v, \eta)] \dot{\eta} \quad (2.21)$$

และใช้คุณสมบัติของเมทริกซ์ที่สมมาตรรอบแนวแกนทะแยงมุม (Skew-symmetric) คือ $\dot{\eta}^T (M_\eta - 2C_\eta) \dot{\eta} = 0 \forall \dot{\eta}$ จะได้ว่า

$$\dot{V} = \dot{\eta}^T [M_\eta(\eta) \ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta) \dot{\eta} + g_\eta(\eta)] \quad (2.22)$$

เมื่อระบบควบคุม เป็นแบบคงที่ การวิเคราะห์เสถียรภาพ ทางพลศาสตร์ของการ ควบคุมจะสามารถตัดทิ้งไปได้ และจะได้

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(v, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = 0 \quad (2.23)$$

และท้ายสุดฟังก์ชันลึอาปูนอฟ V จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$\dot{V} = \dot{\eta}^T D_\eta \dot{\eta} = -v^T Dv \quad (2.24)$$

ทฤษฎีที่ 2.2 การควบคุมที่จะทำให้มีเสถียรภาพแบบคงที่ (Control - Fixed Stability)

1) $V > 0$ สำหรับทุก $\eta, \dot{\eta} \in \mathbb{R}^N$ แต่ $\eta \neq 0$ และ $\dot{\eta} \neq 0$ ดังนั้น

$$\dot{\eta}^T M_\eta(\eta) \dot{\eta} = v^T Mv > 0 \quad v \neq 0 \quad (2.25)$$

ถ้าในกรณีเมทริกซ์ความเฉื่อย $M > 0$ (2.26)

เมื่อ $J^{-1}(\eta)$ คือนิยามสำหรับ $\eta \in \mathbb{R}^N$ ในขณะที่ $J(\eta)$ ไม่ได้กำหนดสำหรับ $\theta = \pm 90^\circ$

2) $V < 0$ สำหรับทุก $\eta, \dot{\eta} \in \mathbb{R}^N$ ในกรณีที่เมทริกซ์ความหน่วง (Damping matrix.)

$$D(v) > 0 \text{ เมื่อ } \forall v \in \mathbb{R}^N \quad (2.27)$$

3) $V \rightarrow \infty$ ในขณะที่ $\|\eta\| \rightarrow \infty$ และ $\|\dot{\eta}\| \rightarrow \infty$ ใช้สำหรับสมการที่ (2.19)

กรณีที่ 1 สำหรับยานดำน้ำเราจะสมมุติให้มวล ของยานเป็นค่าคงที่ (ไม่คิดความถี่ของคลื่น $M_A = 0$) และ $M = M^T > 0$

กรณีที่ 2 ระบบต้องมีความสามารถในการ ป้องกันการรบกวนจากภายนอกที่เข้ามากระทำ

2.2.2 การควบคุมที่ติดตามการเคลื่อนที่แบบลูปปิด (Closed-Loop Tracking control) [7]

สมมุติให้การควบคุม แบบเชิงเส้น ของความเร็วเชิงมุม ที่มีค่าผิดพลาดที่มีนิยามเป็น $\tilde{v}(t) = v(t) - v_d(t)$ เมื่อ $v_d(t)$ คือเวกเตอร์ของตัวแปรสถานะของความเร็วที่ต้องการ (Desired state vector) สำหรับการออกแบบยานพาหนะใต้น้ำตลอดจนระบบเครื่องกล สามารถ ใช้นิยามฟังก์ชันลึอาปูนอฟ (Lyapunov) ที่เป็นพลังงานจลน์

$$V(\vec{v}, t) = \frac{1}{2} \vec{v}^T M \dot{\vec{v}} \quad (2.28)$$

ซึ่งสามารถตีความได้แบบเสมือนกับพลังงานจลน์ (Pseudo-kinetic) (สมมติ $M = M^T$ และ $M_A = 0$)

$$V = \vec{v}^T M \dot{\vec{v}} \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.1) แทนลงใน V จะได้

$$\dot{V} = \dot{\vec{v}}^T [\tau - M\dot{v}_d - C(v)v_d - D(v)v_d + g(\eta) - \vec{v}^T D(v)\dot{\vec{v}}] \quad (2.30)$$

ใช้คุณสมบัติของเมทริกซ์ที่สมมาตรรอบแกนทะแยงมุม Skew - symmetric $\vec{v}^T C(v)\dot{\vec{v}} = 0 \quad \forall \vec{v} \in \mathbb{R}^N$

$$v = M\dot{v}_d - C(v)v_d - D(v)v_d + g(\eta) - K_d \vec{v} \quad (2.31)$$

เมื่อ K_d คือ เมทริกซ์อัตราขยายที่ใช้ในการควบคุมแบบเป็นบวก (Positive regulator gain matrix) เมื่อแทนใน (2.30) จะได้

$$\dot{V} = -\vec{v}^T [D(v) + K_d] \vec{v} \leq 0 \quad (2.32)$$

เมื่อ $\dot{V} \leq 0$ ได้ว่า $V(t) \leq V(0) \quad \forall t \geq 0$ ดังนั้นระบบจะมีเสถียรภาพ

2.3 การออกแบบการควบคุมแบบพีไอดี

ในส่วนนี้จะเริ่มต้นด้วย อธิบายการออกแบบการควบคุมแบบ พีไอดี (PID) และแบบสไลด์ ดิง โหมด (SMC) ระบบการควบคุมประเภท PID (สัดส่วน,อนุพันธ์และอินทิกรัล) ซึ่งสามารถเขียนเป็นตัวควบคุมแต่ละแบบได้ดังนี้

1. การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control)
2. การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)
3. การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)
4. การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (Proportional plus integral Control)
5. การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus derivative Control)
6. การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ (Proportional plus integral plus derivative Control)

2.3.1 การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control; P)

การควบคุมแบบสัดส่วน จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณออกของตัวควบคุม (Controller Output; $u(t)$) และค่าสัญญาณความผิดพลาดของระบบต่อค่าอ้างอิง (Actuating Error Signal; $e(t)$) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.33)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.33)$$

(2.34) ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบสัดส่วนได้จากการแปลงลาปลาซของสมการที่

$$\frac{u(s)}{E(s)} = K_p \quad (2.34)$$

ค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมแบบพี จะแปรผันตามค่าสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้น ข้อเสียของการควบคุมแบบสัดส่วนคือ ไม่สามารถกำจัดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady-State Error หรือ e_{ss}) ที่เกิดขึ้น หลังจากการเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมาย หรือ เมื่อได้รับสัญญาณรบกวนจาก โหลด

2.3.2 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control; I)

การควบคุมแบบอินทิกรัลจะให้ความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมเป็นสัดส่วนกับสัญญาณความผิดพลาด ดังสมการที่ (2.35) และ (2.36)

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2.35)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.36)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบอินทิกรัล เป็นไปตามสมการที่ (2.37)

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.37)$$

ถ้าความผิดพลาดมีค่าเป็นสองเท่าค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและถ้าความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ ค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมจะมีค่าคงที่ ทำให้การควบคุมแบบนี้ช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady-State Error) บางครั้งการทำงานของ การควบคุมแบบอินทิกรัล เรียกว่า การควบคุมแบบทำใหม่ (Reset Control)

2.3.3 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control; D)

ค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ จะเป็นสัดส่วนของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.38)

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.38)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบอนุพันธ์ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.39)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (2.39)$$

การควบคุมแบบอนุพันธ์ มีส่วนการควบคุมที่ทำให้ค่าพุ่งเกิน (Overshoot) มีขนาดลดลงเนื่องจากการควบคุมแบบนี้พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

2.3.4 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล (Proportional plus integral Control; PI)

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัล หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า การควบคุมแบบพีไอ จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกจากตัวควบคุม $u(t)$ และสัญญาณค่าความผิดพลาดที่ใช้ขับเคลื่อน $e(t)$ ดังสมการที่ (2.40)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.40)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบพีไอ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.41)

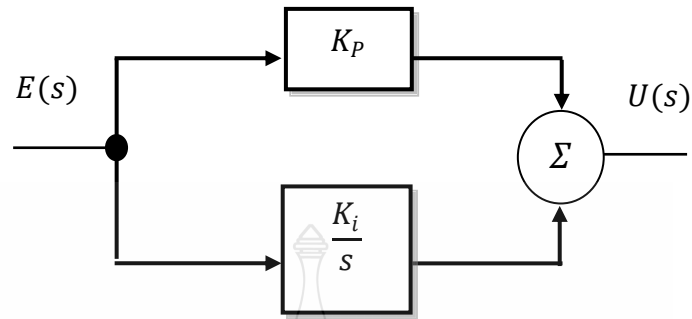
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.41)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน และ K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล นอกจากนี้ ยังอาจจะแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.42)

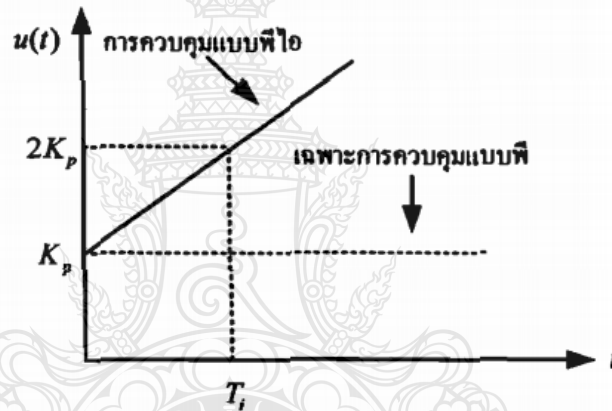
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{K_p (1 + T_i s)}{T_i s} \quad (2.42)$$

โดยที่ T_i เป็นเวลาอินทิกรัล (Integral time) ซึ่งมีค่า $T_i = K_p / K_i$ จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอ มีโพล (Pole) อยู่ที่จุดกำเนิด และมีซีโร (Zero) ที่ตำแหน่ง $s = -1/T_i$ การปรับค่า T_i จะเป็นการปรับแต่งเฉพาะในส่วนของการควบคุมแบบอินทิกรัล ในขณะที่การปรับค่า K_p จะส่งผลต่อการควบคุมทั้งสองส่วน สำหรับแผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.2

ถ้าหากสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน $e(t)$ เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอ จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 2.3 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอ เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย

2.3.5 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (Proportional plus derivative Control; PD)

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า การควบคุมแบบพีดี จะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกจากตัวควบคุม $u(t)$ และสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน $e(t)$ ดังสมการที่ (2.43)

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.43)$$

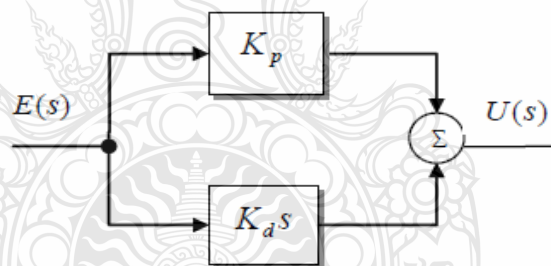
ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบพีดี มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.44)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (2.44)$$

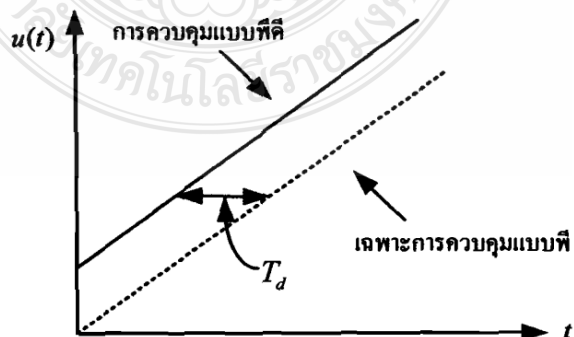
โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative gain) นอกจากนี้ยังอาจจะแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.45)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s = K_p (1 + T_d s) \quad (2.45)$$

โดยที่ T_d เป็นเวลาอนุพันธ์ (Derivative time) ซึ่งมีค่า $T_d = K_d/K_p$ จะเห็นว่าตัวควบคุมแบบพีดีมีซีโร (Zero) ที่ตำแหน่ง $s = -\frac{1}{T_d} = -K_p/K_d$ และไม่มีโพล (Pole) สำหรับแผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีดี จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.4 ถ้าหากสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีดีจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งจะเห็นว่าส่วนอนุพันธ์ของตัวควบคุมสามารถทำหน้าที่คาดการณ์ล่วงหน้าถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อนได้



รูปที่ 2.4 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีดี



รูปที่ 2.5 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีดี เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย

การควบคุมแบบพีดี จะปรับปรุงผลตอบสนองชั่วคราวของระบบ จึงเหมาะสำหรับระบบที่มี การล่าช้าทางเวลาค่อนข้างมาก ทำให้การควบคุมถึงจุดที่ต้องการรวดเร็วขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติในการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน แต่มีข้อเสียคือ มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมาก จึงไม่ควรใช้กับระบบที่มีสัญญาณรบกวนสูง และยังสามารถทำให้ตัวขับเคลื่อนเกิด การอ้อมตัวขึ้นได้อีกด้วย

2.3.6 การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ (Proportional plus integral plus derivative Control; PID)

การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอินทิกรัลและอนุพันธ์ หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า การควบคุมพีไอดี (PID Control) เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน แบบอินทิกรัล และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกันจะมีความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณออกจากตัวควบคุม $u(t)$ และสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน $e(t)$ ดังสมการที่ (2.46)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.46)$$

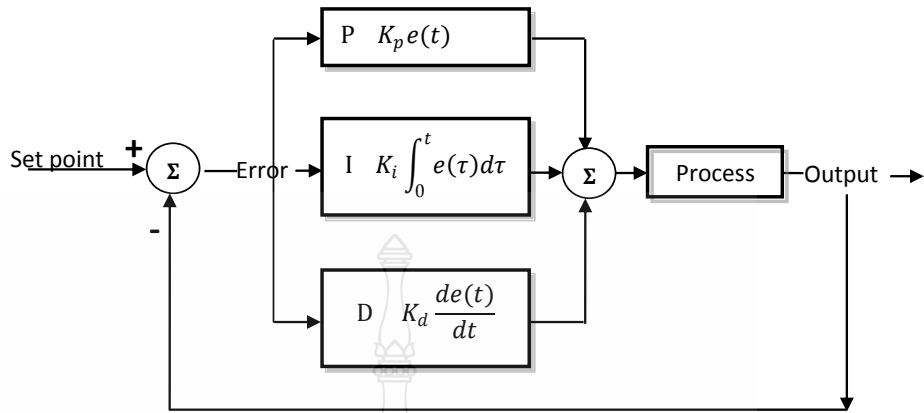
ฟังก์ชันถ่ายโอนของการควบคุมแบบพีไอดี มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.47)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (2.47)$$

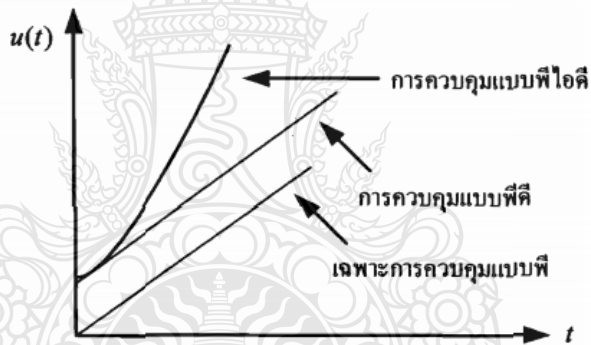
โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative gain) และสังเกตได้ว่า การควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มซีโร (Zero) จำนวน 2 ตัวและ โพล (Pole) อีกจำนวน 1 ตัวที่จุดกำเนิด และเพิ่มอันดับของระบบขึ้นอีก 1 อันดับ โดยองค์ประกอบ $\frac{1}{s}$ นอกจากนี้ยังอาจจะแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนในอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังสมการที่ (2.48)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.48)$$

โดยที่ T_i เป็นเวลาเชิงอินทิกรัล และ T_d เป็นเวลาเชิงอนุพันธ์ สำหรับแผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอดี มีลักษณะดังรูปที่ 2.6 ถ้าหากสัญญาณผิดพลาดขับเคลื่อน $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอดี จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมแบบพีไอดี



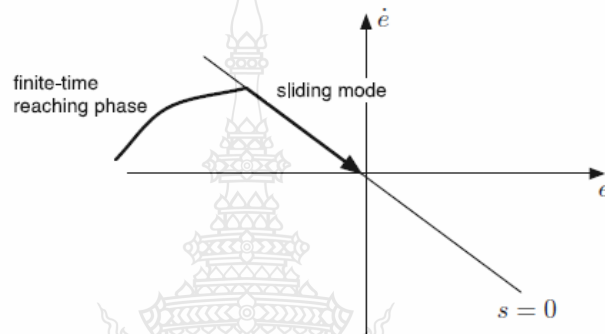
รูปที่ 2.7 สัญญาณออกจากตัวควบคุมแบบพีไอดี เมื่อ $e(t)$ เป็นฟังก์ชันลาดเอียงหนึ่งหน่วย

การควบคุมแบบพีไอดี สัญญาณออกจากตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับผลรวมของการควบคุมแบบพีไอดี โดยพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากระบบต่อค่าอ้างอิง เมื่อเกิดค่าความผิดพลาด ส่วนการควบคุมแบบอนุพันธ์จะทำหน้าที่แก้ไขค่าความผิดพลาด โดยพิจารณาความชันของกาเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในส่วนของการควบคุมแบบสัดส่วน จะทำหน้าที่รักษาระดับค่าสัญญาณออกของตัวควบคุมจนกระทั่งค่าความผิดพลาดหมดไป จากนั้นการควบคุมแบบอินทิกรัลจะลดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว โดยใช้ผลรวมของค่าความผิดพลาดทำให้ค่าความผิดพลาดลดลงอย่างต่อเนื่องสำหรับระบบที่มีการตอบสนองที่รวดเร็วกับการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณออกจากตัว

ควบคุม จะทำให้การควบคุมแบบอินทิกรัลไม่ส่งผลต่อการควบคุม เนื่องจากค่าความผิดพลาดจะถูกกำจัดในช่วงเวลาอันรวดเร็วด้วยการควบคุมแบบอนุพันธ์

2.3.7 การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding Mode Control)

หลักการของวิธีการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (Sliding Mode Control หรือ SMC) คือ การควบคุมตัวแปรสถานะของค่าผิดพลาดให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ้ง (Sliding Plane) เมื่อตัวแปรสถานะเข้าสู่ระนาบสไลด์ดิ้ง และควบคุมให้เคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลด์ดิ้งในทิศทางการเข้าสู่ศูนย์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบสไลด์ดิ้งโหมด

สมการของระบบอันดับสองในรูปทั่วไป 2nd-Order

$$m\ddot{\eta} + d_1\dot{\eta} + d_2\eta|\dot{\eta}| = \tau \quad (2.49)$$

เมื่อ m , d_1 และ d_2 คือ พารามิเตอร์ (Parameter) ที่ไม่รู้ค่าที่แน่นอน

ในการออกแบบกฎการควบคุม (Control Law) [3] จะใช้ฟังก์ชันลียาปูนอฟ (Lyapunov Function) (V) เงื่อนไขดังนี้

- 1) ถ้า $V > 0$ เสมอ ระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ
- 2) ถ้า $\dot{V} \leq 0$ เสมอ ระบบจะมีเสถียรภาพ

ถ้าพิจารณา Lyapunov Function ให้

$$V = \frac{1}{2}m\dot{s}^2 \quad (2.50)$$

กำหนดให้ $V = \frac{1}{2}m\dot{s}^2 > 0$ เสมอแล้วหาอนุพันธ์จะได้

$$\dot{V} = ms\dot{s} \quad (2.51)$$

สมการทั่วไปของความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ตามตัวแปร อ้างอิงที่กำหนดให้ (Tracking Error, e) เป็น

$$e = \eta - \eta_d \quad (2.52)$$

$$\text{ดังนั้นเมื่อหาค่าอนุพันธ์จะได้} \quad \dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d \quad (2.53)$$

$$\text{และกำหนดให้} \quad \dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d - \lambda e \quad (2.54)$$

เมื่อ λ คือค่าคงที่ค่าบวกของความลาดเอียง (slope) ของพื้นผิวสวิตช์ (Switching surface)

และให้นิยามผลรวมของความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ตามตัวแปร อ้างอิง (s) ที่กำหนดให้เป็น

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (2.55)$$

จัดรูปแบบของสมการ(2.51)ใหม่จะได้

$$\dot{V} = -d_2|\dot{\eta}|s + [\tau - m\dot{\eta}_r - d_1\dot{\eta} - d_2|\dot{\eta}|\dot{\eta}_r] \quad (2.56)$$

ซึ่งจะทำให้ \dot{V} เป็นค่าติดลบ (negative) ก็ต่อเมื่อสมการของกฎการควบคุม (Control Law) นั้นมีค่าเป็น

$$\tau = \hat{m}\dot{\eta}_r + \hat{d}_1\dot{\eta} + \hat{d}_2|\dot{\eta}|\dot{\eta}_r - K_d s - K_s \text{sgn}(s) \quad (2.57)$$

เมื่อ $K_d =$ สัมประสิทธิ์ของอัตราขยายของความหน่วง (Damping coefficient) ($K_d > 0$)

$K =$ อัตราขยายของการสวิตช์ (switching gain)

$\hat{m} =$ ค่าประมาณของมวล m

$\hat{d}_1 =$ ค่าประมาณของค่าความหน่วงเชิงเส้น d_1

$\hat{d}_2 =$ ค่าประมาณของค่าความหน่วงแบบไม่เชิงเส้น d_2

$$\text{และ } \text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{สำหรับเงื่อนไขอื่น} \end{cases}$$

2.4 แรงลอยตัว (Buoyant force)

หลักการของแรงดันอุทกสถิตบนผิวโค้งสามารถนำมาใช้คำนวณแรงดันสุทธิบนวัตถุจมหรือวัตถุลอยในของเหลวได้ ซึ่งเป็นกฎของการลอยตัวที่ค้นพบโดยอาร์คิมิดีส (Archimedes) คือ

- 1) วัตถุที่จมในของเหลว แรงลอยตัวแนวตั้งจะเท่ากับน้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่
- 2) วัตถุที่ลอยจะเข้าแทนที่ของเหลวจะมีแรงลอยตัวเท่ากับน้ำหนักของวัตถุเองในของเหลวที่วัตถุลอยอยู่

แรงลอยตัวจะเป็นแรง ในแนวตั้ง กระทำบน ส่วนแรงลอยตัวใน แนวตั้งของวัตถุที่ขึ้นกับแรงดันอุทกสถิตจะได้เป็น

$$F_B = \int_{\text{body}} (p_2 - p_1) dA_H = -\gamma \int (z_2 - z_1) dA_H = (\gamma)(\text{ปริมาตรของวัตถุ}) \quad (2.58)$$

สมการที่ 2.58 กำหนดว่าของไหลที่มีน้ำหนักจำเพาะคงตัวแนวการกระทำของแรงลอยตัวจะผ่านจุดศูนย์กลางปริมาตรของวัตถุที่เข้าไปแทนที่ ซึ่งไม่จำเป็นต้องจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ก็ได้ จุดที่แรงลอยตัว (Buoyant force หรือ F_B) กระทำเรียกว่าจุดศูนย์กลางการลอยตัว (Center of buoyant) ซึ่งกำหนดให้เป็นจุด B ปกติจุด B อาจจะตรงหรือไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ ก็ได้ ซึ่งแรงลอยตัวจะมีการแปรผันกับความหนาแน่นของเหลว

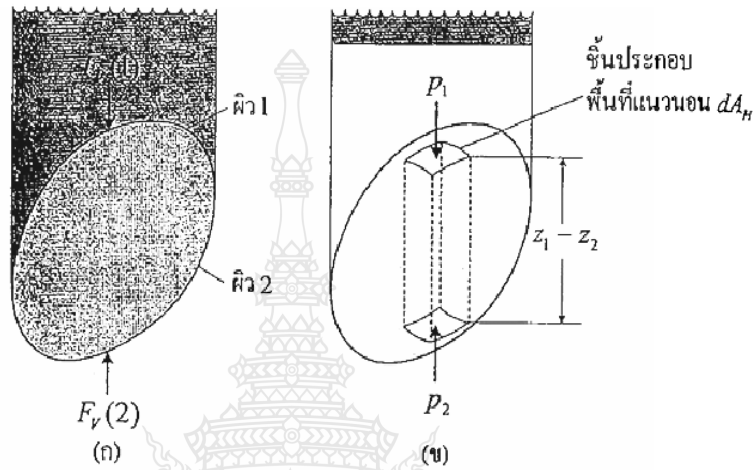
สมการที่ 2.59 สามารถประยุกต์ใช้กับชั้นของไหลโดยรวมน้ำหนักของแต่ละชั้นความหนาแน่น ρ_i ที่เข้าแทนที่ด้วยวัตถุในส่วนที่จม จะได้แรงลอยตัวรวม

$$(F_B)_{LF} = \sum \rho_i g (\text{Displace volume})_i \quad (2.59)$$

แต่ละชั้นของเหลวที่ด้วยวัตถุถูกแทนที่จะมีศูนย์กลางแรงลอยตัวในชั้นปริมาตรนั้น และมีการรวมแรง และ โมเมนต์ของแรงลอยตัวที่เพิ่มขึ้น หาก จุดศูนย์กลางของการลอยตัวของวัตถุ อีกกรณีหนึ่งคือวัตถุจมเพียงบางส่วน โดยที่จะมีส่วน นที่ไหลพ้นจากผิว น้ำอิสระดังแสดงในรูปที่ 2.9 เมื่อส่วนที่แรงก็คือปริมาตรที่เข้าแทนที่ในของเหลวสมการ (2.60) สามารถนำมาใช้กับปริมาตรส่วนนี้จะได้

$$F_B = (\gamma) (\text{ปริมาตรที่ถูกแทนที่}) = \text{น้ำหนักของวัตถุที่ลอยในของเหลว} \quad (2.60)$$

