

ยานใต้น้ำควบคุมผ่านสายส่งระยะไกล 4 องศาอิสระ

4-DOF Remotely Operated Vehicle

ณรงค์ศักดิ์ ชุนชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ยานได้นำควบคุมผ่านสายส่งระยะไกล 4 องศาอิสระ

ณรงค์ศักดิ์ ชุนชิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ยานได้นำควบคุมผ่านสายส่งระยะไกล 4 องศาอิสระ 4-DOF Remotely Operated Vehicle
ชื่อ – นามสกุล	นายณรงค์ศักดิ์ ชุนจิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์พัฒนา ปราโมทย์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์ปานาน กุลวานิช, Ph.D.)

..... กรรมการ
(อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ
(อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ยานใต้น้ำควบคุมผ่านสายส่งระยะไกล 4 องศาอิสระ
ชื่อ – นามสกุล	นายณรงค์ศักดิ์ ขุนจิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบยานใต้น้ำที่เรียกว่า “BENBAM-G3” พร้อมศึกษาระบบควบคุม โดยยานสามารถเคลื่อนที่ได้ 4 องศาอิสระ คือ 1) หน้า-หลัง 2) ซ้าย-ขวา 3) ดำขึ้นลง และ 4) หมุนรอบแกนตั้ง โดยขอบเขตด้านสมรรถนะยานสามารถ 1) ความเร็วการเคลื่อนที่หน้า-หลัง และซ้าย-ขวา ไม่เกิน 0.5 m/s 2) หมุนรอบแกนตั้ง ± 180 องศา และ 3) ดำน้ำได้ลึก 2 เมตร

ขั้นตอนวิจัยเริ่มต้นจาก 1) ออกแบบตัวยานทั้งระบบทางกลและไฟฟ้าและสร้างชุดผลึกที่ให้แรงผลึก 6 N จำนวน 8 ชุด ทำหน้าที่เป็นอินพุตสร้างแรงขับเคลื่อน 2) ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ ด้วยวิธีแรงจุดคงที่และประมาณค่าด้วยเทคนิค least square และได้ค่ามวลเพิ่มจากน้ำ ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้นและค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสองที่เหมาะสมกับยานที่สุดคือ (424 kg, 24 Ns/m, 1416 N.(s/m)²) สำหรับการเคลื่อนที่เดินหน้า (454 kg, 127 Ns/m, 219 N.(s/m)²) สำหรับการเคลื่อนที่ด้านข้าง (908 kg, 254 Ns/m, 437 N.(s/m)²) สำหรับการเคลื่อนที่แนวตั้ง และ (15 kg.m², 4 N.s/rad, 6 N.(s/rad)²) สำหรับการหมุนรอบแกนตั้ง 3) ออกแบบระบบควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา และ ระบบควบคุมองศาการหันเห และรักษาระดับความลึก โดยใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ จากนั้นจำลองการเคลื่อนที่ด้วยสมการพลศาสตร์ในโปรแกรม MATLAB/Simulink และทดสอบการเคลื่อนที่ของยานจริงในสระน้ำ

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากการทดสอบ มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะกับยานจริง สามารถควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ที่ความเร็ว 0.03-0.05 m/s ภายในเวลา 2 วินาที หมุนรอบแกนแนวตั้งที่มุมเพิ่มทีละ 5 องศา ในเวลา 5 วินาที และได้ระดับความลึกทีละ 0.1 m ในเวลา 4 วินาที และจากการเปรียบเทียบตัวควบคุม PID กับตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ พบว่ามีผลตอบสนองไวและมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ระบบควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะ

Thesis Title	4-DOF Remotely Operated Vehicle
Name – Surname	Mr. Narongsak Khunchit
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Pradya Prempraneerach, Ph.D.
Academic Year	2014

ABSTRACT

The purposes of this thesis are to design a 4-DOF Remotely Operated Vehicle (ROV), which called “BENBAM-G3” and to study a control system for 4-DOF motion of ROV: 1) forward-backward motion, 2) turn left-turn right, 3) up-down motion and 4) rotate around vertical axis. The ROV performance capabilities are 1) velocity in surge and sway directions within 0-0.5 m/s, 2) ± 180 -degree rotation around vertical and 3) submerged depth of 2 meter.

Research procedures consist of 1) designing of ROV mechanical and electrical systems and constructing 8 thrusters with 6-N thrust force per thruster, acting as propulsion inputs and 2) experimental estimation of ROV hydrodynamics coefficients (HCs) using a least-square parameter estimation technique by towing ROV with constant forces. The most suitable HC estimation of this ROV including added mass, linear and quadratic dampings for surge motion, sway motion, heave motion and yaw motion are (424 kg, 24 Ns/m, 1416 N.(s/m)²), (454 kg, 127 Ns/m, 219 N.(s/m)²), (908 kg, 254 Ns/m, 437 N.(s/m)²), (15 kg.m², 4 N.s/rad, 6 N.(s/rad)²), respectively, 3) designing the speed controllers for surge and sway motion, heading and depth controllers using an state feedback control and then simulating dynamic motion within MATLAB/Simulink and performing a ROV experimental tests in the pool.

Using designed state-feedback controller with derived HCs, ROV velocity in surge and sway motions can ramp up from rest to 0.03-0.05 m/s with a settling time of 2 second. Heading control for 5-degree increment can be achieved within 5 second. Depth control for 0.1-meter increment can be done within 4 second. Comparing with the PID controller, the state-feedback controller yields faster response and has the steady-state error less than 20 percentage.

Keywords: remotely operated vehicle, hydrodynamic coefficient, state-feedback controller

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความกรุณาของ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ข้อเสนอแนะปรับปรุงแก้ไขส่วนต่างๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณสถาบัน ไทย-เยอรมัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ อุปกรณ์และเครื่องมือ สำหรับการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์และบุคลากรสถาบัน ไทย-เยอรมันทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และให้กำลังใจตลอดการทำวิจัย และที่ขาดไม่ได้คืออาจารย์คัมพลวง คำบุปผา ซึ่งได้สละเวลา และให้ความช่วยเหลือด้านการประกอบและการทดลอง ตั้งแต่เริ่มต้นทำการวิจัย จนสำเร็จได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างที่สุดมา ณ ที่นี้

ขอบคุณภรรยาและลูก พี่น้องและเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจมาโดยตลอด คุณความดีและประโยชน์อันใด จากงานวิจัยนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตาแก่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน และสุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้ เป็นอีกหนึ่งงานวิจัยด้านยานได้นำที่สามารถใช้เป็นแหล่งความรู้ และให้นักศึกษาวิจัยรุ่นต่อไปที่สนใจ ได้ใช้เป็นแนวทางวิจัย หรือพัฒนาต่อยอดงานวิจัย ให้ก้าวไกลได้ยิ่งขึ้น และหากงานวิจัยนี้ขาดตกบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัยขอกราบขอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การประยุกต์ใช้งานยานใต้น้ำ.....	4
2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 ประเภทของยานใต้น้ำ.....	8
2.4 ส่วนประกอบของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล.....	12
2.5 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบยานใต้น้ำ.....	15
2.6 พลศาสตร์ของยานใต้.....	19
2.7 ตัวควบคุมใหม่.....	28
2.8 ตัวควบคุมดั้งเดิม.....	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	32
3.1 ภาพรวมของการดำเนินการวิจัย.....	36
3.2 ภาพรวมการออกแบบยานใต้.....	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การออกแบบและสร้างต้นแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล BENBAM-G2.....	39
3.4 การออกแบบและสร้างต้นแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล BENBAM-G3.....	52
3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ.....	57
3.6 สมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ.....	58
3.7 การออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่.....	61
บทที่ 4 ผลการวิจัย	66
4.1 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ยาน BENBAM-G3”.....	66
4.2 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา ยาน BENBAM-G3”.....	68
4.3 การทดสอบระบบควบคุมความลึก ยาน BENBAM-G3”.....	70
4.4 การทดสอบระบบควบคุมการหมุนรอบแกนแนวตั้ง ยาน BENBAM-G3”.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 การอภิปรายผล.....	73
5.3 ข้อเสนอแนะ	73
บรรณานุกรม	75
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก การทดสอบความสามารถต้านทานแรงดันใต้น้ำของอุปกรณ์.....	78
ภาคผนวก ข การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ.....	84
ภาคผนวก ค การทดลองหาสมรรถนะของชุดผลึก.....	101
ภาคผนวก ง การหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3.....	113
ภาคผนวก จ การหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2.....	123
ภาคผนวก ฉ การทดสอบระบบควบคุมยานใต้น้ำ BENBAM-G3.....	138
ภาคผนวก ช ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่.....	142
ประวัติผู้เขียน	161

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดด้านสมรรถนะและความแข็งแรงของยานใต้น้ำในขั้นตอนออกแบบ	38
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของยานใต้น้ำ BENBAM	38
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของโครงสร้างยานใต้น้ำ BENBAN-G2	40
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของชุดผลึก	43
ตารางที่ 3.5 ข้อมูลทางเทคนิคของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	45
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของถังเพิ่มแรงลอยตัว	45
ตารางที่ 3.7 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	48
ตารางที่ 3.8 ตารางตัวแปรที่ได้จากการวัดและได้จากการคำนวณ	51
ตารางที่ 3.9 ข้อมูลทางเทคนิคของชุดผลึก	54
ตารางที่ 3.10 ข้อมูลทางเทคนิคของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	54
ตารางที่ 3.11 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	57
ตารางที่ 3.12 ข้อมูลทางเทคนิคและพารามิเตอร์ของยานใต้น้ำ BENBAM	58
ตารางที่ 3.13 เงื่อนไขการออกแบบกฎการควบคุมเบื้องต้น	62
ตารางที่ 4.1 ค่า state gain k_1 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความเร็วหน้า-หลัง	66
ตารางที่ 4.2 ค่า state gain k_1 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา	68
ตารางที่ 4.3 ค่า state gain k_1, k_2 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความลึก	70
ตารางที่ 4.4 ค่า state gain k_1, k_2 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมการหมุนรอบแกน แนวตั้ง.....	71
ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้ เมื่อนำค่าต่างๆที่ได้มาคำนวณ.....	95
ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ BENBAM-G2 และ BENMAB-G3	99
ตารางที่ ค.1 ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึกในน้ำ	105
ตารางที่ ค.2 ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึกทิศทางการหมุน CCW.....	109
ตารางที่ ค.3 ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึกทิศทางการหมุน CW.....	109
ตารางที่ ง.1 การจัดสรรชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAM-G3	105
ตารางที่ จ.1 การจัดสรรชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAM-G2	125

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การนำยานใต้น้ำมาใช้ในการสำรวจใต้น้ำแข็ง	4
รูปที่ 2.2 การนำยานใต้น้ำมาใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำ	4
รูปที่ 2.3 การนำยานใต้น้ำพร้อมชุดแขนกลมาใช้ในการปฏิบัติงานใต้ท้องทะเล	5
รูปที่ 2.4 ยาน VidioRay Pro III.....	5
รูปที่ 2.5 ยานต้นแบบสำรวจใต้น้ำ	6
รูปที่ 2.6 แบบจำลองของหุ่นยนต์สำรวจใต้น้ำ	7
รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ใต้น้ำที่พัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ประเทศไทย	7
รูปที่ 2.8 ยานใต้น้ำ Constellation (RS2)	8
รูปที่ 2.9 ยานใต้น้ำ Sea Otter MkII	8
รูปที่ 2.10 ยานใต้น้ำ Seaeye Tiger ของ SABB	9
รูปที่ 2.11 ยานใต้น้ำ SEAEYE SABERTOOTH ของ SAAB	9
รูปที่ 2.12 ยานใต้น้ำ SeaBotix LBV150-4 ของ SeaBotix Inc	10
รูปที่ 2.13 ยานใต้น้ำ Seaeye Falcon ของ SAAB	10
รูปที่ 2.14 ยานใต้น้ำ Seaeye Jaguar ของ SAAB	11
รูปที่ 2.15 HDIA Plough ของ SMD	11
รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบหลักของ ROV	12
รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของตัว ROV	13
รูปที่ 2.18 ยานใต้น้ำ SeaLion-2 โดย JW Fishers Mfg	13
รูปที่ 2.19 ยานใต้น้ำ SARbot ของ SeaBotix Inc	13
รูปที่ 2.20 ชุดผลึก 4000 Series ของ Deep Sea Systems International, Inc.	14
รูปที่ 2.21 ระบบกล้อง CCD	15
รูปที่ 2.22 กล้องกันน้ำ Kongsberg OE 1366F ของ Kongsberg Maritime Ltd.	15
รูปที่ 2.23 องศาอิสระของยาน (Vehicle degrees of freedom)	16
รูปที่ 2.24 ROV มีเสถียรภาพเป็นบวก (Positive ROV stability).....	16
รูปที่ 2.25 โมเมนต์สวนกลับกระทำกับ ROV	17
รูปที่ 2.26 วิธีหาค่าโมเมนต์สวนกลับของ ROV.....	17

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.27 รูปทรงทางเรขาคณิตของ ROV กับความเสถียร	18
รูปที่ 2.28 ตำแหน่งการวางชุดผลึกของ ROV กับความเสถียร	18
รูปที่ 2.29 ผลของทิศทางการหมุนของชุดผลึกกับความเสถียรของ ROV	19
รูปที่ 2.30 กรอบอ้างอิงของยานใต้น้ำ	19
รูปที่ 2.31 แผนผังบล็อกของสมการสถานะ	29
รูปที่ 2.32 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต	29
รูปที่ 2.33 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับสถานะเพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุล	30
รูปที่ 2.34 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเมื่อมีการปรับรูปร่างอินพุต ในโดเมน s	31
รูปที่ 2.35 แผนภาพกรอบตัวควบคุมแบบเปิดปิด	33
รูปที่ 2.36 แผนภาพกรอบของการควบคุม PID เขียนในโดเมน s	34
รูปที่ 3.1 ยานใต้น้ำ BENBAN-G2 และ ยานใต้น้ำ BENBAN-G3	37
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของยานใต้น้ำ BENBAN-G2	39
รูปที่ 3.3 ชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้กับยานใต้น้ำ BENBAN-G2	40
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบ	41
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดชุดผลึกและหมายเลขชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAN-G2	43
รูปที่ 3.6 ถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของยานใต้น้ำ BENBAN-G2	44
รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการออกแบบ	44
รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับโครงยาน	45
รูปที่ 3.9 ถังเพิ่มแรงลอยตัวที่ได้จากการออกแบบ	46
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของถังเพิ่มแรงลอยตัวที่ได้จากการออกแบบและวิธีติดตั้ง	47
รูปที่ 3.11 การติดตั้งถังเพิ่มแรงลอยตัว	47
รูปที่ 3.12 แผนภาพกรอบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	49
รูปที่ 3.13 แผนภาพอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	49
รูปที่ 3.14 แผนภาพกรอบการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึก	50
รูปที่ 3.15 แผนผังทางไฟฟ้าของระบบวัดค่าตัวแปร	51
รูปที่ 3.16 ชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบ	52

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 ตำแหน่งติดชุดผลึก	53
รูปที่ 3.18 ถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการติดตั้ง	55
รูปที่ 3.19 การติดตั้งถังเพิ่มแรงลอยตัว	55
รูปที่ 3.20 แผนภาพกรอบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	56
รูปที่ 3.21 แผนภาพอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก	57
รูปที่ 3.22 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะประกอบการออกแบบ	62
รูปที่ 4.1 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s	66
รูปที่ 4.2 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.05 m/s	67
รูปที่ 4.3 ผลการควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s	69
รูปที่ 4.4 ผลการควบคุมความลึก จากระดับ 0 ถึง 0.01 m ที่แรงผลักอินพุตสูงสุดเท่ากับ ± 6 N	70
รูปที่ 4.5 ผลการควบคุมความลึก จากระดับ 0 ถึง 0.02 m ที่แรงผลักอินพุตสูงสุดเท่ากับ ± 6 N	71
รูปที่ 4.6 ผลการควบคุมมุมหันเห จากระดับ 0 ไปยังตำแหน่ง 5 องศา ที่แรงบิดอินพุตสูงสุด เท่ากับ ± 1.6 Nm	72
รูปที่ 4.7 ผลการควบคุมมุมหันเห จากระดับ 0 ไปยังตำแหน่ง ± 90 องศา และ ± 180 องศา ที่แรงบิดอินพุตสูงสุดเท่ากับ ± 1.6 Nm	72
รูปที่ ก.1 ความดันที่กระทำกับยานใต้น้ำที่ความลึก h	79
รูปที่ ก.2 การจำลองความลึกที่ 7.4 เมตรน้ำ	80
รูปที่ ก.3 ชุดทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์กับชุดทดสอบ	81
รูปที่ ก.4 ขั้นตอนการทดสอบความดัน	82
รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ทดลองและการติดตั้งยานใต้น้ำ	86
รูปที่ ข.2 แผนภาพกรอบแบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำที่สร้างจากสมการ (ข.1) เพื่อจำลองผลด้วย MATLAB/Simulink	90
รูปที่ ข.3 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการเคลื่อนที่เดินหน้า	91
รูปที่ ข.4 ผลตอบสนองของความเร็วช่วง transient กับผลจาก curve fitting	92
รูปที่ ข.5 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง	93
รูปที่ ข.6 ผลตอบสนองของความเร็วช่วง transient รอบแกนแนวตั้งกับผลจาก curve fitting	95

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ข.7 ผลจำลองด้วยMATLAB/Simulink ของความเร็วเดินหน้า	96
รูปที่ ข.8 ผลจำลองด้วยMATLAB/Simulink ของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง	97
รูปที่ ค.1 อุปกรณ์สอบเทียบ Tachometer	103
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าจาก tachometer กับความเร็วรอบ tachometer	104
รูปที่ ค.3 การติดตั้งชุดผลึกกับชุดทดสอบแรงผลึก	105
รูปที่ ค.4 ผลทดสอบแรงผลึกที่ความเร็วรอบกำหนด	106
รูปที่ ค.5 ผลการทำ curve fitting แรงผลึกด้านบวกและด้านลบ	106
รูปที่ ค.6 การติดตั้งชุดผลึกกับชุดทดสอบแรงผลึก	108
รูปที่ ค.7 สมรรถนะของชุดผลึกสำหรับสร้างแรงผลึก τ_1 , τ_2 และ τ_3	110
รูปที่ ค.8 ผลทดสอบแรงผลึกที่ความเร็วรอบกำหนด	111
รูปที่ ค.9 ผลการทำ curve fitting แรงผลึกด้านบวกและด้านลบ	112
รูปที่ ง.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BENBAM-G3	114
รูปที่ จ.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2	124
รูปที่ จ.2 การเคลื่อนที่โหมค 1 และ 2 ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2	125
รูปที่ ฉ.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง และซ้าย-ขวา	139
รูปที่ ฉ.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมความลึก	140
รูปที่ ฉ.3 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมการหมุนรอบแกนแนวตั้ง	141

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AUV	Autonomous Operated Underwater Vehicle
B	น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยยานใต้น้ำ
$\{B\}$	กรอบอ้างอิงในตัวยานใต้น้ำตามพิกัดคาร์เทเซียน
C_x	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำตามแนวแกน x
C_y	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำตามแนวแกน y
C_z	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำตามแนวแกน z
D_x	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำรอบแกน x
D_y	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำรอบแกน y
D_z	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของน้ำรอบแกน z
$\{E\}$	กรอบอ้างอิงบนพื้นดินตามพิกัดคาร์เทเซียน
g	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดโลก
J_x	โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลยานใต้น้ำรอบแกน x
J_y	โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลยานใต้น้ำรอบแกน y
J_z	โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลยานใต้น้ำรอบแกน z
M_{RB}	เมตริกของมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของยาน
M_A	เมตริก Added mass
m	มวลของยานใต้น้ำ
ROV	Remotely Operated Vehicle
V	ปริมาตรของยานใต้น้ำ
W	น้ำหนักของยานใต้น้ำ
u	ความเร็วเชิงเส้นของยานใต้น้ำตามแนวแกน x
v	ความเร็วเชิงเส้นของยานใต้น้ำตามแนวแกน y
w	ความเร็วเชิงเส้นของยานใต้น้ำตามแนวแกน z
x	ตำแหน่งของยานใต้น้ำตามแนวแกน x
y	ตำแหน่งของยานใต้น้ำตามแนวแกน y
z	ตำแหน่งของยานใต้น้ำตามแนวแกน z
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϕ	มุมของการหมุนรอบแกน x
θ	มุมของการหมุนรอบแกน y
ψ	มุมของการหมุนรอบแกน z
η	เวกเตอร์ตำแหน่งและทิศทาง
\mathbf{v}	เวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุม

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปฏิบัติการใต้น้ำมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น การสำรวจใต้น้ำ ถ่ายภาพใต้น้ำ เก็บตัวอย่างน้ำ สำรวจความเสียหายของระบบใต้น้ำเช่นระบบท่อ ปฏิบัติการกู้ภัยใต้น้ำ และอื่น ๆ ซึ่งในปัจจุบันใต้น้ำเครื่องจักรมาเพื่อช่วยในการปฏิบัติการใต้น้ำดังกล่าว เพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น เพื่อความสะดวกของผู้ปฏิบัติงานใต้น้ำ ลดความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานใต้น้ำ เป็นต้น การออกแบบยานใต้น้ำเป็นงานที่ท้าทาย เพราะการทำงานใต้น้ำจะมีตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวนการทำงานของยานจนทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่มีความแม่นยำน้อยลง ตัวอย่างของความแปรที่เป็นสิ่งรบกวนประการแรกคือ คลื่นหรือกระแสน้ำธรรมชาติ แม้แต่ใต้น้ำก็ยังเกิดคลื่นปั่นป่วนขึ้นเมื่อชุดผลึกทำงานและการควบคุมการเคลื่อนที่ระยะไกลนั้นกระทำได้ยากเนื่องจากไม่สามารถรับสัญญาณ GPS ใต้น้ำได้ ประการที่สองคือ ความไม่แน่นอนของมวลรวมและจุดศูนย์กลางของตำแหน่งมวลรวมถ้ามีการติดตั้งชุดเซนเซอร์ที่ใช้ในการหับจับอุปกรณ์ต่างๆจะทำให้พลศาสตร์ของ การทำงานเปลี่ยนไป และประการที่สามพลังงานที่ใช้มีจำกัดตามขนาดของแบตเตอรี่ จึงไม่สามารถทำงานได้นานๆ จากเหตุผลข้างต้น หากผู้ออกแบบต้องการหาสมการการเคลื่อนที่ทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำให้ครอบคลุมทุกสภาวะการณ์ทำงาน นั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและหากต้องการควบคุมให้ยานใต้น้ำมีองศาความเป็นอิสระในหลายทิศทางให้ได้แม่นยำแล้วก็จะทำให้การหาสมการการเคลื่อนที่จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาและออกแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลพร้อมระบบควบคุมที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 4 องศาอิสระคือ เติลหน้า - หลัง เคลื่อนที่ซ้าย - ขวา ดำขึ้น - ลง และหมุนรอบแกนตั้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมที่สามารถควบคุมยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลที่มีองศาการเคลื่อนที่อิสระเท่ากับ 4 ให้เคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพดังนี้

1.2.2.1 การเคลื่อนที่หน้า หลัง ในระนาบแนวนอน

1.2.2.2 การเคลื่อนที่ซ้าย ขวา ในระนาบแนวนอน

1.2.2.3 การหมุนรอบแกนตั้ง

1.2.2.4 การค้ำน้ำขึ้น ลงในแนวตั้ง

1.2.3 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน และแนวตั้ง

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1.3.1 ยานใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่และปฏิบัติงานในน้ำจืด และน้ำนิ่งได้อย่างแม่นยำ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลผ่านสาย สามารถเคลื่อนที่ในน้ำนิ่ง ไม่มีคลื่น ไม่มีการไหล และเป็นน้ำจืด

1.4.2 โครงสร้างของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลสามารถค้ำน้ำได้ลึกอย่างน้อย 5 เมตร ได้โดยไม่มีกรร่วซึม

1.4.3 วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล และจำลองการเคลื่อนที่ และเทียบกับการเคลื่อนที่จริง

1.4.4 ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้หลักการควบคุมสมัยใหม่ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์

1.4.5 สมรรถนะในการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล มีขอบเขตดังนี้

1.4.5.1 เคลื่อนที่ หน้า หลัง ซ้าย ขวา ด้วยความเร็วในช่วง 0 ถึง 0.5 เมตรต่อวินาที และความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่สถานะคงตัวอยู่ในช่วง ± 0.1 เมตร/วินาที

1.4.5.2 หมุนรอบตัวในไปในทิศทางบวกได้ 180 องศา ทิศทางลบได้ 180 องศา และความคลาดเคลื่อนของมุมการหมุนที่สถานะคงตัวอยู่ในช่วง $\pm 5^{\circ}$

1.4.5.3 ค้ำน้ำลึกในช่วงประมาณ 0 ถึง 2 เมตร และรักษาระดับความลึกให้มีค่าคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัวอยู่ในช่วง ± 0.1 เมตร

1.5 ระเบียบวิธีวิจัย

1.5.1 ศึกษาองค์ประกอบที่มีผลสำคัญต่อการออกแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล

1.5.2 ออกแบบและสร้างต้นแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล ที่มีความเป็นไปได้ในการเคลื่อนที่ เท่ากับ 6 องศาอิสระ

- 1.5.3 สร้างสมการการเคลื่อนที่ของยานได้นำควบคุมระยะไกล
- 1.5.4 หาคุณสมบัติทางกายภาพของยานได้นำควบคุมระยะไกล
- 1.5.5 ประดิษฐ์โปรแกรมแบบบังคับมือ (manual) สำหรับสั่งงานยานสำรวจได้นำผ่านทางคอมพิวเตอร์ โดยผู้บังคับการให้สามารถ เคลื่อนที่หน้า หลัง, เลี้ยวซ้าย ขวา หมุนรอบตัว ได้นำได้
- 1.5.6 ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้หลักการควบคุมสมัยใหม่ (modern control)
- 1.5.7 ประดิษฐ์โปรแกรมแบบอัตโนมัติ (automatic) สำหรับสั่งงานยานสำรวจได้นำผ่านทางคอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องมีผู้บังคับการ ให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ให้สามารถ เคลื่อนที่หน้า หลังเลี้ยวซ้าย ขวา หมุนรอบตัว ได้นำและรักษาตำแหน่ง ตามขอบเขตของการศึกษาข้อ 1.4.5 ได้
- 1.5.8 วิเคราะห์และสรุปผลการควบคุมการทำงานที่ได้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้องค์ประกอบหรือตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการออกแบบยานได้นำควบคุมระยะไกล และระบบควบคุม
- 1.6.2 ได้ต้นแบบยานได้นำควบคุมระยะไกล เพื่อใช้ในงานสำรวจ
- 1.6.3 ได้ระบบควบคุมที่สามารถควบคุมยานได้นำควบคุมระยะไกลให้ทำงานได้ตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพดังนี้
 - 1.6.3.1 เคลื่อนที่หน้า หลัง
 - 1.6.3.2 เคลื่อนที่ซ้าย ขวา
 - 1.6.3.3 หมุนรอบตัว
 - 1.6.3.4 ได้นำและรักษาตำแหน่ง
- 1.6.4 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับยานได้นำควบคุมระยะไกล
- 1.6.5 ได้องค์ความรู้ด้านการควบคุมอัตโนมัติ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การประยุกต์ใช้งานยานใต้น้ำ

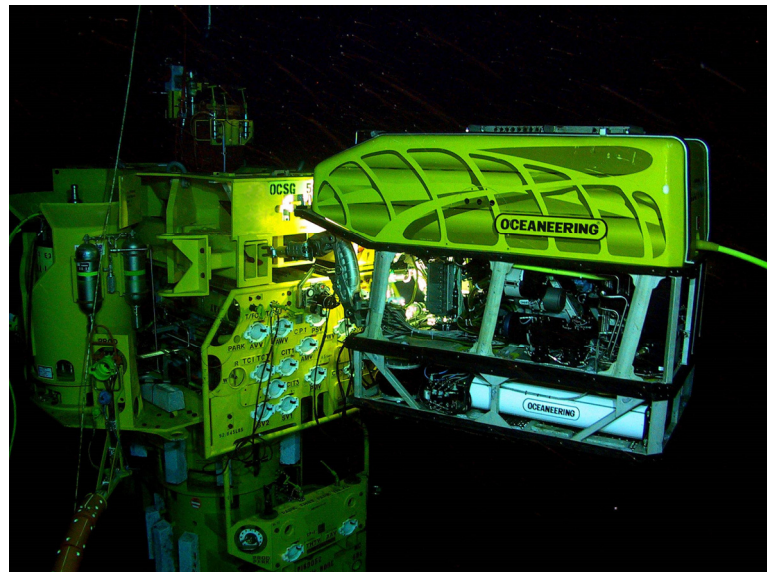
ปัจจุบัน ยานใต้น้ำ (underwater vehicle) ถูกนำมาใช้ในการปฏิบัติงานใต้น้ำอย่างแพร่หลาย เพื่อจุดประสงค์ที่แตกต่างกันไป เช่น เพื่อความสะดวกของผู้ปฏิบัติงานใต้น้ำ เพื่อลดความเสี่ยงจากอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานใต้น้ำ หรือบางกรณีอาจใช้ปฏิบัติงานแทนคน ดังตัวอย่างการนำมาใช้งานตามรูปที่ 2.1 ถึง 2.3



รูปที่ 2.1 การนำยานใต้น้ำมาใช้ในการสำรวจใต้น้ำแข็ง [1]



รูปที่ 2.2 การนำยานใต้น้ำมาใช้ในการตรวจวัดคุณสมบัติของน้ำ [2]



รูปที่ 2.3 การนำยานใต้น้ำพร้อมชุดแขนกลมาใช้เพื่อปฏิบัติงานใต้ท้องทะเล [3]

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลมีผู้ให้ความสนใจและทำการศึกษากันอย่างกว้างขวาง ทั้งในและต่างประเทศ ตามตัวอย่างดังนี้

ก) งานวิจัยเรื่อง “Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV” ของ Wei Wang [4] โดย Wei Wang ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของยานใต้น้ำ VidioRay Pro III (รูปที่ 2.4) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด



รูปที่ 2.4 ยาน VidioRay Pro III [4]

ข) งานวิจัยเรื่อง “Model Reference Adaptive Control of Underwater Robot Vehicle in Plan Motion” ของ Jerzy Garus [5] โดย Jerzy Garus ได้ทำการศึกษาระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นของหุ่นยนต์ใต้น้ำ โดยพิจารณาสมการการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น และใช้กฎการปรับตัวได้เพื่อหาพารามิเตอร์ (parameter adaptation law) เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่นเมทริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) รวมกับมวลที่เพิ่มจากน้ำ (added mass) เมทริกซ์แรงเหวี่ยงแบบไม่เชิงเส้น (coriolis) และแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centripetal) เมทริกซ์ค่าความหน่วงทางไฮโดรไดนามิกส์ (hydrodynamic damping) เป็นต้น

ค) งานวิจัยเรื่อง “คันแบบยานสำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ” ของ อนุพนธ์ พิมพ์ช่วย และคณะ [6] โดยนำเสนอการออกแบบและสร้างยานคันแบบสำรวจใต้น้ำอัตโนมัติ ที่สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า-ถอยหลัง ดำขึ้น-ลง และเคลื่อนที่หมุนรอบแกนแนวตั้งได้ ดังรูปที่ 2.5 ความสามารถด้านสมรรถนะของยานคันแบบ สามารถดำน้ำได้ลึก 1.5 เมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 0.2 เมตร/วินาที และทำงานใต้น้ำได้ 30 นาที

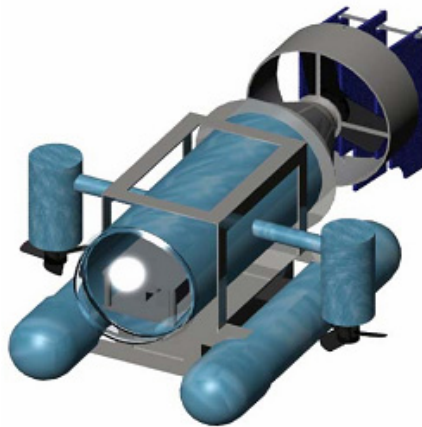


รูปที่ 2.5 ยานคันแบบสำรวจใต้น้ำ [6]

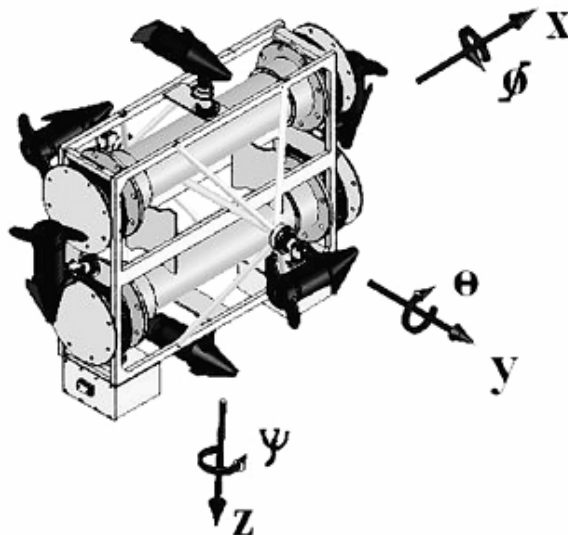
ง) งานวิจัยเรื่อง “หุ่นยนต์คันแบบสำหรับการสำรวจใต้น้ำ” ของ ชีรภัทร หลิมบุญเรืองและคณะ [7] โดยนำเสนอการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์คันแบบสำหรับการสำรวจทรัพยากรใต้น้ำ ที่สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า-ถอยหลัง ดำขึ้น-ลง และเลี้ยวซ้าย-ขวาได้ ดังรูปที่ 2.6 ความสามารถด้านสมรรถนะของหุ่นยนต์คันแบบ สามารถดำน้ำได้ลึก 3.5 เมตร ความเร็วไปข้างหน้า ถอยหลัง ลอยตัวจมตัว เท่ากับ 68.8, 61.1, 224.6 และ 169.3 มิลลิเมตร/วินาที และทำงานใต้น้ำได้ 30 นาที ควบคุมการทำงานผ่านรีโมทไร้สาย (ชนิดใช้คลื่นวิทยุ) ระยะทางควบคุม 23 เมตร

จ) งานวิจัยเรื่อง “การควบคุมหุ่นยนต์ใต้น้ำอัตโนมัติด้วยวิธีสไลดิงโหมด” ของ ชีรยุทธ

ชาติชนะยืนยง [8] โดยทำการศึกษาออกแบบตัวควบคุมควบคุมแบบสไลดิงโหมด เพื่อควบคุมทิศทางการมุงหน้าของหุ่นยนต์ได้นำอัตโนมัติ (รูปที่ 2.7) โดยได้จำลองการควบคุมการมุงหน้าที 20 องศาพร้อมกับการทดสอบจริงกับหุ่นยนต์ทดสอบ และได้กล่าวถึงผลการจำลองและทดสอบจริงไว้ว่า “จากผลการจำลองในคอมพิวเตอร์และการทดสอบกับหุ่นยนต์จริงจะเห็นว่าตัวควบคุมสไลดิงโหมดมีประสิทธิภาพที่ดีมากในการควบคุมให้การหันเหทิศทางไปยังตำแหน่งที่ต้องการการสไลดิงของการจำลองและการทดสอบกับหุ่นยนต์จริงเกิดขึ้นภายหลังเวลาประมาณ 13 วินาที และ 3 วินาที ตามลำดับ”



รูปที่ 2.6 แบบจำลองของหุ่นยนต์สำรวจได้นำ [7]



รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ได้นำที่พัฒนาโดยสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ประเทศไทย [8]

2.3 ประเภทของยานใต้น้ำ

ยานใต้น้ำแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ [9] ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คือยานใต้น้ำใช้คนขับ (manned underwater vehicle) เป็นยานใต้น้ำที่มีคนควบคุมการเคลื่อนที่สามารถอยู่ในตัวยานได้ ตัวอย่างของยานใต้น้ำกลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ยานใต้น้ำ Constellation (RS2) [10]

กลุ่มที่ 2 คือยานใต้น้ำไร้คนขับ (unmanned underwater vehicle) เป็นยานใต้น้ำที่ไม่มีคนควบคุมการเคลื่อนที่อยู่ในตัวยานซึ่งสามารถควบคุมระยะไกลได้หรือตั้งโปรแกรมการเคลื่อนที่ล่วงหน้าไว้แล้ว ตัวอย่างของยานใต้น้ำกลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ยานใต้น้ำ Sea Otter MkII [11]

2.3.1 ประเภทของยานใต้น้ำไม่ใช้คน

ยานใต้น้ำไม่ใช้คนจับแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อยดังนี้

1) ประเภทใช้สายส่ง (tethered) เป็นยานใต้น้ำที่ถูกควบคุมการเคลื่อนที่จากนอกตัวยานหรือบนบกผ่านไปตามสายส่ง ตัวอย่างของยานใต้น้ำประเภทนี้ดังตัวอย่างรูปที่ 2.10 และมีศัพท์เฉพาะที่ใช้เรียกชื่อยานประเภทนี้ว่า Remotely Operated Underwater Vehicle หรือ Remotely Operated Vehicle และใช้อักษรย่อ ROV หรือ ROVs แทนยานประเภทนี้



รูปที่ 2.10 ยานใต้น้ำ Seaeye Tiger ของ SABB [12]

2) ประเภทไม่ใช้สายส่ง (non-tethered) เป็นยานใต้น้ำ ที่มีตัวควบคุมการเคลื่อนที่อยู่ในตัวยาน สามารถควบคุมตัวเองได้โดยอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้สายส่ง ตัวอย่างของยานใต้น้ำประเภทนี้ดังตัวอย่างรูปที่ 2.11 และมีศัพท์เฉพาะที่ใช้เรียกชื่อยานประเภทนี้ว่า Autonomous Operated Underwater Vehicle และใช้อักษรย่อ AUV หรือ AUVs แทนยานประเภทนี้



รูปที่ 2.11 ยานใต้น้ำ SEAEYE SABERTOOTH ของ SAAB [13]

2.3.2 ประเภทของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล

ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลหรือ ROV แบ่งเป็น 5 กลุ่ม [14] ดังนี้

1) Class I – Observation ROVs

กลุ่มนี้เป็น ROV ขนาดเล็กที่มีไฟและกล้อง หรือ โซนาร์ตัวเดียวเท่านั้น วัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการงานสำรวจเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างของ ROV กลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ยานใต้น้ำ SeaBotix LBV150-4 ของ SeaBotix Inc. [15]

2) Class II – Observation ROVs ที่สามารถรับภาระโหลดเพิ่มเติม

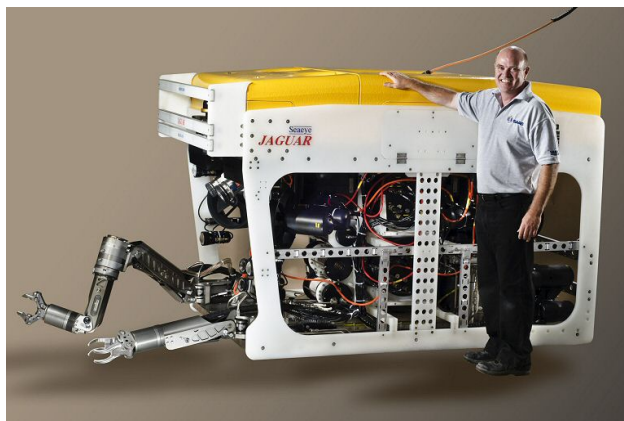
กลุ่มนี้เป็น ROV ที่ติดตั้งกล้องและ โซนาร์สองตัวพร้อมกันได้ และสามารถติดตั้ง เซนเซอร์เพิ่มได้ และสามารถเคลื่อนย้ายสิ่งของได้โดยไม่เกิดผลกระทบกับการทำงานหลักของยาน ขณะที่มีการเคลื่อนย้ายสิ่งของ ตัวอย่างของ ROV กลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ยานใต้น้ำ Seaeye Falcon ของ SAAB [16]

3) Class III – Work-Class Vehicles

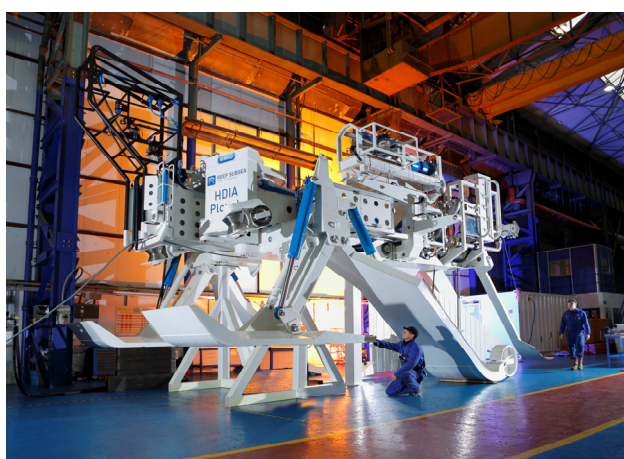
กลุ่มนี้เป็น ROV ที่มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะติดตั้งเซนเซอร์ แขนกล และสามารถติดตั้งเครื่องมืออื่นๆเพิ่มเติมได้ โดยไม่ต้องเดินสายไฟแยก โดยทั่วไปมีขนาดใหญ่และมีความสามารถสูงกว่า Class I และ Class II ตัวอย่างของ ROV กลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ยานใต้น้ำ Seabeed Jaguar ของ SAAB [16]

4) Class IV – Towed and Bottom-Crawling Vehicles

กลุ่มนี้เป็น ROV ที่เคลื่อนที่โดยการลากจูงจากเรือผิวน้ำ โดยทั่วไปถูกออกแบบเพื่อใช้กับงานเฉพาะทางเช่น งานฝังสายไฟใต้ทะเล ตัวอย่างของ ROV กลุ่มนี้ดังรูปที่ 2.15



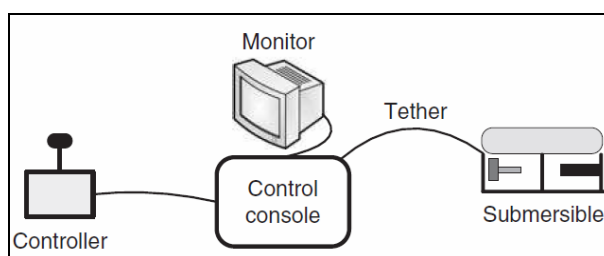
รูปที่ 2.15 ยานใต้น้ำ HDIA Plough ของ SMD [17]

5) Class V – Prototype or Development Vehicles

กลุ่มนี้เป็น ROV ที่นอกเหนือจาก Class I ถึง Class IV อันได้แก่ ROV ที่ทำเป็นต้นแบบ หรือที่กำลังพัฒนา รวมถึงยานใต้น้ำอัตโนมัติ (AUVs) ด้วย

2.4 ส่วนประกอบของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล

ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลหรือ ROV ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนประกอบที่อยู่ในน้ำ (submersible) อันได้แก่ตัวยาน และส่วนประกอบที่อยู่บนบก (ground) อันได้แก่ชุดควบคุม (controller) แผงควบคุม (control console) และจอภาพ (monitor) ดังรูปที่ 2.16

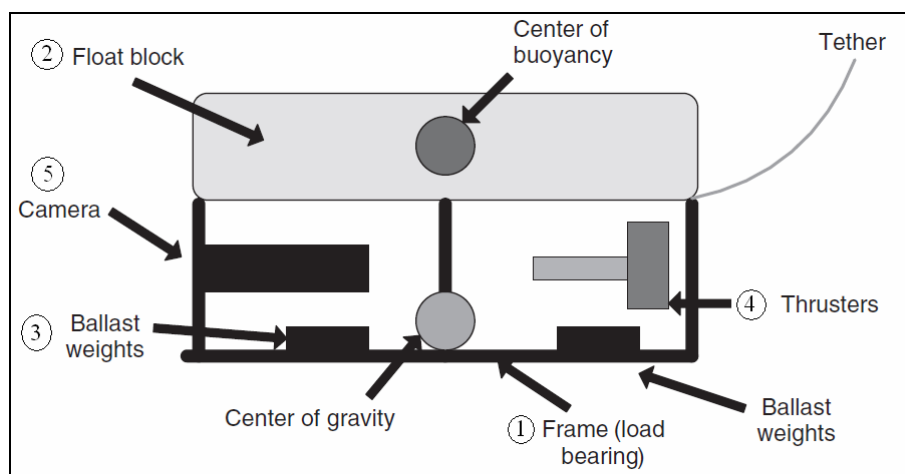


รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบหลักของ ROV [9]

ส่วนประกอบของตัวยาน ตัวยานหรือส่วนที่อยู่ในน้ำมีส่วนประกอบพื้นฐาน (ดังแสดงตามรูปที่ 2.17) ประกอบด้วย โครง (frame) ถังเสริมแรงลอยตัว (float block) ชุดน้ำหนักถ่วง (ballast weights) ชุดผลึก (thrusters) และกล้อง (camera) และอาจมีส่วนประกอบเสริมอื่นๆ ตามความจำเป็นต่อการใช้งานเช่น ไฟส่องสว่าง หรือแขนกล เป็นต้น

2.4.1 โครง

ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับยึดส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งเป็นถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันน้ำ โครงต้องมีความแข็งแรงและควรมีพื้นที่ปะทะน้ำให้น้อยเพื่อการประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อนและช่วยรักษาเสถียรภาพในการทรงตัวเมื่อปะทะกับคลื่นใต้น้ำ รูปร่างของโครงอาจแตกต่างกันออกไปตามความยากง่ายในการสร้างและความเหมาะสมในการใช้งาน ตัวอย่างในรูปที่ 2.18 เป็น ROV ที่ออกแบบโครงสร้างเป็นชุดเดียวกับถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนรูปที่ 2.19 เป็น ROV ที่เป็นโครงสร้างเปิด มีถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แยกต่างหากอยู่ด้านบน



รูปที่ 2.17 ส่วนประกอบของตัว ROV [9]



รูปที่ 2.18 ยานใต้น้ำ SeaLion-2 โดย JW Fishers Mfg [18]

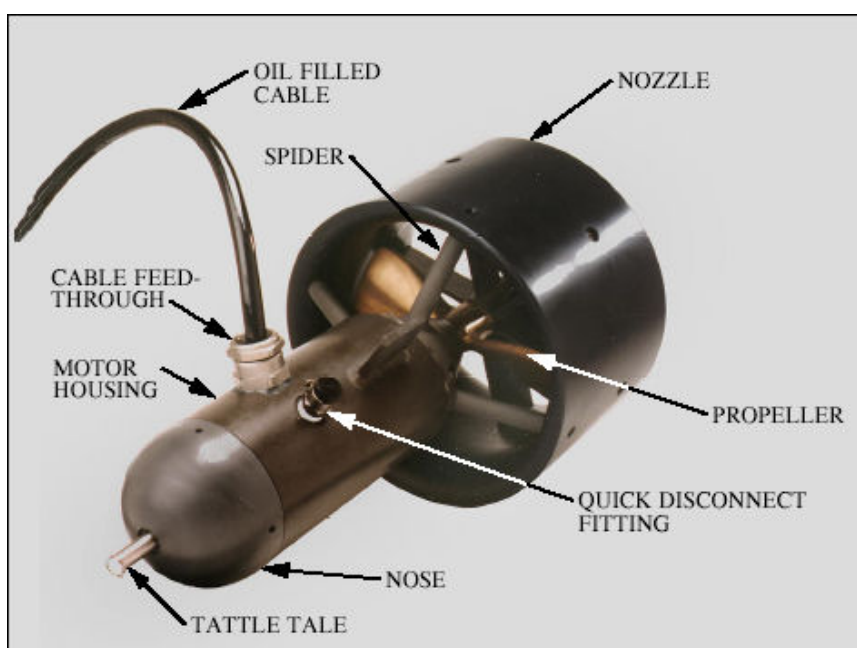


รูปที่ 2.19 ยานใต้น้ำ SARbot ของ SeaBotix Inc. [19]

2.4.2 ถังเสริมแรงลอยตัว ทำหน้าที่เพิ่มแรงลอยตัวให้กับ ROV โดยผู้ออกแบบอาจติดตั้ง ถังเสริมแรงลอยตัวเพื่อป้องกันไม่ให้ ROV จมน้ำทันทีเมื่อปล่อยลงน้ำ หรือเพื่อให้ ROV ลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำได้เองเมื่อไม่มีการขับเคลื่อนหรือหมดพลังงาน ดังรูปที่ 2.18 อาศัยถังบรรจุอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์เป็นถังเสริมแรงลอยตัวในตัว ส่วนรูปที่ 2.19 ติดตั้งถังเสริมแรงลอยตัวไว้ด้านบนของ ROV

2.4.3 ชุดน้ำหนักรถ่วง ทำหน้าที่ถ่วงดุลให้ตัวยานเกิดการสมดุลหรือจมลง

2.4.4 ชุดผลึก ทำหน้าที่สร้างแรงผลึกเพื่อขับเคลื่อนตัวยาน ซึ่งจำนวนชุดผลึกจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนองศาอิสระในการเคลื่อนที่และตำแหน่งการจัดวางชุดผลึก สิ่งที่ต้องพิจารณาในการเลือกใช้งานชุดผลึกคือขนาดแรงผลึกสูงสุด จะใช้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ตัวแปรหลายประการ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ ความเร็วในการตอบสนองเมื่อสั่งงาน และภาระสูงสุดของตัวยาน รูปที่ 2.20 เป็นชุดผลึกที่จำหน่ายเชิงพาณิชย์



รูปที่ 2.20 ชุดผลึก 4000 Series ของ Deep Sea Systems International, Inc. [20]

2.4.5 กล้อง ทำหน้าที่ถ่ายภาพใต้น้ำเพื่อการนำทางหรือบันทึกภาพใต้น้ำ รูปที่ 2.21 เป็นกล้องที่นำมาประยุกต์ใช้กับ ROV แต่ต้องติดตั้งในถังกันน้ำ ส่วนรูปที่ 2.22 เป็นกล้องกันน้ำได้ จำเป็นต้องติดตั้งในถัง



รูปที่ 2.21 ระบบกล้อง CCD [9]



รูปที่ 2.22 กล้องกันน้ำ Kongsberg OE 1366F ของ Kongsberg Maritime Ltd [21]

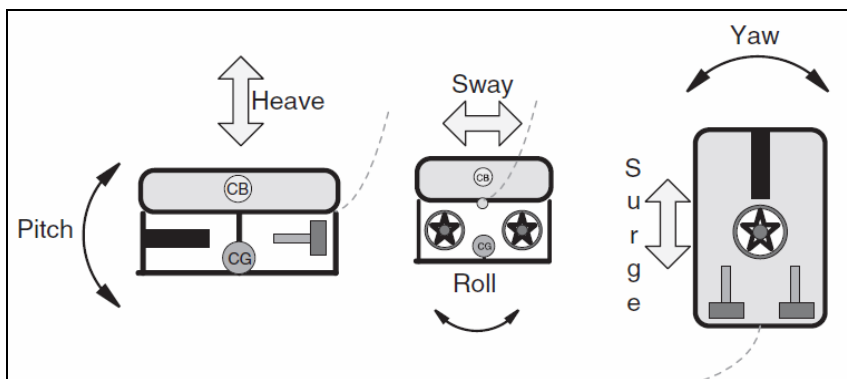
2.5 ปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบยานใต้น้ำ