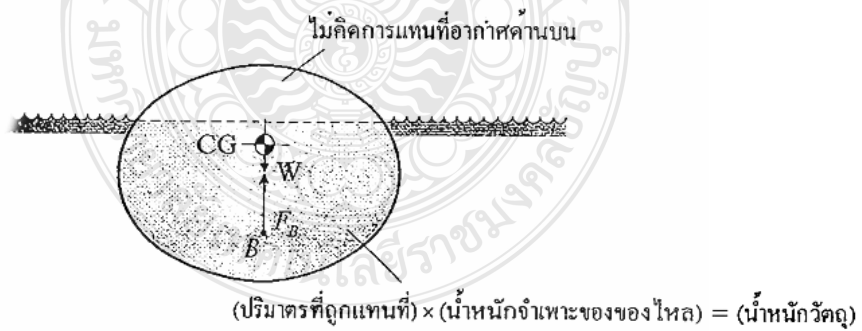
ไม่เพียงแต่แรงลอยตัวจะเท่ากับน้ำหนักวัตถุ แต่แรงลอยตัวยังอยู่ในแนวเส้นตรง (Collinear) เดียวกันกับน้ำหนัก เนื่องจากไม่เกิดโมเมนต์สุทธิในสมดุลทางอุทกศาสตร์ในแนวตั้ง



รูปที่ 2.9 หลักการสองวิธีที่นำไปหาแรงลอยตัวของวัตถุจม [6]

(ก) แรงบนผิวโค้งบนและล่าง

(ข) การรวมแรงดันในแนวตั้งของชั้นประกอบ



รูปที่ 2.10 ความสมดุลทางสถิตยศาสตร์ของวัตถุที่ลอยปริ่มผิวน้ำ

2.5 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างยานดำน้ำ

การออกแบบหุ่นยนต์พื้นฐานสามารถให้นิยามได้เป็น วิทยาศาสตร์หรือการศึกษา เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ โครงสร้าง ทฤษฎี และการประยุกต์ของหุ่นยนต์ โดยมี ส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

2.5.1 การออกแบบตัวหุ่น

- วางแผนการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ ในการทำหุ่นยนต์
- วางแผนการออกแบบ โครงสร้าง การขับเคลื่อนของระบบ โครงสร้างว่าเป็นแบบใด และมีกลไกการทำงานอะไรบ้าง

2.5.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

- ต้องทราบของลักษณะการทำงานของหุ่นว่าจะต้องมี การควบคุมแบบใด ถ้าหากควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ จะต้องมีการเขียนโปรแกรม ให้หุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานได้ตามเงื่อนไขและข้อจำกัดที่กำหนด

2.5.3 การเลือกเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง

- เครื่องมือในการสร้าง ที่เหมาะสมกับชิ้นงาน
- ขนาดและชนิดของ วัสดุ อุปกรณ์ มอเตอร์ วงจร

2.5.4 ส่วนประกอบทางอิเล็กทรอนิกส์

- หลักการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
- การออกแบบวงจรไฟฟ้า

2.5.5 ส่วนประกอบทางเครื่องจักรกล

- โครงสร้างต้องสามารถรับน้ำหนักและแรงที่มากกระทำในขณะที่เคลื่อนที่

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานตามเงื่อนไขต่างๆ ตามที่เราเขียนหรือตั้งโปรแกรมไว้ โดยที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เองสามารถเชื่อมต่อ อุปกรณ์ภายนอกได้ทันที(แล้วแต่รุ่นและคุณสมบัติของรุ่น นั้นๆ) เราจึงสามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้ในงานการควบคุมต่างๆ มากมาย เช่น การควบคุมมอเตอร์ การควบคุมหลอดไฟ หรือการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เป็นต้น แต่หลายคนคงเคยได้ยินว่า ไมโครโปรเซสเซอร์ หรือ โปรเซสเซอร์มาแล้ว แต่ไมโครโปรเซสเซอร์โดยทั่วไปจะทำหน้าที่ ประมวลผล และทำงานเร็วมาก แต่ไม่เหมาะนำมาทำงานในลักษณะการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หลายตัวพร้อมๆกัน ได้(สามารถ

ทำได้แต่ต้องใช้อุปกรณ์รอบข้างเสริมมากเนื่องจากข้อจำกัดในการประมวลผล ดังนั้นในงานควบคุมขนาดเล็กเรานิยมใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาใช้งานมากกว่าด้วยสาเหตุไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายรุ่นหลายขนาดที่มีประสิทธิภาพต่างกันไป ให้เลือกใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็กและราคาถูก ไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบันสามารถเขียนโปรแกรมได้หลายภาษาเช่น C เป็นต้น ทำให้เรียนรู้ได้เร็ว มีเครื่องมือสนับสนุนในการทำงานมากมาย ปัจจุบันมีหนังสือให้ความรู้ทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์มากมายทั้งภาษาไทย และต่างประเทศมีใช้ในการสอนตั้งแต่ระดับ ปวช . ปวส. และปริญญาตรี



รูปที่ 2.11 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างง่าย

2.6.1 ส่วนประกอบภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

ภายในตัวของไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เองจะ โครงสร้างต่างๆ ดังนี้

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

2.6.2 การเรียนรู้การใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

การใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นเราไม่อาจจะนำตัวไอซีชนิดนี้ไปใช้งานเดี่ยวๆ ได้ แต่จะมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกต่อร่วมด้วยเสมอ ดังนั้นการที่จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดีนั้นจำเป็นต้องมีพื้นฐาน ของการใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเช่นกัน นอกจากความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แล้วยังต้องมีความเข้าใจลักษณะสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นๆ รวมทั้งการมีเครื่องมือในการทดลองและทดสอบการเขียน โปรแกรมภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ปัจจุบัน มีตัวคอมไพเลอร์ภาษาต่างๆ ให้เลือกใช้ เช่นภาษาแอสเซมบลี ภาษา C ภาษาเบสิก เป็นต้น ส่วนจะเลือกใช้ภาษาไหนก็แล้วแต่ตามใจชอบ ภาษาแอสเซมบลี เป็นภาษาที่มีความสามารถสูง แต่ใช้เวลาศึกษานาน เป็นภาษาแรกๆ ในการใช้งานสมัยก่อนหน้านี้ ภาษาเบสิก เป็นภาษาที่เขียนได้ง่าย ใช้ เวลาเรียนรู้ได้เร็ว ภาษา C เช่นเดียวกับ ภาษาเบสิก คือ เขียนง่าย มีความสามารถใกล้เคียงกับ แอสเซมบลี เรียนรู้ได้เร็ว เนื่องจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายตระกูล และหลาย รุ่นแต่ละรุ่นก็มีความสามารถแตกต่างกันไปดังนั้น หากต้องการศึกษาเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่นใด สามารถศึกษาได้จาก Datasheet ก่อนนำมาประยุกต์ใช้งาน

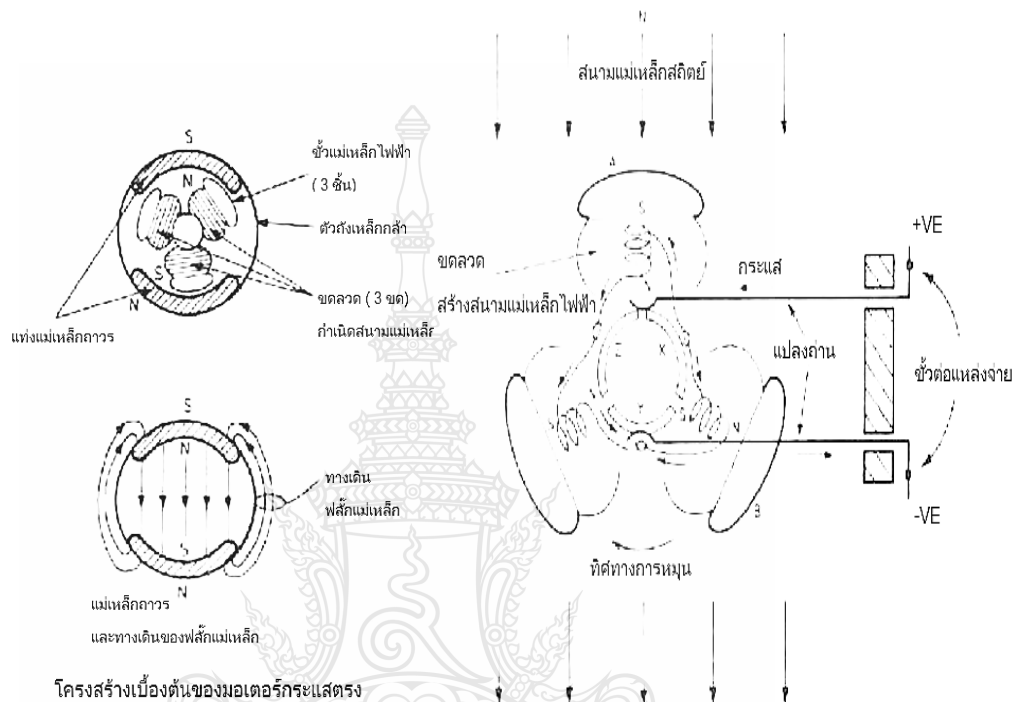


รูปที่ 2.12 การออกแบบคอนโทรลเลอร์

2.7 มอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)

มอเตอร์กระแสตรงจะมีหลักการทำงานโดยวิธีการผ่านกระแสให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดแรงแม่เหล็ก โดยส่วนของแรงนี้จะขึ้นอยู่กับกระแสและกำลังของสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.13 ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กจะเกิดจากแท่งแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ 2 ชิ้นที่ขึ้นภาพเป็นแบบโค้งยึดติดกับตัวถังได้พอดี เพื่อที่จะให้เส้นแรงแม่เหล็กวิ่งเข้าสู่ใจกลางของมอเตอร์ได้ ดังนั้นความเข้มของแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับขนาดความหนาของแม่เหล็กด้วย ซึ่งส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กวิ่งไปบนตัวถังโลหะ กระแสไฟฟ้าในขดลวดที่พันกับทุ่นโรเตอร์ ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และต้านกับสนามแม่เหล็กถาวร จึงเกิดเป็นแรงบิดเพื่อที่จะหมุนทุ่นโรเตอร์

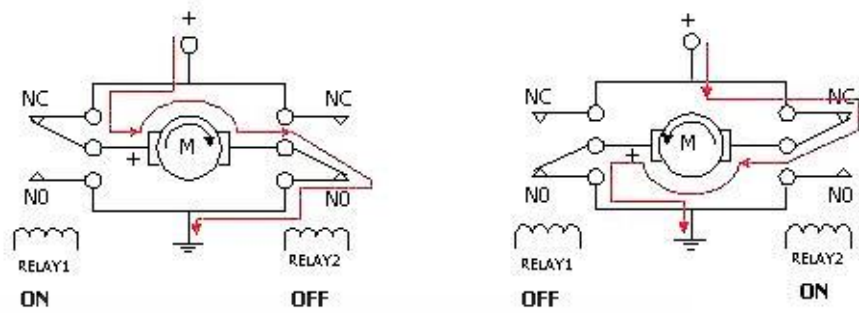
ให้ไปในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็กที่มีแรงมากกว่า กระแสก็จะไหลผ่านไปยังท่อนโรเตอร์ โดยผ่านแปรงถ่าน ซึ่งจะสัมผัสกับแหวนตัวนำในท่อนโรเตอร์ และแหวน คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 เซกเมนต์เพื่อที่จะทำหน้าที่นำกระแสเข้าขดลวดนั่นเอง



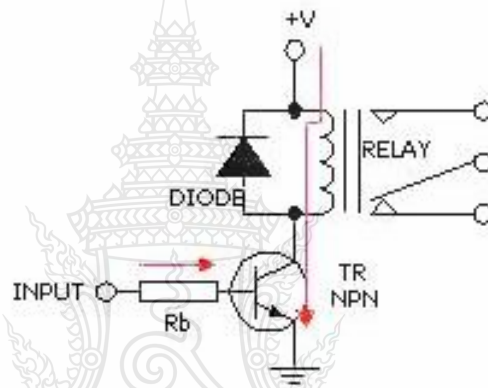
รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างทั่วไปของมอเตอร์กระแสตรง

2.7.1 การขับและกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง (DC MOTOR)

ในการใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการหมุน และทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงนั้น เราจะต้องมีส่วนของวงจร ที่เรียกว่าวงจรขับมอเตอร์ (Driver) ในส่วนของวงจรกลับทิศทางของมอเตอร์นั้น สามารถที่จะใช้รีเลย์ต่อวงจร สวิตช์เพื่อกลับทิศทางของขั้วไฟกระแสตรง หรืออาจใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นวงจรขับกำลังเช่น ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต แล้วแต่วิธีที่เราจะเลือกใช้งานจากรูปที่ 2.14 เป็นการใช้รีเลย์ควบคุมการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยการควบคุมการปิด - เปิดที่รีเลย์ 2 ตัว ซึ่งจะทำหน้าที่กลับทิศทางของขั้วไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ โดยการสลับการทำงานของรีเลย์ เช่นให้รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน (ON) และรีเลย์ตัวที่ 2 หยุดทำงาน (OFF) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางซ้าย และในทำนองเดียวกันถ้าหากรีเลย์ตัวที่ 1 หยุดทำงาน (OFF) และรีเลย์ตัวที่ 2 ทำงาน (ON) ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา

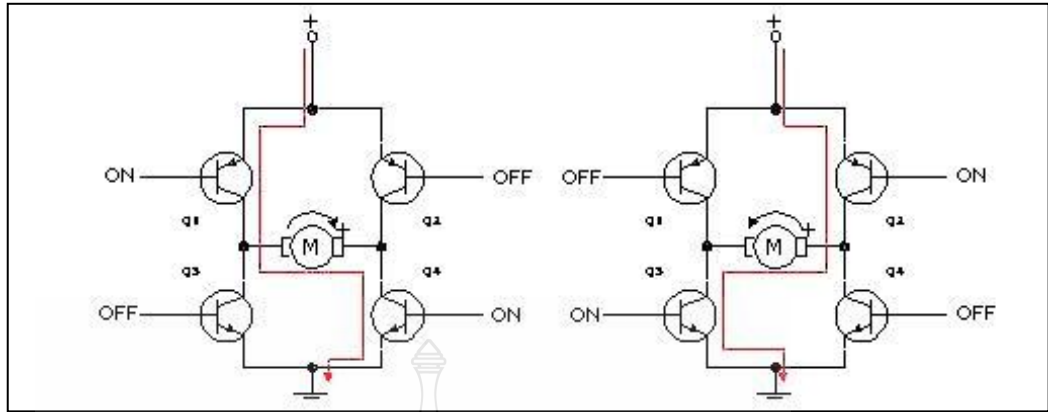


รูปที่ 2.14 แสดงการกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์ 2 ตัว



รูปที่ 2.15 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน

จากภาพเป็นวงจรขับรีเลย์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแส ด้วยเหตุผล เพราะไม่สามารถจะใช้ขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนกระแสไฟที่ขดลวดของรีเลย์ โดยตรงได้ เนื่องจากว่ากระแสที่จ่ายออกมาจากขา เอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราจึงต้องมี ส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อที่จะทำการขยายกระแสให้เพียงพอในการป้อน ให้กับขดลวดของรีเลย์ ส่วนไดโอดนำมาต่อไว้สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ ของสนามแม่เหล็กในขณะที่เกิดการลดขนาดลง ซึ่งอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้



รูปที่ 2.16 แสดงการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรถับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์
กระแสตรง [7]

จากภาพเป็นวงจรถับกระแสตรงซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 4 ตัวที่ทำหน้าที่ขับ และควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ถ้าหากกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q4 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์จากซ้ายไปขวา โดยผ่านมอเตอร์ กระแสตรงทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา ในทำนองเดียวกันถ้าหากเราทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าก็จะไหลจากทางขวาไปซ้ายซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์กลับทิศทางหมุนจากทางขวาไปซ้าย

2.7.2 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง

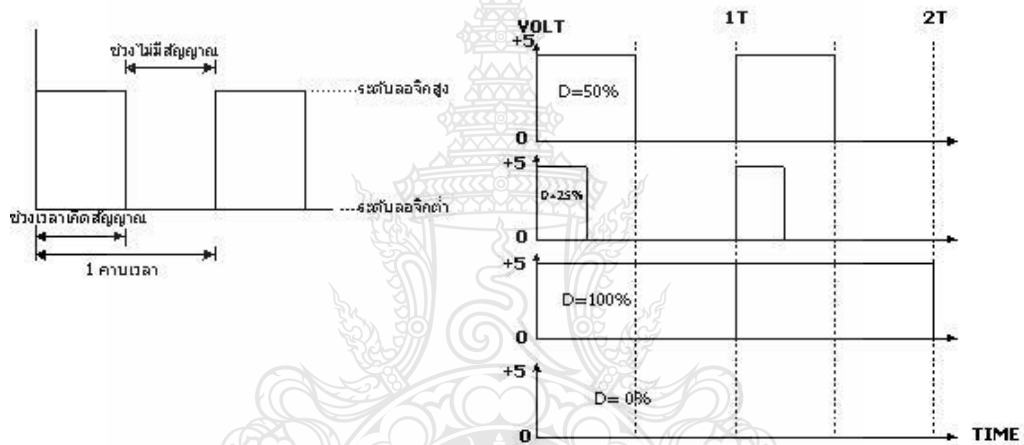
การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งอาจจะใช้วิธีการควบคุมแบบพื้นฐานทั่วไปเช่นการควบคุมด้วยวิธีการใช้ตัวต้านทานปรับค่าโดยต่ออนุกรมกับมอเตอร์ หรือใช้วิธีการการควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าของระดับแรงดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์ แต่การควบคุมในวิธีดังกล่าวถึงแม้ว่าจะควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ได้ แต่ที่ความเร็วต่ำจะส่งผลให้แรงบิดต่ำไปด้วย ดังนั้นเราจึงเลือกใช้วิธีการควบคุมโดยการจ่ายกระแสไฟให้กับมอเตอร์เป็นช่วงๆ โดยอาศัยกระแสไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์ให้เป็นค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วง ซึ่งเราเรียกว่าวิธีการของการมอดูเลชั่นทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation)

2.7.3 วิธีการมอดูเลชั่นทางความกว้างของพัลส์ (PWM)

การมอดูเลชั่นทางความกว้างของพัลส์ PWM (Pulse Width Modulation) จะเป็นการปรับเปลี่ยนที่สัดส่วน และความกว้างของสัญญาณพัลส์ โดย ความถี่ของสัญญาณพัลส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่าของคิวตี้ไซเคิล (Duty cycle) นั้นเอง ซึ่งค่าของคิวตี้ไซเคิล

คือช่วงความกว้างของพัลส์ที่มีสถานะลอจิกสูง โดยคิดสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์จากความกว้างของพัลส์ทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น ถ้าหากค่าดีวีดีไซเคิลมีค่าเท่ากับเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ก็หมายถึงใน 1 คาบสัญญาณ พัลส์จะมีช่วงของสัญญาณที่เป็นสถานะลอจิกสูงอยู่ครึ่งหนึ่ง และสถานะลอจิกต่ำอยู่อีกครึ่งหนึ่ง ดังรูปที่ 2.17 และในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดีวีดีไซเคิลมีค่ามาก หมายความว่าความกว้างของพัลส์ที่เป็นสถานะลอจิกสูงจะมีความกว้างมากขึ้น หากค่าดีวีดีไซเคิลมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ก็หมายความว่า จะไม่มีสถานะลอจิกต่ำเลย ซึ่งค่าดีวีดีไซเคิลสามารถ จะหาได้จากค่าความสัมพันธ์ดังนี้

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



รูปที่ 2.17 แสดงความกว้างของพัลส์ขนาดต่างๆ และค่าดีวีดีไซเคิลของช่วงพัลส์ที่มีความถี่คงที่

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

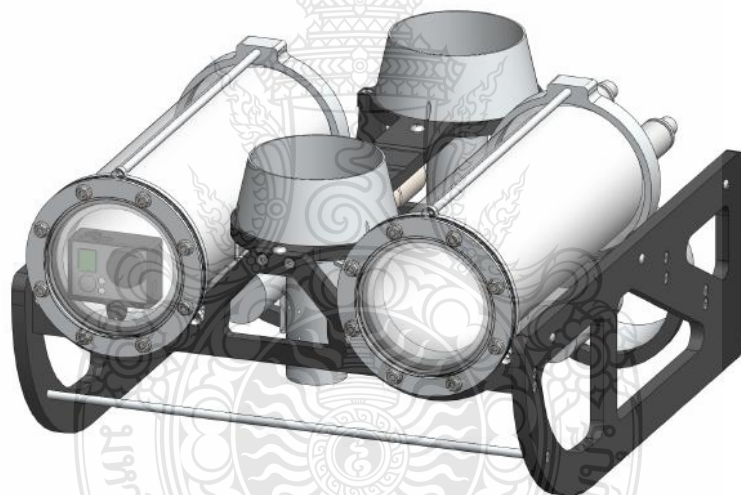
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

| กิจกรรม | 2556 | | 2557 | | | | | 2558 |
|--|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|
| | ก.ค | ต.ค | ม.ค | เม.ย | ส.ค | ก.ค | ต.ค | ม.ค |
| | ก.ย | ธ.ค | มี.ค | มิ.ย | มิ.ย | ก.ย | ธ.ค | มี.ค |
| 1.ศึกษาและหาข้อมูลทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ | | | | | | | | |
| 2.ศึกษาโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการออกแบบและจำลองระบบควบคุม | | | | | | | | |
| 3.ออกแบบตัวยานดำน้ำควบคุมระยะไกล ด้วยโปรแกรม Solid Works | | | | | | | | |
| 4.ออกแบบและสร้างถังอะคริลิกถึงกันน้ำเก็บอุปกรณ์ควบคุมในตัวยานดำน้ำ | | | | | | | | |
| 5.สร้างยานดำน้ำตามแบบ | | | | | | | | |
| 6. เรียนรู้และออกแบบโปรแกรม Arduino ควบคุมยานดำน้ำด้วยจอยสติ๊ก และ ระบบควบคุมรักษาระดับความลึก สำหรับให้เคลื่อนที่ | | | | | | | | |
| 7.วิเคราะห์และแก้ปัญหา | | | | | | | | |
| 8.สรุปและจัดพิมพ์รายงาน | | | | | | | | |

3.2 การออกแบบและสร้างหุ่นดำน้ำที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษาทฤษฎีทางกลศาสตร์ของไหลแล้ว จึงได้ดำเนินการออกแบบยานดำน้ำขนาดเล็กให้ระบบทั้งหมดสามารถขนย้ายได้ง่ายและสะดวก โดยการออกแบบได้ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Works และมีเกณฑ์การออกแบบรายละเอียดในการออกแบบ คือ

- ในการเคลื่อนที่ของยานดำน้ำจะต้องประสบกับผลกระทบจากแรงต้านของน้ำน้อยที่สุด
- ยานดำน้ำต้องมีเสถียรภาพในการลอยตัวเพื่อให้การควบคุมจากผู้บังคับสามารถควบคุมได้ง่าย
- ยานดำน้ำต้องมีระบบกันน้ำที่ดีเพื่อไม่ให้น้ำรั่วซึมเข้าไปในแผงควบคุมได้ และในรายละเอียดในการออกแบบยานดำน้ำควบคุมระยะไกล ได้มีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 3 ส่วนหลัก คือ ถังเก็บแผงวงจรควบคุม โครงสร้างยานดำน้ำพร้อมแท่นจับยึดมอเตอร์ขับเคลื่อนทั้ง 4 มอเตอร์ ดังต่อไปนี้