ในการออกแบบยานใต้น้ำมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาประกอบในขั้นตอนการออกแบบดังต่อไปนี้

2.5.1 ปัจจัยทั่วไปที่พิจารณาในการออกแบบยานใต้น้ำ

- 1) แหล่งน้ำเป็นน้ำจืดหรือน้ำเค็ม ซึ่งมีผลต่อการเลือกใช้วัสดุทำโครงสร้างยานใต้น้ำ
- 2) ระดับความลึกสูงสุด ซึ่งมีผลต่อการออกแบบด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง
- 3) ความอิสระในการเคลื่อนที่ เช่น เดินหน้าได้ หมุนตัวได้และดำขึ้นลงได้ ซึ่งทั้งหมดมีผลต่อจำนวนชุดผลึกและการจัดตำแหน่งชุดผลึกด้วย ดังรูปที่ 2.23
- 4) แหล่งพลังงาน อยู่ในตัวยาน อยู่บนบก หรือผสมผสานกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ซึ่งก็มีผลต่อขนาดและน้ำหนักของยาน
- 5) กลไกในการดำขึ้นลง ใช้แรงลอยจากชุดผลึก หรือใช้ถังอับเฉา (ballast tank) กรณีใช้แรงลอยจากชุดผลึกมีข้อเด่นคือสามารถออกแบบให้จุด CG ของยานมีตำแหน่งที่แน่นอนได้ มีผลทำให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม แต่มีข้อด้อยคือสิ้นเปลืองพลังงาน กรณีใช้ถังอับเฉามีข้อเด่นคือ

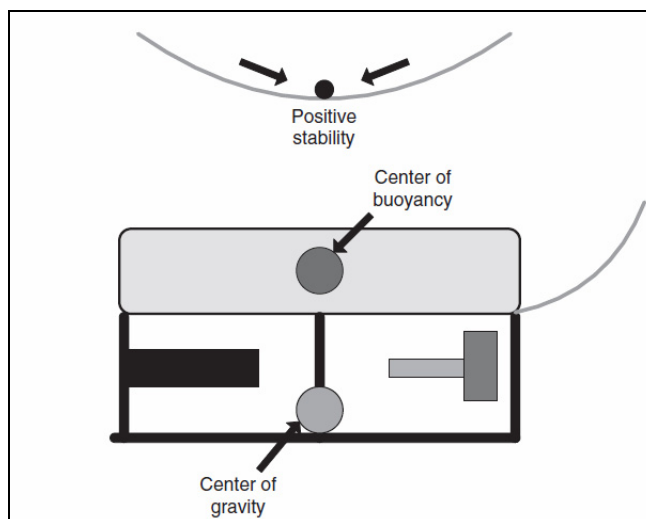
สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่ากรณีแรกแต่มีข้อด้อยคือจุด CG ของยานมีตำแหน่งไม่แน่นอนทำให้ยากต่อการออกแบบระบบควบคุม



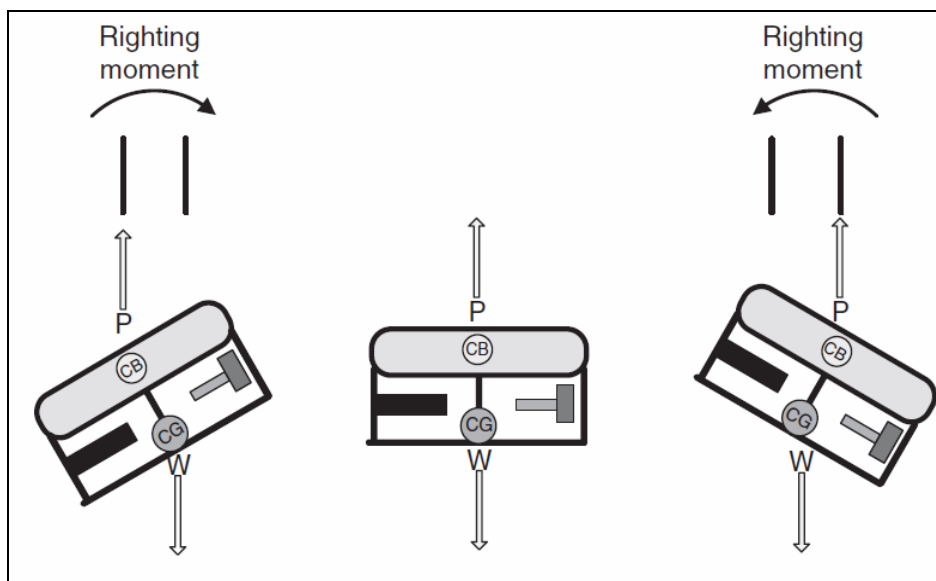
รูปที่ 2.23 องศาอิสระของยาน (Vehicle degrees of freedom) [9]

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพในการเคลื่อนที่และรักษาตำแหน่งของตัวยาน

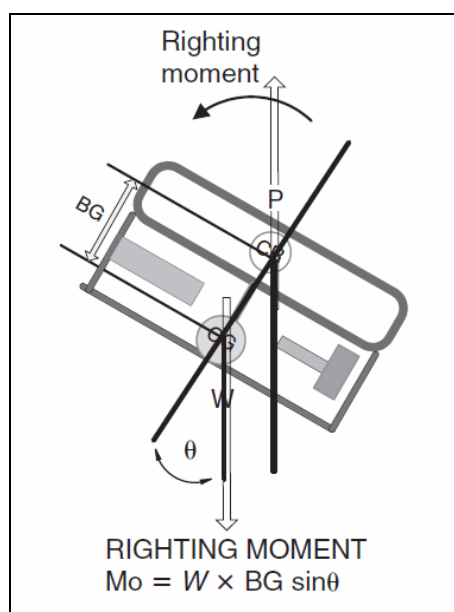
1) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของยานและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัวกรณี ROV ในรูปที่ 2.24 จุดศูนย์กลางมวลหรือ CG อยู่ต่ำกว่าจุดศูนย์กลางแรงลอยตัวหรือ CB ทำให้ยานสามารถหมุนคืนกลับสู่สถานเดิมได้เอง เพราะมีโมเมนต์กลับคืน กระทำกับ ROV ดังรูปที่ 2.24 ส่วนรูปที่ 2.25 แสดงวิธีหาค่าโมเมนต์กลับคืนที่กระทำกับ ROV



รูปที่ 2.24 ROV มีเสถียรภาพเป็นบวก (Positive ROV stability) [9]

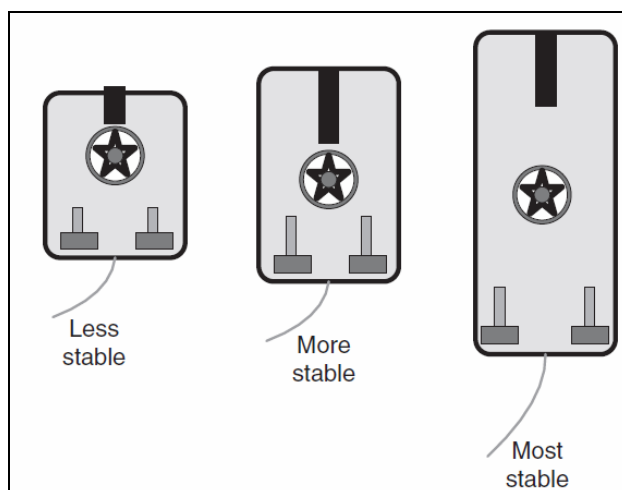


รูปที่ 2.25 โมเมนต์กลับคืนกระทำกับ ROV [9]



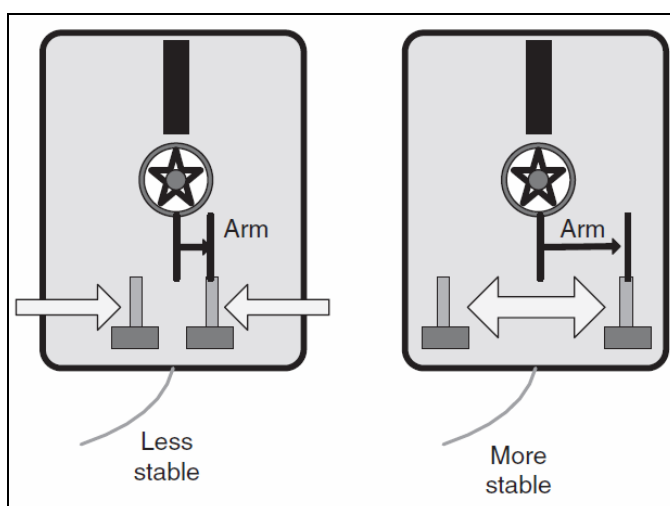
รูปที่ 2.26 วิธีหาค่าโมเมนต์กลับคืนของ ROV [9]

2) รูปร่างและสัดส่วนของตัวยาน มีผลต่อเสถียรภาพของ ROV เช่นกัน ดังในรูปที่ 2.27 เมื่อ ROV มีสัดส่วนความยาวต่อความกว้างของตัวยานเพิ่มขึ้น ก็จะมีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าสูงขึ้น

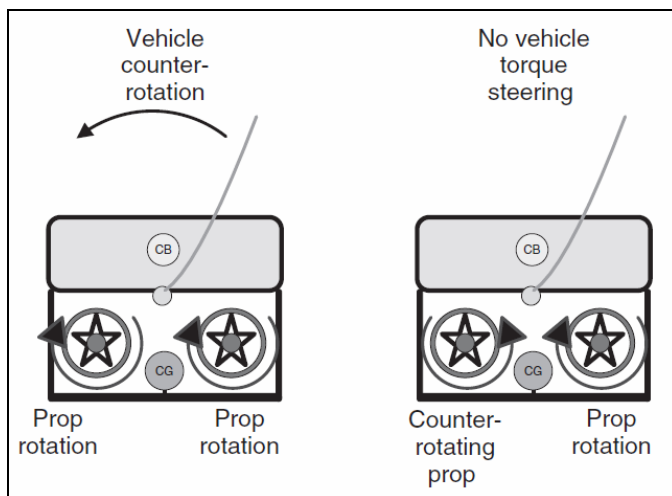


รูปที่ 2.27 รูปทรงทางเรขาคณิตของ ROV กับความมีเสถียรภาพ [9]

3) ตำแหน่งติดตั้งชุดผลึกและทิศทางการหมุนของชุดผลึก มีผลต่อเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของ ROV เช่นกัน ตามรูปที่ 2.28 ระยะห่างระหว่างชุดผลึกที่มากกว่าจะให้เสถียรภาพในการทรงตัวมากกว่า ส่วนรูปที่ 2.29 ทางด้านซ้าย เมื่อชุดผลึกหมุนเสริมแรงกัน โดยมีการหมุนในทิศทางเดียวกันจะทำให้ ROV เกิดการหมุนตัวไปในทิศทางตรงกันข้ามกับชุดผลึก และภาพทางด้านขวาเมื่อชุดผลึกหมุนเสริมแรงกันแต่ทิศทางใบพัดสวนทางกันจะป้องกันไม่ทำให้ ROV เกิดการหมุนตัวไปตัวเอง



รูปที่ 2.28 ตำแหน่งการวางชุดผลึกของ ROV กับความเสถียร [9]



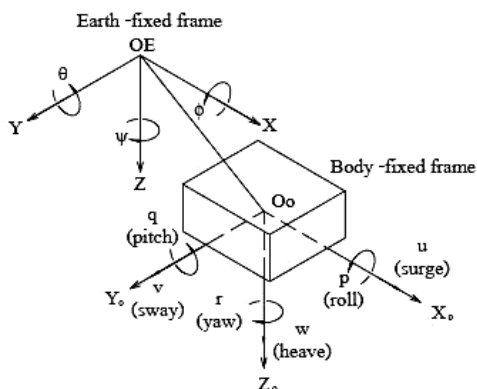
รูปที่ 2.29 ผลของทิศทางการหมุนของชุดผลักดันกับความเสถียรของ ROV [9]

4) ขนาดของสายส่งและตำแหน่งติดตั้ง สายส่งควรมีขนาดเล็กที่สุด จึงจะส่งผลกระทบต่อการทำงานของ ROV น้อย และควรติดตั้งให้เกิดการบิดตัวของ ROV น้อยที่สุด และอื่นๆ

2.6 พลศาสตร์ของยานใต้น้ำ

2.6.1 กรอบอ้างอิง

กรอบอ้างอิง (reference frame) สำหรับบ่งบอกตำแหน่งและทิศทางของยานใต้น้ำมีสองส่วนคือ กรอบอ้างอิงที่เทียบกับตำแหน่งของตัวยานหรือเรียกว่า body-fixed frame และกรอบอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งบน โลกหรือเรียกว่า Earth-fixed frame ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 กรอบอ้างอิงของยานใต้น้ำ [22]

2.6.2 เวกเตอร์สถานะของยานใต้น้ำ 6-DOF

สถานะของยานใต้น้ำสามารถเขียนอธิบายด้วยเวกเตอร์ได้ดังนี้ [23]

1) เวกเตอร์ตำแหน่ง

$$\boldsymbol{\eta}_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2) เวกเตอร์ทิศทาง

$$\boldsymbol{\eta}_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

3) เวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้น

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

4) เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม

$$\mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนเป็นเวกเตอร์รวมจะได้เวกเตอร์ตำแหน่งกับทิศทาง ($\boldsymbol{\eta}$) และเวกเตอร์ความเร็ว (\mathbf{v}) ดังนี้

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\eta}_1 \\ \boldsymbol{\eta}_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

เมื่อต้องการคำนวณหาอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของยานได้นำเทียบกับกรอบอ้างอิงบนโลก ($\dot{\boldsymbol{\eta}}_1$) สามารถเขียนแทนด้วยการแปลงพิกัดความเร็ว (velocity transformation) ได้ดังนี้

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)\mathbf{v}_1 \quad (2.7)$$

โดยที่ $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ คือเมตริกซ์ในการแปลงพิกัด (transformation matrix) ที่เป็นฟังก์ชันของมุมออยเลอร์ (Euler angle) คือ มุม roll (ϕ) pitch (θ) และ yaw (ψ) และสามารถอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ที่อ้างอิงบนพื้นโลกกลับไปเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานได้ โดยใช้เมตริกซ์การแปลงพิกัดความเร็วผกผัน (inverse velocity transformation matrix) ได้ดังนี้

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2)\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \quad (2.8)$$

โดยที่เมตริกซ์ในการแปลงพิกัด (transformation matrix) นั้นสามารถคำนวณหาได้จาก [8]

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \psi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

2.6.3 น้ำหนัก แรงลอยตัวและสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ

1) เมตริกซ์แรงดึงดูด แรงลอยตัวและโมเมนต์ ($\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$)

แรงอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วง (\mathbf{f}_G) จะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวลหรือจุด CG ของยาน เช่นเดียวกันแรงลอยตัวก็จะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงลอยตัวหรือ CB เมื่อตำแหน่งของจุด CG และ CB ไม่เป็นจุดเดียวกับจุดอ้างอิงบนตัวยาน โดยจุด CG อยู่ที่ตำแหน่ง \mathbf{r}_G และจุด CB อยู่ที่ตำแหน่ง \mathbf{r}_B และมีพิกัดดังนี้

$$\mathbf{r}_G = \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

และ

$$\mathbf{r}_B = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ผลจากแรงโน้มถ่วงและแรงลอยตัวก็จะก่อให้เกิดโมเมนต์กระทำกับตัวยาน ส่วนน้ำหนัก (W) ของยานใต้น้ำ หาได้จากสมการ

$$W = mg \quad (2.12)$$

และแรงลอยตัว (B) หาได้จากปริมาตรของน้ำที่ถูกแทนที่ด้วยยานใต้น้ำดังสมการ

$$B = \rho g \nabla \quad (2.13)$$

หรืออาจแสดงน้ำหนักในพิกัดของยาน ($\mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}_2)$) ได้เป็น

$$\mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

และแรงลอคตัวในพิกัดของยาน ($\mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}_2)$) ได้เป็น

$$\mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}_2) = -\mathbf{J}_1^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ดังนั้นจะได้เมตริกซ์แรงดึงดูดและแรงลอคตัวในระบบพิกัดของยาน ($\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$) เป็น

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = - \begin{bmatrix} \mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}) \\ \mathbf{r}_G \times \mathbf{f}_G(\boldsymbol{\eta}) + \mathbf{r}_B \times \mathbf{f}_B(\boldsymbol{\eta}) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

หรือ

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \\ -(W - B) \cos \theta \sin \phi \\ -(W - B) \cos \theta \cos \phi \\ -(y_G W - y_B B) \cos \theta \cos \phi + (z_G W - z_B B) \cos \theta \sin \phi \\ (z_G W - z_B B) \sin \theta + (x_G W - x_B B) \cos \theta \cos \phi \\ -(x_G W - x_B B) \cos \theta \sin \phi - (y_G W - y_B B) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

2) เวกเตอร์ของอินพุตควบคุม เช่นแรงและแรงบิดอินพุตที่เกิดจากชุดผลักหรือตัวผลัก (thruster) และเขียนเป็นสมการเมตริกซ์ได้เป็น [3]

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (2.18)$$

เมื่อ \mathbf{L} และ \mathbf{U} คือ mapping matrix และ thruster vector ตามลำดับ โดย \mathbf{L} ขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งชุดผลัก ส่วน \mathbf{U} เป็นเวกเตอร์ของชุดผลักประกอบด้วยแรงและโมเมนต์บิด T ดังนี้

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

3) เมตริกซ์ความเฉื่อย (\mathbf{M}) เมื่อพิจารณาขานได้นำเป็นมวลก้อนหนึ่ง การที่จะลุดให้ขานเกิดการเคลื่อนที่ได้ประการแรกที่ต้องเอาชนะคือความเฉื่อยเนื่องจากมวลของขานเอง (\mathbf{M}_{RB}) ประการต่อมา เมื่อขานอยู่ได้นำรอบด้านล้อมรอบไปด้วยน้ำ เมื่อขานเคลื่อนที่ขานก็จะดันเอามวลของน้ำไปด้วย ซึ่งหมายความว่า การที่จะลุดขานให้เคลื่อนที่ไปได้ นอกจากเอาชนะความเฉื่อยเนื่องจากมวลของขานแล้วจะต้องเอาชนะแรงจากการปะทะของน้ำด้วย และแรงที่ปะทะกับตัวขานจะสูงขึ้นเมื่อความเร่งของขานสูงขึ้นซึ่งมวลของน้ำที่เกิดการปะทะนี้เรียกว่า added mass (\mathbf{M}_A)

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (2.20)$$

โดยที่ \mathbf{M}_{RB} และ \mathbf{M}_A หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mathbf{M}_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

เมื่อ (X_i, Y_i, Z_i) คือ added mass ตามแนวแกน x, y และ z ของตัวยาน ตามลำดับ (K_i, M_i, N_i) คือ added mass รอบแกนแกน x, y และ z ของตัวยาน ตามลำดับ $(\dot{u}, \dot{v}, \dot{w})$ คือความเร็วเชิงเส้นตามแนวแกน x, y และ z ของตัวยาน ตามลำดับ $(\dot{p}, \dot{q}, \dot{r})$ คือความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y และ z ของตัวยาน ตามลำดับ และความหมายของตัวแปรต่างๆในสมการ (2.22) ตัวอย่างเช่น เทอม X_w หมายความว่า เป็นค่า added mass ตามแนวแกน x อันเนื่องมาจากยานมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งตามแนวแกน z และสำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุมเช่นเทอม K_p หมายความว่า เป็นค่า added mass รอบแกน x อันเนื่องมาจากยานมีการหมุนด้วยความเร่งรอบแกน x

4) เมตริกซ์ความหน่วง $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ เมื่อยานได้นำเคลื่อนที่ก็จะมีความหน่วงการเคลื่อนที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น พื้นผิวของตัวยาน รูปร่างตัวยานและความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นต้น ยานได้นำที่มีการเคลื่อนที่ใน 6 DOF ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ ไม่มีการเคลื่อนที่ควบ (non-couple motion) สองทิศทางพร้อมกันและยานมีความสมมาตรทั้งสามระนาบ สามารถประมาณค่าความหน่วงว่ามีเฉพาะพจน์ค่าความหน่วงเชิงเส้น (Linear damping) และพจน์ค่าความหน่วงกำลังสอง (Quadratic damping) ได้ [23] ดังสมการ

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{v}) = & -diag\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ & -diag\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

หรือเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ดังนี้

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} -(X_u + X_{u|u}|u|) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(Y_v + Y_{v|v}|v|) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(Z_w + Z_{w|w}|w|) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(K_p + K_{p|p}|p|) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -(M_q + M_{q|q}|q|) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(N_r + N_{r|r}|r|) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

5) เมตริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์ทางน้ำแบบไม่เชิงเส้น (Hydrodynamic Coriolis) และแบบสู่ศูนย์กลาง (Centripetal)

เมื่อยานใต้น้ำเคลื่อนที่ก็จะมีแรงปะทะจากน้ำมากระทำกับตัวยาน กรณียานใต้น้ำมีรูปร่างไม่สมมาตร จะส่งผลให้เกิดโมเมนต์ขึ้น จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่นลักษณะที่ไม่สมมาตรของรูปร่างของยานและความเร็วในการเคลื่อนที่ เป็นต้น สำหรับยานใต้น้ำที่ตัวยานมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ ไม่มีการเคลื่อนที่ควบ (non-couple motion) เกิดขึ้นในสองทิศทางพร้อมกัน แรงลอยตัวกระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ของยาน วางตัวในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) และเมื่อยานมีความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ต่ำ อาจจะไม่จำเป็นต้องพิจารณาเมตริกซ์ค่าสัมประสิทธิ์ทางน้ำแบบไม่เชิงเส้น (Hydrodynamic Coriolis) และแบบสู่ศูนย์กลาง (Centripetal) ได้ [23]

2.6.4 แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ

สมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของยานใต้น้ำที่มีองศาอิสระเท่ากับ 6 (6 degree of freedom หรือ 6 DOF) เมื่อเขียนสมการในรูปทั่วไปในกรอบอ้างอิงของตัวยาน จะได้ดังสมการที่ (2.25) [23]

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.25)$$

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \quad (2.26)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \quad (2.27)$$

เมื่อประมาณการเคลื่อนที่ที่เป็นเชิงเส้น ณ จุดสมดุลจุดใดจุดหนึ่ง สมการ (2.25) จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น [23]

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_c(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right|_{\boldsymbol{\eta}_0} \Delta\boldsymbol{\eta} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (2.28)$$

โดยที่ตำแหน่งสมมูลนั้นจะแทนด้วยตัวห้อย 0 ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

$$\mathbf{v}_0 = [u_0 \quad v_0 \quad w_0 \quad p_0 \quad q_0 \quad r_0]^T \quad (2.29)$$

$$\boldsymbol{\eta}_0 = [x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad \phi_0 \quad \theta_0 \quad \psi_0]^T \quad (2.30)$$

ดังนั้นผลต่างที่จุดสมมูลกับจุดใดๆ จะได้เป็น

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0 \quad (2.31)$$

$$\Delta \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_0 \quad (2.32)$$

$$\Delta \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_0 \quad (2.33)$$

และเมื่อกำหนดให้แรงจากค่าสัมประสิทธิ์ทางน้ำแบบไม่เชิงเส้น ($f_c(\mathbf{v})$) และแรงจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง ($f_d(\mathbf{v})$)

$$f_c(\mathbf{v}) = \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (2.34)$$

$$f_d(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (2.35)$$

สำหรับยานได้นำที่ตัวยานมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ จะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ควบ (non-couple motion) สองทิศทางพร้อมกัน และแรงลอยตัวนั้นกระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงมวล (center of gravity) ของยาน วางตัวในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) และเมื่อยานมีความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ที่ต่ำ พจน์ของเมตริกซ์ $\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ จะสามารถตัดทิ้งได้ [23] ส่วนเมตริกซ์อื่นๆ ในสมการที่ (2.25) มีองค์ประกอบย่อยดังนี้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (2.36)$$

$$\mathbf{M}_{RB} = \text{diag}[m_x, m_y, m_z, I_x, I_y, I_z] \quad (2.37)$$

$$\mathbf{M}_A = \text{diag}[X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}] \quad (2.38)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})_L + \mathbf{D}(\mathbf{v})_Q \quad (2.39)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_L = \text{diag}[X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r] \quad (2.40)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_Q = \text{diag} \begin{bmatrix} X_{u|u}u, Y_{v|v}v, Z_{w|w}w, \\ K_{p|p}p, M_{q|q}q, N_{r|r}r \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = - \begin{bmatrix} (W - B)\sin \theta \\ -(W - B)\cos \theta \sin \phi \\ -(W - B)\cos \theta \cos \phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

2.7 ตัวควบคุมสมัยใหม่

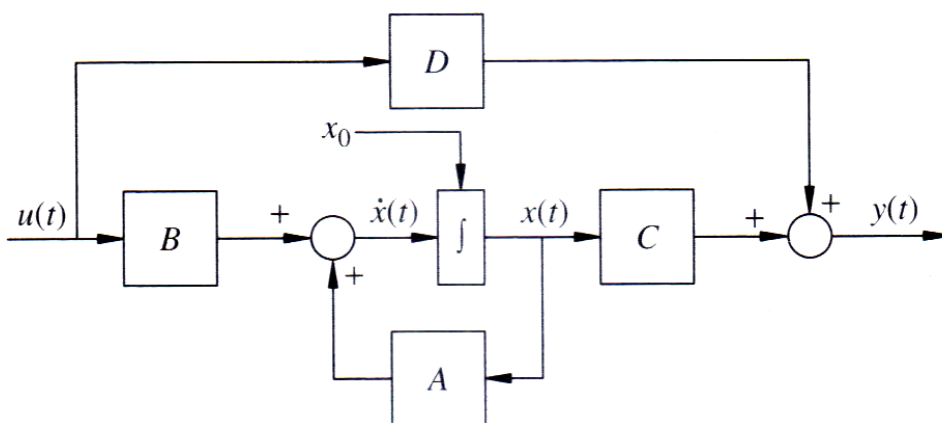
2.7.1 สมการสถานะของระบบพลศาสตร์

สมการสถานะเขียนอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (2.43)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (2.44)$$