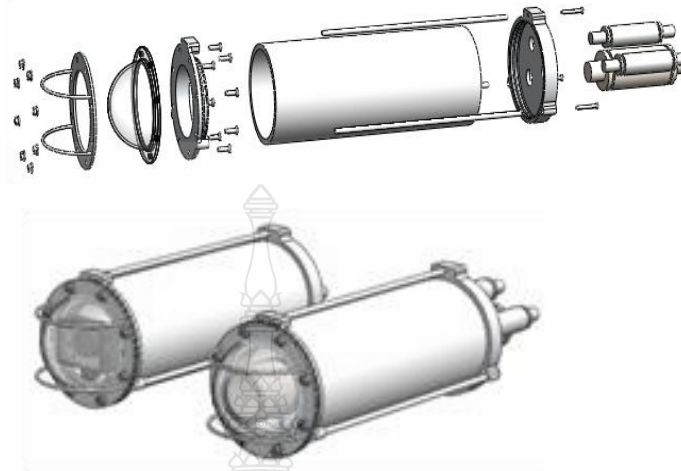


รูปที่ 3.1 หุ่นยนต์ดำน้ำ

3.2.1 ออกแบบถังเก็บแผงวงจรควบคุม

ถังแรกใช้เก็บแผงวงจรควบคุม ทางขวามือในรูปที่ 3.3 ถังที่สองใช้สำหรับใส่กล้องทางซ้ายมือในรูปที่ 3.3 โดยที่ถังทั้งสองชนิดนี้ทำจากอะคริลิก (Acrylic) ใสทรงกระบอกกลางซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนจากสารเคมี มีรัศมี 0.11 เมตร และหนา 0.005 เมตร ชั้นวางทำจาก Acrylic ออกแบบให้มีขนาดเล็กพอดีกับบอร์ดวงจรควบคุม ทำการจัดวางบอร์ดต่างๆในการควบคุมเอาไว้ด้วยกัน ฟลอะลูมิเนียมสำหรับปิดถังด้านหลัง ถูออกแบบให้มีช่องใส่ O-ring จำนวน 2 ช่องเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำรั่วซึมเข้าไปภายในถัง ส่วนฟลอะลูมิเนียมปิดถังด้านหน้า ถูออกแบบให้มีช่องใส่ O-

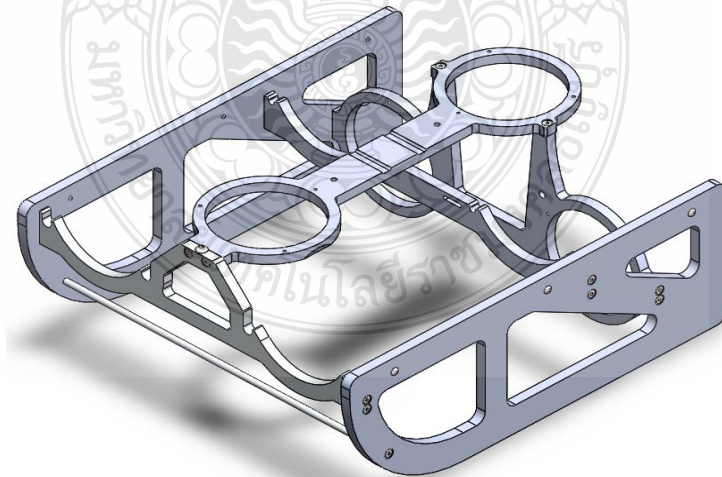
ring จำนวน 2 ช่อง เช่นกันแต่มี โดทพลาสติกใสที่ที่แผ่นยางประกบกันน้ำร่วมซึมทางด้านหน้าด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ถังเก็บแผงวงจรควบคุม

3.2.2 โครงสร้างยานดำน้ำพร้อมแท่นจับยึดมอเตอร์ขับเคลื่อน

โครงสร้างยานดำน้ำทำจาก Delrin ซึ่งมีความแข็งแรง มีความยืดหยุ่นในตัว ทนทานต่อการเสียดสี โครงสร้างเพื่อความแข็งแรงออกแบบให้มีความหนา 1 เซนติเมตร เพื่อสามารถยึดนี้อตได้กับแท่นจับมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวได้อย่างแข็งแรง



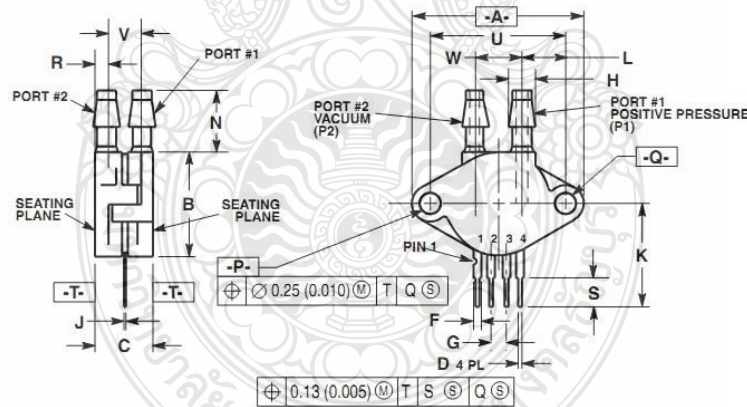
รูปที่ 3.3 โครงสร้างยานดำน้ำ

3.3 เซนเซอร์ในการทดสอบค่า

ปัจจัยในการเลือกเซนเซอร์ใช้งานขึ้นอยู่กับปริมาณธรรมชาติของปริมาณทางฟิสิกส์ที่จะทำการวัดและนำมาใช้ในควบคุมค่าเป็นสำคัญ รวมไปถึงราคา ความน่าเชื่อถือ ตลอดจนคุณภาพของข้อมูล ที่ทำการวัดนอกจากนี้ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรพิจารณาอีก เช่น ความเหมาะสมของเซนเซอร์ที่จะนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมนั้นๆ เซนเซอร์วัดค่า อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณต่างๆ เช่น อุณหภูมิ เสียง แสง แรงทางกล (force) ความดันบรรยากาศ (pressure) ระยะกระจัด (displacement) ความเร็ว (speed) อัตราเร่ง (acceleration) ระดับของเหลว (liquid level) และอัตราการไหล (flow rate) จากนั้นจะทำหน้าที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณออก หรือเอาต์พุตที่ได้จากการวัดในอีกรูปแบบหนึ่งที่สามารถนำไปประมวลผลต่อได้

3.3.1 เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor)[8]

เซนเซอร์วัดความดันเป็นส่วนใหญ่ที่ใช้กันทั่วไปในทางปฏิบัติของอุตสาหกรรมเป็นเซนเซอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสภาพแวดล้อมระบบอัตโนมัติต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์น้ำและไฟฟ้าพลังน้ำ, ทางรถไฟขนส่งอาคารอัจฉริยะอัตโนมัติการผลิต การบิน ทหาร ปิโตรเคมี น้ำมัน หลุม การต่อเรือ เครื่องมือกล ท่อและอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกมากมาย



รูปที่ 3.4 เซนเซอร์วัดความดัน

เซนเซอร์วัดความดันที่เลือกมาใช้กับยานดำน้ำชนิดนี้สามารถทนแรงดันได้ที่ 50 kiloPascal และที่อุณหภูมิ -40 ถึง 125 C° ซึ่งสามารถทำความเข้าใจได้ว่าที่แรงดันสูงสุดสุดของเซนเซอร์ทนได้ คือ น้ำมีความหนาแน่น $\rho = 1000$ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร น้ำสูง 1 เมตร หรือ 1000 มิลลิเมตร มีความดัน $9,807 \text{ Pa} = 9.807 \text{ kPa}$

ดังนั้นแรงดันที่เซนเซอร์วัดความดันสามารถทนน้ำลึกได้เท่ากับ

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

3.3.2 เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล (Digital Compass) [9]

เซนเซอร์ คือ เครื่องมือสำหรับใช้หาทิศทาง มีเข็มแม่เหล็กที่แกว่งไกวได้อิสระในแนวอนทอดตัวในแนวเหนือและใต้ ตามแรงดึงดูดของแม่เหล็กโลก และที่เข็มทิศชี้ไปทางทิศเหนือเสมอ เมื่อทราบทิศเหนือแล้วก็ย่อมหาทิศอื่นได้โดยหันหน้าไปทางทิศเหนือ ด้านขวามือเป็นทิศตะวันออก ด้านซ้ายมือเป็นทิศตะวันตก ด้านหลังเป็นทิศใต้ การบอกทิศทางในแผนที่โดยทั่วไปคือการบอกเป็นทิศที่สำคัญ 4 ทิศ คือทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก หรืออาจจะบอกละเอียดขึ้นอีกก็ได้

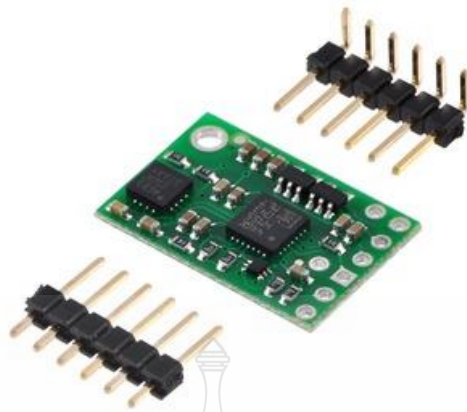


รูปที่ 3.5 เข็มทิศแบบดิจิทัล (Digital Compass) [9]

เซนเซอร์ L3G4200D และ LSM303 เป็นทั้ง Gyro, Accelerometer และ Digital Compass รวมอยู่ในตัวเดียวกัน มีขนาดกว้าง 0.6 นิ้ว ยาว 0.9 นิ้ว มีขนาดเล็กต้องใช้ไฟเลี้ยงเซนเซอร์อยู่ที่ 3.3 – 5 โวลต์ ส่วนทางด้านส่งข้อมูลออกจากเซนเซอร์ที่ผ่านได้ใช้ร่วมกัน คือ สัญญาณ I²C ที่ช่วยให้ทั้งสามเซนเซอร์ส่งผ่านข้อมูลไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้เลือกใช้ คือบอร์ด Arduino Mega 2560 โดยทิศทางการหมุนอยู่ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 360 องศา

3.3.3 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) [9]

เซนเซอร์ Gyro จะทำหน้าที่วัดความเร็วเชิงมุม ก็คือความเร็วในการหมุน (Ω) ในวิชาฟิสิกส์ วัตถุนี้จะหมุนรอบแกนด้วยความเร็ว ยกตัวอย่างถ้าเราจับ Gyro มาเอียงแล้ววัดสัญญาณเอาต์พุตเราจะพบว่าสัญญาณจาก Gyro จะออกก็ต่อเมื่อเกิดการเอียง หรือกำลังจะเอียง หรือเกิดการเคลื่อนไหว เมื่อวัตถุอยู่นิ่ง Gyro จะวัดค่าไม่ได้ เพราะไม่มีความเร็วเชิงมุม



รูปที่ 3.6 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyro) [9]

Gyro ที่ปล่อยทิ้งไว้ให้อยู่นิ่งกับที่ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ก็จะเกิดการแกว่งไปมาและถ้าเรานำ Output ของ Gyro มาหาปริพันธ์ หลังจากที่ได้กรองหรือตัดสัญญาณรบกวนออกไปก็จะสามารถคำนวณหามุมการหมุนได้ (เพราะ เอาต์พุตของ Gyro เป็นความเร็วเชิงมุม)

ส่วนกรรมวิธีในการหาปริพันธ์ใน โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์เราจะใช้เทคนิคการหาปริพันธ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Integral) หรือเป็นการหาผลรวมหรือการบวกรวมของสัญญาณตามเวลาในไมโครคอนโทรลเลอร์ทำได้โดยการบวก ไปจนครบจำนวนครั้ง การอินทิเกรตก็เหมือนกัน ให้มองกลับไปทีรากฐานของการอินทิเกรต ถ้ามีกราฟของสัญญาณมาให้มันก็คือพื้นที่ใต้กราฟ เราจะอินทิเกรตซึ่งทำได้โดยแบ่งพื้นที่ใต้กราฟเป็นช่วงเล็กๆ แล้วหาพื้นที่เล็กๆ นั้น จากนั้นก็จับมารวมกันถ้าเราแบ่งพื้นที่เล็กๆ นั้นด้วยเวลา t_0, t_1, t_2, t_n นั่นก็คือเอาพื้นที่ ที่เวลา t_0 มารวมกับพื้นที่ ที่เวลา t_1 เอาพื้นที่ไปรวมกับพื้นที่ที่เวลา t_2 ไล่ไปเรื่อยๆ ถึง t_n โดยไม่สนใจว่าพื้นที่นั้นมีค่าเป็นบวกหรือลบ สุดท้ายแล้วคำตอบจะบอกเราเองว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการหาปริพันธ์ของความเร็วเชิงมุม จะมีมุมที่ชี้ไปในทิศทางใด ซึ่งจะนำไปประยุกต์ใช้กับทฤษฎีอื่นอีกมาก เช่น Kalman Filter และ Complementary Filter

3.3.4 รายละเอียดบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้นี้จะเป็นบอร์ด Arduino MEGA2560 ซึ่งจะมีคุณสมบัติดังแสดงด้านล่างนี้

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560
- แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์
- แรงดันไฟฟ้าอินพุต (แนะนำ) 7-12 โวลต์

- แรงดันไฟฟ้าอินพุต (จำกัด) 6-20 โวลต์
- ดิจิตอล I/O เท่ากับ 54 Pins (ที่ 14 ให้ผล PWM)
- Pins อนาล็อกอินพุต 16 Pins
- DC ปัจจุบันต่อ I/O เท่ากับ 40 มิลลิแอมแปร์
- DC ปัจจุบันสำหรับ Pin 3.3V /50 มิลลิแอมแปร์
- หน่วยความจำแฟลช 256 กิโลไบต์ที่ 8 กิโลไบต์ใช้โดย Bootloader
- SRAM 8 กิโลไบต์
- EEPROM 4 กิโลไบต์
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 16 เมกกะเฮิร์ต



รูปที่ 3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA2560 [10]

3.3.5 รายละเอียดมอเตอร์ขับเคลื่อน รุ่น Crust Crawler 400 HFS [11]

มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ใช้กับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้น้ำจะเป็นมอเตอร์ใบพัดจาก Crust Crawler รุ่น 400 HFS ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- มอเตอร์ชนิดไม่แปลงถ่านให้ประสิทธิภาพสูง
- น้ำหนัก 0.59 กิโลกรัม
- กำลังสูงสุด 400 วัตต์
- อัตราทดเกียร์ 4.28:1
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา 5 มิลลิเมตร
- อุณหภูมิสูงสุดที่ตัวเรือนสามารถรับได้ 100 องศาเซลเซียส
- ทำงานในช่วง 0 ถึง 50 โวลต์

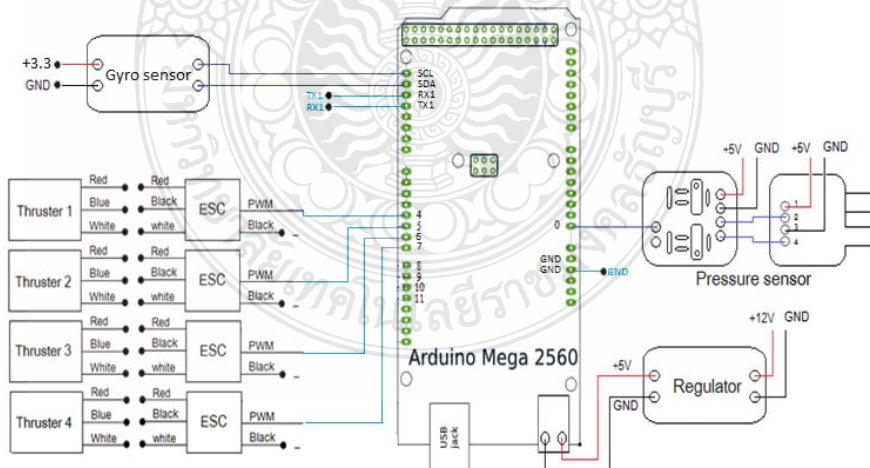
- สามารถทำงานได้ถึงระดับความลึก 91.44 เมตร
- ใบพัดมีขนาด 85 มิลลิเมตร จำนวน 4 ใบ ทำจากทองเหลือง
- อัตราแรงผลัก
 - 1) ที่ 12 โวลต์ ให้แรงผลักสูงสุด 33.58 นิวตัน
 - 2) ที่ 24 โวลต์ ให้แรงผลักสูงสุด 66.72 นิวตัน



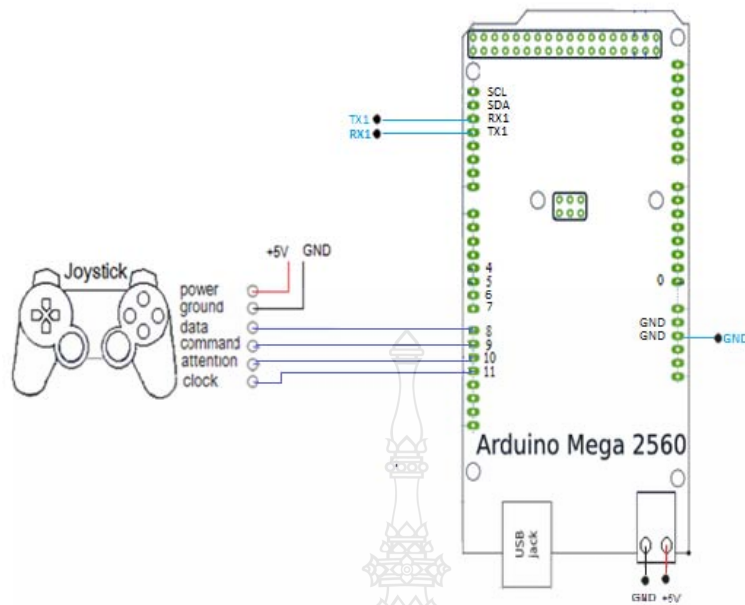
รูปที่ 3.8 มอเตอร์ขับเคลื่อน [12]

3.3.6 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์

ในรูปที่ 3.9 เป็นแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ใต้น้ำ ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมต่างๆเหล่านี้จะถูกเก็บอยู่ภายในถังเก็บแผงวงจรควบคุมของตัวหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ใต้น้ำ



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงการต่อวงจรควบคุมภายในถังเก็บแผงวงจร



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงการต่อวงจรควบคุมภายนอกถึงเก็บแผงวงจร

3.3.7 รายละเอียดของชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน

ชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนจะเป็นของ DRAGON รุ่น DRAGON70A-SBEC 8-10A ที่ใช้ควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ Crust Crawler

- ในรุ่น 70A สามารถรับกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด 70 แอมแปร์และรุ่น 90 สามารถรับกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด 90 แอมแปร์
- ระบายความร้อนด้วยแผงอลูมิเนียม
- มีระบบป้องกันพลังงานไม่ให้มอเตอร์ขับเคลื่อนทำงานเมื่อระบบมีกระแสสูงเกินเพื่อลดอุบัติเหตุที่จะเกิดขึ้นต่อมอเตอร์



รูปที่ 3.11 ชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน



รูปที่ 3.12 การต่อวงจรของชุดควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อน

3.4 ผลการคำนวณจากการออกแบบ

3.4.1 ปริมาตรถังเก็บแผงวงจรควบคุม



รูปที่ 3.13 ขนาดถังเก็บแผงวงจรควบคุม

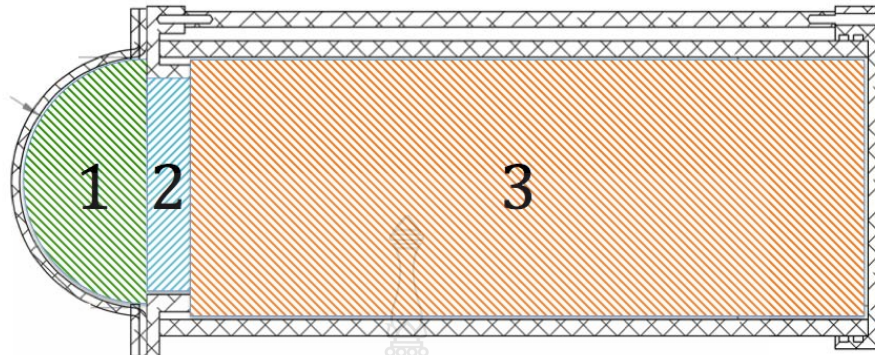
$$\begin{aligned} V1 \text{ (Dome)} &= \left(\frac{4}{3} \pi r^3\right) / 2 \\ &= 217,336.1467 \text{ mm}^3 = 217.3361467 \text{ ml} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V2 \text{ (กระบอกอะครีติก)} &= \pi r^2 l \\ &= 3.14 \times 50.78^2 \times 267 \text{ mm}^3 = 95,010.12 \text{ mm}^3 \\ &= 95.01012 \text{ ml} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V3 \text{ (ช่องว่างฝาปิดถัง)} &= \pi r^2 l \\ &= 3.14 \times 41^2 \times 18 \text{ mm}^3 = 2,119,490.37 \text{ mm}^3 \\ &= 2,119.49037 \text{ ml} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรถังเก็บแผงวงจรควบคุม 2 ถัง เท่ากับ} &= (V1 + V2 + V3) \times 2 \\ &= 4,863.67327 \text{ ml} \end{aligned}$$

3.4.2 แรงลอยตัว



รูปที่ 3.14 แสดงวิธีแบ่งส่วนคำนวณหาปริมาตรถัง

แรงลอยตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

1) คำนวณหาแรงลอยตัว (F_{B1}) ของถังอะคริลิก

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรของถัง}(V) &= V_1 + V_2 + V_3 \\ &= 2,431.83663 \text{ ml} \end{aligned}$$

แรงลอยตัวของถัง

$$\begin{aligned} F_{B1} &= [(1000 \times 9.81 \times 0.00243183663)] \\ &= 23.85632 \text{ N} \end{aligned}$$

รวมสองถังจะได้ = 47.7126 N

2) คำนวณหาแรงลอยตัว (F_{B0}) ของโครงสร้าง

$$\text{ปริมาตรของโครงสร้างของยานดำน้ำ} = 0.008679872 \text{ m}^3$$

แรงลอยตัวของโครงสร้าง

$$F_{B0} = [(1000 \times 9.81 \times 0.008679872)]$$

$$= 85.1495 \text{ N}$$

ดังนั้นแรงลอยตัวของหุ่นมีค่าเท่ากับ

= แรงลอยตัวของถัง + แรงลอยตัวของโครงสร้าง

$$= 47.7126 + 85.1495 \text{ N}$$

$$= 132.8621 \text{ N}$$

3.4.3 น้ำหนักของโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในน้ำ

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักชิ้นส่วนต่างๆของหุ่น

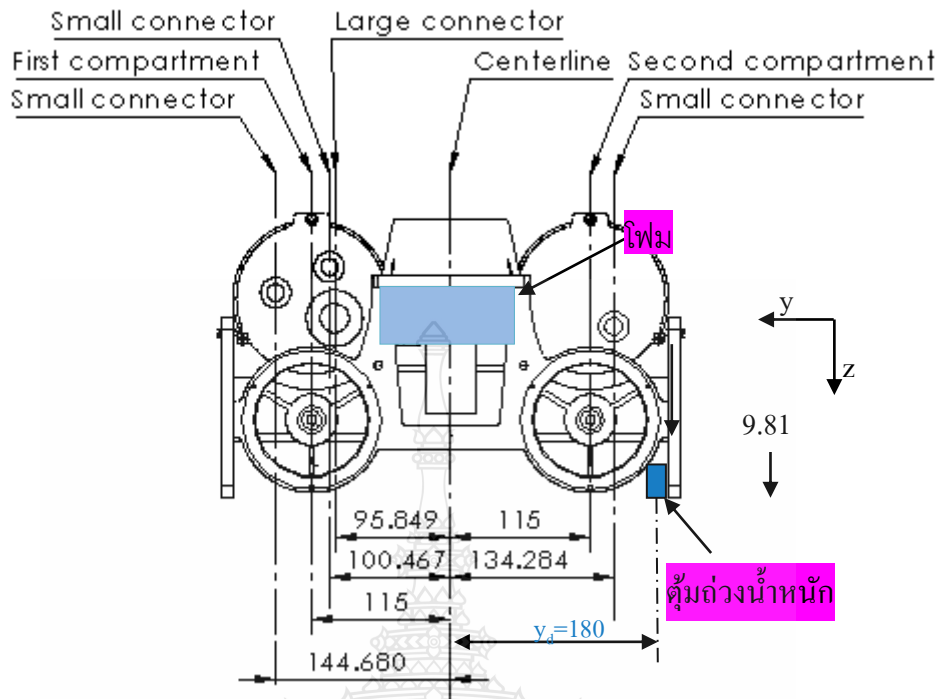
| ชิ้นส่วน | น้ำหนัก(g) | จำนวน | น้ำหนักทั้งหมด(g) |
|---------------------|------------|-------|-------------------|
| Large connector | 750 | 1 | 750 |
| Small connector | 270 | 3 | 810 |
| Thruster controller | 80 | 4 | 320 |
| Micro controller | 50 | 1 | 50 |
| Thruster | 409.5 | 4 | 1,638 |
| โครงสร้าง | 7,250 | 1 | 7,250 |
| รวม | | | 10,818 |

น้ำหนักของโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในน้ำ = $10.818 \times 9.81 \text{ N}$

$$= 106.12458 \text{ N}$$

จะเห็นได้ว่าแรงเนื่องจากน้ำหนักของตัวหุ่น F_T (106.12458 N) มีค่าน้อยกว่าแรงลอยตัว F_B (132.8621N) อยู่ประมาณ 26.73752 N แสดงว่าต้องเพิ่มน้ำหนักของหุ่นอีกประมาณ 2.73 กิโลกรัม เพื่อให้หุ่นสามารถลอยตัวได้อย่างสมดุล

3.4.4 วิธีคำนวณหาตำแหน่งถ่วงน้ำหนักเพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบแกน X โดยใช้ระยะในแนวแกน Y เพื่อคำนวณหาน้ำหนักของตุ้มถ่วงและระยะตั้งฉากกับกับแนวแรงถึงจุดหมุนของตุ้มถ่วง(y_d)เท่ากับ 180 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.15 แสดงแนวทางของแรงที่กระทำในแนวแกน X

โมเมนต์ของหุ่นรอบแกน X

โมเมนต์ของมวลทวนเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned}
 &= M_{(Elec.com1)} + M_{(small\ connector1)} + M_{(small\ connector2)} + M_{(Big\ connector)} \\
 &= 2,235.9933 + 226.4581 + 228.7144 + 1,063.747 \\
 &= 3,754.913 \text{ N mm.}
 \end{aligned}$$

โมเมนต์ของมวลตามเข็มนาฬิกา

$$\begin{aligned}
 &= M_{(Elec.com2)} + M_{(small\ connector3)} + M_{(ตุ้มถ่วง)} \\
 &= 733.2975 + 302.9849892 + (9.81) \times 180 \text{ m}_{(ตุ้มถ่วง)} \\
 &= 1,036.282 + 1765.8 \text{ m}_{(ตุ้มถ่วง)} \text{ N mm.}
 \end{aligned}$$

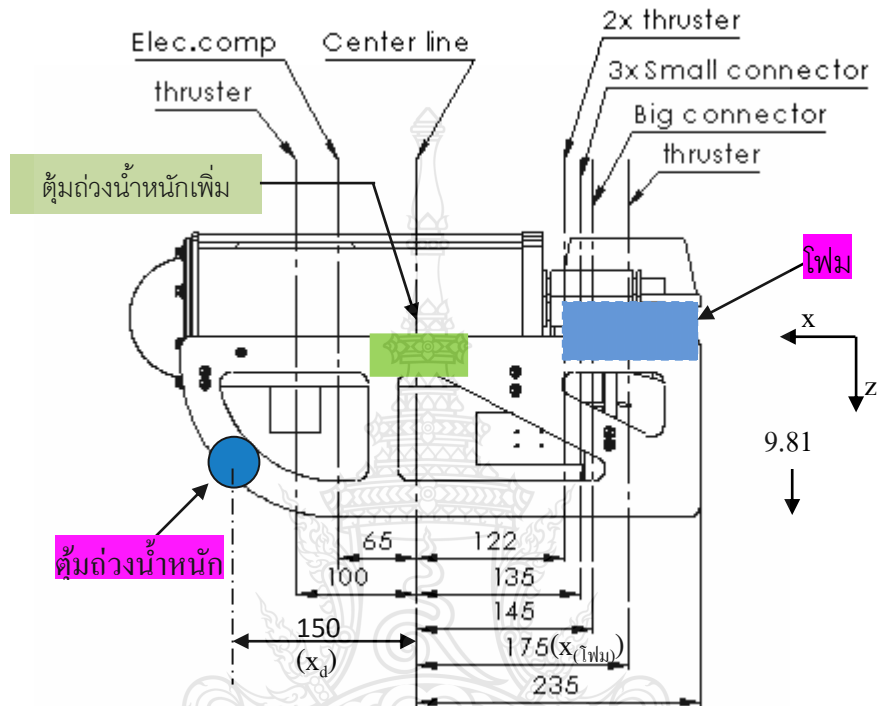
ผลรวมโมเมนต์ของหุ่นรอบแกน x มีค่าเท่ากับ

$$1,036.282 + 1765.8 \text{ m}_{(ตุ้มถ่วง)} = 3,754.913$$

ดังนั้นจะได้มวลตุ้มถ่วงน้ำหนัก(m_{ตุ้มถ่วง}) เพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบ

แกน X มีค่าเท่ากับ 1.54 กิโลกรัม

3.4.5 วิธีการถ่วงน้ำหนักเพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบแกน Y โดยใช้ระยะในแนวแกน X เพื่อคำนวณโดยกำหนดน้ำหนักของตุ้มถ่วงเท่ากับ 1.54 กิโลกรัมที่ตำแหน่ง 15 เซ็นติเมตร



รูปที่ 3.16 แสดงแนวทางของแรงที่กระทำในแนวแกน Y

โมเมนต์ของหุ่นแกน Y

น้ำหนักโดย (+/-)

1)Elc.com1 = 1,982 กรัม

2)Elc.com2 = 650 กรัม

3)Elc.com = 2,632 กรัม

โมเมนต์ของมวลทวนเข็มนาฬิกา = $M_{(Elc.com)} + M_{(thruster1)} + M_{(ตุ้มถ่วง)}$

$$= 1,678.295 + 401.715 + 1.54(9.81)(150)$$

$$= 4346.12 \text{ N-mm.}$$

โมเมนต์ของมวลตามเข็มนาฬิกา

$$= M_{(3\text{small connector})} + M_{(Big connector)} + M_{(thruster(แนวตั้ง))} + M_{(2\text{thruster(แนวอน)})}$$

$$= 536.3168 + 1,066.838 + 703.0091 + 980.1956$$

$$= 3,663.844 \text{ N-mm.}$$

โมเมนต์ของแรงลอยตัวตามเข็มนาฬิกา

$$= \text{แรงลอยตัวของถัง} \times \text{ระยะทางตั้งฉากกับแนวแรงถึงจุดหมุน}$$

$$= 47.8 \times 50.15 \text{ N mm.} = 2,397.17 \text{ N mm.}$$

โมเมนต์ของแรงลอยตัวตามเข็มนาฬิกา

$$= F_{(T_{1m})} 175$$

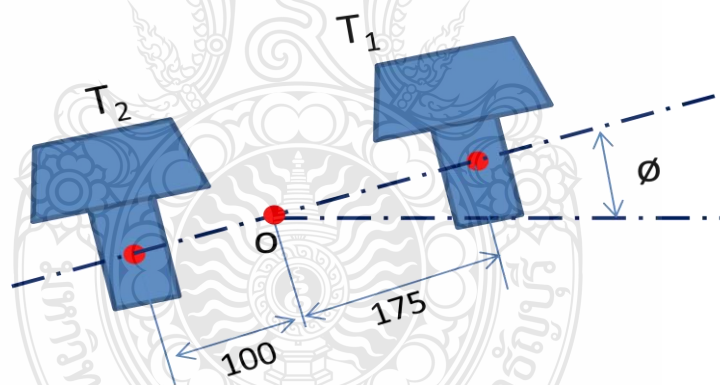
ผลรวมโมเมนต์ของหุ่นรอบแกน y มีค่าเท่ากับ

$$= 3,663.844 + 2,397.17 - 4346.12 - 175 F_{(T_{1m})}$$

ดังนั้นถ้าถ่วงน้ำหนัก 1.54 กิโลกรัมที่ตำแหน่ง x_d เท่ากับ 15 เซ็นติเมตร เพื่อให้หุ่นมีความสมดุลของโมเมนต์รอบแกน y จึงจำเป็นที่จะต้องเพิ่มแรงลอยตัว $F_{(T_{1m})}$ เท่ากับ 9.8 N ที่ตำแหน่ง $x_{(T_{1m})}$ เท่ากับ 17.5 เซ็นติเมตร

เมื่อเพิ่มแรงลอยตัวเท่ากับ 9.8 N น้ำหนักของหุ่นใหม่ต้องเพิ่มอีก 1 กิโลกรัม ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลเพื่อให้โมเมนต์ มีค่าเป็นศูนย์

3.4.6 วิธีการคำนวณหาโมเมนต์ของมอเตอร์ในแนวตั้ง



รูปที่ 3.17 แสดงความสมดุลของแนวทางของแรงที่กระทำในแนวตั้ง

หาโมเมนต์รอบจุด 0

$$T_2 d_2 - T_1 d_1 = e_0 G$$

$$100 T_2 - 175 T_1 = e_0 G$$

เมื่อ e_0 คือองศาที่มีค่าเป็นบวก

G หาได้จากการทดลองเมื่อ $T_1 = T_2$

3.4.7 ความเร็วเคลื่อนที่

ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้น้ำจะใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งมีแรงผลักสูงสุด 33.58 นิวตัน โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงมีความต่างศักย์ 12 โวลต์ มอเตอร์จำนวน 2 ตัว ทำให้ได้แรงผลักในการเคลื่อนที่รวมเท่ากับ 67.16 นิวตัน แรงต้านจะเท่ากับแรงผลัก ดังนั้น ในที่นี่จะใช้แรงต้านเท่ากับ 67.16 นิวตัน การคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

| | | |
|-------|----------|---|
| เมื่อ | F_D | คือ แรงต้านของน้ำ (นิวตัน) |
| | ρ_w | คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) |
| | A_F | คือ พื้นที่ของวัตถุที่ปะทะกับน้ำ (ตารางเมตร) |
| | V | คือ ความเร็วในการเคลื่อน (เมตร/วินาที) |
| | C_D | คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน |

$$F_D = \left[\left(\frac{1}{2} \rho V^2 A_1 C_{d1} \right) + \left(3 \times \frac{1}{2} \rho V^2 A_2 C_{d2} \right) \right]$$
$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 (A_1 C_{d1} + 3 A_2 C_{d2})$$

แทนค่าสมการ

$$67.16 = \frac{1}{2} \times 1000 \times V^2 [(0.15 \times 0.15 \times 0.64) + (3 \times 0.0508 \times 0.0254 \times 0.64)]$$

$$67.16 = \frac{1}{2} \times 1000 \times V^2 (0.0144 + 0.0039)$$

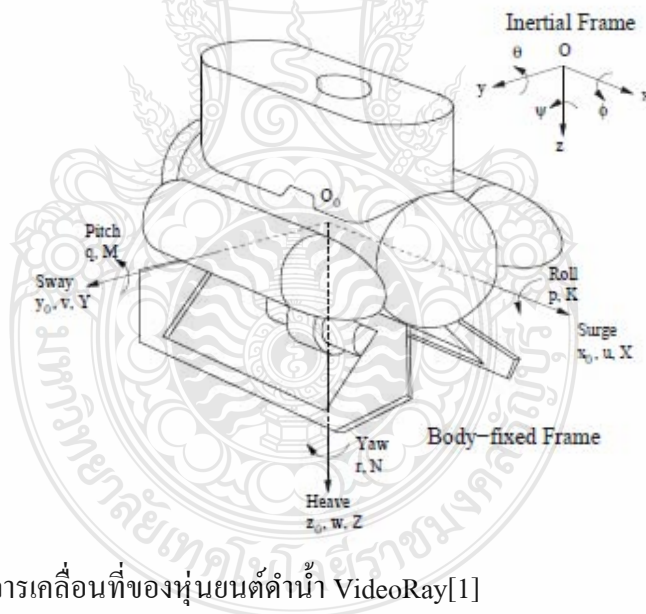
ดังนั้น $V = 2.71$ เมตร/วินาที

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่

ขั้นแรกได้ศึกษาพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อมี เองศาอิสระในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay ที่ขับเคลื่อนด้วยใบพัดสามใบ โดยทางด้านท้าย มีสองใบพัดวางขนานกับแนวนอน เพื่อใช้เดินหน้าหรือถอยหลัง และ บังคับการเลี้ยว ส่วนอีกหนึ่งใบพัดในแนวตั้ง เพื่อใช้ในการเคลื่อนขึ้นหรือลง โดยจะทำการศึกษาสมการพลศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดำน้ำ VideoRay ที่มีขนาดความกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.36 เมตร และ สูง 0.23 เมตร ในรูปที่ 4.1 แสดงการตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay ในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมใน เองศาอิสระ โดยมีจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์อยู่ที่ พิกัด O_0 เมื่อเทียบกับระบบพิกัดเฉื่อยในกรอบอ้างอิง O



รูปที่ 4.1 การตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay[1]

สมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้นำได้ถูกพัฒนาและนำเสนอในหลายรูปแบบในการศึกษานี้เราจะพิจารณาสมการพลศาสตร์แบบหกองศาอิสระจากThor I. Fossen.[7].ดังในสมการที่ (4.1) และ (4.2)

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (4.1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (4.2)$$

เมื่อเวกเตอร์ $v = [u, v, w, p, q, r]^T$, $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ โดยที่เวกเตอร์ v ประกอบด้วยความเร็วเชิงเส้น (u, v, w) และความเร็วเชิงมุม (p, q, r) ในแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 ส่วนเวกเตอร์ η ประกอบด้วยตำแหน่ง (x, y, z) และองศาการหมุน (φ, θ, ψ) รอบแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 และ ส่วนเวกเตอร์ τ คือแรงในแนวเชิงเส้น (X, Y, Z) และโมเมนต์ในแนวเชิงมุม (K, M, N) ที่กระทำรอบแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 โดยที่เมทริกซ์ $J(\eta)$ คือเมทริกซ์จาโคเบียน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม, $M = M_{RB} + M_A$ คือเมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia) ร่วมกับมวลรวมของน้ำ M_A , $C(v) = C(v)_{RB} + C(v)_A$ คือเมทริกซ์ของความเร่งแบบคอริโอลิส (Coriolis) รวมทั้งแรงเหวี่ยงเพิ่มของน้ำ, $D(v) = D_{quad}(v) + D_{lin}(v)$ คือเมทริกซ์ของความหน่วง (Damping), และ $g(\eta)$ คือเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการควบคุมแยกกันอิสระในแต่ละแนวแกนเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมโดยใช้สมมุติฐานที่ว่า

1) แรวลอยตัวกับน้ำน้ำหนักของหุ่นยนต์จะต้องสมดุลกันเสมอ ซึ่งจะทำให้หุ่นอยู่ในจุดสมดุลที่มีมุม roll (φ, p) และ pitch (θ, q) มีค่าเท่ากับศูนย์

2) ผลกระทบที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำ คือ กลิ่น, แรวลอยตัว และ โมเมนต์การหันเห

4.1.1 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน

ในส่วนแรกจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRay ในระนาบแนวนอน เมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่หน้าหรือหลัง (u) และ ความเร็วของการเคลื่อนที่ซ้ายหรือขวา (v) และ การหมุนรอบแกน Z (r) ที่ประกอบด้วยสมการดังนี้

$$m_{11}\dot{u} = -m_{22}vr + X_u u + X_{u|u}|u| + X \quad (4.3)$$

$$m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur + Y_v v + Y_{v|v}|v| \quad (4.4)$$

$$I\dot{r} = N_r r + N_{r|r}|r| + N \quad (4.5)$$

เมื่อ m_{11} คือความเฉื่อยในแนวแกน X

m_{22} คือความเฉื่อยในแนวแกน Y

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน Z

$X_u, X_{u|u}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางที่พุ่งไปข้างหน้าปะทะคลื่นแรง

$Y_v, Y_{v|v}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางด้านข้าง

X คือแรงภายนอกที่กระทำที่เพิ่มขึ้นมาจากแรงคลื่นที่เข้าปะทะทางด้านหน้า, และ N คือแรงบิดภายนอกที่กระทำกับหุ่นยนต์รอบแกน Z

4.1.2 สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

ในส่วนที่สองจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ค้ำน้ำ VideoRay ในระนาบแนวตั้งเมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง (ในแนวแกน z) มีสมการดังนี้

$$m_{33}\dot{w} = Z_w w + Z_{w|w}|w|w| + Z, \quad (4.6)$$

เมื่อ m_{33} คือความเฉื่อยในแนวแกน Z

$Z_w, Z_{w|w}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางลอยตัว

Z คือแรงยกตัวจากภายนอกที่มากระทำกับหุ่นยนต์

โดยค่าคุณสมบัติต่างๆของหุ่นยนต์ VideoRayIII ในแสดงใน ตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของหุ่นยนต์ VideoRayIII

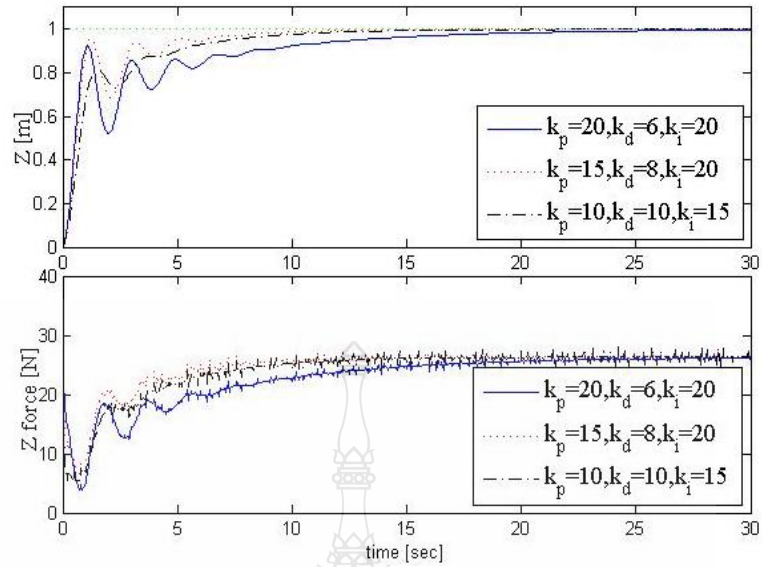
| Parameter | Value | Units | Description |
|-----------|---------|-------------------|-------------------|
| L | 0.36 | M | Vehicle Length |
| W | 0.35 | M | Vehicle Width |
| H | 0.23 | M | Vehicle Height |
| I_{xx} | 0.02275 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| I_{yy} | 0.02391 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| I_{zz} | 0.02532 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| F_{tf} | 36 | N | Thrust Force |

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติต่างๆของหุ่นยนต์ VideoRayIII(ต่อ)

| | | | | | | |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Added Mass | $X_{\dot{u}}$ | $Y_{\dot{v}}$ | $Z_{\dot{w}}$ | K_p | $M_{\dot{q}}$ | $M_{\dot{r}}$ |
| Analytical | 1.94 | 6.05 | 3.95 | 3.26×10^{-2} | 1.75×10^{-2} | 3.21×10^{-2} |
| Linear drag coefficient | X_u | Y_v | Z_w | K_p | M_q | N_r |
| Analytical | 2.30 | 8.01 | 5.81 | 0.0009 | 0.0012 | 0.0048 |
| Quadratic drag coefficient | $X_u u $ | $Y_v v $ | $Z_w w $ | $K_p p $ | $M_q q $ | $N_r r $ |
| Analytical | 8.28 | 23.69 | 20.52 | 0.0048 | 0.0069 | 0.0089 |

4.2 จำลองระบบควบคุมความถี่แบบ PID

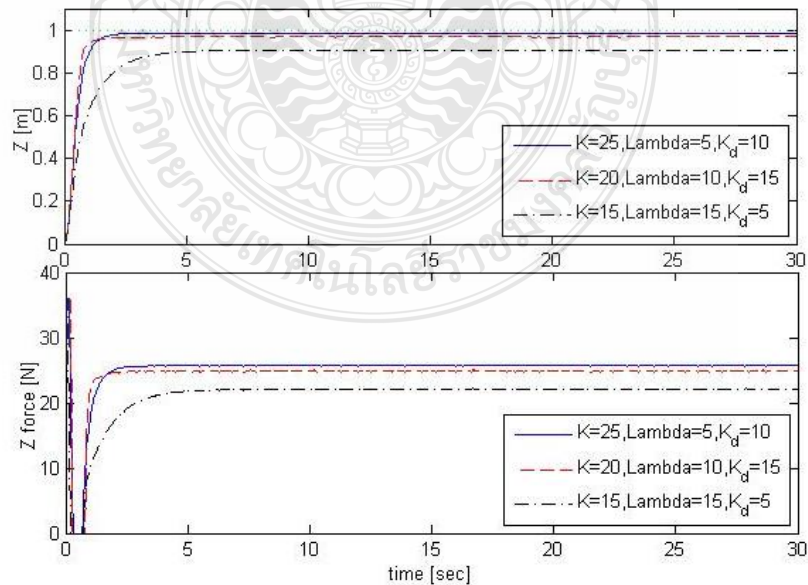
ในระบบควบคุมแบบ PID มีอัตราขยายด้วยกันสามตัวหลัก คือ k_p , k_d , และ k_i จึงได้ทำการปรับค่าตัวแปรอัตราขยายเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ในแกน Z หรือ ควบคุมระดับความถี่ ขั้นแรกได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบสัดส่วน (k_p) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 ตามลำดับซึ่งจะช่วยทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ก็จะทำให้ overshoot ที่สูงขึ้นเช่นกัน ลำดับที่สองได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (k_d) ให้เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 และ 10 เมื่อให้ค่า $k_p=15$ การเพิ่มค่า k_d นั้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงแต่จะสามารถลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ลำดับที่สามได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบปริพันธ์ (k_i) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 เมื่อให้ค่า $k_p=15$ และ $k_d=8$ นั้นจะช่วยลดความผิดพลาดในช่วงคงที่ตอนท้าย (stead-state error) เมื่อได้ปรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot และมีค่าความผิดพลาดตอนท้ายเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่นำมาเลือกใช้ ในการควบคุมความถี่แบบ PID คือ $k_p=15$, $k_d=8$ และ $k_i=20$ ซึ่งมีผลตอบสนองไวและ overshoot น้อย



รูปที่ 4.2 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย k_i , k_p และ k_d

4.3 จำลองระบบควบคุมระดับความลึกแบบ SMC

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในการเคลื่อนที่ในแกน z สำหรับการควบคุมแบบ SMC จะทำการปรับหาค่าอัตราขยายขั้นแรก ปรับค่าอัตราขยาย $K=15$ 20 และ 25 ตามลำดับ ขั้นที่สองปรับค่าอัตราขยาย $\lambda=5$ 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K=25$ ที่ดีที่สุดขั้นที่สามปรับค่าอัตราขยาย $k_d=5$ 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K=25, \lambda=5$ ที่ดีที่สุด ดังรูปที่ 4.3 จะแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในการทดลองคือ $K=25, \lambda=5$ และ $k_d=10$ ซึ่งตอบสนองไวที่สุด และ ไม่มี overshoot

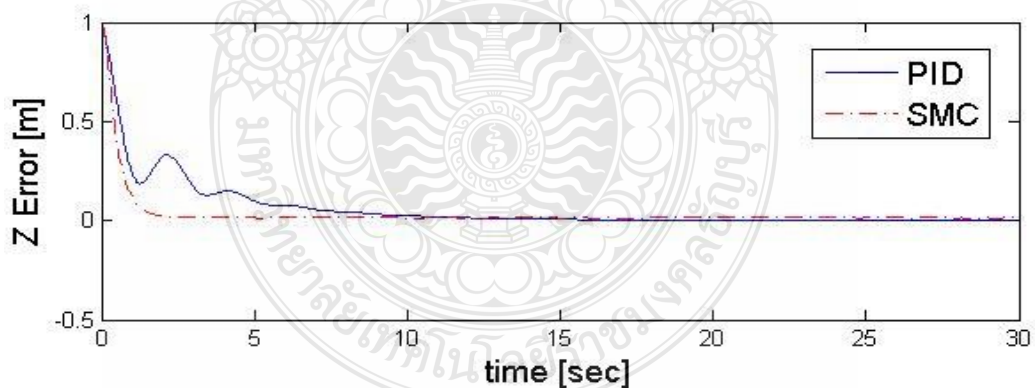


รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย K, λ และ k_d

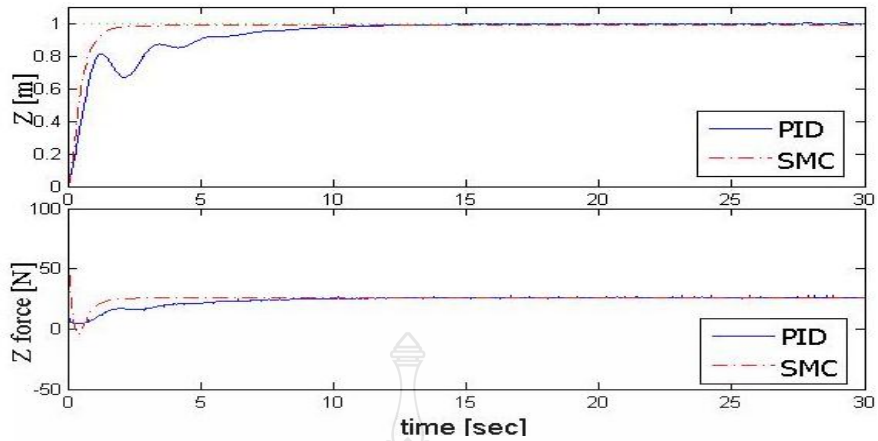
ผลอัตราขยายของการสวิตช์ (K) ให้สูงขึ้นจะช่วยทำให้ผลตอบสนองไวขึ้น และผู้เข้าหาคำสั่งได้รวดเร็วและยังจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในช่วงท้ายให้น้อยลงการเพิ่มค่า λ ช่วยให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลทำให้คลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแกน z น้อยลงแต่แรงที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 27N ดังนั้นต้องเลือกค่าอัตราขยายให้เหมาะสมแต่สังเกตได้ว่าแรงของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ยิ่งมากจะสามารถทำให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลองดังนั้นในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของ VideoRayIII จึงได้ใส่ฟังก์ชัน Saturation ของแรงผลักจากใบพัดไว้ไม่เกิน ± 36 N ซึ่งได้ระบุในคุณสมบัติของใบพัดขับเคลื่อน