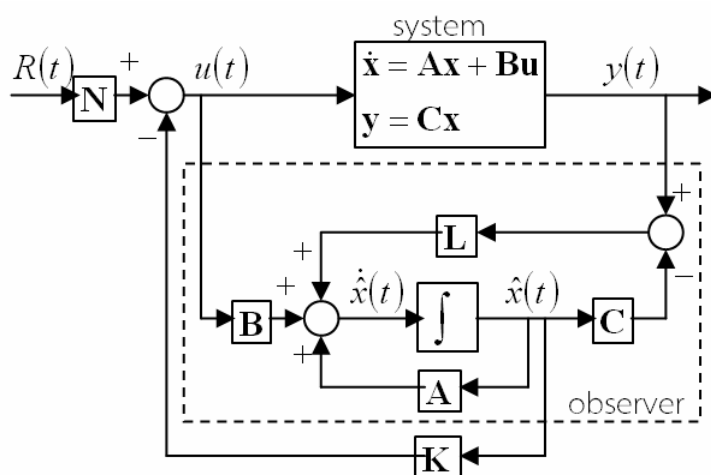
โดยที่ \mathbf{x} คือตัวแปรสถานะ \mathbf{y} คือเอาต์พุต \mathbf{u} คืออินพุต สมการสถานะเขียนอยู่ในรูปแผนภูมิมบล็อกดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แผนผังบล็อกของสมการสถานะ [9]

2.7.2 ทฤษฎีการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุต

การควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต (output feedback control) เป็นการใช้อยู่ตัวสังเกตสถานะร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับสถานะในการควบคุม โดยที่ตัวควบคุมจะใช้เวกเตอร์ \hat{x} ซึ่งเป็นค่าประมาณการของเวกเตอร์สถานะ x ในการคำนวณค่าสัญญาณ u



รูปที่ 2.32 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต

จะสังเกตว่าโครงสร้างโดยรวมของการควบคุมจะเป็นการป้อนกลับเฉพาะเอาต์พุต [24] ดังในรูปที่ 2.32 โดยจะมีกฎการควบคุมคือ

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{N}} \quad (2.45)$$

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุตทำได้หลายวิธีการ ดังเช่นขั้นตอน
ดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง ตรวจสอบคุณสมบัติความสามารถในการควบคุมได้ (controllability) และ
ความสามารถในการสังเกตได้ (observability) ของระบบ สำหรับระบบแบบเชิงเส้นที่ไม่เปลี่ยนแปลง
ตามเวลา (LTI) ที่ถูกแสดงโดย

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad \text{และ} \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

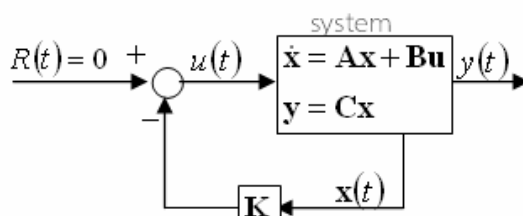
โดยมี $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ และระบบมีเมตริกซ์ความสามารถในการควบคุมได้ (\mathbf{C}_0) และมีเมตริกซ์
ความสามารถในการสังเกตได้ (\mathbf{O}_0) เป็น

$$\mathbf{C}_0 = (\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}) \quad (2.46)$$

$$\mathbf{O}_0 = (\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^{T^2}\mathbf{C}^T \quad \dots \quad \mathbf{A}^{T^{n-1}}\mathbf{C}^T) \quad (2.47)$$

ระบบจะสามารถควบคุมได้ถ้า $\text{rank}(\mathbf{C}_0) = n$ และจะสามารถสังเกตการณ์ได้ถ้า $\text{rank}(\mathbf{O}_0) = n$ หรือ
อันดับของระบบ

ขั้นที่สอง หาค่าอัตราขยาย (\mathbf{K})ของการควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต โดยพิจารณาตัว
ควบคุมเป็นแบบป้อนกลับสถานะเพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุลคือ $R(t) = 0$ ตามแผนภาพกรอบ
ในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับสถานะเพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุล

ที่มีกฎการควบคุมคือ

$$\mathbf{u} = -k_1x_1 - k_2x_2 \dots k_nx_n = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (2.48)$$

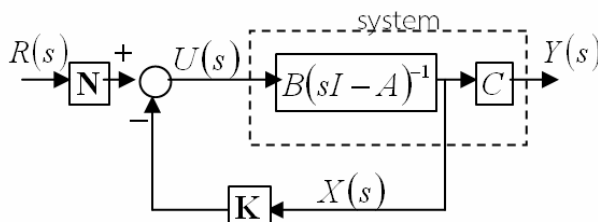
โดยที่ \mathbf{K} คืออัตราขยายที่จะทำให้ระบบควบคุมมีค่าโพล ตามที่ต้องการ ในกรณีที่ระบบลำดับที่สอง สามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมคือ

$$\det(\mathbf{I}s - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})) = 0 \quad (2.49)$$

กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการคือ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.50)$$

ขั้นตอนที่สาม หาค่า \mathbf{N} ของการควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต โดยใช้วิธีปรับรูปร่างอินพุต เพื่อตามสัญญาณอ้างอิง $R(t)$ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวตามที่ต้องการ [24], [25]



รูปที่ 2.34 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเมื่อมีการปรับรูปร่างอินพุต ในโดเมน s

จากแผนภาพกรอบในรูปที่ 2.34 ฟังก์ชันถ่ายโอน $T(s)$ คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK}))^{-1} \mathbf{B}\mathbf{N}(s) \quad (2.51)$$

และ $(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK}))^{-1}$ สามารถหาได้จาก

$$(s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK}))^{-1} = \frac{\text{adj}[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})]}{\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})]} \quad (2.52)$$

และความคลาดเคลื่อนของสัญญาณอ้างอิงกับเอาต์พุต ($E(s)$) คือ

$$E(s) = R(s) - Y(s) = (1 - T(s))R(s) \quad (2.53)$$

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (e_{ss}) ของระบบดังรูปที่ 2.34 หาได้จากทฤษฎีค่าสุดท้ายคือ

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (2.54)$$

ในที่นี้สัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันขั้นบันได ดังนั้นจะได้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[\left(1 - \mathbf{C} \frac{\text{adj}[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})]}{\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{BK})]} \mathbf{BN}(s) \right) \frac{1}{s} \right] \quad (2.55)$$

ดังนั้นสามารถหาค่า N โดยการเทียบสมการ (2.55) กับค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวที่ต้องการ
ขั้นตอนที่สี่ ออกแบบตัวสังเกตสถานะอันดับสมบูรณ์ ($\hat{\mathbf{x}}(t)$) ตามแผนภาพกรอบของการ
ควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตในรูปที่ 2.32 โดยตัวสังเกตการสถานะอันดับสมบูรณ์เขียนอยู่ในสมการได้
เป็น

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{LC})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{Bu} - \mathbf{Ly} \quad (2.56)$$

โดยที่ เมทริกซ์ \mathbf{L} เป็นเมทริกซ์ค่าขยายของตัวสังเกตสถานะและเมื่อแทน \mathbf{x} ด้วย $\hat{\mathbf{x}}$ กฎการควบคุม
ป้อนกลับสถานะในสมการที่ (2.84) เขียนใหม่เป็น

$$\mathbf{u} = -k_1\hat{x}_1 - k_2\hat{x}_2 \dots k_n\hat{x}_n = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} \quad (2.57)$$

โดยสมการที่ (2.57) ก็คือกฎการควบคุมของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตนั่นเองที่ยังไม่มีการปรับ
รูปร่างอินพุต การหาค่าเมทริกซ์ \mathbf{L} ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการหาค่า \mathbf{K} กรณีเป็น

ระบบลำดับที่สอง สามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของตัวสังเกตสถานะ ตามสมการที่ (2.58) กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการ

$$\det(\mathbf{I}s - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})) = 0 \quad (2.58)$$

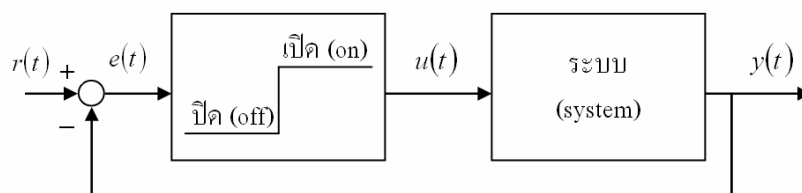
2.8 ตัวควบคุมดั้งเดิม

2.8.1 ตัวควบคุมแบบเปิดปิด

การควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเปิดปิด (on-off controller) สัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมจะมีค่าเพียง 2 ค่า คือ เปิด (on) และปิด (off) ดังแสดงในรูปที่ 2.35 และสามารถแทนกฎการควบคุมด้วยสมการคณิตศาสตร์ ได้ดังนี้ [24]

$$u(t) = \begin{cases} 1: & \text{if } e(t) > 0 \\ 0: & \text{if } e(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2.59)$$

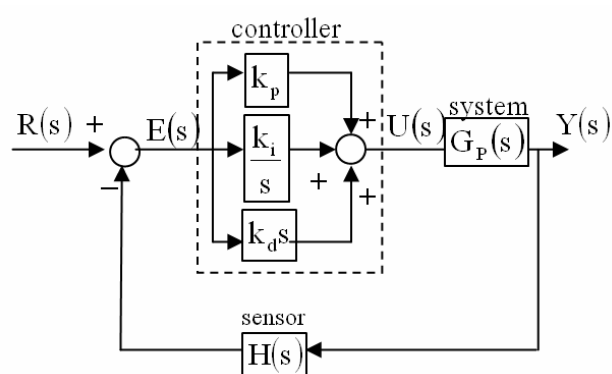
โดยที่ $u(t) = 1$ หมายถึง “เปิด” และ $u(t) = 0$ หมายถึง “ปิด”



รูปที่ 2.35 แผนภาพกรอบตัวควบคุมแบบเปิดปิด

2.8.2 ตัวควบคุมประเภทพีไอดี (PID)

ตัวควบคุมประเภทพีไอดีสามารถแบ่งย่อยได้เป็นตัวควบคุมพีไอดี ตัวควบคุมพีไอ และตัวควบคุมพีดี ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่ให้สัญญาณควบคุมเป็นแบบค่าต่อเนื่อง [24] แผนภาพกรอบตัวควบคุมพีไอดีเขียนในโดเมน s เขียนได้ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แผนภาพกรอบของการควบคุมแบบพีไอดี (PID) เขียนในโดเมน s

กฎการควบคุมแบบพีไอดี (PID) เขียนอยู่ในรูปสมการคือ

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) E(s) \quad (2.60)$$

หรือ

$$U(s) = G_c(s) E(s) \quad (2.61)$$

โดยที่ $G_c(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอดีและมีค่าเท่ากับ

$$G_c(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) \quad (2.62)$$

และ $U(s)$ คือสัญญาณควบคุม $E(s)$ คือผลต่างของสัญญาณอ้างอิง ($R(s)$) กับเอาต์พุต ($Y(s)$) เมื่อให้ $G_p(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ส่วน $H(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัด ส่วน k_p , k_i และ k_d เป็นค่าอัตราขยาย ของพจน์ P, I และ D ตามลำดับ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแบบลูปปิด ($T(s)$) คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)H(s)} \quad (2.63)$$

เมื่อผลตอบสนองของเซนเซอร์ไวกว่าผลตอบสนองของระบบมากๆ ดังนั้นค่าที่วัดได้จะเป็นค่าของเอาต์พุตโดยตรง ดังนั้นจึงให้ $H(s) = 1$ และจะได้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับขนาดหนึ่งหน่วย (unity feedback) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนป้อนไปข้างหน้าโดยกำหนดให้เป็น $G(s)$ ดังสมการ

$$G(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (2.64)$$

และสามารถหาผลต่างที่สภาวะคงตัว (steady state error) เมื่ออินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดต่อหนึ่งหน่วย อินพุตได้จากสมการ

$$e_{ss} = e_{\text{step}}(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \quad (2.65)$$

และในการออกแบบตัวควบคุมจะเป็นการหาค่า k_p , k_i และ k_d โดยสามารถใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองมาตรฐาน (2.66) กับเงื่อนไขการออกแบบที่ต้องการจากค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง (ζ) และค่าความถี่ทางธรรมชาติ (ω_n)

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.66)$$

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ภาพรวมของการดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยวิธีดำเนินการวิจัยหลายขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอน รายละเอียดจะประกอบด้วยเนื้อหาที่เป็นเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติควบคู่กัน ไป ดังนั้นเพื่อให้ดูง่าย จึงได้แยกเนื้อหา และจัดลำดับขั้นตอนของการวิจัยดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) ศึกษาองค์ประกอบที่มีผลสำคัญต่อการออกแบบยานได้นำควบคุมระยะไกล รายละเอียดของขั้นตอนนี้ ได้ศึกษาและเขียนเนื้อหาต่างๆไว้ในบทที่ 2

ขั้นตอนที่ 2) ออกแบบและสร้างต้นแบบยานได้นำควบคุมระยะไกล ที่มีความเป็นไปได้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 4 องศาอิสระหรือ 4-DOF รายละเอียดของขั้นตอนนี้ สำหรับวิธีการและผลการออกแบบ จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 นี้ และสำหรับเนื้อหาและข้อมูลที่เป็นการทดสอบ การทดลอง เช่นการทดสอบความสามารถต้านทานแรงคั้นได้นำของอุปกรณ์ และการทดลองหาสมรรถนะของชุดผลึก จะแยกออกไปแสดงไว้ในภาคผนวก ก และ ค ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 3) หาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานได้นำควบคุมระยะไกลที่ได้สร้างขึ้น รายละเอียดของขั้นตอนนี้ จะแยกออกไปแสดงไว้ในส่วนของภาค ข

ขั้นตอนที่ 4) สร้างสมการการเคลื่อนที่ของยานได้นำควบคุมระยะไกล รายละเอียดของขั้นตอนนี้ จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 นี้

ขั้นตอนที่ 5) ออกแบบระบบควบคุมโดยใช้หลักการควบคุมสมัยใหม่ รายละเอียดของขั้นตอนนี้ จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 นี้

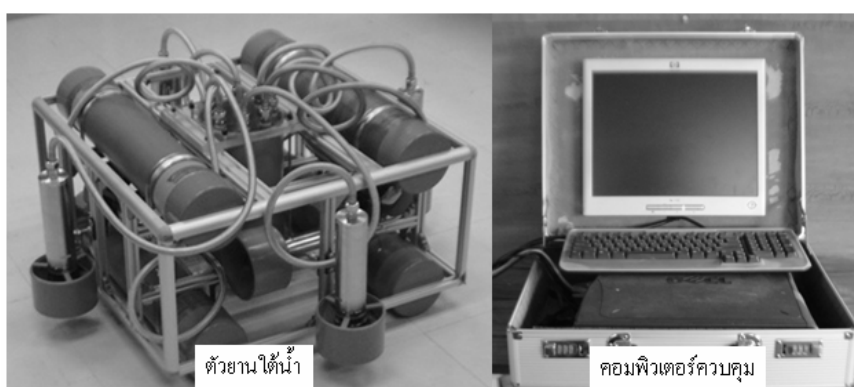
ขั้นตอนที่ 6) ประดิษฐ์โปรแกรมการควบคุมแบบบังคับด้วยมือ (Manual) และแบบอัตโนมัติ (Automatic) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของยานได้นำควบคุมระยะไกล

ขั้นตอนที่ 7) ทดสอบระบบควบคุมกับยานได้นำที่สร้างขึ้น วิธีการและผลที่ได้ รายละเอียดของขั้นตอนนี้ จะแยกแสดงไว้ในบทที่ 4

จากนั้นเมื่อดำเนินการวิจัยครบทุกขั้นตอน ท้ายสุดคือสรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และให้ข้อเสนอแนะของงานวิจัยนี้ไว้ในบทที่ 5

3.2 ภาพรวมการออกแบบยานใต้น้ำ

ในขั้นตอนของการออกแบบ ได้มีการออกแบบและสร้างต้นแบบของยานใต้น้ำเป็นสองรูปแบบ โดยในช่วงเริ่มต้นได้มีการออกแบบและสร้างยานใต้น้ำออกมามีลักษณะภายนอกดังในรูปที่ 3.1 (ก) และหลังจากนั้นได้มีการปรับปรุงในส่วนของคุณสมบัติ การจัดวางชุดผลึก และถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ เพื่อให้มีความกะทัดรัด ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมยิ่งขึ้น ลักษณะภายนอกหลังจากได้ปรับปรุงใหม่นั้นแสดงดังในรูปที่ 3.1 (ข) และยานใต้น้ำที่ได้ออกแบบ ให้ชื่อว่ายานใต้น้ำ “BENBAM-G2” และ “BENBAM-G3” ตามลำดับ



(ก) ยานใต้น้ำออกแบบครั้งแรก (BANBAM-G2)



(ข) ยานใต้น้ำหลังปรับปรุงจากการออกแบบครั้งแรก (BENBAM-G3)

รูปที่ 3.1 ยานใต้น้ำ BENBAN-G2 และ ยานใต้น้ำ BENBAN-G3

ยานใต้น้ำประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนประกอบทางกล ส่วนที่สองเป็นส่วนประกอบทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนที่สามเป็นกฎการควบคุมและโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการควบคุมอัตโนมัติ โดยทั้งหมดมีข้อกำหนดด้านสมรรถนะในขั้นตอนออกแบบดังแสดงในตารางที่ 3.1 และได้ข้อมูลทางเทคนิคของยานใต้น้ำที่สร้างขึ้นตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดด้านสมรรถนะและความแข็งแรงของยานใต้น้ำในขั้นตอนออกแบบ

การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ	ข้อกำหนด	ความคลาดเคลื่อนสูงสุด
1. หน้า-หลัง	ความเร็ว 0 ถึง 0.5 m/s	± 0.1 m/s
2. ซ้าย-ขวา	ความเร็ว 0 ถึง 0.5 m/s	± 0.1 m/s
3. หมุนแกนแนวตั้ง (หมุนรอบตัว)	มุมแกว่ง $\pm 180^\circ$	$\pm 5^\circ$
4. ดำน้ำลึก	0 ถึง 2 m	± 0.1 m
ความแข็งแรงและความสามารถในการป้องกันน้ำของอุปกรณ์	ทนความดันได้ลึก 5 m	

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางเทคนิคของยานใต้น้ำ BENBAM

ข้อมูลทางเทคนิค	BENBAM-G2	BENBAM-G3
1. ขนาดตัวยานใต้น้ำ (กว้าง x ยาว x สูง)	900 mm x 900 mm x 300 mm	880 mm x 640 mm x 500 mm
2. น้ำหนักชั่งบนบก(ในน้ำ)	30 kg (ประมาณ 0)	70 kg (ประมาณ 0)
3. แรงดันไฟฟ้า	24 VDC	24 VDC
4. ความสามารถในการเคลื่อนที่ ตามการจัดวางชุดผลึก	หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำน้ำขึ้น-ลง หมุนซ้าย-ขวา	หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำน้ำขึ้น-ลง หมุนซ้าย-ขวา
5. จำนวนชุดผลึก	8 ตัว	8 ตัว
6. ขีดจำกัดความลึก	ใช้งานได้ปลอดภัย ที่ความลึก 0-5 m	ใช้งานได้ปลอดภัย ที่ความลึก 0-5 m

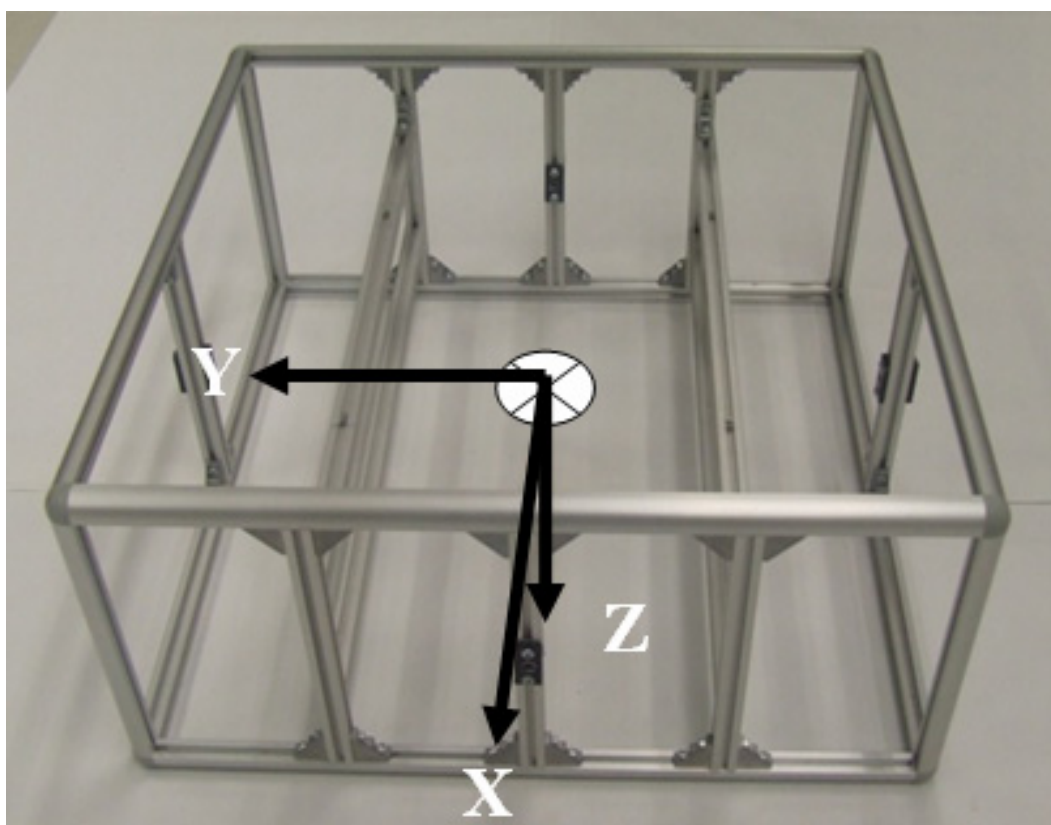
3.3 การออกแบบและสร้างต้นแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล BENBAM-G2

3.3.1 การออกแบบโครงสร้างยาน

มีปัจจัยประกอบการออกแบบดังนี้

- 1) มีรูปร่างสมมาตร
- 2) มีความแข็งแรงเพียงพอและพื้นที่ปะทะน้ำน้อย เพื่อลดแรงต้านการเคลื่อนที่
- 3) การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ทำได้ง่าย
- 4) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

ผลการออกแบบโครงสร้างยานที่ได้จากการออกแบบ ใช้อลูมิเนียมสำเร็จรูปมาประกอบเป็นโครงสร้างยาน ดังรูปที่ 3.2 โดยโครงสร้างยานมีความสมมาตรกันทั้งสามแกน (x, y, z) ทำให้ได้จุด CG ของโครงสร้าง อยู่ที่กึ่งกลางยาน ข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญของโครงสร้างยานหลังการออกแบบ แสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของยานใต้น้ำ BENBAN-G2

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลทางเทคนิคของโครงสร้างยานใต้น้ำ BENBAN-G2

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
วัสดุ	อลูมิเนียม	
ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง)	900cm x 800cm x 300cm	
มวล	5.5 kg	
ความต้านทานความดันที่ความลึก 5 เมตร	ทนได้	อ้างอิงกับคุณสมบัติของวัสดุ

3.3.2 การออกแบบชุดผลึก

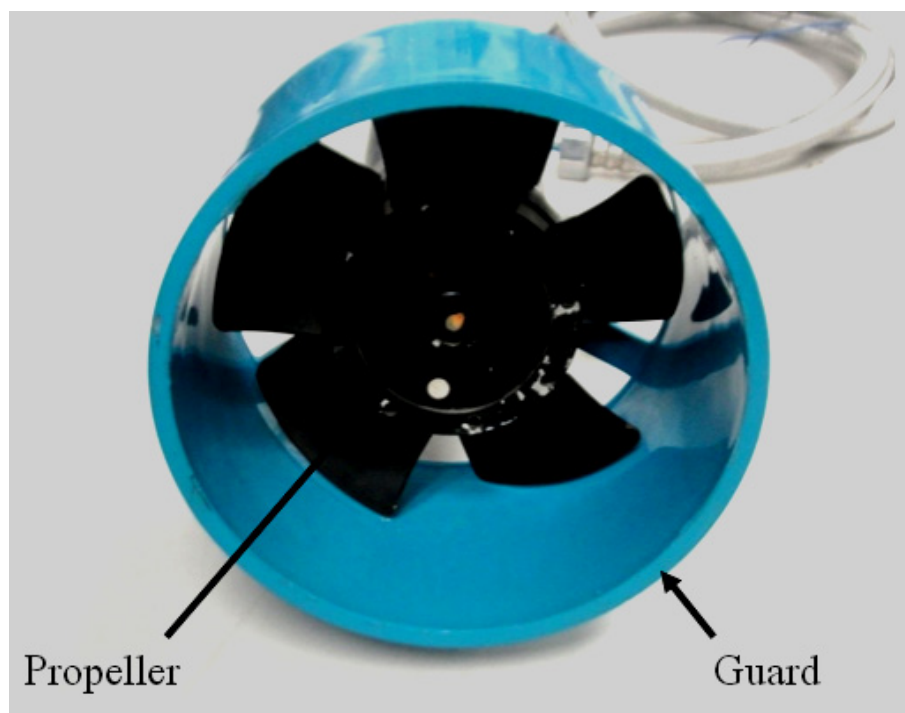
ปัจจัยประกอบการออกแบบ

- ก) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 - 24 โวลต์ เป็นต้นกำลัง
- ข) วัดความเร็วรอบได้ หรือควบคุมแรงผลึกได้
- ค) กันน้ำได้ หรือสามารถทำงานได้ในน้ำโดยปราศจากการป้องกันน้ำ
- ง) ใช้ใบพัดผลึกดันน้ำ
- จ) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ
- ฉ) เพื่อใช้เป็นชุดผลึกรุ่นต้นแบบ (prototype model)