4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมระดับความลึกแบบ PID กับแบบ SMC ในส่วนของเวลาที่ทำให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์

ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม ที่มีช่วงการรบกวนระหว่าง ± 0.001 m มากระทำกับตำแหน่งของหุ่นดำน้ำในแนวแกน Z ดังนั้นควบคุมแบบ PID ที่มีค่า $k_p = 15$, $k_d = 8$, และ $k_i = 20$ จากหัวข้อ 4.1 และการควบคุมแบบ SMC ที่มีค่า $K = 25$ และ $\lambda = 5$ จากหัวข้อ 4.4 เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ตกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลัน



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบเวลาที่ทำให้ค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์สำหรับระบบควบคุมแบบ PID และแบบ SMC

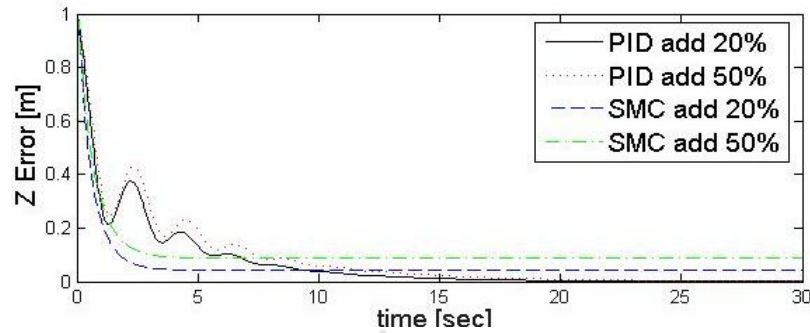


รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อระดับความลึกนั้นถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน เช่น กระแสน้ำ

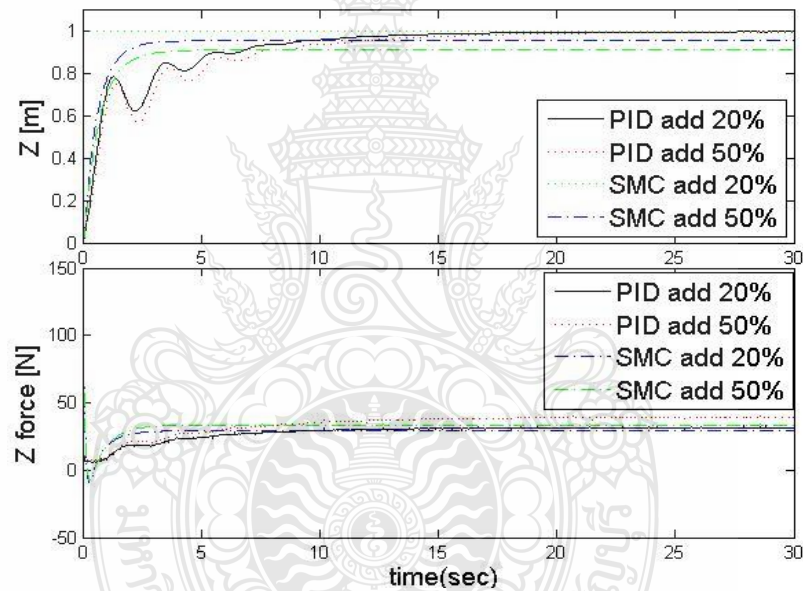
จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ SMC จะตอบสนองเร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID ส่งผลทำให้ค่าความผิดพลาดของระดับความลึกเข้าใกล้ศูนย์ได้ไวที่สุดแม้จะมีสัญญาณรบกวนมากกระทำดังในรูปที่ 4.5

4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ต่อผลการแปรปรวนของพารามิเตอร์ M_{33} และ Z_w และ Z_{ww} เป็นปริมาณ +20% และ +50% จากค่าประมาณ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ของมวลและค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์เพิ่มขึ้นจากค่าประมาณที่ใช้ในสมการ (4.4) เป็น 20% และ 50% เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ลึกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลันจะทำให้ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ช้าลงและจะเกิด overshoot มากขึ้นสำหรับระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งจะทำให้เข้าใกล้ศูนย์ได้ช้าลง สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC ก็จะมีผลตอบสนองที่ช้าลงและจะมีค่าความผิดพลาดของระดับความลึกในช่วงท้ายที่ไม่เป็นศูนย์ เนื่องมาจากเทอมที่มีพจน์อุทกพลศาสตร์ในกฎการควบคุมซึ่งเป็นแบบไม่เชิงเส้นจะไม่หักล้างกับระบบพลศาสตร์ของหุ่นดำน้ำให้หมดไปได้แต่ข้อดีคือจะไม่เกิด overshoot ในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จะแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมแบบ PID สามารถที่จะควบคุมความลึกที่ 1 เมตรแต่ ระบบควบคุมแบบ SMC จะไม่สามารถทำความลึกที่ 1 เมตรได้



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID และ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33}, Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ

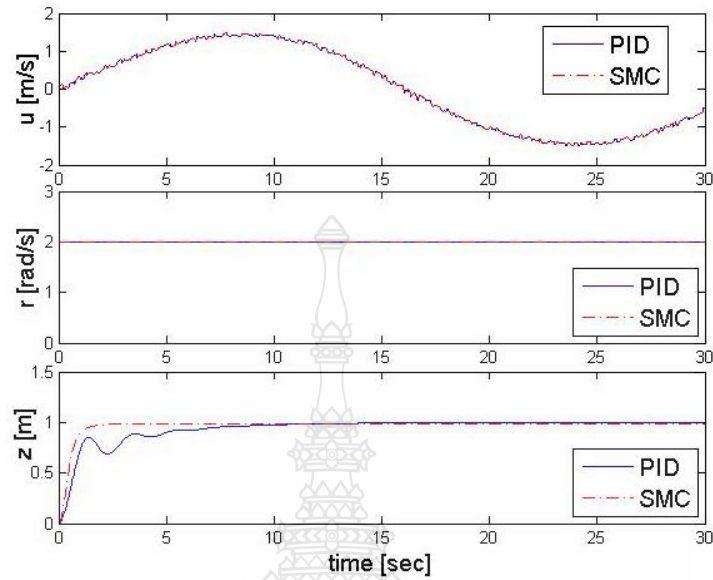


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33}, Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ

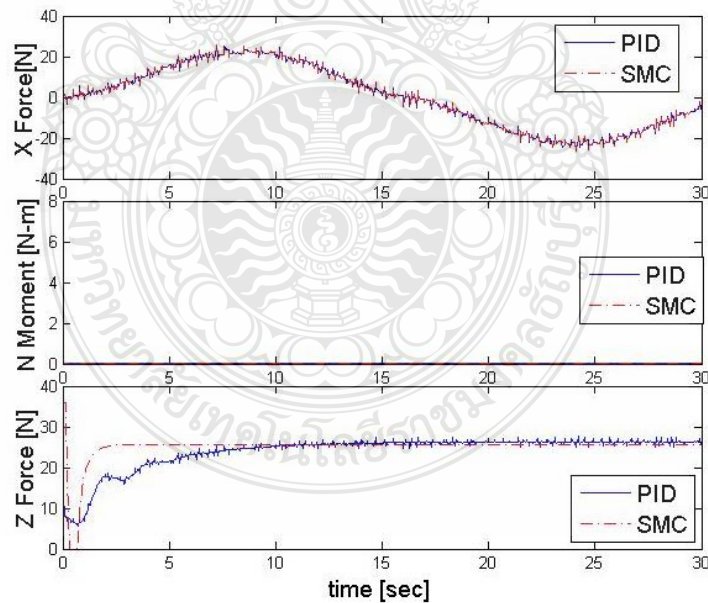
4.6 การเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบ PID กับการควบคุมแบบ SMC ในการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ

เมื่อกำหนดให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน x หรือเป็นแบบแกว่งกลับไปมาแบบฟังก์ชัน sine และอัตราการหมุนเป็นแบบคงที่ 2 rad/s และ หุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ลึกลงไปใต้น้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลันและให้ค่าอัตราขยายเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.5 ถ้าหุ่นยนต์ดำน้ำเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง ผลที่ได้ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 การเคลื่อนที่ในระนาบ xy จะเคลื่อนหมุนวนเหมือนวงรีและ

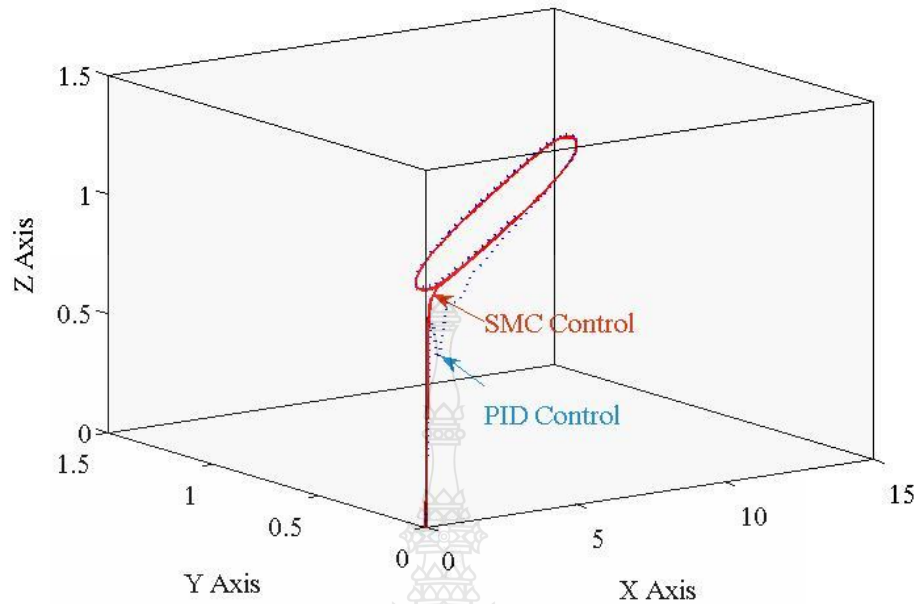
ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง จะเคลื่อนที่ไปยังระดับความลึก 1 เมตร ภายในเวลา 10 วินาที เมื่อถูกควบคุมด้วยระบบการควบคุมแบบ PID และแบบ SMC



รูปที่ 4.8 ความเร็วในแนวแกน x (u), ความเร็วเชิงมุม (r) และการเคลื่อนที่ในแนวแกน z(w)จากการควบคุมแบบ PID และ SMC



รูปที่ 4.9 แรงในแกน x โมเมนต์รอบแกน z(N) และแรงในแกน z จากการควบคุมแบบ PID และ SMC



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติ เมื่อใช้ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID และ SMC

จากรูปที่ 4.10 จะแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม (PID) และ SMC สามารถรักษาระดับความลึกได้คงที่ 1 เมตร และจะเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงรี เนื่องจากมีค่าความเร็วเชิงมุมที่คงที่ $r = 2 \text{ rad/s}$ และ การเคลื่อนที่ในแกน X นั้นจะส่ายไป-มา โดยจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ทั้งในระนาบ xy และระดับความลึกมีค่าน้อยมาก โดยที่ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองในการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ที่ไว และ แรงขับจากระบบควบคุมทั้งสองแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

4.7 การทดสอบและผลการทดสอบ

ในส่วนของการสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำ จะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักด้วยกันดังนี้คือ ในส่วนที่ 1 จะทำการทดสอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆของหุ่นยนต์ดำน้ำ เพื่อตรวจสอบการรั่วซึมและการป้องกันน้ำเข้าสู่ระบบอิเล็กทรอนิกส์ ในส่วนที่ 2 จะทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในระบบ ในส่วนที่ 3 จะเป็นการทดสอบและ วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ดำน้ำที่ได้สร้างขึ้นตามการออกแบบ ที่กล่าว ในบทที่ 3 พร้อมทั้งใช้ ความรู้ทางด้านทฤษฎีระบบควบคุมมาช่วยสนับสนุนการทดสอบการทำงานของ หุ่นยนต์ดำน้ำ แล้วจึงตรวจสอบ การทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ทั้งหมดและรวบรวมข้อมูลในการปฏิบัติงาน

4.7.1 ทดสอบการรั่วซึมของถังเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ใน ส่วนที่ 1 จะทำการทดสอบการป้องกันการรั่วซึมของฝาครอบถังอะคริลิกทั้งสองด้าน ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 ซึ่งใช้โอรังสองชั้น และการขันอัดด้วยสกรู เพื่อช่วยป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ในส่วนของคอนเนคเตอร์ใช้ในการเชื่อมต่อสายไฟ นั้นใช้การขันอัดโอรังด้วยแหวน และท่อนำน้ำเข้าของเซนเซอร์วัดความดัน จะใช้เทปพันเกลียว แล้วสกรูเข้ากับฝาถัง จากนั้นได้นำถังอะคริลิกนี้ไปแช่ไว้ในถังน้ำที่มีระดับความลึกของน้ำ 1 เมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากนั้นนำถังเก็บแผงวงจรควบคุมขึ้นมาตรวจสอบการรั่วซึม และพบว่าไม่มีการรั่วซึมของน้ำเข้าไปใน ถังอะคริลิก



รูปที่ 4.11 การทดสอบการรั่วซึม

4.7.2 การหล่อซิลิโคนสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนและการทดสอบการกันน้ำ

เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อน รุ่น Crust Crawler 400 HFS ในได้เกิดการชำรุดเสียหาย และเพลามอเตอร์ไม่สามารถหมุนได้ จึงได้ทำการซ่อมแซมโดยการเปลี่ยนมอเตอร์ใหม่ เป็นมอเตอร์แบบ brushless รุ่น HIMAX HA2825 และ ทำการ หล่อซิลิโคน รอบมอเตอร์เพื่อป้องกันน้ำรั่วซึมเข้ามอเตอร์ โดยใช้ซิลิโคน ชนิด S885 ซึ่งมีคุณสมบัติทนแรงเสียดทานได้ดีมาก สามารถรับแรงที่กระทำซ้ำ (reproduction) ได้สูงมาก แม้พิมพ์ยางซิลิโคนที่ทำออกมาสามารถเก็บไว้ได้นานหลายปี (ตามสภาวะที่เก็บ) โดยมีการเตรียมอุปกรณ์การหล่อซิลิโคน ดังแสดงในรูปที่ 4.12โดยวิธีการใช้งาน ของยางซิลิโคน ชนิด S885 มี 4 ขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.12 ชุดอุปกรณ์สำหรับหล่อยางชิลิโคน

1) ก่อนการใช้งานยางชิลิโคน ทำการเตรียมยางโดยการปั่นด้วยสว่านไฟฟ้า ประมาณ 5 ถึง 10 นาที (ถ้าไม่มีสว่านไฟฟ้าสามารถเทยางชิลิโคนใส่ภาชนะในปริมาณที่ต้องการใช้ แล้วคนด้วยมือได้โดยอาจใช้อุปกรณ์ที่สะอาด เช่น แท่งเหล็ก หรือตะเกียบ)



รูปที่ 4.13 แสดงขั้นตอนการผสมกาว

2) อัตราส่วนการผสมยางชิลิโคนกับตัวเร่ง คือ 2% (ยางแต่ละชนิดอาจมีอัตราส่วนการผสมที่แตกต่างกัน) หมายถึง ใช้ยาง 100 ส่วน ต่อ สารทำการแข็งตัว 2 ส่วน แล้วค่อยๆ เทสารทำการแข็งตัว และ คนผสมให้ทั่วๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก

3) ระยะเวลา ในการแข็งตัว หลังจากผสมกับ สาร ทำการ แข็งตัวแล้ว ต้องทิ้งไว้ ประมาณ 90 นาที เนื้อยางจะเริ่มแข็งตัวเป็นของแข็ง ซึ่งช่วงเวลาหลังจากนี้ จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลง

รูปร่างของยางได้แล้วต้องปล่อยให้ยางแข็งตัวเท่านั้น จากนั้นปล่อยให้ไวอีกประมาณ 24 ชม. ชิ้นงานจึงจะแห้ง (หรือเป็นช่วงเวลา Cure Time) หลังจากนั้นจึงจะสามารถใช้งานได้



รูปที่ 4.14 มอเตอร์หล่ออย่างซิลิโคน

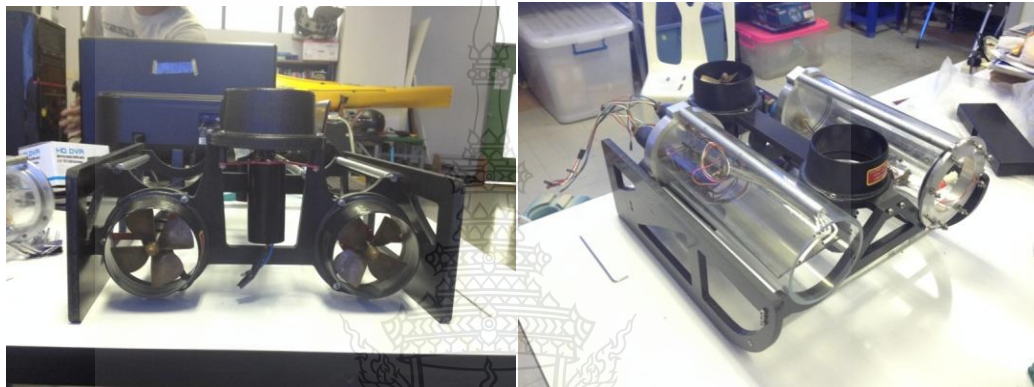
4) ทดสอบการขับเคลื่อนของมอเตอร์หลังจากการหล่ออย่างซิลิโคน โดยจุ่มลงในน้ำที่มีความลึก 1 เมตร ผลการทดสอบมอเตอร์จะสามารถหมุนได้เป็นปกติ และตรวจสอบไม่พบฟองอากาศที่เกิดจากการรั่วซึม

4.7.3 ขั้นตอนการประกอบ โครงสร้างของ หุ่นยนต์ที่ได้สร้างขึ้นตามการออกแบบ รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในกล่องกันน้ำ



รูปที่ 4.15 การประกอบโครงสร้างของหุ่นยนต์ดำน้ำ (ซ้าย) การประกอบชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนและถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ (ขวา)

ขั้นตอนแรกทำการประกอบโครงสร้างของ หุ่นยนต์ดำน้ำ ดังรูปที่ 4.15 ขั้นตอนที่สอง ประกอบมอเตอร์เข้ากับโครงสร้าง และประกอบ ชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ลงในถังเก็บ ดังรูปที่ 4.16 จากนั้นทำการปิดฝาด้านท้าย ที่กันน้ำด้วยโอริง ให้แน่น ส่วนฝาปิดด้านหน้าหรือโดม (Dome) จะเป็น ส่วนสุดท้ายสุดในการประกอบ ยึดเข้ากับโครงสร้างของหุ่นยนต์ดำน้ำ เพราะ โดมได้ถูกออกแบบมา เพื่อง่ายต่อการถอดประกอบและสามารถกันน้ำได้ด้วย นอกจากนั้นแล้วในการเปลี่ยนโปรแกรมของ ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นแต่ละครั้งก็ต้องทำการถอดโดมออกด้วยเช่นกัน ดังแสดงรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 การประกอบโครงสร้างกับเข้ากับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน (ซ้าย) และ การประกอบถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับหุ่นยนต์ดำน้ำ (ขวา)



รูปที่ 4.17 หุ่นยนต์ดำน้ำที่ได้ประกอบเสร็จแล้ว พร้อมใช้ในการทดสอบ

4.7.4 การควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ค้ำน้ำด้วยจอยสติ๊ก

ในส่วนที่ 2 นั้นจะเป็นการทดสอบเซนเซอร์และการเชื่อมอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์ค้ำน้ำ การควบคุมหุ่นยนต์ค้ำน้ำที่ได้สร้างขึ้นนี้ จะใช้จอยสติ๊กในการ ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนทั้งสี่ตัวอย่างเป็นอิสระแก่กัน ผ่านสายรับ -ส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino ในหุ่นยนต์ค้ำน้ำ และ ไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino ที่อยู่บนฝั่ง โดยใช้ในการรับ -ส่งสัญญาณผ่านพอร์ตอนุกรม (serial port) ในการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นจะทำการ เพิ่ม/ลด ค่าพัลส์ (Pulse) เพื่อปรับค่าในการควบคุมความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 4.18 โดยที่ผู้บังคับสามารถสามารถเลือกการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวคิ่งเป็นแบบบังคับด้วยมือ (MANUAL) หรือ แบบรักษาระดับความลึกแบบอัตโนมัติ (AUTO)



รูปที่ 4.18 แผนภาพการบังคับมอเตอร์ขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ค้ำน้ำด้วยจอยสติ๊ก

4.7.5 การทดสอบควบคุม ชุดไคฟ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ขับเคลื่อน

ในการควบคุมความเร็วการหมุนของ มอเตอร์ ขับเคลื่อน นั้นได้ใช้ ชุดไคฟ์ ควบคุมความเร็ว (Speed Control) ยี่ห้อ dragon รุ่น 70A โดยจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่สร้างขึ้นจากไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino เพื่อไปป้อนให้กับ ชุดไคฟ์ยี่ห้อ dragon และ คำสั่ง (POS) จากไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino แต่เนื่องจาก Speed Control ยี่ห้อ dragon สามารถขับเคลื่อนให้มอเตอร์ brushless หมุนได้ทางเดียว ดังนั้นหุ่นยนต์จึงสามารถบังคับให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างเดียวและบังคับให้ค้ำน้ำลงได้ทางเดียวด้วยเช่นกัน เมื่อต้องการให้หุ่นยนต์ค้ำน้ำลอยตัวกลับมาที่ผิวน้ำก็ทำการหยุดการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อน

ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่สร้างขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เปรียบเทียบกับคำสั่ง (POS) จากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

| | Speed control | Start | | หมุนขวา | | หมุนซ้าย | |
|---------|---------------|--------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | Aduino | Pulse | Aduino | Pulse | Aduino | Pulse |
| | | POS | (ms) | POS | (ms) | POS | (ms) |
| Motor 1 | Dragon | 50 | 1.1 | 90 | 1.5 | 130 | 1.9 |
| Motor 2 | Dragon | 50 | 1.1 | 90 | 1.5 | 130 | 1.9 |
| Motor 3 | Dragon | 50 | 1.1 | 90 | 1.5 | 130 | 1.9 |
| Motor 4 | Dragon | 50 | 1.1 | 90 | 1.5 | 130 | 1.9 |

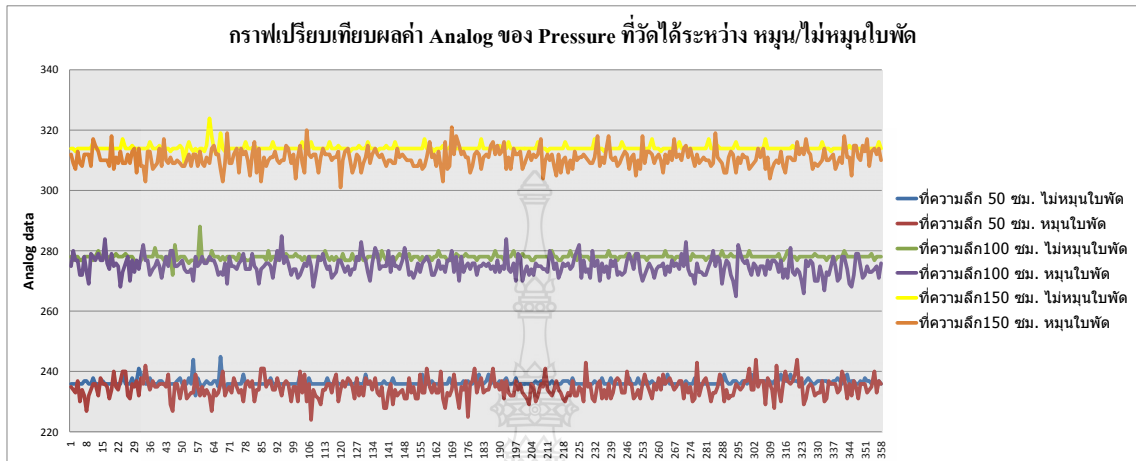
4.7.6 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน

หลังจากทำการต่อท่อจากเซนเซอร์วัดความดันเข้ากับฝักก้นน้ำของถังอะคริลิก และเชื่อมต่อบอร์ดขยายสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลมายัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ ควบคุม โดยสัญญาณที่ได้รับมาเป็นสัญญาณแบบอะนาล็อก (Analog) เมื่อทดสอบการรับส่งสัญญาณได้ แล้วจึงทำการประกอบ ถังอะคริลิกก้นน้ำที่เก็บแผงวงจรควบคุม ไว้ภายใน ในการทดสอบการวัดค่าความลึกได้ ทำการผูกเชือกเข้ากับถังอะคริลิก พร้อมกับถ่วงน้ำหนัก แล้วนำไปหย่อนลงในน้ำแล้ว บันทึกค่าสัญญาณ ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน

ในการทดลองนี้จะเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน ในกรณีเมื่อไม่มีกระแส น้ำารบกวหรือใบพัดมอเตอร์ไม่หมุน กับ ในกรณีที่มีกระแส น้ำารบกวหรือใบ พัด มอเตอร์เกิดการผลักดันน้ำเข้ามารบกว ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อในกรณีที่ใบพัดมอเตอร์ไม่หมุนสัญญาณแบบอะนาล็อก ที่วัดได้จากเซนเซอร์ วัดความดัน นั้นจะคงที่ๆระดับความลึกที่ต่างกัน โดยไม่มีสัญญาณรบกว แต่เมื่อมีการขับเคลื่อนใบพัด ค่าความดัน (Pressure) ที่อ่านค่าได้เกิดการแปรปรวนอันเนื่องจากกระแส น้ำ สัญญาณแบบอะนาล็อกที่วัดได้จากเซนเซอร์จะเกิดการสั่น โดยได้สรุปค่าเฉลี่ยของค่าสัญญาณแบบอะนาล็อกที่ได้ ไว้ในตารางที่ 4.2

เพื่อนำค่าสัญญาณแบบอะนาล็อก ที่วัดได้จากเซนเซอร์ วัดความดัน มาแปลงเป็นระดับความลึกที่หุ่นยนต์ดำน้ำวัดได้ ข้อมูลที่วัดได้เซนเซอร์นั้นเป็นแบบเชิงเส้นที่อธิบายด้วยสมการ

เส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (4.5)-(4.7) โดยมีค่าความชันเฉลี่ยของสมการเป็น $m_p = 1.31406$ และค่าตัดแกนตั้ง $C_p = -258$



รูปที่ 4.19 กราฟการทดสอบเพื่อหาค่าความเที่ยงตรงของเซนเซอร์ความดัน

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าวัดความดันกับตัวถังที่อ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

| Analog data "pressure" | ที่ความลึก 50 ซม. | | ที่ความลึก 100 ซม. | | ที่ความลึก 150 ซม. | |
|---------------------------|-------------------|-----------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|
| | ไม่หมุนใบพัด | หมุนใบพัด | ไม่หมุนใบพัด | หมุนใบพัด | ไม่หมุนใบพัด | หมุนใบพัด |
| Max | 245 | 244 | 288 | 285 | 324 | 321 |
| Min | 232 | 224 | 272 | 265 | 309 | 301 |
| Rang | 13 | 20 | 16 | 20 | 15 | 20 |
| Ave | 236.5 | 234.6 | 277.9 | 274.9 | 314.2 | 310.7 |

นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาหาสมการเชิงเส้น $y_p = m_p x_p + C_p$

ที่ระยะ 50 ซม. Microcontroller อ่านค่าได้ = 234.6 จะได้สมการเชิงเส้นเป็น

$$50 = (234.6)m_p + C_p \quad (4.7)$$

ที่ระยะ 150 ซม. Microcontroller อ่านค่าได้ = 310.7 จะได้สมการเชิงเส้นเป็น

$$150 = (310.7)m_p + C_p \quad (4.8)$$

สามารถหา m_p โดยนำสมการที่ (4.7)-(4.8) จะได้ $m_p = 1.31406$

สามารถหา C_p แทน m ลงในสมการที่(4.8)ได้ $C_p = -258$

ดังนั้นจะได้สมการเส้นตรงของแรงดันกับตัวถังที่อ่านด้วย Microcontroller คือ

$$y_p = 1.31406x_p - 258 \quad (4.9)$$

4.7.7 ทดสอบการทำงานเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล

เพื่อประมวลผลหาค่าองศาการหันเหของหุ่นยนต์ค่าน้ำได้ใช้เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลมาช่วยในการวัดการหันเห โดยได้ทำการวัดค่าที่ได้จากเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลหรือมุมวัดองศาเทียบกับทิศเหนือของโลกซึ่งได้ผลความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตารางทดสอบการทำงานเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลอ่านค่าโดย Microcontroller

| องศาเทียบกับทิศเหนือของโลก (องศา) | ค่าที่วัดได้จาก Microcontroller |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 232 |
| 90 | 225 |
| 180 | 198 |
| 270 | 112 |

จากตารางที่ 4.4 จะสามารถหาสมการแบบเชิงเส้น หรือ สมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\text{ที่ } 90 \text{ องศา เมื่อแทนค่าจะได้สมการอยู่ในรูป } 90 = 225x + C_c \quad (4.10)$$

$$\text{ที่ } 180 \text{ องศาเมื่อแทนค่า จะได้สมการอยู่ในรูป } 180 = 198x + C_c \quad (4.11)$$

สามารถหาความชัน (m_c) โดยนำสมการที่ (4.10)-(4.11) จะได้ $m_c = -3.33333$

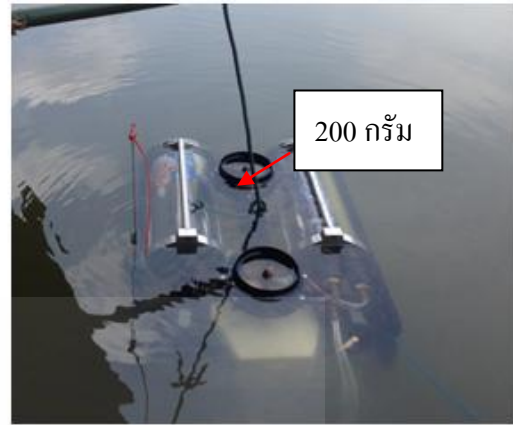
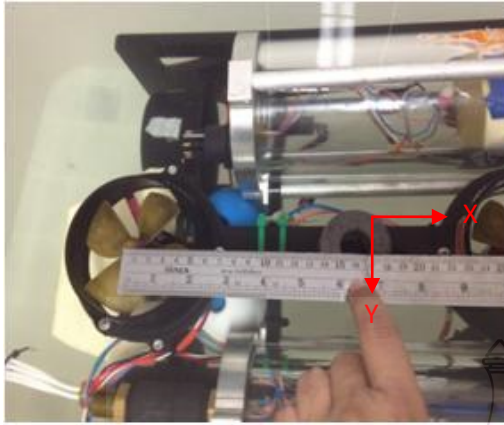
สามารถหาค่าตัดแกนตั้ง C_c แทน m_c ลงในสมการที่(4.11) ได้ $C_c = 840$

ดังนั้นจะได้สมการเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านโดย Microcontroller คือ

$$y_i = -3.33333x_i + 840 \quad (4.12)$$

4.7.8 ทดสอบหาจุดหมุนที่อยู่ระหว่างใบพัดของหุ่นยนต์ค่าน้ำในแนวตั้ง

ทำการทดสอบเพื่อหาจุดหมุนของหุ่นยนต์ค่าน้ำ ที่เกิดจากโมเมนต์ของมอเตอร์ ที่ทำให้เกิดการก้ม-เงยในแนวตั้ง หรือ การหมุนรอบแกน y โดยวางค้อนน้ำหนักขนาด 200 กรัมบนโครงหุ่นยนต์ค่าน้ำดังรูปที่ 4.20 แล้วสังเกตการหมุนของหุ่นยนต์ค่าน้ำในแนวตั้ง และทำการย้ายตำแหน่งที่วางค้อนน้ำหนักตามแนวแกน x ไปเรื่อยๆ จนได้จุด ที่ หุ่นยนต์ค่าน้ำลอยตัวขนานกับผิวน้ำพอดี และทำการวัดค่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงค้อนน้ำหนัก



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งวางน้ำหนักซ้ายและขวาวิธีการสังเกตหุ่นยนต์ดำน้ำในแนวตั้ง

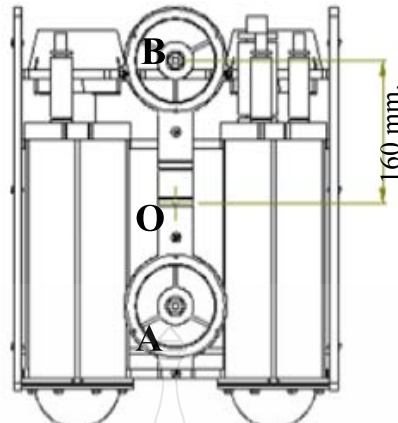
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงผลการถ่วงน้ำหนักในแนวแกน x ดังรูปที่ 4.21

| ตำแหน่งถ่วงน้ำหนัก ในแนวแกน x(ซม.) | รูปแบบการเคลื่อนที่ ในแนวตั้ง(แกนz) |
|---------------------------------------|--|
| 150 | ส่วนหัวของหุ่นกระดกขึ้น |
| 155 | ส่วนหัวของหุ่นกระดกขึ้น |
| 160 | ส่วนหัวและส่วนท้ายอยู่ในระนาบ |
| 165 | ส่วนท้ายของหุ่นกระดกขึ้น |

จากผลการทดสอบ เราจะได้ระยะจากจุดหมุนถึงจุดที่วางค้ำน้ำหนักหรือ จุด B มีค่าเท่ากับ 16 เซ็นติเมตร เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของใบพัดทางด้านหลัง ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งเมื่อเทียบกับระยะจากจุดหมุนถึงจุด B เดิมที่ได้ออกแบบไว้ 17.5 เซ็นติเมตร มีค่าต่างกันอยู่ 8.6 % เนื่องมาจากการทำชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ดำน้ำ และการประกอบที่มีค่าผิดพลาดไปบ้างจากที่ได้ออกแบบไว้

ที่ระยะ OB เท่ากับ 16 เซ็นติเมตร และระยะ OA เท่ากับ 11.5 เซ็นติเมตรนำมาเขียนสมการควบคุม 2 ใบพัดในแนวตั้งได้คือ

$$115T_2 - 160T_1 = e_0G \quad (4.13)$$

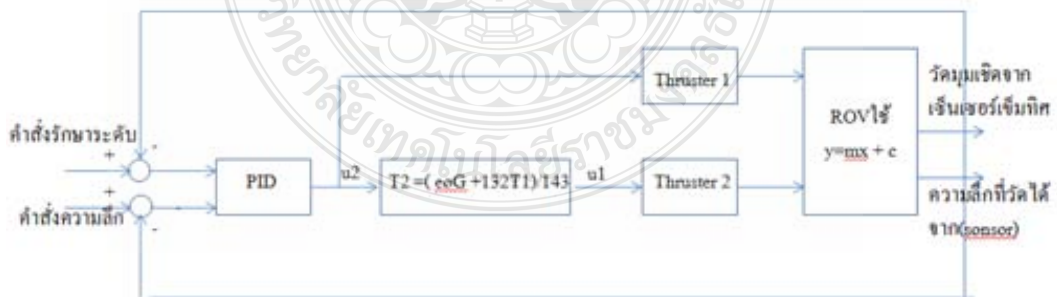


รูปที่ 4.21 แสดงระยะห่างจากจุด O ถึงจุด B ที่ส่วนหัวและส่วนท้ายอยู่ในระนาบ

4.8 การออกแบบระบบควบคุม PID และการทดสอบการเคลื่อนที่ เฉพาะในแนวตั้ง ของ หุ่นยนต์ใต้น้ำ

4.8.1 ออกแบบระบบควบคุม PID สำหรับมอเตอร์สองตัว ในแนวแกน Z

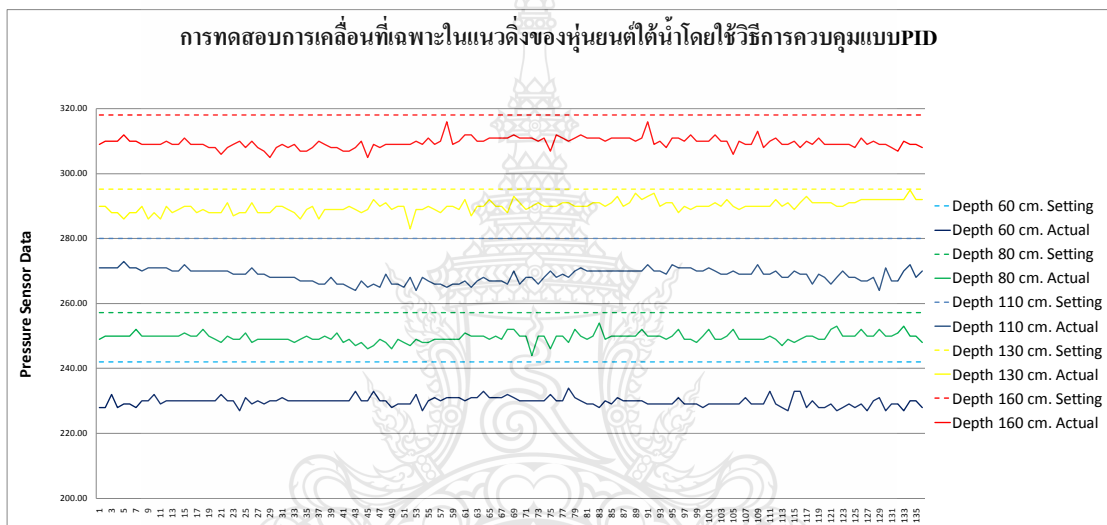
ในการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) เพื่อใช้ในการควบคุมการหมุนของ 2 ใบพัดในแนวตั้งและ ที่สามารถ หมุน ได้ทิศทางเดียว คือ ผลักให้หุ่นยนต์ดำน้ำลง โดยใช้ Pressure sensor เป็นตัววัดระดับความลึกเพื่อใช้ในการ ป้อนกลับ ในระบบควบคุมความลึกด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี โดยให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวประมวลผลเพื่อรักษาระดับความลึก ตามคำสั่งที่ต้องการ และ ใช้ค่าที่ได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ ควบคุมการหมุนของ 2 ใบพัดในแนวตั้งโดยแยกอิสระจากกันเพื่อรักษาความสมดุลของหุ่นยนต์ในแนวราบ



รูปที่ 4.22 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) สำหรับควบคุมการหมุนของ 2 ใบพัดในแนวตั้ง หรือ ในแนวแกน Z

จากรูปที่ 4.23 ระบบควบคุมแบบ PID จะทำงานเมื่อได้รับคำสั่งความลึก และสั่งให้ใบพัดที่ตัวที่ 1 หมุนด้วยแรงผลึก u_2 และใบพัดที่ตัวที่ 2 ด้วยแรงผลึก u_1 ซึ่ง $u_1 = T_2$ โดยหาได้จากหัวข้อที่ 4.7.8 และเมื่อหุ่นเริ่มดำลงเราจะใช้ สมการเส้นตรงของแรงดัน กับตัวถังที่อ่านด้วย Microcontroller ดังสมการที่ 4.9 และสมการเส้นตรง ความสัมพันธ์ระหว่าง เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัล ดังสมการที่ 4.12 ส่งข้อมูลป้อนกลับให้คอนโทรลเลอร์ประมวลผลเพื่อรักษาระดับ

4.8.2 การทดสอบการรักษาระดับความลึกในแนวตั้งของหุ่นยนต์ใต้น้ำโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID) ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino



รูปที่ 4.23 การแสดงข้อมูลสัญญาณแบบอะนาล็อกที่ป้อนกลับค่าจากเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) ที่อ่านด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 4.23 ค่าความดัน (Pressure) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดความดัน ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ระยะความลึก 60 ซม., 80 ซม., 110 ซม., 130 ซม. และ 160 ซม. ที่กำหนดด้วยคำสั่ง (setting) เมื่อเทียบกับค่าความลึกที่วัดได้จาก เซนเซอร์วัดความดัน จะพบว่าการแกว่งไปมาโดยมีค่าความคลาดเคลื่อน ของระดับความลึกที่ไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ค่า $K_p = 1$ $K_d = 0.1$ $K_i = 0.01$ เนื่องจาก เซนเซอร์ มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกระแสน้ำ ที่มาจากใบพัด และ Speed Control ที่นำมาใช้ควบคุมมอเตอร์ในการทดลองนี้ สามารถ หมุนได้ทางเดียว จึงทำให้ ไม่สามารถเลี้ยงระดับความลึกให้ใกล้เคียงกับค่าคำสั่งได้

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลจำลองระบบควบคุม

5.1.1 ผลจำลองระบบควบคุมความลึก ของยานดำน้ำ VideoRay ด้วยระบบควบคุม แบบ พีไอดี (PID)

- การปรับอัตราขยายแบบสัดส่วน (k_p) ให้เพิ่มขึ้นช่วยทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไวขึ้น แต่ก็จะทำให้การกวัดแกว่ง (overshoot) ที่สูงขึ้นด้วย

- การปรับอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (k_d) ให้เพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงแต่จะสามารถลดผลตอบสนองที่เป็นกวัดแกว่ง (overshoot) ลงได้

- การปรับอัตราขยายแบบปริพันธ์ (k_i) ให้เพิ่มขึ้นนั้นจะช่วยขจัดความผิดพลาด ในช่วงคงที่ตอนท้าย (stead-state error)

ค่าอัตราขยายที่เหมาะสม ที่เลือก ใช้ในการควบคุมความลึกแบบ PID คือ $k_p=15$, $k_d=8$ และ $k_i=20$ ซึ่งมีผลตอบสนองไวและมีค่าการกวัดแกว่ง (overshoot) น้อย

5.1.2 ผลจำลอง ระบบควบคุม ระดับความลึก ของยานดำน้ำ VideoRay ด้วยระบบควบคุม แบบสไลดิงโหมด (SMC)

การปรับ อัตราขยายของการสวิตช์ (K) ให้สูงขึ้นจะช่วยทำให้ผลตอบสนองไวขึ้น และลู่อู่เข้าหาค่าตั้งได้รวดเร็วและยังจะช่วยลดค่าความผิดพลาดในช่วงท้ายให้น้อยลงการเพิ่มค่า การ ถ่วงน้ำหนักของความผิดพลาด λ ช่วยให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลทำให้ คลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแกน z น้อยลงแต่แรงที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ก็ จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ $27N$

ค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในการทดลองคือ $K=25$, $\lambda=5$ และ $k_d=10$ ซึ่งตอบสนอง ไวที่สุด และ ไม่มีการกวัดแกว่ง (overshoot) เลย

5.1.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมระดับความลึกแบบ PID กับ แบบ SMC ในส่วนของเวลาที่ทำให้ค่าความผิดพลาดลู่อู่เข้าศูนย์

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมแบบ PID และ SMC จะเห็นว่าระบบควบคุมแบบ SMC มี ผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิดการกวัดแกว่ง (overshoot) เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID แม้ว่าจะ มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่มากระทำกับสัญญาณป้อนกลับ

5.1.4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ต่อผลการแปรปรวนของพารามิเตอร์ M_{33} และ Z_w และ Z_{ww} เป็นปริมาณ +20% และ +50% จากค่าประมาณ

ในกรณีที่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ทางอุทกพลศาสตร์ที่แน่นอน เช่น M_{33}, Z_w และ Z_{ww} พร้อมกันหลายๆตัวระบบควบคุมแบบ PID และ SMC จะมีผลตอบสนองที่ช้าลง แต่สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC มีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการหักล้างของเทอมแบบไม่เชิงเส้นที่มาจากพจน์ที่มีค่าอุทกพลศาสตร์นั้นไม่ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะปรับอัตราขยายที่ดีที่สุดแล้ว ซึ่งต่างจากระบบควบคุมแบบ PID ที่ยังสามารถควบคุมความลึกในระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ หรือระบบควบคุมแบบ PID นั้นจะไม่ไวต่อตัวแปรที่ไม่รู้ค่า นอกจากนั้นจะเห็นได้ว่า

5.1.5 การเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแบบ PID กับ การควบคุมแบบ SMC ในการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ

ในกรณีนี้ว่าการเคลื่อนที่ใน 3 มิตินั้นเกิดได้จากการควบคุมแรงในแกน x และ z และโมเมนต์รอบแกน z ไปพร้อมกันโดยจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ทั้งในระนาบ xy และระดับความลึกมีค่าน้อยมาก โดยที่ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองในการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ที่ไว และ แรงขับจากระบบควบคุมทั้งสองแบบนี้จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5.2 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ในการทดลองสร้างหุ่นยนต์ดำน้ำ มี 2 ใบพัดในแนวตั้ง และ อีก 2 ใบพัดในแนวราบ ที่สามารถหมุนได้ทางเดียว และ โครงสร้างหุ่นสามารถดำน้ำลึกได้มากที่สุด 7 เมตรตามความยาวของสายที่ควบคุมโดยใช้จอยสติ๊ก และ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการควบคุมความเร็วของใบพัดทั้ง 4 ใบ และมีเซนเซอร์วัดความดันเพื่อป้องกันค่าระดับความลึก โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดจะถูกเก็บไว้ในถังที่กั้นน้ำ 2 ถังที่ติดตั้งอยู่ทางด้านบนของหุ่นยนต์ดำน้ำ เพื่อสร้างแรงลอยตัวและเสถียรภาพในการลอยตัว

ผลการทดสอบ

5.2.1 ผลการทดสอบการรั่วซึมของถังเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ทดสอบการรั่วซึมไม่พบจุดรั่วซึมทดสอบโดยการทดสอบจุ่มหุ่นยนต์ดำน้ำไว้ที่ระดับความลึก 1 เมตรเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5.2.2 การหล่อซิลิโคนสำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนและการทดสอบการกันน้ำ

ทำการหล่อซิลิโคนรอบมอเตอร์เพื่อป้องกันน้ำรั่วซึมเข้ามอเตอร์ โดยใช้ซิลิโคน ชนิด S885 ซึ่งมีคุณสมบัติทนแรงฉีกขาดได้ดีมาก สามารถรับแรงที่กระทำซ้ำ (reproduction) ได้สูงมาก เมื่อ

หล่อเสร็จแล้วได้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนของมอเตอร์หลังจากการหล่ออย่างซิลิโคน โดยจุ่มลงใน น้ำที่ความลึก 1 เมตร ผล การทดสอบมอเตอร์จะ สามารถหมุนได้เป็นปกติ และ ตรวจสอบ ไม่พบ ฟองอากาศเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์ทำงานที่เกิดอาจเกิดจากการรั่วซึม

5.2.3 การทดสอบควบคุม ชุดโคไฟซ์มอเตอร์ขับเคลื่อน

ในการควบคุมความเร็วการหมุนของ มอเตอร์ ขับเคลื่อน นั้นได้ใช้ ชุดโคไฟซ์ ควบคุม ความเร็ว (Speed Control) ยี่ห้อ dragon รุ่น 70A โดยจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง สัญญาณพัลส์ (Pulse) เมื่อสัญญาณพัลส์ อยู่ระหว่าง 1.1-1.5 ms โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่า ความ กว้างพัลส์ได้ระหว่าง 50-90 แต่เนื่องจากชุดควบคุมความเร็ว (Speed Control) ยี่ห้อ dragon สามารถ ขับเคลื่อนให้มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (brushless) หมุนได้ทางเดียว ดังนั้นหุ่นยนต์จึงสามารถ บังคับให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้อย่างเดียวและบังคับให้ดำนน้ำลงได้ทางเดียวด้วยเช่นกัน เมื่ ้อต้องการ ให้หุ่นยนต์ดำน้ำลอยตัวกลับมาที่ผิวน้ำก็จะทำการหยุดหมุนมอเตอร์ขับเคลื่อนในแนวตั้งทั้งสอง