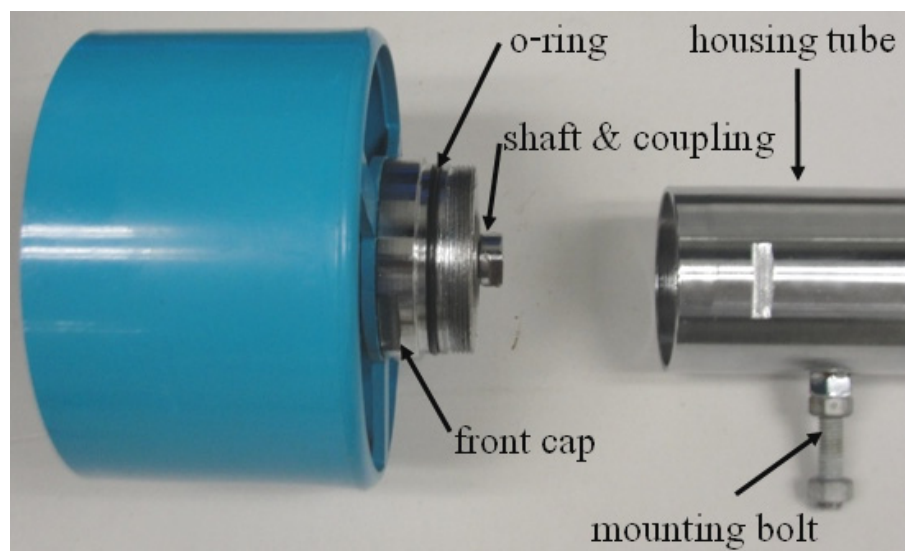
ผลการออกแบบและสร้างชุดผลึกได้ดังรูปที่ 3.3 และมีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบเพื่อใช้กับยานใต้น้ำ BENBAN-G2

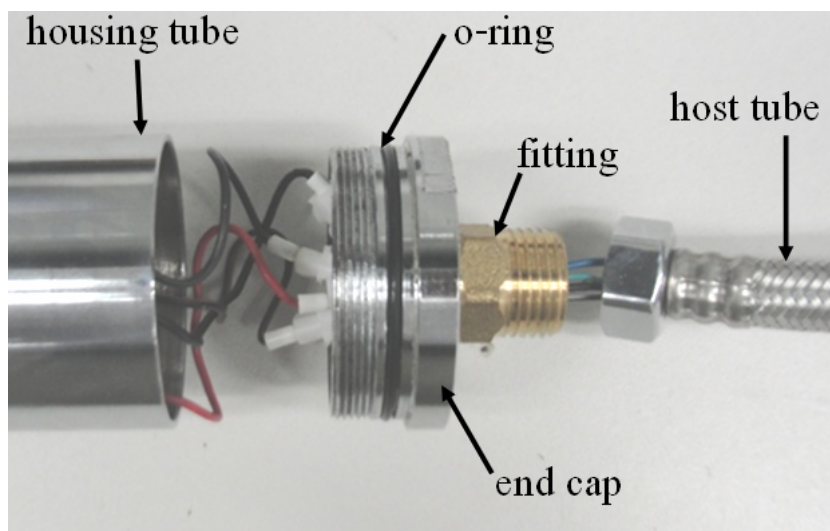


(ก)

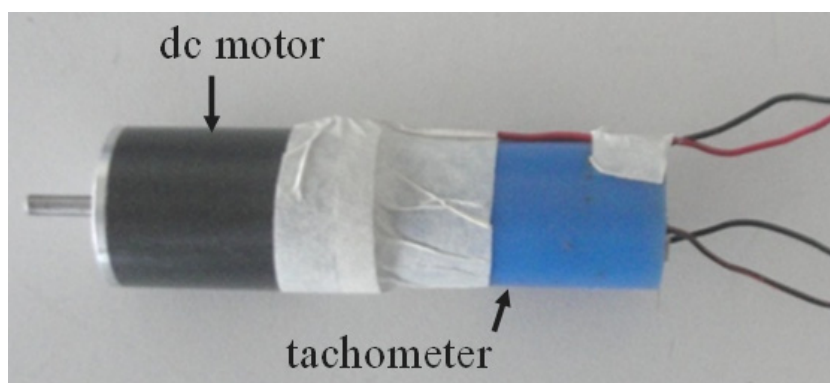


(ข)

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของชุดผลักดันที่ได้จากการออกแบบ



(ค)



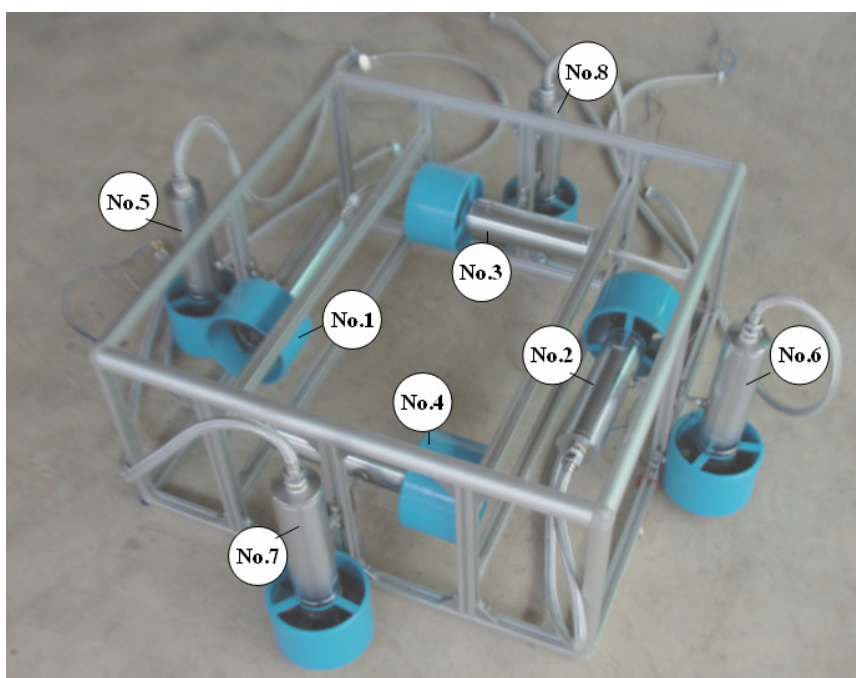
(ง)

รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.4 ชุดผลึกประกอบด้วย เรือนชุดผลึก (front cap, end cap, o-ring และ housing tube) ทำหน้าที่ป้องกันน้ำและซีดอุปกรณ์ โอริง มอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่เป็นต้นกำลัง tachometer ทำหน้าที่วัดรอบมอเตอร์ ท่ออ่อน (host tube) ข้อต่อ (fitting) ทำหน้าที่ป้องกันสายไฟและกันน้ำ เฟลา (shaft) คัปปลิง (coupling) ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์ไปยังใบพัด (propeller) ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงบิดที่ได้จากต้นกำลังเป็นแรงผลัดคั่นน้ำ ฝาครอบ (guard) ทำหน้าที่ป้องกันการปะทะ

ระหว่างใบพัดกับสิ่งรอบๆ และยังทำหน้าที่บังคับทิศทางของน้ำที่พุ่งออกจากใบพัดให้เป็นลำการไหลตามแนวแกนใบพัด

ชุดผลึกที่ติดตั้งกับตัวยานใต้น้ำ BENBAM-G2 มี 8 ชุด โดยติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.5 ชุดผลึกมีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดชุดผลึกและหมายเลขชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAM-G2

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลทางเทคนิคของชุดผลึก

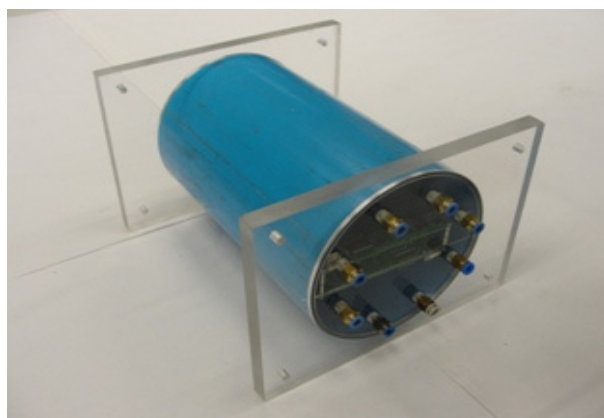
ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. แรงดันไฟฟ้า	24 vdc	
2. กำลังมอเตอร์	100 Watt	
3. แรงผลึกสูงสุดที่แรงดัน 24 v	10 N	จากการทดสอบ
4. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	Tachometer	
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	110 mm.	
6. มวล	2.3 kg ต่อ ชุด	รวม18 kg
7. ความต้านทานความดัน ที่ความลึก 5 เมตร	ทนได้	จากการทดสอบ

3.3.3 การออกแบบถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

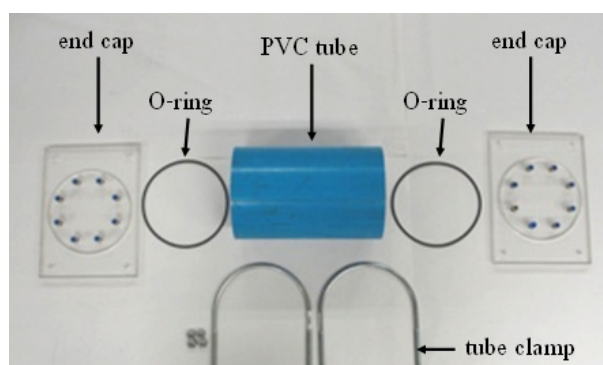
ปัจจัยประกอบการออกแบบ

- 1) มีรูปร่างสมมาตร
- 2) มีความแข็งแรงเพียงพอ กันน้ำได้
- 3) การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ทำได้ง่าย
- 4) การเชื่อมต่อสายไฟทำได้ง่าย
- 5) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

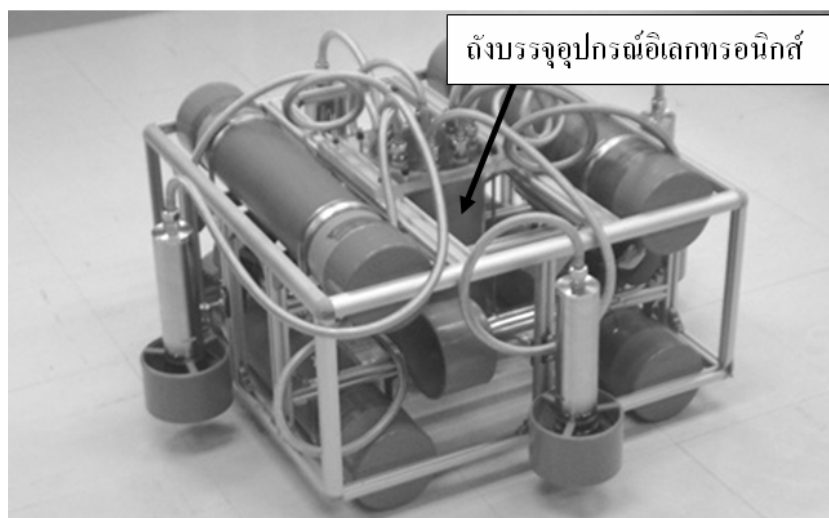
ผลการออกแบบ ได้ถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ท่อน้ำพีวีซีมาประกอบเป็นถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.6 และติดตั้งถังไว้ตรงกึ่งกลางของตัวยานดังรูปที่ 3.8 ถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3.8 การติดตั้งถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับโครงยาน

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลทางเทคนิคของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. วัสดุ	ท่อพีวีซี	
2. มวลพร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	6.2 kg	
3. ความต้านทานความดัน ที่ความลึก 5 เมตร	ทนได้	จากการทดสอบ

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลทางเทคนิคของถังเพิ่มแรงลอยตัว

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. วัสดุ	ท่อพีวีซี	
2. ปริมาตรต่อถัง	0.006 m ³	ค่าประมาณ
3. มวลต่อถัง	1.6 kg	พร้อมชุดยึด
4. แรงลอยตัวสุทธิต่อถัง	4.5 kgf (หรือ 43.2 N)	หักลบด้วยมวลแล้ว
5. ความต้านทานความดัน ที่ความลึก 5 เมตร	ทนได้	จากการทดสอบ

3.3.4 การออกแบบถังเพิ่มแรงลอยตัว

ปัจจัยประกอบการออกแบบ

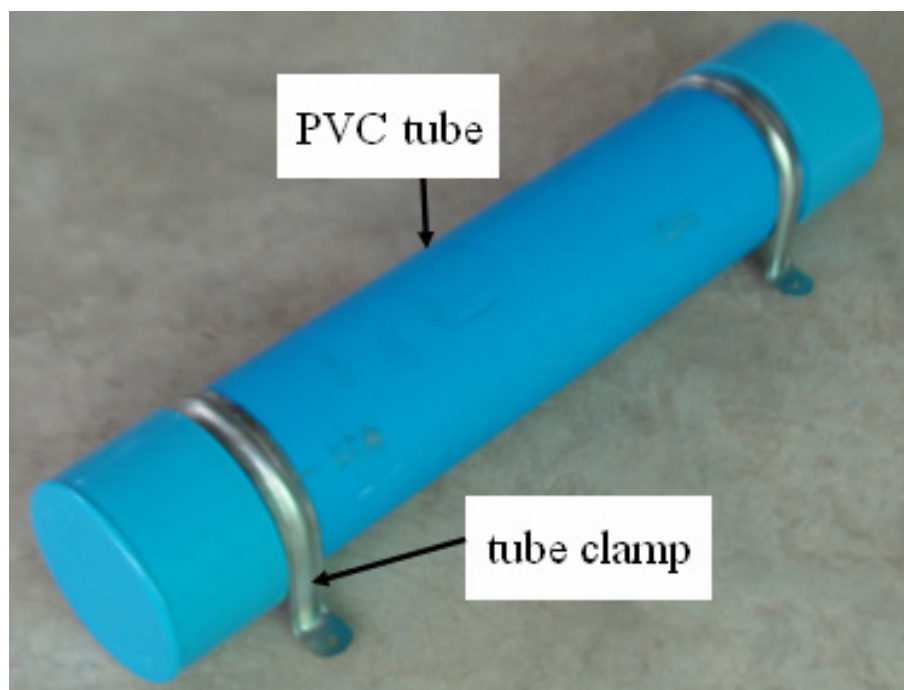
- 1) มีรูปร่างสมมาตร

- 2) มีความแข็งแรงเพียงพอ กันน้ำได้
- 3) การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ทำได้ง่าย
- 4) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

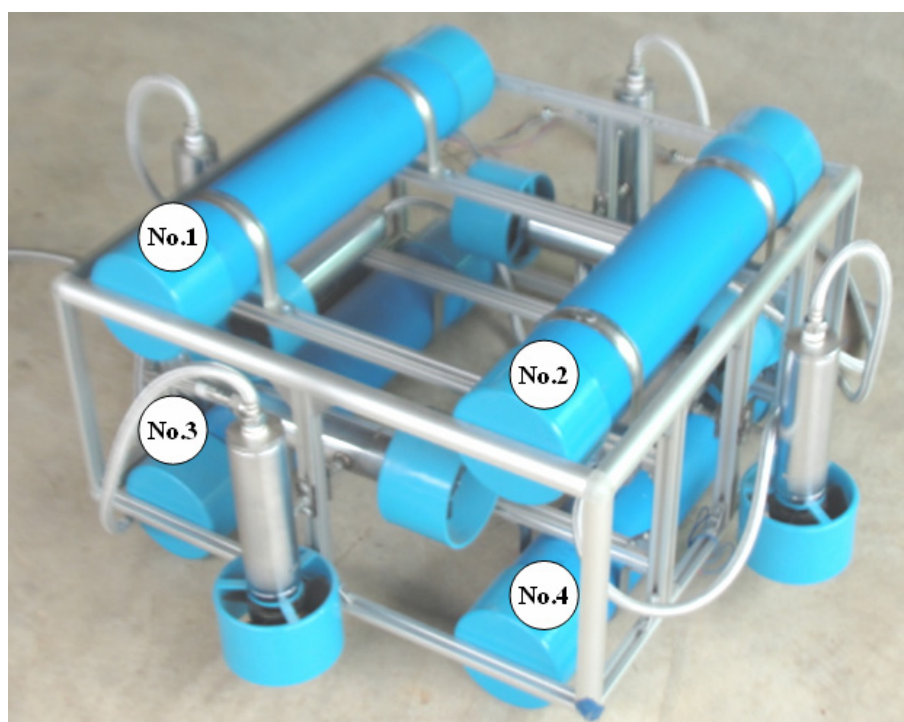
ผลการออกแบบถังเพิ่มแรงลอยตัว ใช้น้ำพื้วิธีมาประกอบเป็นถังเพิ่มแรงลอยตัว ดังรูปที่ 3.9 โดยใช้ทั้งหมด 4 ถัง ติดตั้งสมมาตรกัน ดังรูปที่ 3.11 ทำให้ได้แรงลอยตัวกระทำผ่านจุด CG ของตัวยาน



รูปที่ 3.9 ถังเพิ่มแรงลอยตัวที่ได้จากการออกแบบ



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของถังเพิ่มแรงลอยตัวที่ได้จากการออกแบบและวิธีติดตั้ง



รูปที่ 3.11 การติดตั้งถังเพิ่มแรงลอยตัว

3.3.5 การออกแบบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดหลัก

ปัจจัยประกอบการออกแบบ

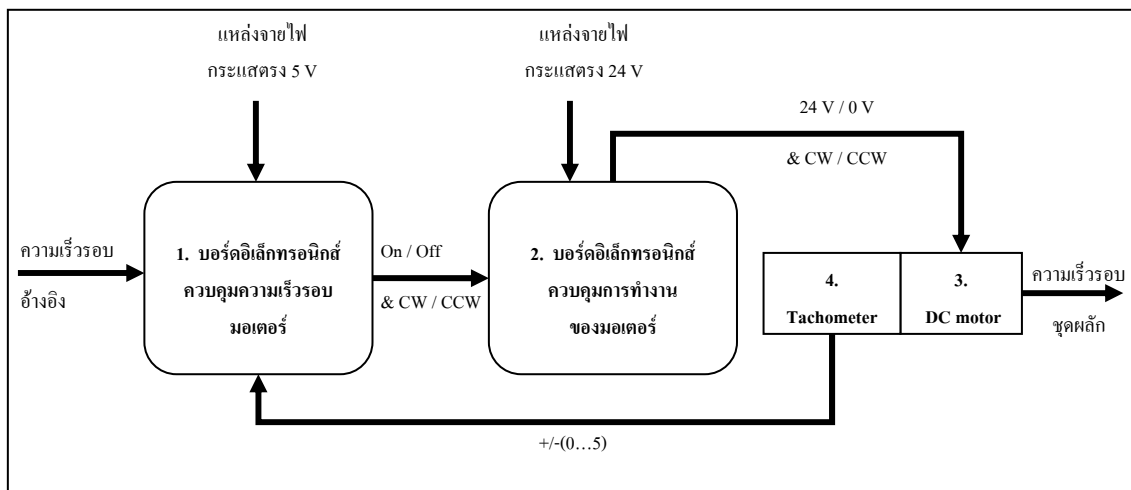
- 1) ใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12-24 โวลต์
- 2) ควบคุมความเร็วรอบและทิศทางการหมุนตามสัญญาณอ้างอิง
- 3) รับสัญญาณความเร็วรอบ และทิศทางอ้างอิง จากตัวควบคุมยานใต้น้ำ

(คอมพิวเตอร์)

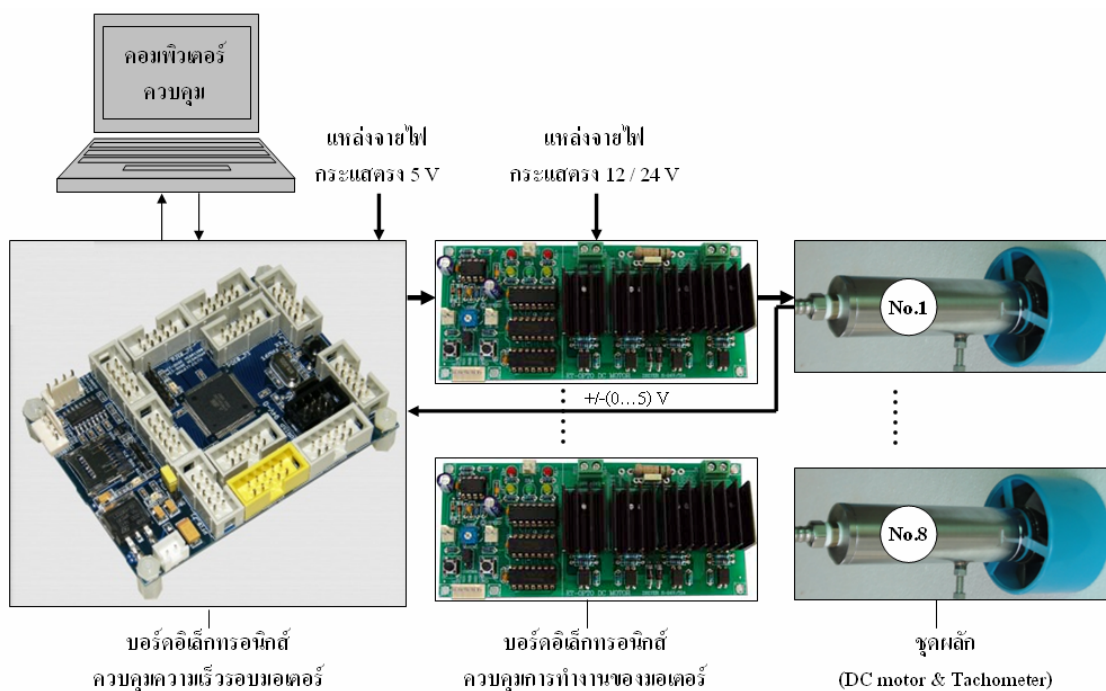
ผลการออกแบบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ แสดงเป็นแผนภาพกรอบดังรูปที่ 3.12 และแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงดังรูปที่ 3.13 ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ประกอบด้วยอุปกรณ์ 1) บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ประดิษฐ์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปรุ่น ET-BASE MEGA2560 ทำหน้าที่รับความเร็วรอบอ้างอิงจากคอมพิวเตอร์ควบคุม วัดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์จาก Tachometer จากนั้นประมวลผลการควบคุมตามซอฟต์แวร์ของกฎการควบคุมแบบเปิด-ปิด ที่บรรจุอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วส่งสัญญาณควบคุมที่ได้ (on หรือ off และทิศทางการหมุน) ไปยังบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป 2) บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ประดิษฐ์จากบอร์ดควบคุมทิศทางการหมุนมอเตอร์สำเร็จรูปรุ่น ET-OPTO DC MOTOR ทำหน้าที่ รับสัญญาณควบคุมที่ถูกส่งมาจาก บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จากนั้นประมวลผลการควบคุมโดยวงจรถิเล็กทรอนิกส์ภายในบอร์ด แล้วทำการควบคุมมอเตอร์โดยการจ่ายไฟ (on) หรือหยุดจ่ายไฟ (off) ควบคู่กับสลับทิศทางการหมุน 3) Tachometer ทำหน้าที่วัดรอบการหมุนของมอเตอร์เพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ การควบคุมความเร็วรอบของชุดหลัก ทำโดยใช้ตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (on-off control) ที่ความถี่สูง โดยแสดงเป็นแผนภาพกรอบดังรูปที่ 3.14 โดยประดิษฐ์ซอฟต์แวร์ของกฎการควบคุมแบบเปิดปิดบรรจุอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดหลัก

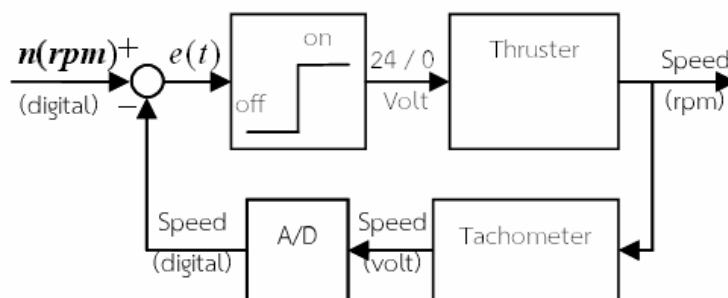
ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. แรงดันใช้งาน	24 Volt	
2. กระแสสูงสุด	10 Amp	
3. การควบคุม	Close loop on/off control	



รูปที่ 3.12 แผนภาพกรอบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชูคผลัก



รูปที่ 3.13 แผนภาพอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชูคผลัก



รูปที่ 3.14 แผนภาพการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึก

3.3.6 การออกแบบระบบไฟฟ้าวัดค่าสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวยาน

ปัจจัยประกอบการออกแบบ

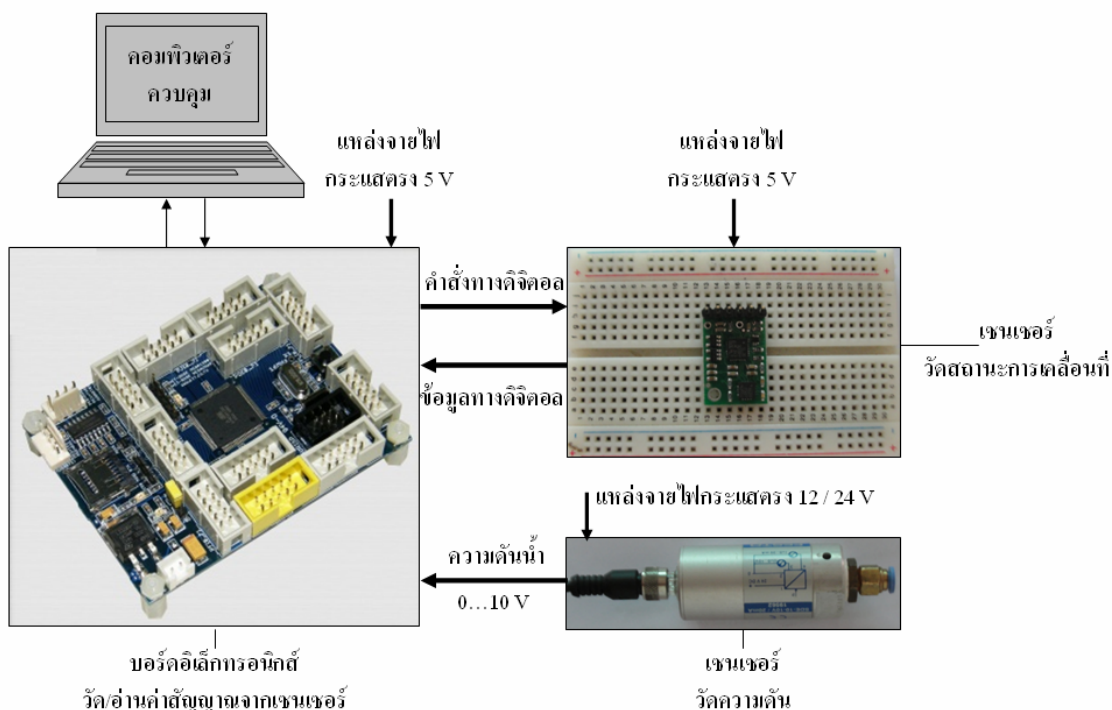
- 1) ระยะทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x y และ z
- 2) องศาการหมุนรอบแกน x y และ z
- 3) ความเร็วเชิงเส้นของยานตามแนวแกน x y และ z
- 4) ความเร็วเชิงมุมรอบแกน x y และ z
- 5) ความเร่งเชิงเส้นตามแนวแกน x y และ z
- 6) ความเร่งเชิงมุมรอบแนวแกน x y และ z และ
- 7) ความลึกของตัวยาน

จากการออกแบบ ถ้าจะวัดค่าของตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมานี้ด้วยเซนเซอร์ (sensor) จะมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในการออกแบบระบบวัดค่าสัญญาณการเคลื่อนที่ของยานนี้ จะวัดค่าที่จำเป็นต้องใช้งาน สามารถวัดได้ง่าย เซนเซอร์มีราคาไม่สูงและหาซื้อได้ง่าย ส่วนตัวแปรที่จำเป็นต้องใช้งานแต่ไม่ได้วัดค่า นั้นหาค่าโดยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 3.8 ระบบไฟฟ้าวัดค่าสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวยานที่ได้จากการออกแบบแสดงเป็นอุปกรณ์จริงดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักคือ ก) เซนเซอร์วัดสถานะการเคลื่อนที่ ใช้บอร์ดเซนเซอร์สำเร็จรูปรุ่น MinIMU-9 ภายในบอร์ดประกอบด้วย 3 ส่วนย่อย ส่วนที่หนึ่งคือ 3-axis gyroscope ทำหน้าที่วัดความเร็วเชิงมุมรอบแกน x y และ z ส่วนที่สองคือ 3-axis accelerometer ทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงเส้นตามแนวแกน x y และ z และส่วนที่สามคือ 3-axis magnetometer ทำหน้าที่วัดมุมเอียงของแกน x y และ z โดยสถานะทั้งหมดจะส่งไปยังบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์วัด/อ่านค่าจากเซนเซอร์ 2) เซนเซอร์วัดความดัน เป็นเซนเซอร์รุ่น SDE-10-10/20m สามารถวัดความดันได้ 0 ถึง 10 bar ความละเอียด 0.01 bar ค่าที่ได้จากการวัดเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 10 โวลต์ 3) บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์วัด/อ่านค่า

จากเซนเซอร์ ประดิษฐ์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปรุ่น ET-BASE MEGA2560 ทำหน้าที่รับสถานะการเคลื่อนที่ จากเซนเซอร์วัดสถานะการเคลื่อนที่ เพื่อส่งสัญญาณต่อไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุม

ตารางที่ 3.8 ตารางตัวแปรที่ได้จากการวัดและได้จากการคำนวณ

ตัวแปร	วัดค่าด้วยเซนเซอร์	วิธีการคำนวณ
1. มุมการแกว่งรอบแกน x y และ z	3-axes magnetometer	
2. ความเร็วเชิงมุมรอบแกน x y และ z	3-axes gyroscope	
3. ความเร่งเชิงมุมรอบแกน x y และ z		/
4. ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน x, y		/
5. ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน z	เซนเซอร์วัดความดัน	
6. ความเร็วเชิงเส้นตามแนวแกน x y และ z		/
7. ความเร่งเชิงเส้นตามแนวแกน x y และ z	3-axis accelerometer	



รูปที่ 3.15 แผนผังทางไฟฟ้าของระบบวัดค่าตัวแปร

3.4 การออกแบบและสร้างต้นแบบยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล BENBAM-G3

3.4.1 การออกแบบโครงสร้างยาน

โครงสร้างยานรุ่น 70 kg นี้ยังคงใช้โครงสร้างของยานใต้น้ำรุ่น 30 กิโลกรัม ไม่มีการปรับปรุง เนื่องจากโครงสร้างของยานใต้น้ำรุ่น 30 kg นั้นมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ง่ายต่อการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม เป็น โครงสร้างเปิดพื้นที่ปะทะน้ำน้อย มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา

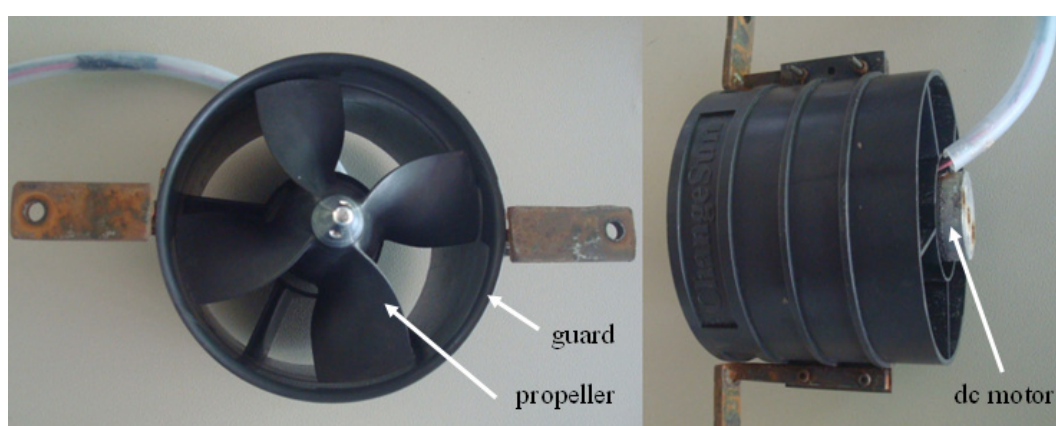
3.4.2 การออกแบบชุดผลึก

จากชุดผลึกของยานใต้น้ำรุ่น 30 kg นั้นมีข้อดีคือมีการกันน้ำได้ วัดความเร็วรอบได้ แต่พบว่ามีข้อด้อยคือ ชุดผลึกประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมาก มีแรงเสียดในส่วนของซีลกันน้ำสูง ขณะทำงาน มอเตอร์เกิดความร้อนสูง มีโอกาสเสียหายได้เมื่อมอเตอร์กำลังขับน้อย และต้องสร้างตัวควบคุมชุดผลึกแบบป้อนกลับจึงจะสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ดังนั้นจึงปรับปรุงชุดผลึกใหม่

ปัจจัยประกอบการออกแบบ

- 1) ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 - 24 โวลต์ เป็นต้นกำลัง
- 2) ควบคุมแรงผลึกได้
- 3) สามารถทำงานได้ในน้ำโดยปราศจากการป้องกันน้ำ
- 4) ใช้ใบพัดผลึกต้นน้ำ
- 5) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ
- 6) เพื่อใช้เป็นชุดผลึกรุ่นต้นแบบ (Prototype model)

จากการออกแบบและสร้างชุดผลึกได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ชุดผลึกที่ได้จากการออกแบบ

จากรูปที่ 3.216 ชุดผลึกประกอบด้วยใบพัด (propeller) ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงบิดที่ได้ จากมอเตอร์กระแสตรง (dc motor) เป็นแรงผลักดันน้ำ ฝาครอบ (guard) ทำหน้าที่ป้องกันการปะทะระหว่างใบพัดกับสิ่งรอบๆ และยังทำหน้าที่บังคับทิศทางของน้ำที่พุ่งออกจากใบพัดให้เป็นลำการไหลตามแนวแกนใบพัด

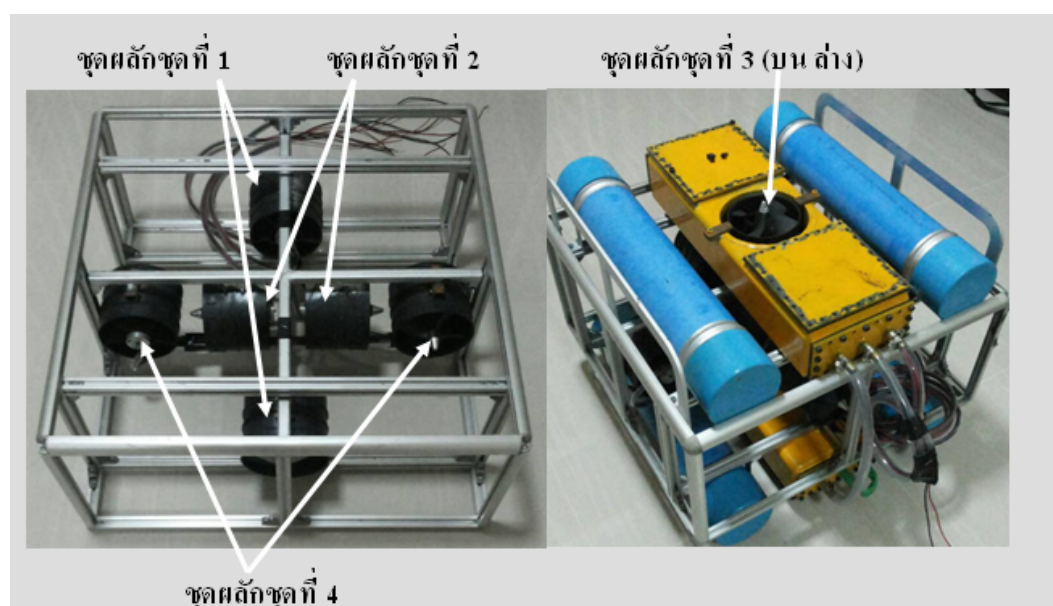
การติดตั้งชุดผลึก ได้ปรับปรุงให้จ่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ คือแบ่งชุดผลึกออกเป็น 4 คู่ ดังรูปที่ 3.17 และชุดผลึกมีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังตารางที่ 3.9 โดยแต่ละคู่ทำหน้าที่ดังนี้

คู่ที่ 1 ใช้สำหรับการเคลื่อนที่หน้า-หลัง หรือตามแนวแกน x

คู่ที่ 2 ใช้สำหรับการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา หรือตามแนวแกน y

คู่ที่ 3 ใช้สำหรับเคลื่อนที่ดำขึ้น-ลง หรือตามแนวแกน z

คู่ที่ 4 ใช้สำหรับหมุนรอบแกนแนวตั้ง หรือหมุนรอบแกน z



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งติดตั้งชุดผลึก

3.4.3 การออกแบบถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

จากถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของยานใต้น้ำรุ่น 30 kg นั้นมีข้อดีคือมีน้ำหนักเบา สร้างได้ง่ายและต้นทุนต่ำ แต่พบว่ามีข้อด้อยคือขณะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงาน เกิดความร้อนสะสมภายในถัง การถ่ายเทความร้อนออกจากถังเกิดขึ้นน้อยเพราะวัสดุของถังมีความเป็นฉนวนกัน

ความร้อนสูง ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีโอกาสเสียหายได้ อีกประการคือการติดตั้งรวมถึงการถอดประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในถังมีความยุ่งยาก ดังนั้นจึงปรับปรุงถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใหม่

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลทางเทคนิคของชุดผลึก

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. แรงดันไฟฟ้า	12-24 vdc	
2. กำลังมอเตอร์	100 Watt	
3. แรงผลึกสูงสุดที่แรงดัน 24 v	6 N	จากการทดสอบ
4. อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	ไม่มี	
5. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด	110 mm.	
6. ความต้านทานความดัน ที่ความลึก 5 เมตร	ทำงานได้โดยไม่กั้นน้ำ	จากการทดสอบ

ปัจจัยประกอบการออกแบบ

- 1) มีรูปร่างสมมาตร
- 2) มีความแข็งแรงเพียงพอ กั้นน้ำได้
- 3) การติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ทำได้ง่าย
- 4) การเชื่อมต่อสายไฟทำได้ง่าย
- 5) วัสดุหาซื้อได้ง่ายและต้นทุนต่ำ

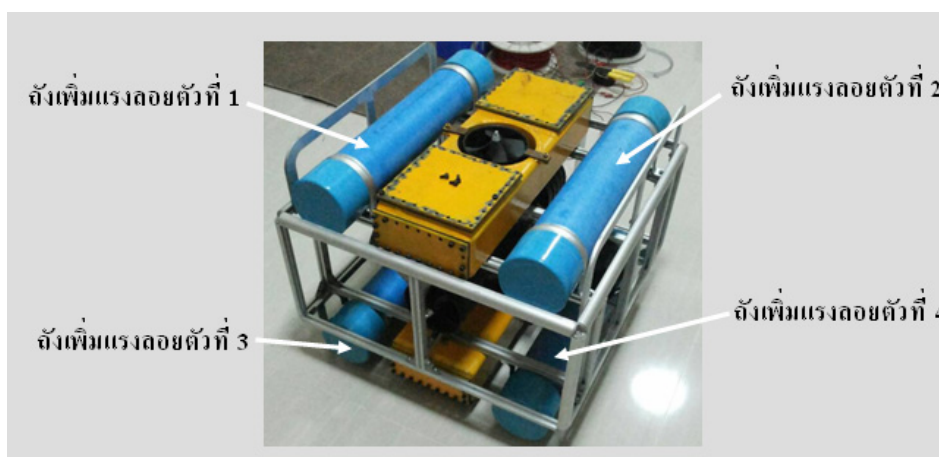
ถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการออกแบบ ใช้ท่อเหล็กมาประกอบเป็นถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 3.18 และติดตั้งถังไว้ตรงกึ่งกลางของตัวยาน ด้านบนและล่าง ดังรูปที่ 3.19 ถังใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลทางเทคนิคของถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. วัสดุ	เหล็ก	
2. มวลพร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ต่อถัง	20 kg	
3. ความต้านทานความดัน ที่ความลึก 5 เมตร	ทนได้	จากการทดสอบ



รูปที่ 3.18 ถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และการติดตั้ง



รูปที่ 3.19 การติดตั้งถังเพิ่มแรงลอยตัว

3.4.4 การออกแบบถังเพิ่มแรงลอยตัว

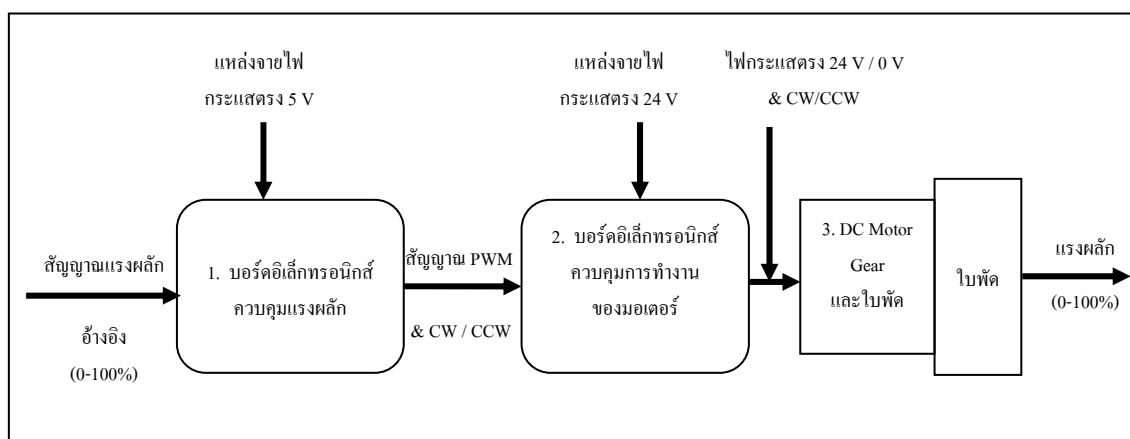
ถังเพิ่มแรงลอยตัวของยานรุ่น 70 kg ยังคงเป็นแบบยานได้น้ำรุ่น 30 kg ไม่มีการปรับปรุง เนื่องจากถังเพิ่มแรงลอยตัวของยานได้น้ำรุ่น 30 kg นั้นมีข้อดีหลายอย่าง เช่น ง่ายต่อการติดตั้ง การเพิ่มแรงลอยตัวทำได้ง่ายโดยการเพิ่มจำนวนถัง มีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา ยานรุ่น 70kg ใช้ถังเพิ่มแรงลอยตัวจำนวน 4 ถังเป็นถังหลัก ดังรูปที่ 3.19 และเพิ่มอีก 2 ถัง เพื่อชดเชยกับมวลรวมของตัวยานที่เพิ่มขึ้น

3.4.5 การออกแบบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก

การออกแบบระบบควบคุมชุดผลึกได้ออกแบบให้สามารถสร้างได้ง่ายขึ้น
ปัจจัยประกอบการออกแบบ

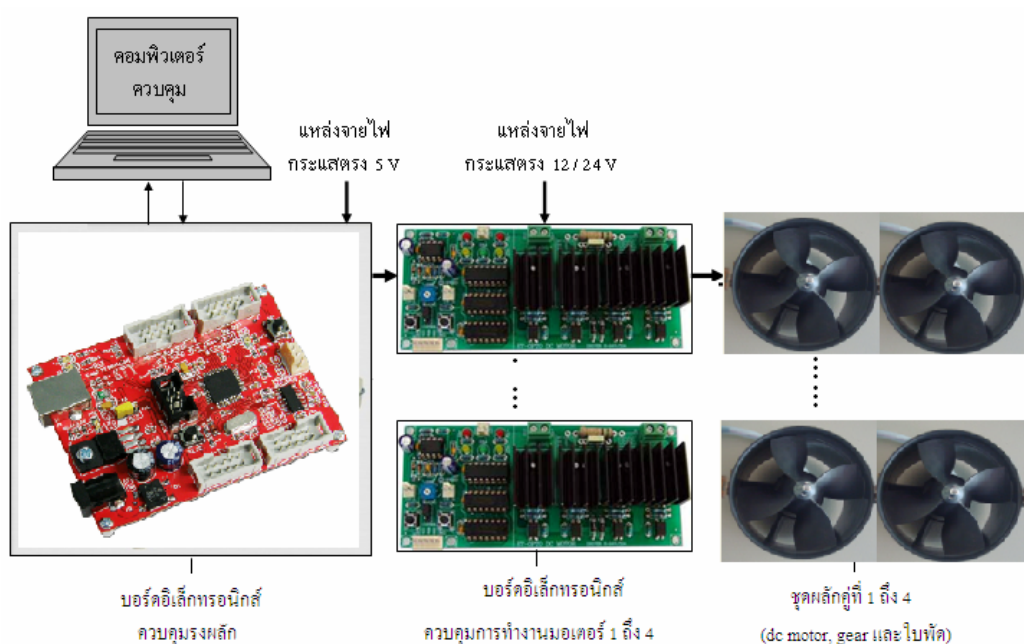
- 1) ใช้ควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12-24 โวลต์
- 2) ควบคุมแรงผลึกตามสัญญาณอ้างอิง
- 3) รับสัญญาณแรงผลึกอ้างอิงจากตัวควบคุมยานใต้น้ำ (คอมพิวเตอร์)

ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ที่ได้จากการออกแบบแสดงเป็นแผนภาพกรอบรูปที่ 3.20 และแสดงอุปกรณ์จริงดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 แผนภาพกรอบระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก

จากรูปที่ 3.20 ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก คือ 1) บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมแรงผลึก ประดิษฐ์จากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูปรุ่น ET-BASE-AVR-EASY32U4 ทำหน้าที่รับสัญญาณแรงผลึกอ้างอิงจากคอมพิวเตอร์ควบคุม แปลความหมายแล้วส่งสัญญาณ PWM และทิศทางการหมุนไปยังบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่อไป 2) บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ประดิษฐ์จากบอร์ดควบคุมทิศทางการหมุนมอเตอร์สำเร็จรูปรุ่น ET-OPTO DC MOTOR ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมที่ถูกส่งมาจาก บอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมแรงผลึก จากนั้นประมวลผลการควบคุมโดยวงจรมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ภายในบอร์ดแล้วทำการควบคุมมอเตอร์ชุดผลึกโดยการจ่ายไฟ (on) หรือหยุดจ่ายไฟ (off) ควบคู่กับสลับทิศทางการหมุน



รูปที่ 3.21 แผนภาพอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก

ตารางที่ 3.11 ข้อมูลทางเทคนิคของระบบไฟฟ้าควบคุมมอเตอร์ชุดผลึก

ข้อมูล	ค่าหรือคำอธิบาย	หมายเหตุ
1. แรงดันใช้งาน	12/24 Volt	
2. แรงผลึก	0-6 N	
3. การควบคุม	Opened loop	

3.4.6 การออกแบบระบบไฟฟ้าวัดค่าสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวยาน

ระบบไฟฟ้าวัดค่าสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวยานรุ่น 70 kg ยังคงเป็นแบบเดียวกับยานได้นำรุ่น 30 กิโลกรัม ไม่มีการปรับปรุง

3.5 ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้

ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำที่สร้างขึ้น ทั้ง BENBAM-G2 และ BEMBAM-3 ดังแสดงในตารางที่ 3.12 โดยที่ค่าต่างๆ หากจากการทดลองด้วยวิธีแรงผูกคงที่ ซึ่งรายละเอียดของการทดลอง ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3.12 ข้อมูลทางเทคนิคและพารามิเตอร์ของยานใต้น้ำ BENBAM

ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์	BENBAM-G2 (30kg)	BENBAM-G3 (70kg)
$X_{\dot{u}}$	113.2591 kg	424.67 kg
X_u	20.1603 Ns/m	23.5 Ns/m
$X_{u u }$	241.1425 N(s/m) ²	1415.7 N(s/m) ²
$Y_{\dot{v}}$	113.2591 kg	454.02 kg
Y_v	20.1603 Ns/m	126.977 Ns/m
$Y_{v v }$	241.1425 N(s/m) ²	218.61 N(s/m) ²
$Z_{\dot{w}}$	113.2591 kg	908.04 kg
Z_w	20.1603 Ns/m	253.954 Ns/m
$Z_{w w }$	241.1425 N(s/m) ²	437.22 N(s/m) ²
$I_z + N_r$	7.9708 kgm ²	2.69 kg-m ² +15.1885 kg-m ²
N_r	0.1192 N(s.rad)	3.9267 N(s.rad)
$N_{r r }$	4.1228 N(s.rad) ²	5.4667 N(s.rad) ²

3.6 สมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ

3.6.1 สมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BANBAM-G2

โมเดล 1

$$\begin{bmatrix} 143 & 0 & 0 \\ 0 & 143 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.119 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ซึ่งสามารถแบ่งแยกการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ

1) การเคลื่อนที่หน้า - หลัง

$$\dot{u} = [-0.1407][u] + [0.007]\tau_1 \quad (3.2)$$

$$y = [1][u] \quad (3.3)$$

- 2) การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา
ไม่มีในการเคลื่อนที่ของโหมด 1
- 3) การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

$$\begin{Bmatrix} w \\ \dot{w} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1407 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.007 \end{bmatrix} \tau_3 \quad (3.4)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \end{Bmatrix} \quad (3.5)$$

- 4) การเคลื่อนที่รอบแกนแนวตั้ง

$$\begin{Bmatrix} r \\ \dot{r} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix} \tau_2 \quad (3.6)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

โหมด 2

$$\begin{bmatrix} 143 & 0 & 0 \\ 0 & 143 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 20 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 \\ 0 & 0 & 0.119 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ w \\ r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_4 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

ซึ่งสามารถแบ่งแยกการเคลื่อนที่ออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ

- 1) การเคลื่อนที่หน้า - หลัง
ไม่มีในการเคลื่อนที่ของโหมด 1
- 2) การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา

$$\dot{v} = [-0.1407][v] + [0.007]\tau_4 \quad (3.9)$$

$$y = [1][u] \quad (3.10)$$

3) การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

$$\begin{Bmatrix} w \\ \dot{w} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1407 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.007 \end{bmatrix} \tau_3 \quad (3.11)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{Bmatrix} z \\ \dot{z} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

4) การเคลื่อนที่รอบแกนแนวตั้ง

$$\begin{Bmatrix} r \\ \dot{r} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix} \tau_5 \quad (3.13)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{Bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \quad (3.14)$$

3.6.2 สมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BANBAM-G3

ยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ไม่ได้ออกแบบให้มีโหมดการเคลื่อนที่ เพราะชุดผลักแยกอิสระในแต่ละ DOF

$$\begin{bmatrix} 495 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 524 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 978 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.7 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 24 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 127 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 254 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

1) การเคลื่อนที่หน้า - หลัง

$$\dot{u} = [-0.0475][u] + [0.00202]\tau_1 \quad (3.16)$$

$$y = [1][u] \quad (3.17)$$

2) การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา

$$\dot{v} = [-0.2423][v] + [0.00202]\tau_2 \quad (3.18)$$

$$y = [1][v] \quad (3.19)$$

3) การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

$$\begin{cases} \dot{w} \\ \dot{w} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.2596 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00102 \end{bmatrix} \tau_3 \quad (3.20)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

4) การเคลื่อนที่รอบแกนแนวตั้ง

$$\begin{cases} \dot{r} \\ \dot{r} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.2196 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05593 \end{bmatrix} \tau_4 \quad (3.22)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

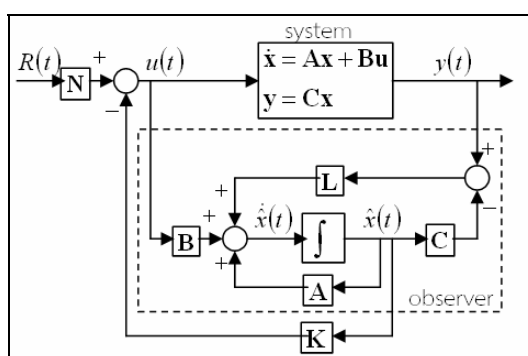
3.7 การออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่

3.7.1 เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 และ BEMBAM-G3 ใช้กฎการควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ ภายใต้เงื่อนไขการออกแบบขั้นต้นดังแสดงในตารางที่ 3.13 และจากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.7.2 ว่าการควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ (state feedback control) เป็นการนำตัวสังเกตการสถานะร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับสถานะในการควบคุม โดยที่ตัวควบคุมจะใช้เวกเตอร์ \hat{x} ซึ่งเป็นค่าประมาณการของเวกเตอร์สถานะ x ในการคำนวณค่าสัญญาณ u และมีกฎการควบคุมคือ $u = -K\hat{x} + \bar{N}$ ดังนั้นในที่นี้การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะจะเป็นไปตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.7.2

ตารางที่ 3.13 เงื่อนไขการออกแบบกฎการควบคุมเบื้องต้น

ตัวควบคุมความถี่ (z)	ตัวควบคุมมุมแกว่ง (ψ)	ตัวควบคุมความเร็ว หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา	
Damping ration: ζ	0.707	0.707	-
Settling time : t_s	1	1	1
Steady state error : e_{ss}	0	0	0
การเคลื่อนที่แนวตั้งจะเคลื่อนที่เป็นระดับความลึกที่เพิ่มหรือลดลงจากเดิมครึ่งละ 0.1 เมตร	การหมุนรอบแกนแนวตั้งจะหมุนเป็นองศาที่เพิ่มหรือลดลงจากเดิมครึ่งละ 5 องศา	การเคลื่อนที่หน้าหลังจะเพิ่มหรือลดความเร็วจากเดิมครึ่งละ 0.1 m/s	



รูปที่ 3.22 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะประกอบการออกแบบ

3.7.2 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะสำหรับยานใต้น้ำ BEMBAM-G2

ตัวควบคุมในโหมด 1 เริ่มต้นจากตรวจสอบความสามารถควบคุมได้และ
ความสามารถในการสังเกตการณ์ได้ จากนั้นกำหนดตำแหน่งโพลตัวสังเกตสถานะที่ $-4 \pm 4i$ และ
 $-8 \pm 8i$ ตามลำดับ ได้ผลดังนี้

1) สำหรับความเร็วหน้า-หลัง ($n = 1$)

(1) $\text{rank}(\mathbf{C}_0) = 1 = n$ สามารถควบคุมได้

(2) $\text{rank}(\mathbf{O}_0) = 1 = n$ สามารถสังเกตการณ์ได้

(3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 = [k_1] = [551]$

(4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_1 = [551]$

2) สำหรับความเร็วหน้า-หลัง

ไม่มีในโหมด 1

3) สำหรับมุมแกว่ง ($n = 2$)

(1) $\text{rank}(\mathbf{C}_0) = 2 = n$ สามารถควบคุมได้

(2) $\text{rank}(\mathbf{O}_0) = 2 = n$ สามารถสังเกตการณ์ได้

(3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_4 = [k_1 \quad k_2] = [255.1 \quad 63.9]$

(4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_4 = [255.1]$

(5) $\mathbf{L} = \mathbf{L}_4 = [L_1 \quad L_2]^T = [16 \quad 128.2]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ

4) สำหรับความถี่ ($n = 2$)

(1) $\text{rank}(\mathbf{C}_0) = 2 = n$ สามารถควบคุมได้

(2) $\text{rank}(\mathbf{O}_0) = 2 = n$ สามารถสังเกตการณ์ได้

(3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_3 = [k_1 \quad k_2] = [4571 \quad 1163]$

(4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_3 = [4571]$

(5) $\mathbf{L}_3 = [L_1 \quad L_2]^T = [16 \quad 134]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ

ตัวควบคุมในโหมด 2 เริ่มต้นจากตรวจสอบความสามารถควบคุมได้และ
สังเกตการณ์ได้จากนั้นกำหนดตำแหน่งโพลตัวสังเกตสถานะเท่ากับ $-4 \pm 4i$ และ $-8 \pm 8i$
ตามลำดับ ได้ผลดังนี้

1) สำหรับความเร็วหน้า-หลัง

ไม่มีในโหมด 2

2) สำหรับความเร็วซ้าย-ขวา

(1) $\text{rank}(\mathbf{C}_0) = 1 = n$ สามารถควบคุมได้

- (2) $\text{rank}(\mathbf{Oo})=1=n$ สามารถสังเกตการณ์ได้
- (3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_4 = [k_1] = [551]$
- (4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_4 = [551]$
- 3) สำหรับมุมแกว่ง ($n=2$)
- (1) $\text{rank}(\mathbf{Co})=2=n$ สามารถควบคุมได้
- (2) $\text{rank}(\mathbf{Oo})=2=n$ สามารถสังเกตการณ์ได้
- (3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_5 = [k_1 \ k_2] = [255.1 \ 63.9]$
- (4) $\mathbf{K} = \mathbf{N}_5 = [255.1]$
- (5) $\mathbf{L} = \mathbf{L}_5 = [L_1 \ L_2]^T = [16 \ 128.2]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ
- 4) สำหรับความถี่ ($n=2$)
- เหมือนโหมด 1 คือ
- (1) $\text{rank}(\mathbf{Co})=2=n$ สามารถควบคุมได้
- (2) $\text{rank}(\mathbf{Oo})=2=n$ สามารถสังเกตการณ์ได้
- (3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_3 = [k_1 \ k_2] = [4571 \ 1163]$
- (4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_3 = [4571]$
- (5) $\mathbf{L}_3 = [L_1 \ L_2]^T = [16 \ 134]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ

3.7.2 การออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับตัวแปรสถานะสำหรับยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

เริ่มต้นจากตรวจสอบความสามารถควบคุมได้และความสามารถในการสังเกตการณ์ได้ จากนั้นกำหนดตำแหน่งโพลตัวสังเกตสถานะที่ $-4 \pm 4i$ และ $-8 \pm 8i$ ตามลำดับ ได้ผลดังนี้

- 1) สำหรับความเร็วหน้า-หลัง ($n=1$)
- (1) $\text{rank}(\mathbf{Co})=1=n$ สามารถควบคุมได้
- (2) $\text{rank}(\mathbf{Oo})=1=n$ สามารถสังเกตการณ์ได้
- (3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_1 = [k_1] = [1976.7]$
- (4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_1 = [1976.7]$
- 2) สำหรับความเร็วซ้าย-ขวา ($n=1$)
- (1) $\text{rank}(\mathbf{Co})=1=n$ สามารถควบคุมได้
- (2) $\text{rank}(\mathbf{Oo})=1=n$ สามารถสังเกตการณ์ได้
- (3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_2 = [k_1] = [1967.4]$
- (4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_2 = [1976.4]$

3) สำหรับความลึก ($n = 2$)

(1) $\text{rank}(\mathbf{Co}) = 2 = n$ สามารถควบคุมได้

(2) $\text{rank}(\mathbf{Oo}) = 2 = n$ สามารถสังเกตการณ์ได้

(3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_3 = [k_1 \quad k_2] = [31373 \quad 7589]$

(4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_3 = [31373]$

(5) $\mathbf{L}_3 = [L_1 \quad L_2]^T = [15.7 \quad 123.9]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ

4) สำหรับมุมมอง ($n = 2$)

(1) $\text{rank}(\mathbf{Co}) = 2 = n$ สามารถควบคุมได้

(2) $\text{rank}(\mathbf{Oo}) = 2 = n$ สามารถสังเกตการณ์ได้

(3) $\mathbf{K} = \mathbf{K}_4 = [k_1 \quad k_2] = [572.1 \quad 139.1]$

(4) $\mathbf{N} = \mathbf{N}_4 = [572]$

(5) $\mathbf{L}_4 = [L_1 \quad L_2]^T = [15.7 \quad 124.5]^T$ เมื่อใช้ตัวสังเกตสถานะ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

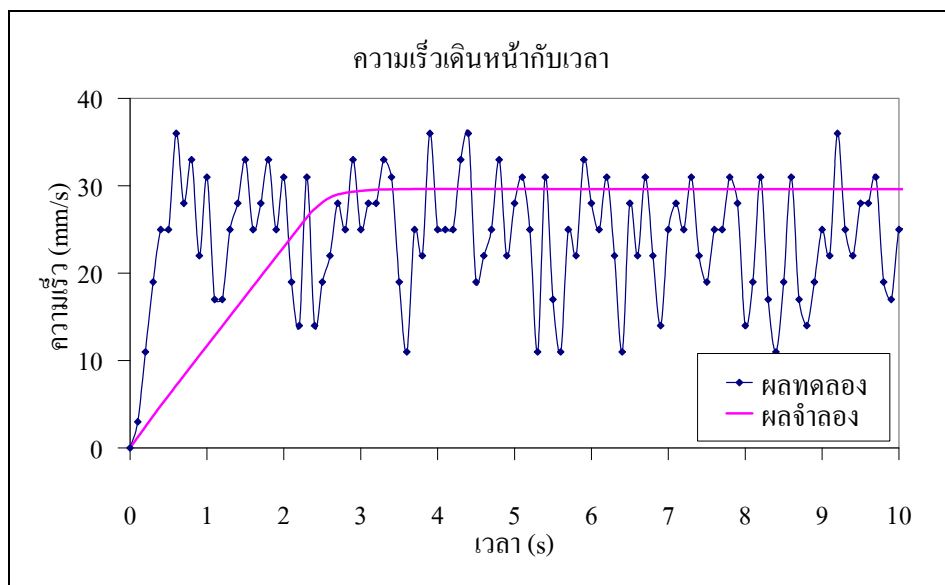
4.1 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ยานใต้น้ำ BENBAM-G3

ในการทดสอบระบบควบคุมความเร็วหน้า-หลังนั้น ทำการทดสอบจริงเฉพาะในทิศทางด้านหน้าที่สองความเร็ว คือ 1) ความเร็วจาก 0 ถึง 0.03 m/s และ 2) ความเร็วจาก 0 ถึง 0.05 m/s โดยทั้งสองความเร็ว ได้ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย (gain) k_1 ที่สัมพันธ์กับค่า settling time ของการออกแบบที่ 1 และ 2 s ตามลำดับ ได้ผลการควบคุมตามรูปที่ 4.1 ถึง 4.4

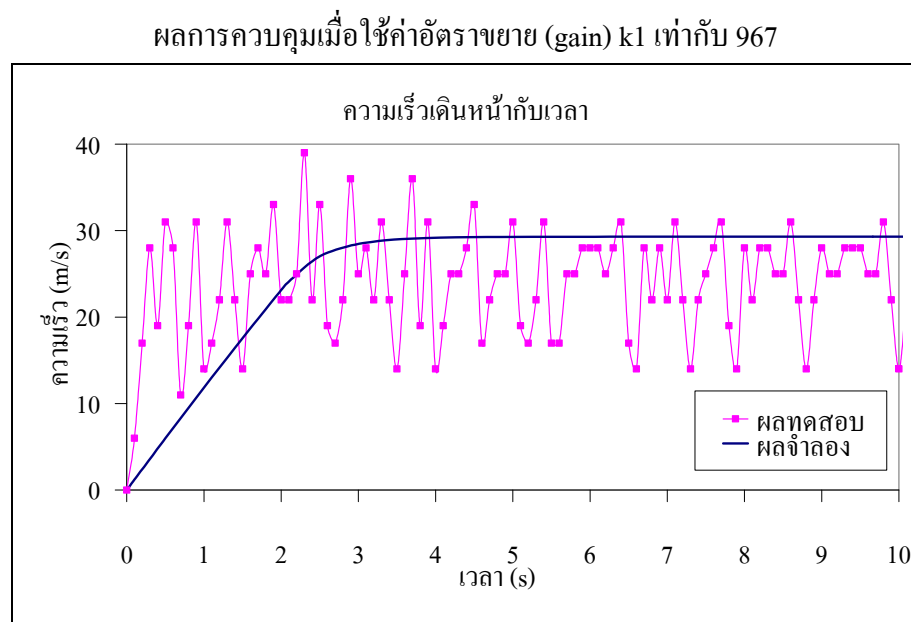
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความเร็วหน้า-หลัง

settling time (s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อัตราขยาย (gain), k_1	1957	967	637	472	373	307	259	224	197	175

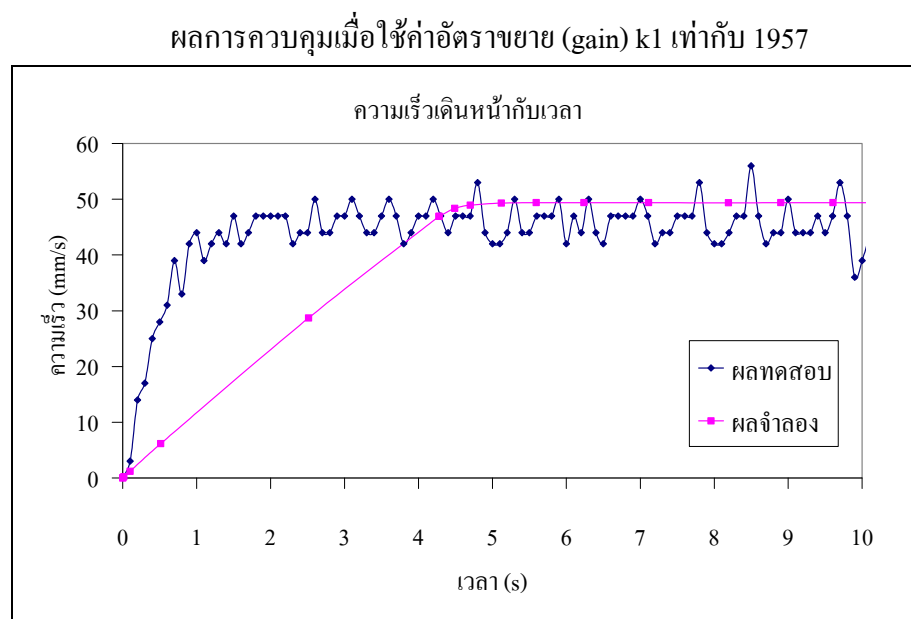
ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 เท่ากับ 1957



รูปที่ 4.1 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s และแรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N

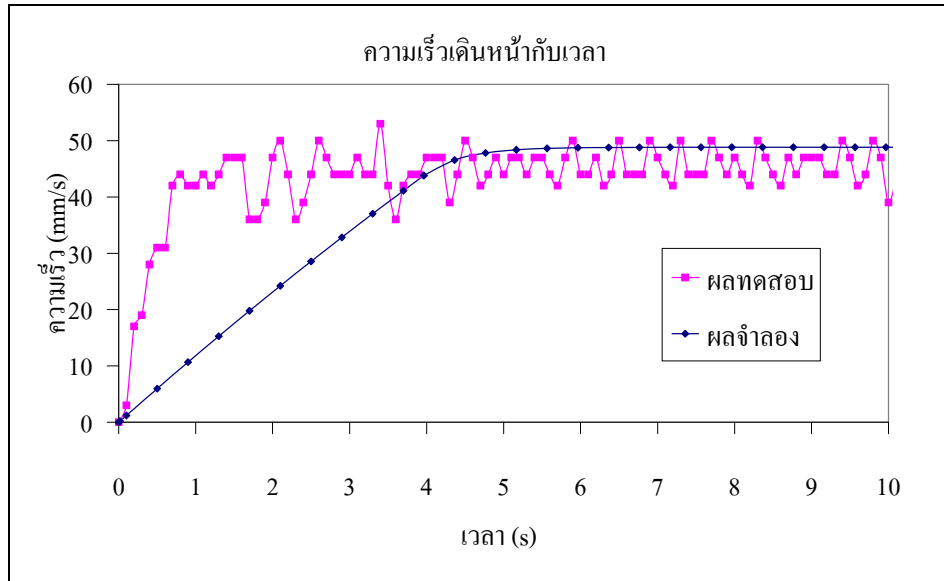


รูปที่ 4.2 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s และแรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N



รูปที่ 4.3 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.05 m/s และแรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N

ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่าอัตราขยาย (gain) k1 เท่ากับ 967



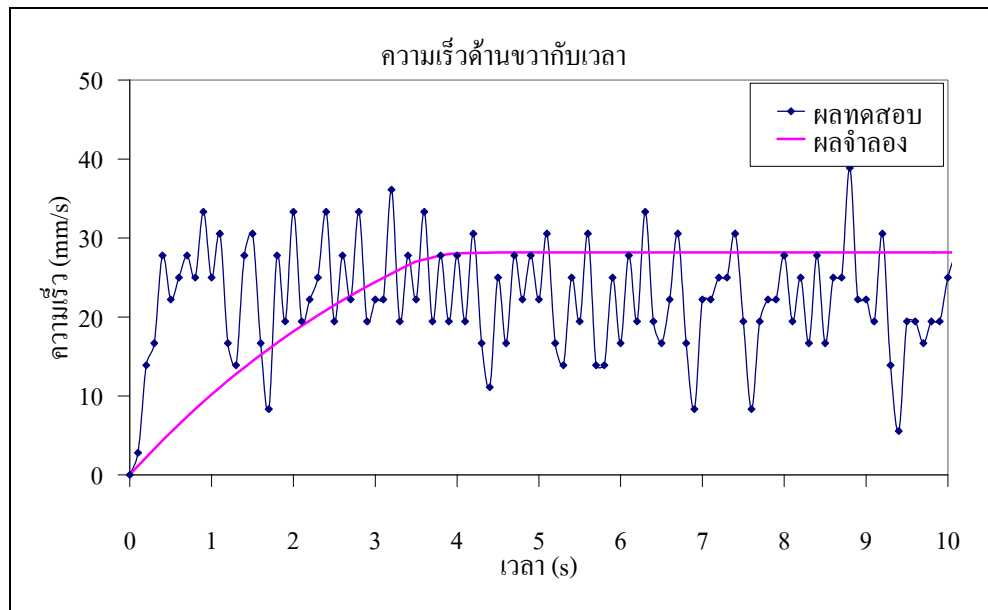
รูปที่ 4.4 ผลการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.05 m/s และแรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N

4.2 การทดสอบระบบควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา ยานใต้น้ำ BENBAM-G3

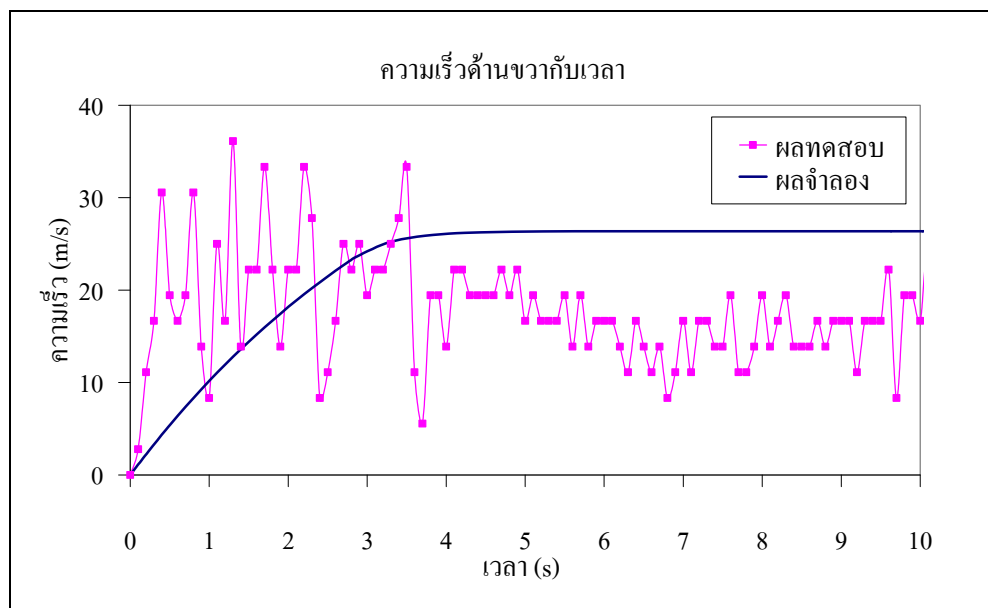
ในการทดสอบระบบควบคุมความเร็วซ้าย-ขวานั้น ทำการทดสอบจริงเฉพาะในทิศทางด้านขวา ที่หนึ่งความเร็ว คือความเร็วจาก 0 ถึง 0.03 m/ ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย (gain) k1 ที่สัมพันธ์กับค่า setting time ของการออกแบบที่ 1 และ 2 s ตามลำดับ ได้ผลการควบคุมตามรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 ค่า state gain k1 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา

setting time (s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อัตราขยาย (gain) k1	1967	920	571	397	292	222	172	135	106	83



(ก) ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 เท่ากับ 1967



(ข) ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 เท่ากับ 920

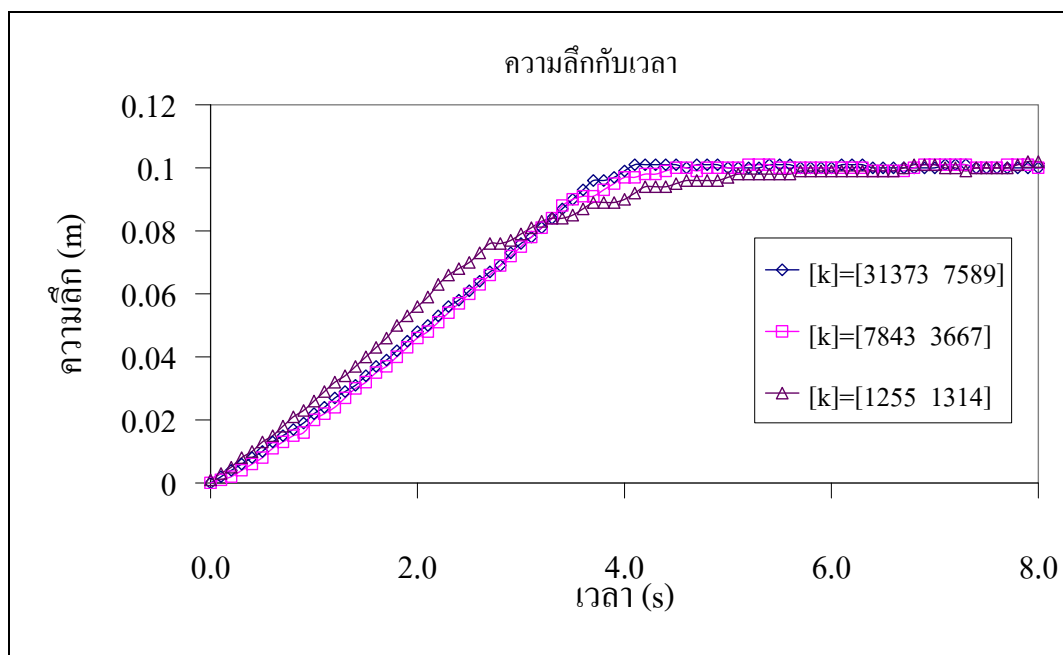
รูปที่ 4.5 ผลการควบคุมความเร็วซ้าย-ขวา ที่ความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s และแรงผลักดันสูงสุด เท่ากับ ± 6 N