5.2.4 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความดัน

ผลการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน ในกรณีเมื่อไม่มี กระแสน้ำรบกวนหรือใบพัดมอเตอร์ไม่หมุน กับ ในกรณีที่มีกระแสน้ำมารบกวนหรือใบพัดมอเตอร์ เกิดการปลักน้ำเข้ามารบกวน ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อในกรณีที่ใบพัดมอเตอร์ไม่หมุนสัญญาณ แบบอะนาล็อก ที่วัด ได้จากเซนเซอร์ วัดความดัน นั้นจะ มีค่าคงที่ๆระดับความลึกที่ต่างกัน โดยไม่มี สัญญาณรบกวน แต่เมื่อมีการขับเคลื่อนใบพัด ค่าความดัน (Pressure) ที่อ่านค่าได้เกิดการแปรปรวน อันเนื่องมาจากกระแสน้ำ สัญญาณแบบอะนาล็อก ที่วัด ได้จากเซนเซอร์จะเกิดการสั่น กลับไปกลับ มา ตลอดเวลา

5.2.5 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล

ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล จะได้ สมการเส้นตรง ของ ความสัมพันธ์ระหว่าง องศาการหันเหของ เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล เทียบกับ สัญญาณแบบอะ นาล็อกที่อ่านโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถเขียนเป็นสมการ $y_1 = -3.33333x_1 + 840$ สมการที่ ได้เมื่อนำมาประยุกต์ใช้งานจะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเล็กน้อย

5.2.6 ทดสอบหาจุดหมุนที่อยู่ระหว่างใบพัดของหุ่นยนต์ดำน้ำในแนวตั้ง

จากผลการทดสอบ เราจะได้ระยะจากจุดหมุนถึงจุดที่วางค้ำน้ำหนักมีค่าเท่ากับ 16 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางของใบพัดทางด้านหลัง ซึ่งเมื่อเทียบกับระยะจากจุดหมุนถึงจุด ที่ ต้องถ่วงค้ำน้ำหนัก เดิมที่ได้ออกแบบไว้คือ 17.5 เซนติเมตรซึ่งมีค่าต่างกันอยู่ 8.6 % เนื่องมาจากการ ทำชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ดำน้ำ และการประกอบที่มีค่าผิดพลาดไปบ้างจากที่ได้ออกแบบไว้

5.2.7 การทดสอบการรักษาระดับความลึก ในแนวตั้ง ของหุ่นยนต์ใต้น้ำ โดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีไอดี (PID) ผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

ค่าความดัน (Pressure) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดความดัน เมื่อเทียบกับค่าความลึกที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความดัน จะพบว่ามีการแกว่งไปมา โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของระดับความลึกที่ไม่เกิน ± 5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ค่า $K_p = 1$ $K_d = 0.1$ $K_i = 0.01$ เนื่องจากเซนเซอร์มีสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะกระแสน้ำที่มาจากใบพัด และ ชุดควบคุมความเร็ว (Speed Control) ที่นำมาใช้ควบคุมมอเตอร์ในการทดลองนี้สามารถหมุนได้ทางเดียวจึงทำให้ไม่สามารถเลี้ยงระดับความลึกให้ใกล้เคียงกับค่าคำสั่งได้

5.3 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา

5.3.1 มอเตอร์ขับเคลื่อนรุ่นเดียวกัน แต่แรงและประสิทธิภาพนั้นไม่เท่ากัน ทำให้ต้องมีการปรับแต่งค่าคำสั่ง (Calibration) ก่อนการนำไปใช้งาน เพื่อจะหาค่า สัญญาณพัลส์ (Pulse) ที่ทำให้ความเร็วรอบใบพัดที่เท่ากัน

5.3.2 เซนเซอร์วัดมุมเอียงอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากการสั่นสะเทือนจากภายนอก ดังนั้นจึงควรมีการปรับเทียบ ค่าองศาการหันเห (Calibration) ของเซนเซอร์ทุกครั้งก่อนทำการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.3.3 ชุดไคฟ์ขับเคลื่อน มุมไม่ได้ทิศทางเดียวทำให้การควบคุมมีค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้นในอนาคตจึงควรจะต้องเลือกใช้ชุดไคฟ์ขับเคลื่อนที่สามารถหมุนได้สองทาง

บรรณานุกรม

- [1] Wai Wang.(2006) Autonomous of a Differential Thrust Micro ROV. Master's thesis, University of Waterloo, of Ontario, Canada 2006.
- [2] สุรศักดิ์ ทิมพิทักษ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัตน์.(2012) “Remotely Operated Vehicle with Depth Control” paper presented in the 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering 24-27 October 2012, ChiangRai Thailand.
- [3] Zhaodong Tang, Jiajia Zhou, XinqianBian and Heming Jia. (2010).Simulation of optimal integralsliding mode controller for the depth control of AUV. Proceedings of the 2010, IEEE International Conference on Information and Automation June 20 - 23, Harbin, China.
- [4] Heping Liu, Zhenbang Gong.(2008).“Upper Bound Adaptive Learning of Neural Network for the Sliding Mode Control of Underwater Robot” ICACTE '08. International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering,20-22 Dec.2008, Phuket Thailand.
- [5] ภัคพงศ์ จันทเปรมจิตต์. (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 .
- [6] Kunchit, N. andPrempraneerach, P. (2011). Experimental Estimation of Hydrodynamics Coefficients of Underwater Vehicle using Constant Towing Force, paper presented in *RSU Research Conference 2012*, Pathumthani, Thailand
- [7] T. I. Fossen and S. I. Sagatun. Adaptive control of nonlinear systems: A case study of underwater robotic systems. *Journal of Robotic Systems*, 8(3):392—412, 1991.

บรรณานุกรม(ต่อ)

- [8] Oser J. and Blemings H. (2009). Practical Arduino, ISBN: 987-1-4302-2478-5, United States of America.
- [9] เซนเซอร์วัดความเร่ง, เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม, เข็มทิศดิจิทัล เข้าถึงได้จาก <http://www.pololu.com/catalog/product/1265>
- [10] “คุณสมบัติArduino.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>(7 เมษายน 2555)
- [11] “ไครม์อเตอร์และมอเตอร์ขับเคลื่อน Crust Crawler.” [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.crustcrawler.com> (7 เมษายน 2555)
- [12] อติศักดิ์ ชินะวงศ์. 2543. มอเตอร์กระแสตรง. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.adisak51.com/page21.html>(17 มกราคม 2554).

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Program Brochure and Abstracts of
National Research Conference 2014



รวมบทคัดย่อ
การประชุมวิชาการระดับชาติ
3 เมษายน 2557

แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ
และวิทยาศาสตร์สุขภาพ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาปัตยกรรมศาสตร์และการออกแบบ
มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
วิจัยพัฒนาการเรียนการสอน
วิจัยสถาบัน

คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2557

1. ดร.อาทิตย์ อุไรรัตน์ ที่ปรึกษา
อธิการบดี มหาวิทยาลัยรังสิต
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรฐพัทธ์ พันธราธร ที่ปรึกษา
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยรังสิต
3. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุสรณ์ ธรรมใจ ประธานกรรมการ
รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยรังสิต
4. ศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ สินลารัตน์ กรรมการ
รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต
5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดวงฤดี ศุภคิมส์โร กรรมการ
รองอธิการบดีด้านวิจัยและบริการวิชาการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
6. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักคณา วรศิลป์ชัย กรรมการ
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการวิจัย และพัฒนานวัตกรรม
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปานเพชร ชินินทร กรรมการ
รองอธิการบดี (ด้านวิชาการและวิจัย)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์จุฑามาศ พีรพัชระ กรรมการ
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
9. รองศาสตราจารย์บุญเกียรติ ไทรชมพู่ กรรมการ
รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
10. รองศาสตราจารย์ ดร.บุญศรี พรหมมาพันธุ์ กรรมการ
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
11. รองศาสตราจารย์ ดร.สมโรตม์ โกมลวนิช กรรมการ
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

คณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2557(ต่อ)

- | | | |
|-----|---|---------------------|
| 12. | รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย พณานานนท์ ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนา วิทยาลัยราชพฤกษ์ | กรรมการ |
| 13. | อาจารย์ ดร.กรวิก พรนิมิต รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ วิทยาลัยอินเตอร์เทคลำปาง | กรรมการ |
| 14. | อาจารย์ ดร.มลิวัลย์ ประดิษฐ์ธีระ ผู้อำนวยการสำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยรังสิต | กรรมการ |
| 15. | อาจารย์กิตติศักดิ์ ไตรพิพัฒพรชัย ผู้อำนวยการสำนักงานมาตรฐานวิชาการ มหาวิทยาลัยรังสิต | กรรมการ |
| 16. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์อารีรัตน์ แย้มเกษร ผู้อำนวยการศูนย์สนับสนุนและพัฒนากาเรียนการสอน มหาวิทยาลัยรังสิต | กรรมการ |
| 17. | อาจารย์ศรรัตน์ จำปาน้อย ผู้อำนวยการสำนักงานทะเบียน มหาวิทยาลัยรังสิต | กรรมการ |
| 18. | อาจารย์เบญจา สันติชนานนท์ ผู้อำนวยการสำนักงานธุรกิจสัมพันธ์ | กรรมการ |
| 19. | อาจารย์วัชระ ลอยสมุทร ผู้อำนวยการศูนย์บริการวิชาการ | กรรมการ |
| 20. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์จันทร์ อยู่แพทย์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต | กรรมการและเลขานุการ |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ

สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

1. ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อ่านเปรื่อง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. รองศาสตราจารย์ ดร.คณิต วัฒนวิเชียร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิม เรืองวิริยะชัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
4. รองศาสตราจารย์ ดร.ชญาบุช แสงวิเชียร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
5. รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
6. รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธิดารัตน์ บุญศิริ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศ ประทีนทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา หาญศุภลักษณ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา สวงนิตย์ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พัฒน์ พิเศษจูเกษม มหาวิทยาลัยรังสิต
12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเลิศ โชติพันธ์รัตน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
13. อาจารย์ ดร. อุกฤษฏ์ วัชรฤทธิ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
14. อาจารย์ ดร.ไชยวัฒน์ กล้าพล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
15. อาจารย์ ดร.ภัทราวดี มากมี มหาวิทยาลัยบูรพา
16. อาจารย์ ดร.อรวิทย์ อุปลัมภานนท์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
17. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา จันทร์ประเสริฐ มหาวิทยาลัยรังสิต
18. รองศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย ทองแป้น มหาวิทยาลัยรังสิต
19. รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ งามสม มหาวิทยาลัยรังสิต
20. รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส สัจจศิริรัตน์ มหาวิทยาลัยรังสิต
21. รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิมล อารยะปราณี มหาวิทยาลัยรังสิต
22. รองศาสตราจารย์ ดร.เสรี สุภราทิตย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
23. รองศาสตราจารย์ สมาน เสนงาม มหาวิทยาลัยรังสิต
24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกวิท รพีพิศาล มหาวิทยาลัยรังสิต
25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวรรณ อัสวไพบูลย์ มหาวิทยาลัยรังสิต

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ(ต่อ)

- | | | |
|-----|--|-------------------|
| 26. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนิดา สามพรานไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 27. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล จันทร์สว่าง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 28. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เล็กเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 29. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.सानนท์ นิยมฉวี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 30. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ญาณวุฒิ สุพิชญางกูร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 31. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ ศิริรัตนันตร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 32. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปัญญา มณีจักร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 33. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ รักษาติ แสงวงศ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 34. | อาจารย์ ดร.กฤษฎา ศรีแผ้ว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 35. | อาจารย์ ดร.เกรียง กิจบำรุงรัตน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 36. | อาจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 37. | อาจารย์ ดร.วรรณิ เอกศิลป์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 38. | อาจารย์ ดร.วรุตม์ เอมอคม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 39. | อาจารย์ ดร.สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 40. | อาจารย์ ดร.อาภากร วัฒนะ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 41. | อาจารย์ ต่อศักดิ์ อุทัยไผ่ฟ้า | มหาวิทยาลัยรังสิต |

Proceedings of National Research Conference 2014

งานประชุมวิชาการระดับชาติ ประจำปี 2557

ISBN 978-616-7687-23-0

วันพฤหัสบดีที่ 3 เมษายน 2557

ณ ห้อง Auditorium ชั้น 2 อาคารดิจิทัล มัลติมีเดีย คอมเพล็กซ์ (อาคาร 15) มหาวิทยาลัยรังสิต



มหาวิทยาลัยรังสิต
Rangsit University



เครือข่ายวิจัยประชาชน
Professional Research Network

คำนำ

กำหนดการ

หัวข้อ

ดัชนีผู้แต่ง

ดัชนีคำสำคัญ

ความช่วยเหลือ

เยี่ยมชมเว็บไซต์

Search

Go!

ดัชนีผู้แต่ง

ผู้แต่ง: **ธนพงศ์ ทองโชติ** พบจำนวน 11 บทความ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID และ SMC
Automated Motion Control of Underwater Robot Using PID and SMC Control

ธนพงศ์ ทองโชติ, ปรัชญา เปรมปราชญ์ชัยดี

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ดำน้ำ, การควบคุมความลึก, ระบบควบคุมแบบไฮโดรตึงโรบอท

Copyright © 2014 Rangsit University



การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID และ SMC

Automated Motion Control of Underwater Robot Using PID and SMC Control

ธนพงศ์ ทองโชติ^{1*} และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²

Thanapong Tongchote^{1*} and Pradya Prempraneerach²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²อาจารย์ที่ปรึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

*Corresponding author Email: thanapongtm@gmail.com

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบ VideoRayIII นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพที่มีความแปรปรวนเช่น กระแสน้ำ นอกจากนั้นระบบควบคุมต้องสามารถลดค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตามความเร็วที่กำหนดให้มีค่าน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ สำหรับการเคลื่อนที่ในระนาบ x,y นั้นใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID) ส่วนในการควบคุมความลึกหรือการเคลื่อนที่ในแกน z จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมแบบ Sliding Mode Control (SMC) และ PID โดยใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRayIII และจะทำการหาค่า Parameter ที่ดีที่สุดในการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของทั้ง 2 แบบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากผลการจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ดำน้ำ ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID แต่ในกรณีที่มีการแปรปรวนของค่าพารามิเตอร์ของพลศาสตร์ M_{33} , Z_w และ Z_{ww} ที่เพิ่มขึ้นพร้อมกันระบบควบคุมแบบ PID และ SMC จะมีผลตอบสนองที่ช้าลง ระบบควบคุมแบบ SMC จะมีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการหักล้างของเทอมที่มีค่าอุทกพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้นนั้น ไม่ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์ต่างจากระบบควบคุมแบบ PID ยังสามารถควบคุมความลึกในระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำนอกจากนั้นได้จำลองการเคลื่อนที่ใน 3 มิติโดยใช้การควบคุมทั้งในระนาบและความลึกพร้อมกันเพื่อควบคุมแรงในแกน x และ z และ โมเมนต์รอบแกน z ทำให้หุ่นยนต์ดำน้ำเคลื่อนที่ตามเส้นทางใน 3 มิติ

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ดำน้ำ การควบคุมความลึก ระบบควบคุมแบบสไลด์คิงโหมด

Abstract

The objective of this research is to design a control system capable of operating a dynamic model of a VideoRay underwater robot effectively in an uncertain environment such as undersea with a strong current. Furthermore, the control system must exhibit a small tracking error when given specified paths. In this research, a Proportional Integral Derivative (PID) controller controls the horizontal motion in the xy plane and a comparison between the PID control and the Sliding Mode Control (SMC) is examined for vertical motion or depth control. The depth control dynamic simulation results show that the PID controller had less steady-state errors than the SMC controller, but the tracking response of the SMC controller was much faster with a similar thrust magnitude. When multi-hydrodynamic parameters like M_{33} , Z_w and Z_{ww} were uncertain, the PID and SMC controllers exhibited poor performance and slow response. The SMC controller could not reduce the tracking error to zero because of the non-perfect cancellation of the nonlinear hydrodynamic terms, but the PID controller was still able to maintain the same depth level. Moreover, motion in 3D requires simultaneously controlling the horizontal motion and depth. Therefore, force in x,y directions and the moment around the z axis must be generated by the controller to enable the 3D motion of the underwater robot to be controlled.

Keywords: *underwater robot, depth control, sliding mode control*

1. บทนำ

ปัจจุบันเรือดำน้ำถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เราสร้างเรือดำน้ำขนาดเล็กที่สามารถดำน้ำในระดับที่ลึกมาก เพื่อทำงานเฉพาะกิจ เช่น การสำรวจซากเรือโบราณ การวางสายเคเบิลใต้น้ำ การหาร่องรอยของแผ่นดินไหวและการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตใต้ทะเล ซึ่งทำให้มนุษย์เราสามารถจะเข้าถึงโลกใต้ทะเลที่เราไม่เคยสัมผัสมาก่อน หุ่นยนต์ใต้น้ำ VideoRay III (Wang, 2006) ในรูปที่ 1 (บน) ได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอนและในแนวแกนตั้งแยกกันอย่างอิสระเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายโดยการติดตั้งเซนเซอร์ต่างๆ เช่น เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำ หรือ

เซนเซอร์คลื่นเสียง Timpitak and Prempraneerach (2012) ได้ออกแบบหุ่นยนต์ดำน้ำขับเคลื่อนด้วยลิโบพัคและควบคุมบังคับทิศทางโดยใช้จอยสติ๊กแบบมีสายควบคุมการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์จะถูกควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ พร้อมกับใช้เซ็นเซอร์วัดความดัน วัดความเร็ว และวัดมุมเอียง นอกจากนี้ภายในหุ่นยนต์ยังมีกล้องวิดีโอติดอยู่ ทำให้สามารถส่งภาพขึ้นมาที่จอมอนิเตอร์เพื่อให้ผู้ควบคุมที่อยู่บนบกทราบถึงสภาพแวดล้อมใต้น้ำและองศาการหันเห ทั้งนี้ หุ่นยนต์ดำน้ำสามารถใช้ทำการสำรวจได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม โดยมีระบบการควบคุมระดับความลึกให้คงที่ได้ในระดับความลึกที่ไม่เกิน 10 เมตร

Tang et al. (2010) จำลองการควบคุมความลึกของหุ่น AUV ด้วยวิธีการ Optimal Integral Sliding Mode Controller (ISMC) ผลการทดลองแสดงให้เห็น

ว่า การควบคุมความลึกแบบ ISMC ตอบสนองได้ไว และมีเปอร์เซ็นต์ของ overshoot ที่น้อยกว่าการควบคุมความลึกแบบPID แต่การควบคุมแบบ PID จะสามารถควบคุมpitch angle ได้ดีกว่า

Liu and Gong (2008) ได้จำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำที่มีการขับเคลื่อนในแนวตั้งด้วยสองใบพัดที่ติดตั้งในแนวตั้งและขับเคลื่อน ไปด้าน หน้าและบังคับการหันเหด้วยอีกสองใบพัดที่ติดตั้งในแนวนอน โดยใช้การควบคุมแบบ SMC และ ทดสอบการเคลื่อนที่ในสระว่ายน้ำ



รูปที่ 1 หุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRayIII (WaiWang, 2006) (บน) และ หุ่นยนต์ ดำน้ำควบคุมระยะไกล (ภคพงศ., 2011) (ล่าง)

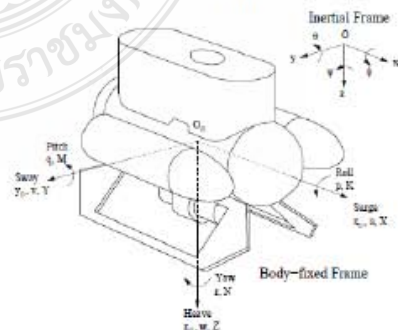
Jantapremjit (2011) ได้นำเสนอวิธีการการควบคุมแบบสไลด์มอดสำหรับหุ่นดำน้ำแบบAUVที่มีประสิทธิภาพและมีค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ น้อยนอกจากนั้น Jantapremjit (2011) ได้ออกแบบและ พัฒนาหุ่นดำน้ำควบคุมระยะไกลด้วยระบบขับเคลื่อน 4 ชุดดังแสดงในรูปที่ 1 (ล่าง) ผู้ควบคุมจะใช้จอยสติ๊ก กำหนดการเคลื่อนที่ได้ 3 แบบคือ เคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวตั้ง เดินหน้า-ถอยหลัง หันซ้าย-หันขวา โดยมีชุด

คอนโทรลเลอร์สำหรับการควบคุมและรับข้อมูลจาก เซ็นเซอร์คือเซ็นเซอร์วัดความดันความเร่งและมุมเอียง และเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งมีกล้องวิดีโอที่ สามารถรับภาพได้น้ำมายังผู้ใช้ งานเพื่อเก็บข้อมูล และมีระบบแสงสว่างสำหรับงานในที่มืด โดยหุ่นมีน้ำหนัก ประมาณ 15 กิโลกรัม

2. วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบ xy โดยจะใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative Control (PID) ส่วน ระบบควบคุมระดับความลึกในแนวแกน z จะใช้สอง เทคนิคการควบคุมแบบ Sliding Mode Control (SMC) และ PID เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสีย ระหว่างสองเทคนิค โดยจะใช้แบบจำลองทางพลศาสตร์ ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRayIII และจะหาผลลัพธ์การ ทดสอบระบบควบคุมทั้งสองแบบเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ของ หุ่นยนต์ดำน้ำและทดสอบการควบคุมใน 3 มิติ เมื่อใช้ การควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบแบบ PID

3. สมการพลศาสตร์ของหุ่นดำน้ำ และ ระบบควบคุม



รูปที่ 2 การตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำ VideoRayIII (Wang, 2006)

ศึกษาพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ สำหรับการเคลื่อนที่เมื่อมี 6 องศาอิสระในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ที่ขับเคลื่อนด้วยใบพัดสามใบ ทางด้านท้ายมีสองใบพัด วางขนานกับแนวนอนเพื่อใช้เดินหน้าหรือถอยหลัง และ บังคับการหันเหส่วนอีกหนึ่งใบพัดในแนวตั้ง เพื่อใช้ในการเคลื่อนขึ้นหรือลง โดยจะทำการศึกษาสมการพลศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ที่มีขนาดความกว้าง 0.35 เมตร ยาว 0.36 เมตร และ สูง 0.23 เมตร ในรูปที่ 2 แสดงการตั้งแกนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมใน 6 องศาอิสระ โดยมีจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์อยู่ที่พิกัด O_0 เมื่อเทียบกับระบบพิกัดเฉื่อยในกรอบอ้างอิง O

สมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำได้ถูกพัฒนาและนำเสนอในหลายรูปแบบในการศึกษานี้เราจะพิจารณาสมการพลศาสตร์แบบหกองศาอิสระจาก Fossen (1994) ดังในสมการที่ (1) และ (2)

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

$$\eta = J(\eta)v \quad (2)$$

เมื่อเวกเตอร์ $v = [u, v, w, p, q, r]^T$, $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$, $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$ โดยที่เวกเตอร์ v ประกอบด้วยความเร็วเชิงเส้น (u, v, w) และ ความเร็วเชิงมุม (p, q, r) ในแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 ส่วนเวกเตอร์ η ประกอบด้วยตำแหน่ง (x, y, z) และองศาการหมุน (φ, θ, ψ) รอบแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 และส่วนเวกเตอร์ τ คือแรงในแนวเชิงเส้น (X, Y, Z) และ โมเมนต์ในแนวเชิงมุม (K, M, N) ที่กระทำรอบแนวแกนอ้างอิงเมื่อเทียบกับระบบพิกัด O_0 โดยที่เมทริกซ์ $J(\eta)$ คือเมทริกซ์จาโคเบียน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม, $M =$

$M_{RB} + M_A$ คือเมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia) ร่วมกับมวลรวมของน้ำ $M_A C(v) = C(v)_{RB} + C(v)_A$ คือเมทริกซ์ของความเร่งแบบคอริโอลิส (Coriolis) รวมทั้งแรงเหวี่ยงเพิ่มของน้ำ $D(v) = D_{quad}(v) + D_{lin}(v)$ คือเมทริกซ์ของความหน่วง (Damping), และ $g(\eta)$ คือเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการควบคุมแยกกันอิสระในแต่ละแนวแกนเพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมโดยใช้สมมุติฐานที่ว่า

1) แรงลอยตัวกับน้ำหนักของหุ่นยนต์จะต้องสมดุลกันเสมอซึ่งจะทำให้หุ่นอยู่ในจุดสมดุลที่มีมุม roll(θ, p) และ pitch(θ, q) มีค่าเท่ากับศูนย์

2) ผลกระทบที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คาน้ำคือคลื่น แรงลอยตัว และ โมเมนต์การหันเห

3.1 ศึกษาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน

ในส่วนแรกจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในระนาบแนวนอน เมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ที่หน้าหรือหลัง (u) และ ความเร็วของการเคลื่อนที่ซ้ายหรือขวา (v) และ การหมุนรอบแกน Z (r) ที่ประกอบด้วยสมการดังนี้

$$m_{11}\dot{u} = -m_{22}vr + X_u u + X_{u|u}|u| + X \quad (3)$$

$$m_{22}\dot{v} = -m_{11}ur + Y_v v + Y_{v|v}|v| \quad (4)$$

$$I_r \dot{r} = N_r r + N_{r|r}|r| + N \quad (5)$$

เมื่อ m_{11} คือความเฉื่อยในแนวแกน X , m_{22} คือความเฉื่อยในแนวแกน Y, I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน $Z, X_u, X_{u|u}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางที่พุ่งไปข้างหน้าปะทะคลื่นแรง, และ $Y_v, Y_{v|v}$ คือค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์ในสมการเชิงเส้นและกำลังสองทิศทางด้านข้างและ X คือแรงภายนอกที่กระทำที่เกดขึ้นมาจากแรงคลื่นที่เข้าปะทะทางด้านหน้า และ N คือแรงบิด

ภายนอกที่กระทำกับหุ่นยนต์รอบแกน Z โดยค่าคุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRay ในแสดงในตารางที่ 1 และ 2 ทางด้านล่างนี้

ตารางที่ 1 คุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRayIII

| Parameter | Value | Units | Description |
|-----------|---------|-------------------|-------------------|
| L | 0.36 | M | Vehicle Length |
| W | 0.35 | M | Vehicle Width |
| H | 0.23 | M | Vehicle Height |
| I_{xx} | 0.02275 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| I_{yy} | 0.02391 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| I_{zz} | 0.02532 | kg.m ² | Moment of Inertia |
| F_{tf} | 36 | N | Thrust Force |

ตารางที่ 2 (ต่อ) คุณสมบัติต่างของหุ่นยนต์ VideoRayIII

| | | | | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Added Mass | X_{ij} | Y_{ij} | Z_{ij} | K_{p_i} | M_{q_i} | M_{r_i} |
| Analytical | 1.94 | 6.05 | 3.95 | 3.26×10^7 | 1.72×10^7 | 3.21×10^7 |
| Linear drag coefficient | X_{ij} | Y_{ij} | Z_{ij} | K_{p_i} | M_{q_i} | N_{r_i} |
| Analytical | 2.30 | 8.01 | 5.81 | 0.0009 | 0.0012 | 0.0043 |
| Quadratic drag coefficient | $X_{ij ij}$ | $Y_{ij ij}$ | $Z_{ij ij}$ | $K_{p_i ij}$ | $M_{q_i ij}$ | $N_{r_i ij}$ |
| Analytical | 8.28 | 23.69 | 20.32 | 0.0042 | 0.0069 | 0.0089 |

3.2 ศึกษาสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

ในส่วนที่สองจะศึกษาการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์คาน้ำ VideoRayIII ในระนาบแนวตั้งเมื่อพิจารณาความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลง(ในแนวแกน z) มีสมการดังนี้

$$m_{33}\dot{w} = Z_w w + Z_{w|w}|w| + Z \quad (6)$$

เมื่อ m_{33} คือความเฉื่อยในแนวแกน(z), Z_w คือค่าสัมประสิทธิ์ทางอุทกพลศาสตร์(Hydrodynamics)ในสมการเชิงเส้น $Z_{w|w}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ อุทกพลศาสตร์ในทิศทางลอยตัวกำลังสอง, Z คือแรงยกตัวจากภายนอกที่กระทำกับหุ่นยนต์

3.3 ระบบควบคุมหุ่นยนต์คาน้ำ

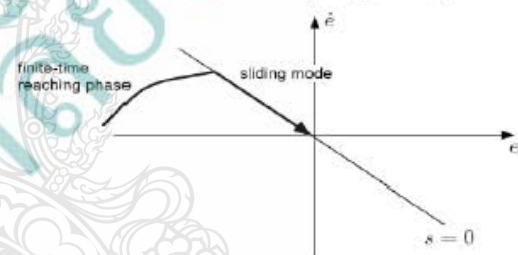
3.3.1 การควบคุมแบบ PID เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน ร่วมกับแบบอินทิกรัล และ ร่วมกับแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกัน โดยมีสัญญาณผิดพลาดเป็นอินพุต

ในการจับเคลื่อน $e(t)$ และ สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุม $u(t)$ เพื่อใช้บังคับแรงผลักจากมอเตอร์ ดังสมการที่ (7)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงสัดส่วน, K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล, และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์

3.3.2 การการควบคุมแบบ SMC หลักการของวิธีการควบคุมแบบสไลด์คั้ง คือ การควบคุมผลรวมตัวแปรค่าผิดพลาด ($s = \dot{e} + \lambda e$) ให้เคลื่อนที่เข้าสู่ระนาบสไลด์คั้ง (Sliding Plane) เมื่อตัวแปรค่าผิดพลาดเข้าสู่ระนาบสไลด์คั้ง และถูกควบคุมให้เคลื่อนที่อยู่บนระนาบสไลด์คั้งในทิศทางการเข้าสู่ศูนย์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กราฟแสดงการเคลื่อนที่แบบสไลด์คั้งโมด

สมการเคลื่อนที่ในแนวตั้งในสมการที่ (6) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$m\ddot{\eta} + d_1\dot{\eta} + d_2|\dot{\eta}| = \tau \quad (8)$$

เมื่อ m, d_1 และ d_2 คือตัวแปรที่ไม่ค่าที่แน่นอน ดังนั้นในการออกแบบกฎการควบคุม (Control Law) จะใช้ Lyapunov Function (V) ซึ่งจะมีเงื่อนไขของเสถียรภาพของระบบ ก็ต่อเมื่อ 1. $V > 0$ เสมอ และ 2. $\dot{V} \leq 0$ เสมอดังนั้นถ้าพิจารณา Lyapunov Function เป็น $V = \frac{1}{2}m\dot{s}^2$ โดยที่ $V = \frac{1}{2}m\dot{s}^2 > 0$ เสมอและเพื่อให้เงื่อนไข $\dot{V} = m\dot{s}\dot{s}$ เป็นจริงจะจัดรูปแบบสมการที่(8) ใหม่และอนุพันธ์ของผลรวมค่าความผิดพลาด แล้ว

$$\tau = m\dot{\eta}_r + d_1\dot{\eta} + d_2|\dot{\eta}| - K_d s - K_p \text{sgn}(s) \quad (9)$$

เมื่อ K_d = ค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วง (Damping coefficient) ($K_d > 0$), K = ค่าอัตราขยายของการสวิทช์ (switching gain), m = ค่าประมาณของ m , \hat{d}_1 = ค่าประมาณของ d_1 , \hat{d}_2 = ค่าประมาณของ d_2 และ

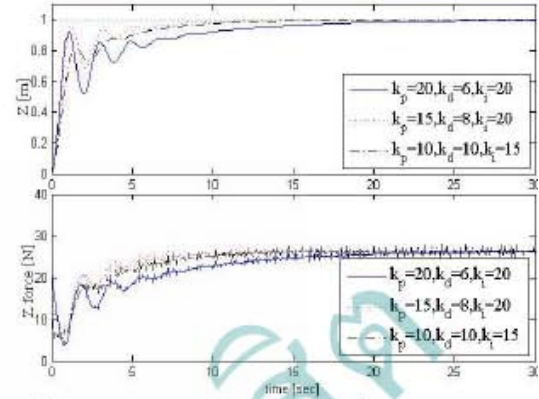
$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ -1 & \text{กรณีอื่นๆ} \end{cases}$$

นอกจากนั้นค่าความคลาดเคลื่อน (e) ในการเคลื่อนที่ตามตัวแปรอ้างอิงที่กำหนด (η_d) เป็น $e = \eta - \eta_d$ แล้ว $\dot{e} = \dot{\eta} - \dot{\eta}_d$ เมื่อกำหนดให้ $\dot{\eta}_r = \dot{\eta}_d - \lambda e$

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

4.1 ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID

ในระบบควบคุมแบบ PID มีอัตราขยายด้วยกันสามตัวหลัก คือ k_p , k_d , และ k_i จึงได้ทำการปรับค่าตัวแปรอัตราขยายเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ในแกน z หรือ ควบคุมระดับความลึก ขั้นแรกได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบสัดส่วน (k_p) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 ตามลำดับซึ่งจะช่วยทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ก็ทำให้ overshoot ที่สูงขึ้นเช่นกัน ลำดับที่สองได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (k_d) ให้เพิ่มขึ้นจาก 6 เป็น 8 และ 10 เมื่อให้ค่า $k_p = 15$ การเพิ่มค่า k_d นั้นจะทำให้ผลตอบสนองช้าลงแต่จะสามารถลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot ลำดับที่สามได้ทำการทดลองปรับอัตราขยายแบบปริพันธ์ (k_i) ให้เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 15 และ 20 เมื่อให้ค่า $k_p = 15$ และ $k_d = 8$ นั้นจะช่วยจัดความผิดพลาดในช่วงคงที่คอนท่าย (steady-state error) เมื่อได้ปรับค่าอัตราขยายที่เหมาะสมจะสามารถช่วยลดผลตอบสนองที่เป็น overshoot และมีค่าความผิดพลาดคอนท่ายเป็นศูนย์



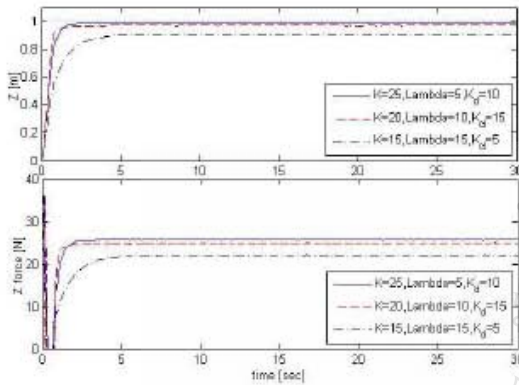
รูปที่ 4 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย k_i , k_p และ k_d

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่นำมาเลือกใช้ในการควบคุมความลึกแบบ PID คือ $k_p = 15$, $k_d = 8$ และ $k_i = 20$ ซึ่งมีผลตอบสนองไวและ overshoot น้อย

4.2 ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ SMC

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุดในการเคลื่อนที่ในแกน z สำหรับการควบคุมแบบ SMC จะทำการปรับค่าอัตราขยายขั้นแรก ปรับค่าอัตราขยาย $K = 15$, 20 และ 25 ตามลำดับ ขั้นที่สองปรับค่าอัตราขยาย $\lambda = 5$, 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K = 25$ ที่ดีที่สุดขั้นที่สามปรับค่าอัตราขยาย $k_d = 5$, 10 และ 15 โดยเลือกค่า $K = 25$, $\lambda = 5$ ที่ดีที่สุดจากรูปที่ 5 จะแสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในการทดลองคือ $K = 25$, $\lambda = 5$ และ $k_d = 10$ ซึ่งตอบสนองไวที่สุด และ ไม่มี overshoot

0



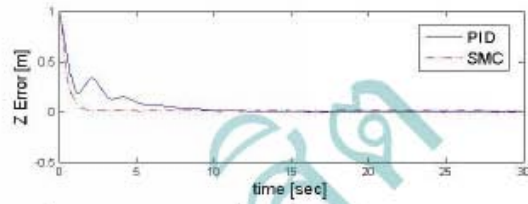
รูปที่ 5 ผลตอบสนองต่อคำสั่งแบบ step เมื่อปรับค่าอัตราขยาย K , λ และ k_d

ผลอัตราขยายของการสวิทช์ (K) ให้สูงขึ้นจะช่วยทำให้ผลตอบสนองไวขึ้นและเข้าสู่ค่าสั่งได้รวดเร็ว และยังจะช่วยลดค่าความคิดพลาดในช่วงที่ขยับน้อยลงการเพิ่มค่า λ ช่วยให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีผลทำให้คลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแกน z น้อยลงแต่แรงที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 27N ดังนั้นต้องเลือกค่าอัตราขยายให้เหมาะสม สมแต่สังเกตได้ว่าแรงของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ยิ่งมากจะสามารถทำให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้นแต่ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการทดลองดังนั้นในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของ VideoRayIII จึงได้ใส่ฟังก์ชัน Saturation ของแรงผลึกจากใบพัดไว้ไม่เกิน ± 36 N ซึ่งได้ระบุในคุณสมบัติของใบพัดขับเคลื่อน

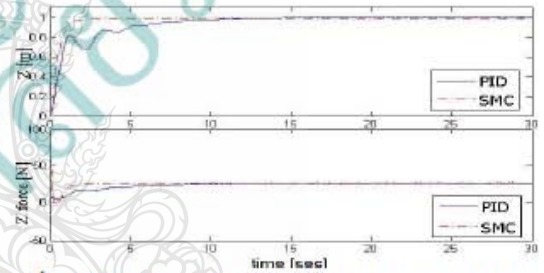
4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการควบคุมระดับความลึกแบบ PID กับแบบ SMC ในส่วนของเวลาที่ให้ค่าความคิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์

ในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม ที่มีช่วงการรบกวนระหว่าง ± 0.001 m มากจะทำกับ ตำแหน่งของหุ่นดำน้ำในแนวแกน Z ดังนั้นควบคุมแบบ PID

ที่มีค่า $k_p= 15$, $k_d = 8$, และ $k_i = 20$ จากหัวข้อ 4.1 และการควบคุมแบบ SMC ที่มีค่า $K = 25$ และ $\lambda = 5$ จากหัวข้อ 4.2 เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ลึกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างฉับพลัน



รูปที่ 6 เปรียบเทียบเวลาที่ให้ค่าความคิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์ สำหรับระบบควบคุมแบบ PID และแบบ SMC



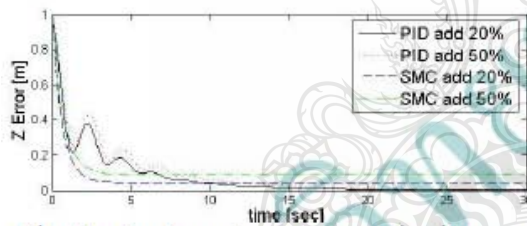
รูปที่ 7 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อระดับความลึกนั้นถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน เช่น กระแสน้ำ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบ SMC จะตอบสนองเร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PID ส่งผลทำให้ค่าความคิดพลาดของระดับความลึกเข้าใกล้ศูนย์ได้ไวที่สุดแม้จะมีสัญญาณรบกวนมากจะทำดังในรูปที่ 7

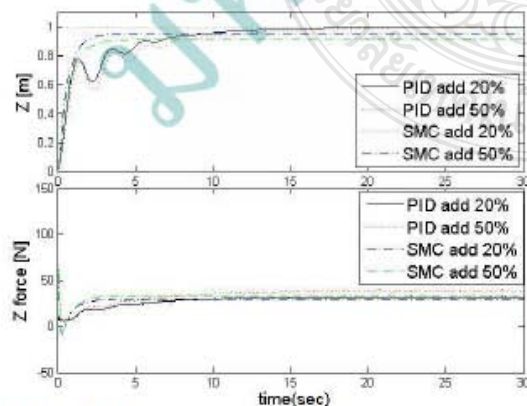
4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบควบคุมแบบ PID และ SMC ต่อผลการแปรปรวนของพารามิเตอร์ M_{33} และ Z_w และ Z_{ww} เป็นปริมาณ $+20\%$ และ $+50\%$ จากค่าประมาณ

เมื่อค่าพารามิเตอร์ของมวลและค่าสัมประสิทธิ์อุทกพลศาสตร์เพิ่มขึ้นจากค่าประมาณที่ใช้ในสมการ (9) เป็น 20% และ 50% เมื่อหุ่นดำน้ำถูกสั่ง

ให้เคลื่อนที่ตกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างจับปล้นจะทำให้ผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ช้าลงและจะเกิด overshoot มากขึ้นสำหรับระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งจะทำให้เข้าใกล้ศูนย์ได้ช้าลง สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC ก็จะมีผลตอบสนองที่ช้าลงและจะมีค่าความผิดพลาดของระดับความลึกในช่วงท้ายที่ไม่เป็นศูนย์ เนื่องจากทอมที่มีพจน์อุทกพลศาสตร์ในกฎการควบคุมซึ่งเป็นแบบไม่เชิงเส้นจะไม่หักล้างกับระบบพลศาสตร์ของหุ่นค้ำน้ำให้หมดไปได้แต่ข้อดีคือจะไม่เกิด overshoot ในการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 จะแสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมแบบ PID สามารถที่จะควบคุมความลึกที่เมตรแต่ ระบบควบคุมแบบ SMC จะไม่สามารถทำความลึกที่เมตรได้



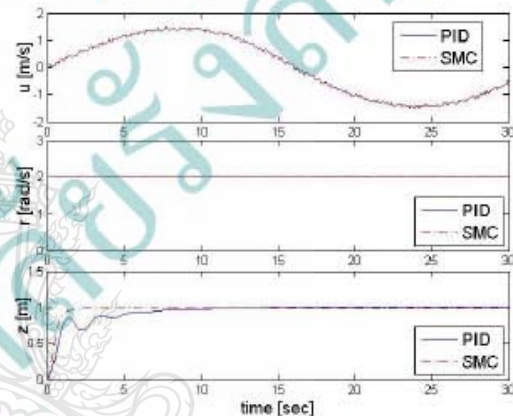
รูปที่ 8 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่ในแกน z เข้าใกล้ศูนย์ เมื่อใช้การควบคุมแบบ PID และ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33}, Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ



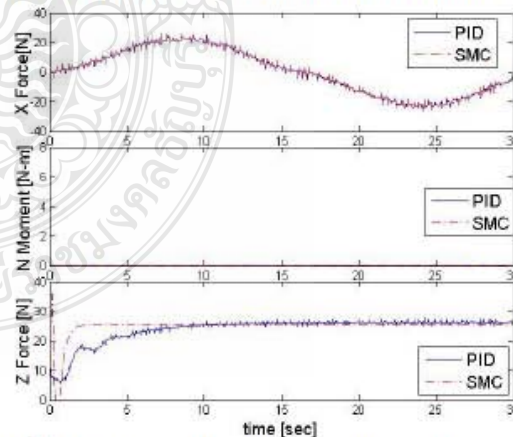
รูปที่ 9 เปรียบเทียบการควบคุมตำแหน่งในแนวแกน Z แบบ PID กับแบบ SMC เมื่อพารามิเตอร์ M_{33}, Z_w และ Z_{ww} นั้นเพิ่มขึ้นพร้อมกัน 20% และ 50% จากค่าประมาณ

4.5 การเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแบบ PID กับ การควบคุมแบบ SMC ในการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ

เมื่อกำหนดให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแนวแกน x หรือ u เป็นแบบแกว่งกลับไปมาแบบฟังก์ชัน sine และอัตราการหมุนเป็นแบบคงที่ 2 rad/s และ หุ่นค้ำน้ำถูกสั่งให้เคลื่อนที่ที่ลึกลงไปในน้ำ 1 เมตรอย่างจับปล้นและให้ค่าอัตราขยายเหมือนกับในหัวข้อที่ 4.4 ถ้าหุ่นยนต์ค้ำน้ำเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง



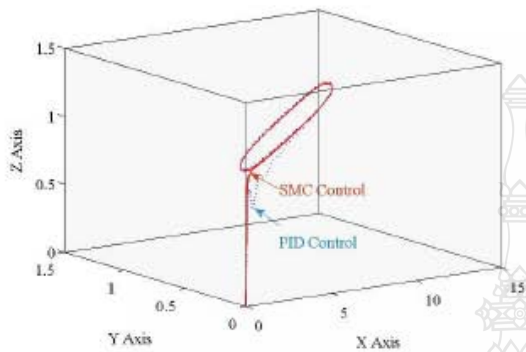
รูปที่ 10 ความเร็วในแนวแกน x (u), ความเร็วเชิงมุม (r) และการเคลื่อนที่ในแนวแกน z (w) จากการควบคุมแบบ PID และ SMC



รูปที่ 11 แรงในแกน x โมเมนต์รอบแกน z (N) และแรงในแกน z จากการควบคุมแบบ PID และ SMC

ผลที่ได้ดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 การเคลื่อนที่ในระนาบ xy จะเคลื่อนที่หมุนวนเหมือนวงรีและส่วนการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง จะเคลื่อนที่ไปยังระดับความลึก

1 เมตร ภายในเวลา 10 วินาที เมื่อถูกควบคุมด้วยระบบการควบคุมแบบ PID และแบบ SMC



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติ เมื่อใช้ระบบควบคุมระดับความลึกแบบ PID และ SMC

จากรูปที่ 12 จะแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม PID และ SMC สามารถรักษาระดับความลึกได้คงที่ 1 เมตร และจะเคลื่อนที่หมุนวนเป็นวงรีเนื่องจากมีค่าความเร็วเชิงมุมที่คงที่ $r = 2 \text{ rad/s}$ และ การเคลื่อนที่ในแกน X นั้นจะส่ายไป-มา โดยจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ทั้งในระนาบ xy และระดับความลึกมีค่าน้อยมาก โดยที่ระบบควบคุมแบบ SMC จะให้ผลตอบสนองในการเคลื่อนที่ในแนวแกน z ที่ไวและแรงขับจากระบบควบคุมทั้งสองแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

5. บทสรุป

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมแบบ PID และ SMC จะเห็นว่าระบบควบคุมแบบ SMC มีผลตอบสนองที่เร็วและไม่เกิด overshoot เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบ PID แม้ว่าจะมีสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่มากกระทำกับสัญญาณป้อนกลับแต่ในกรณีที่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ทางอุทกพลศาสตร์ที่แน่นอน เช่น M_{33} , Z_w และ Z_{ww} พร้อมกันหลายๆตัวระบบควบคุมแบบ PID และ SMC จะมีผลตอบสนองที่ช้าลง แต่

สำหรับระบบควบคุมแบบ SMC มีค่าความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการหักล้างของเทอมแบบไม่เชิงเส้นที่มาจากพจน์ที่มีค่าอุทกพลศาสตร์นั้นไม่ถูกหักล้างอย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะปรับอัตราขยายดีที่สูงสุดแล้วซึ่งต่างจากระบบควบคุมแบบ PID ที่ยังสามารถควบคุมความลึกในระดับที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ หรือ ระบบควบคุมแบบ PID นั้นจะไม่ไวต่อตัวแปรที่ไม่รู้ค่านอกจากนั้นจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ใน 3 มิตินั้นเกิดได้จากการควบคุมแรงในแกน x และ z และ โมเมนต์รอบแกน z ไปพร้อมกัน โดยระบบควบคุมทั้งสองแบบมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ในอนาคตจะนำระบบควบคุมทั้งแบบ SMC และ PID ไปประยุกต์ใช้งานกับหุ่นยนต์ดำน้ำจริงต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- 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.
- Timpitak, S. and Prempraneerach, P. (2012). "Remotely Operated Vehicle with Depth Control" paper presented in the 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering 24-27 October 2012, Chiang Rai Thailand.
- Liu H., Gong, Z.(2008). "Upper Bound Adaptive Learning of Neural Network for the Sliding Mode Control of Underwater Robot" ICACTE '08. International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, 20-22 Dec.2008, Phuket Thailand.

- Fossen, T. I. (1994). Book "Guidance and Control of Ocean Vehicles", ISBN: 0 471 94113 1 , John Wiley & Sons, New York.
- Wang, W. (2006). Autonomous of a Differential Thrust Micro ROV. Master's thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada 2006.
- Tang, Z. D. , Zhou J., Bian, X., and Jia, H. (2010). Simulation of optimal Integral sliding mode controller for the depth control of AUV. Proceedings of the 2010, IEEE International Conference on Information and Automation June 20 - 23, Harbin, China.



ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นาย ธนพงศ์ ทองโชติ |
| วัน เดือน ปีเกิด | 2 กรกฎาคม 2522 |
| ที่อยู่ | 15 หมู่ 12 ตำบล ศาลาลอย อำเภอ ท่าเรือ จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13130 |
| ประวัติการศึกษา | มัธยมต้น โรงเรียนท่าเรือ นิตยานุกูล ประกาศนียบัตรวิชาชีพ(ปวช) วิทยาลัยเทคนิค พระนครศรีอยุธยา ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(ปวส) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต พระนครเหนือ ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะทาง | วิเคราะห์และเขียน โปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ |
| ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ | ธนพงศ์ ทองโชติ,ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ “การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดำน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID และ SMC “Automated Motion Control of Underwater Robot Using PID and SMC Control” RSU_National Reserch Conference 2014, วันที่ 3 เมษายน 2014 ผลงานได้รับรางวัลวิจัยดีเด่น |