4.3 การทดสอบระบบควบคุมความลึก ยานใต้น้ำ BENBAM-G3

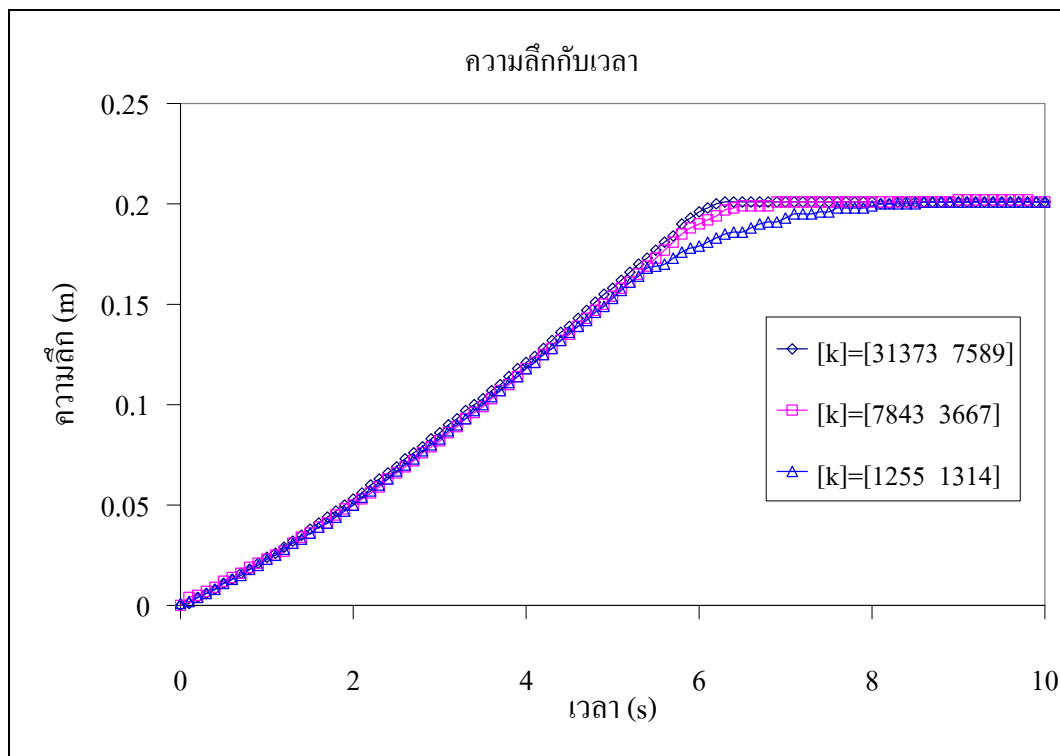
ในการทดสอบระบบควบคุมความลึกนั้น อ้างอิงจากจุดเริ่มต้นที่ผิวยานด้านบนอยู่ระดับเดียวกับผิวน้ำ และกำหนดให้ที่จุดศูนย์กลางมวลของยาน ณ ตำแหน่งนี้มีค่าเป็นศูนย์ และทำการทดสอบจริงที่สองความลึกคือ 1) ความลึกจาก 0 ถึง 0.01 m และ 2) ความเร็วจาก 0 ถึง 0.02 m โดยทั้งสองความลึก ได้ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย (gain) k_1 และ k_2 ที่สัมพันธ์กับค่า settling time ของการออกแบบที่ 1, 2 และ 5 s ตามลำดับ ได้ผลการควบคุมตามรูปที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 , k_2 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมความลึก

setting time (s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อัตราขยาย (gain) k_1	31373	7843	3484	1961	1255	873	639	490	386	314
อัตราขยาย (gain) k_2	7589	3667	2359	1706	1314	1053	865	726	616	530



รูปที่ 4.6 ผลการควบคุมความลึก จากระดับ 0 ถึง 0.01 m ที่แรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N



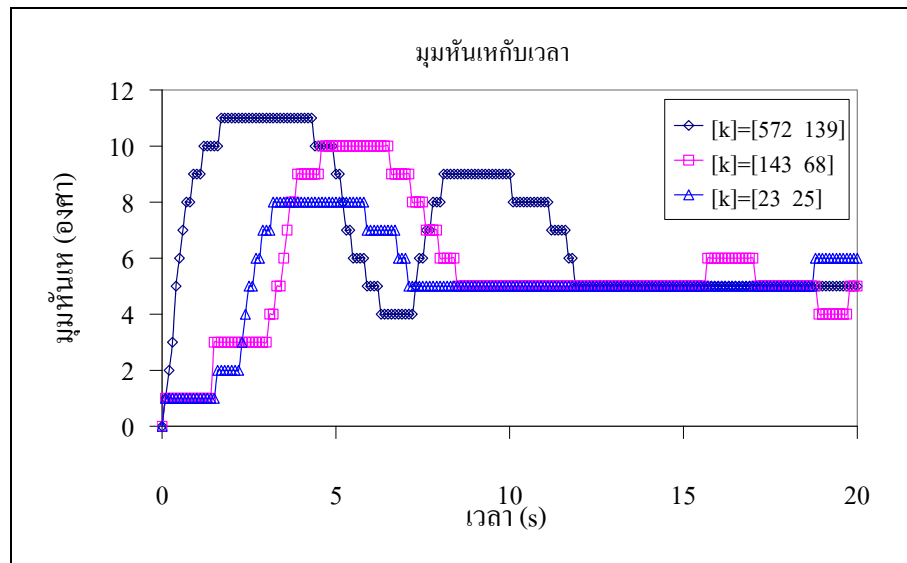
รูปที่ 4.7 ผลการควบคุมความลึก จากระดับ 0 ถึง 0.02 m ที่แรงผลักดันสูงสุดเท่ากับ ± 6 N

4.4 การทดสอบระบบควบคุมการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง ยานใต้น้ำ BENBAM-G3

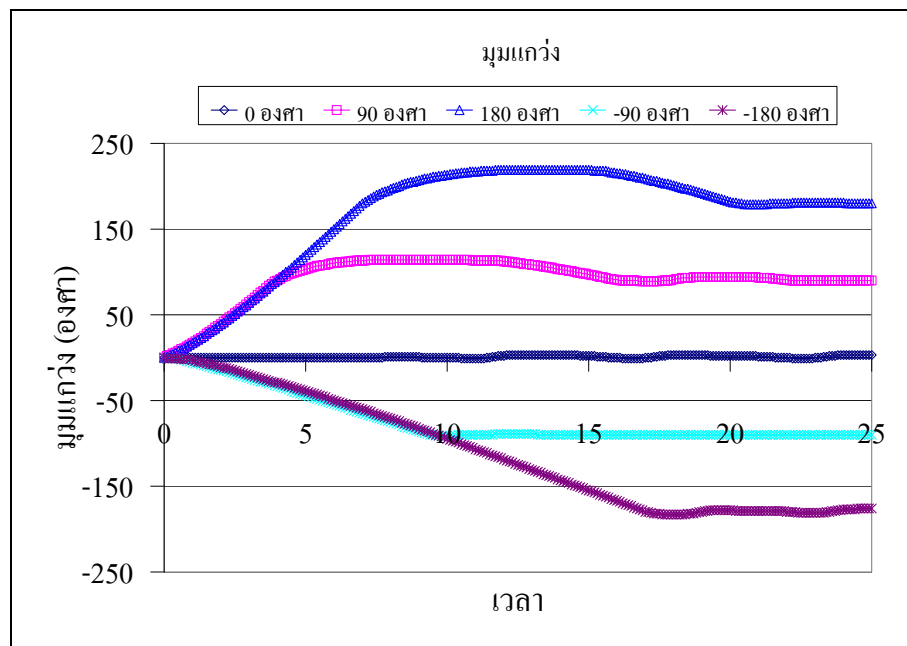
ในการทดสอบระบบควบคุมการหมุนรอบแกนแนวดิ่งนั้น ทำการทดสอบจริงที่สองความลึกคือ 1) จาก 0 ไปยังตำแหน่ง 5 องศา 2) จาก 0 ไปยังตำแหน่ง 90 องศา และจาก 0 ไปยังตำแหน่ง 180 องศา โดยแต่ละตำแหน่ง ได้ทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราขยาย (gain) k_1 และ k_2 ที่สัมพันธ์กับค่า setting time ของการออกแบบที่ 1, 2 และ 5 s ตามลำดับ ได้ผลการควบคุมตามรูปที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราขยาย (gain) k_1 , k_2 ที่สัมพันธ์กับ settling time ของตัวควบคุมการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง

setting time (s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
อัตราขยาย (gain) k_1	572	143	64	36	23	16	12	9	7	6
อัตราขยาย (gain) k_2	139	68	44	32	25	20	16	14	12	10



รูปที่ 4.8 ผลการควบคุมมูมหันเห้ จากระดับ 0 ไปยังตำแหน่ง 5 องศา ที่แรงบิดอินพุตสูงสุดเท่ากับ $\pm 1.6 \text{ Nm}$



รูปที่ 4.9 ผลการควบคุมมูมหันเห้ จากระดับ 0 ไปยังตำแหน่ง ± 90 องศา และ ± 180 องศา ที่แรงบิดอินพุตสูงสุดเท่ากับ $\pm 1.6 \text{ Nm}$

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากขั้นตอนของการออกแบบ สร้างต้นแบบ ทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของตัวยาน จนถึงออกแบบระบบควบคุมและทดสอบจริงในสระน้ำ ได้ผลลัพธ์เป็นต้นแบบยานใต้น้ำที่สามารถเคลื่อนที่ดังนี้ 1) หน้า-หลัง 2) ซ้าย-ขวา 3) หมุนเลี้ยว และ 4) ดำขึ้น-ลง โดยนับเป็น 4 องศาอิสระ หรือ 4-DOF และในส่วนของสมรรถนะที่ได้ เมื่อใช้ชุดผลัดที่มีแรงผลัดเท่ากับ ± 6 N ขับเคลื่อนยานใต้น้ำ BEMBAM-G3 ที่มีมวล 70 kg ให้สมรรถนะดังนี้ 1) ความเร็วเคลื่อนที่หน้า-หลังและซ้าย-ขวา สูงสุดที่ 0.05 m/s 2) หมุนเลี้ยวหรือมุมการแกว่งรอบแกนแนวตั้ง ทำได้เท่ากับ ± 180 องศา และ 3) รองรับการดำน้ำลึกสูงสุด 5 m

5.2 การอภิปรายผล

กฎการควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของยาน เมื่อนำมาประดิษฐ์เป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมยานใต้น้ำผ่านระบบสายส่ง สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3 ได้อย่างน่าพอใจ ทั้ง 4-DOF ดังนี้ 1) สามารถควบคุมความเร็วเคลื่อนที่หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ที่ความเร็วจาก 0 ถึง 0.03-0.05 m/s ได้ในเวลา 2 s 2) หมุนรอบแกนแนวตั้งที่มุมเพิ่มทีละ 5 องศา ได้ในเวลา 5 s และ 3) ได้ระดับความลึกทีละ 0.1 m ได้ในเวลา 4 s และจากการเปรียบเทียบตัวควบคุม PID กับตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ พบว่ามีผลตอบสนองไวและมีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และจากผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิจัยนี้ สรุปได้ว่ายานใต้น้ำ BENBAM-G3 สามารถใช้เป็นต้นแบบและใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่ยานใต้น้ำควบคุมระยะไกลในอนาคต ที่สามารถนำไปใช้งานจริงได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนายานใต้น้ำเพื่อใช้ในสภาพงานจริง

1) จากที่ได้ศึกษาและทดลองจริง พบว่าในทางปฏิบัติหรือการใช้งานยานใต้น้ำในสภาพงานจริงนั้น หลีกเลียงไม่ได้ที่จะพบกับการรบกวนของคลื่น ซึ่งทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่มีความแม่นยำน้อยลง มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของกระแสคลื่นในน้ำที่มากกระทำกับยาน

ดังนั้นเพื่อให้การเคลื่อนที่ของยานมีเสถียรภาพมากขึ้น ควรมีการพัฒนาระบบควบคุมโดยการนำตัวแปรของการรบกวนจากคลื่น มาใช้ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมด้วย

2) ด้านระบบการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ โดยแท้จริงแล้วเป็นระบบแบบไม่เชิงเส้น และรูปร่างๆของยานใต้น้ำก็อาจแตกต่างกันไป ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมการเคลื่อนที่มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพสูงและเหมาะกับยานนั้นๆจริง อาจจะปรับปรุงการควบคุมเป็นแบบไม่เชิงเส้นแล้วเปรียบเทียบผลกัน เพื่อให้ได้ระบบควบคุมที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำนั้นๆมากที่สุด

3) ด้านปฏิบัติ อุปกรณ์วัดสัญญาณ มีผลกับสมรรถนะของตัวควบคุมเป็นอย่างมาก เพื่อให้มั่นใจว่ากฎการควบคุมที่ได้จากการออกแบบ มีสมรรถนะและความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ แนะนำให้ทดลองควบคุมขั้นต้นโดยตัดปัญหาที่อาจเกิดจากความไม่แม่นยำของอุปกรณ์วัดสัญญาณจริงออกไป ด้วยการใช้อุปกรณ์วัดสัญญาณที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น ใช้ linear encoder มาจำลองวัดความลึกแทนการวัดจริงด้วย pressure transducer และใช้ rotary encoder มาจำลองวัดมุมแกว่งแทนการวัดจริงด้วย gyroscope และเมื่อทดสอบจนมั่นใจแล้วว่า กฎการควบคุมให้สมรรถนะเป็นที่น่าพอใจ ถึงเปลี่ยนเป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณที่จะถูกนำไปใช้จริงกับยานใต้น้ำต่อไป

4) ด้านการวัดค่าการเคลื่อนที่ สำหรับยานใต้น้ำ ทำได้ยากและมีต้นทุนสูง ถ้าใช้เครื่องมือวัดที่คุณภาพไม่สูงมาก สัญญาณที่ได้จากการวัดก็อาจคลาดเคลื่อนและถูกรบกวนได้ง่าย แนะนำให้นำวิธีการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย ใช้ observer มาประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ใช้ Kalman filter มาปรับปรุงให้สัญญาณที่ได้จากการวัดมีคุณภาพและความน่าเชื่อถือสูงขึ้น

5) ใช้ชุดผลึกที่ให้อำลัผลึกมากขึ้น เพื่อให้ยานใต้น้ำ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น และรองรับการรบกวนของคลื่นใต้น้ำได้สูงขึ้น

5.3.2 ด้านสถานที่ทดสอบหรือทดลอง

1) จากการทำวิจัย พบอุปสรรคด้านสถานที่ทดลองเป็นอย่างมาก ทั้งเรื่องของแหล่งน้ำ และการวัดค่าต่างๆ เพราะการทดลองใต้น้ำไม่สะดวกและทำได้ยากอีกทั้งมีความเสี่ยงเรื่องของกระแสไฟฟ้า จึงแนะนำให้ สร้างห้องทดลองสำหรับการพัฒนายานใต้น้ำในอาคาร โดยมีลักษณะเป็นอาคารมีหลังคา มีบ่อน้ำ กว้าง 2-3 เมตร ยาว 5-10 เมตร และลึก 2-3 เมตร และมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีระบบป้องกันการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

บรรณานุกรม

- [1] Available: <http://www.acecrc.sipex.aq> (1 April 2013).
- [2] Available: <http://www.iver-auv.com> (1 April 2013).
- [3] Available: <http://www.oceaneering.com> (1 April 2013).
- [4] Wang, W., **Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV**, Master thesis, The University of Waterloo, 2006.
- [5] Garus, J., “Model Reference Adaptive Control of Underwater Robotic Vehicle in Plane Motion,” **Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SYSTEMS**, July 2007, Greece, 2007. pp. 38-43.
- [6] อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย และคณะ, “ต้นแบบยานสำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ,” การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 19, 2548.
- [7] ชีรภัทร หล้าบุญเรือง และคณะ, “หุ่นยนต์ต้นแบบสำหรับการสำรวจใต้น้ำ,” การประชุมวิชาการ
เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, ครั้งที่ 20, ตุลาคม 2549, นครราชสีมา.
- [8] ชีรยุทธ ชาติชนะอินขง, “การควบคุมหุ่นยนต์ใต้น้ำด้วยวิธีสไลดิงโหมด,” บทความทางวิชาการ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ครั้งที่ 29, 2553 หน้า 478-484
- [9] Robert, D. C. and Robert, L. W., **The ROV Manual: A User Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles**. 1st edition. UK: Elsevier Ltd., 2007
- [10] Available: <http://www.researchsubmarine.com> (1 April 2013).
- [11] Available: <http://www.maridan.atlas-elektronik.com> (1 April 2013).
- [12] Available: <http://www.seaeye.com/tiger.html> (1 April 2013).
- [13] Available: <http://www.seaeye.com> (1 April 2013).
- [14] “Code of Practice for The Safe & Efficient Operation of Remotely Operated Vehicles,”
IMCA, R 004, Rev. 3, 2009. pp. 5-6.
- [15] Available: http://www.seabotix.com_products/bv150-4.htm (1 April 2013).
- [16] Available: <http://www.seaeye.com/comparerovs.html> (1 April 2013).
- [17] Available: <http://www.offshoreenergytoday.com/smd-delivers-hdia-plough-to-reef-subsea>
(1 April 2013).

บรรณานุกรม

- [18] Available: <http://www.jwfishers.com/rov.htm> (1 April 2013).
- [19] Available: <http://www.seabotix.com/productssarbot.htm> (1 April 2013).
- [20] Available: <http://www.deepseasystems.com/thrustpix404.htm> (1 April 2013).
- [21] Available: <http://www.uniquegroup.com/products> (1 April 2013).
- [22] ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต และปรัชญา เปรมปราณีรักษ์, “การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยแรงผลักดัน,” การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี ๒๕๕๕, 10 เมษายน 2555, ปทุมธานี, 2555. หน้า 118-126
- [23] Fossen, Thor I., **Guidance and Control of Ocean Vehicles**. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [24] สุวัฒน์ กุลชนปริดา, **วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2552.
- [25] Robert, L. W. and Douglas, A. L., **Linear State-Space Control Systems**, John Willey & Sons, 2007.
- [26] Ljung, Lennart, **System identification**. New Jersey: Prentice Hall, 1987.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

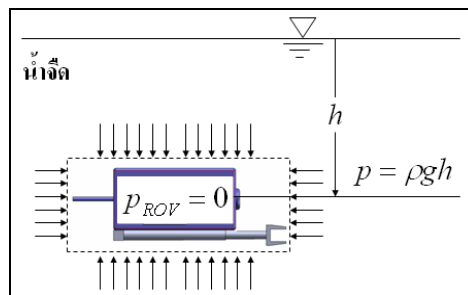
การทดสอบความสามารถต้านทานแรงดันได้น้ำของอุปกรณ์

การทดสอบความสามารถต้านทานแรงดันใต้น้ำของอุปกรณ์

ก.1 วิธีการทดสอบความดัน

โครงสร้างของยานใต้น้ำควบคุมระยะไกล ต้องสามารถดำน้ำได้ลึกอย่างน้อย 5 เมตร โดยไม่มีการรั่วซึม ดังนั้นจึงทำการทดสอบอุปกรณ์ที่รับความดันเมื่ออยู่ใต้น้ำ เพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดความเสียหายขึ้น โดยมีหลักการทดสอบดังนี้

พิจารณายานใต้น้ำดังรูปที่ ก.1 ที่ตำแหน่งความลึก จะมีค่าความดันน้ำ (p) กระทำกับยานใต้น้ำ เท่ากับ



รูปที่ ก.1 ความดันที่กระทำกับยานใต้น้ำที่ความลึก h

$$p = \rho gh \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่ ρ เป็นค่าความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1000 kg/m^3 , g คือค่าแรงโน้มถ่วงโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2 และ h เป็นตำแหน่งความลึกใต้น้ำที่ยานวางตัวอยู่ และอาจประมาณได้ว่ารอบตัวยาน มีความดันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ p กระทำอยู่เช่นเดียวกัน ขณะที่ในตัวยานหรือชิ้นส่วนของยานมีความดันภายในเท่ากับ p_{ROV} ดังนั้นผลต่างระหว่างความดันภายนอกกับภายในตัวยาน (Δp) ที่ความลึก h หาได้จาก

$$\Delta p = \rho gh - p_{ROV} \quad (\text{ก.2})$$

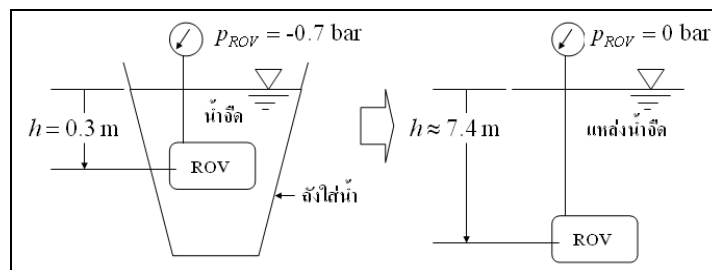
ในการใช้งานยานใต้น้ำ จะไม่มีการอัดความดันไว้ภายในชิ้นส่วนต่างๆ นั่นคือ $p_{ROV} = 0$ (เมื่อให้ความดันบรรยากาศ=0) ดังนั้นความดันที่ตัวยานหรือชิ้นส่วนของยาน ต้องทนให้ได้ที่ความลึก

5 m คำนวณได้จากสมการที่ (ก.2) คือ

$$\begin{aligned}\Delta p &= \rho gh - 0 \\ &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 5 \text{m} \\ &= 0.49 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ หรือ } 0.49 \text{ bar (gauge)}\end{aligned}$$

นั่นหมายความว่าตัวยานหรือชิ้นส่วนของยานต้องทนความดันภายนอกให้ได้ไม่น้อยกว่า 0.49 bar โดยไม่เกิดความเสียหายและไม่มีการรั่วซึมของน้ำ

สำหรับการทดสอบการต้านทานความดันได้น้ำของอุปกรณ์ นั้นไม่สามารถทำการทดสอบในน้ำที่ลึกจริง 5 m ได้ เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการ ดังนั้นจึงใช้วิธีการสร้างสุญญากาศภายในอุปกรณ์ของยานได้น้ำเพื่อให้ผลต่างระหว่างความดันภายนอกกับภายในตัวยาน มีค่าเท่ากับผลต่างของความดันที่ความลึก 5 m แล้วดูการรั่วซึมของน้ำและความแข็งแรงของอุปกรณ์ โดยหลักการของการทดสอบแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 การจำลองความลึกที่ 7.4 เมตรน้ำ

ในการทดสอบ สร้างสุญญากาศภายในอุปกรณ์เท่ากับ 0.7 bar และทดสอบจริงที่ระดับความลึก 0.3 m ดังนั้นผลต่างของความดันคำนวณได้จากสมการที่ (ก.2) คือ

$$\begin{aligned}\Delta p &= \rho gh - p_{ROV} \\ &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.3 \text{m} - \left(-0.7 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \\ &\approx 0.73 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ หรือ } 0.73 \text{ bar (gauge)}\end{aligned}$$

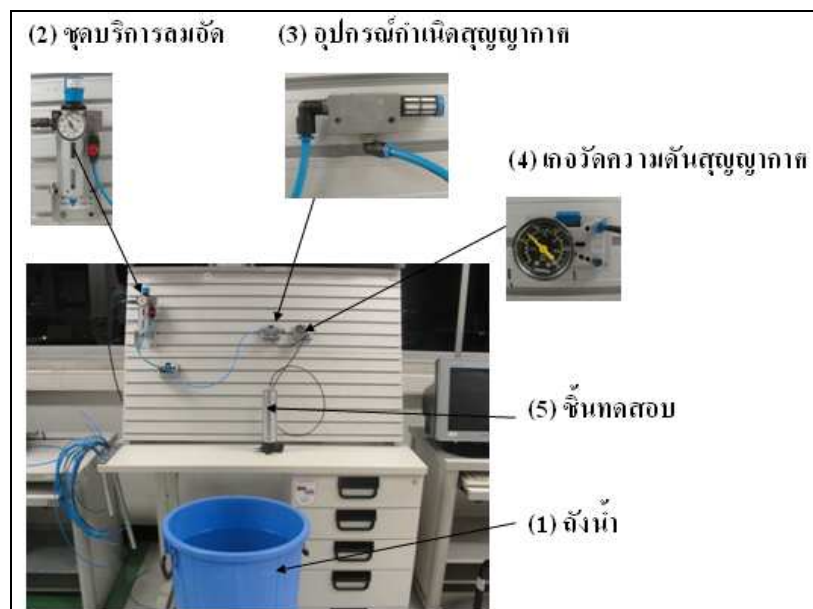
และสามารถแปลงเป็นค่าความลึกเทียบเท่าได้จากสมการ (ก.1) คือ

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{P}{\rho g} \\
 &= \frac{0.73 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1000 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2} \\
 &= 7.4 \text{ m}
 \end{aligned}$$

นั่นหมายความว่าได้ทดสอบเทียบเท่ากับความลึก 7.4 ม ซึ่งมากกว่าค่าที่กำหนดไว้ (5 ม)

ก.2 อุปกรณ์ทดสอบความดัน

ในรูปที่ ก.3 แสดงชุดทดสอบและการติดตั้งถังบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กับชุดทดสอบ โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย (1) คือถังน้ำ ทำหน้าที่เป็นแหล่งน้ำนิ่ง (2) คือชุดบริการลมอัด ทำหน้าที่จ่ายและควบคุมความดันลมอัด (3) คืออุปกรณ์กำเนิดสัญญาณ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณให้เกิดขึ้นในตัวอุปกรณ์ที่ต้องการทดสอบการรั่ว (4) คือเกจวัดความดัน ทำหน้าที่แสดงค่าความดันสัญญาณ (5) คือเซ็นเซอร์ทดสอบ



รูปที่ ก.3 ชุดทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์กับชุดทดสอบ

ก.3 ขั้นตอนการทดสอบความดัน

การทดสอบมีขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ก.4



(ก) ขั้นตอนการทดสอบถึงบรรจุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



(ข) ขั้นตอนการทดสอบชุดหลัก

รูปที่ ก.4 ขั้นตอนการทดสอบความดัน

ก.4 ผลการทดสอบความดัน

การทดสอบความดันกับอุปกรณ์ต่างๆ ของ ขานใต้เท้า BEMBAM-G2 และ BENBAM-G2 ทดสอบด้วยวิธีการเดียวกัน หลังจากถอดชิ้นส่วนมาสำรวจความเสียหายและการรั่วซึมของน้ำ พบว่าไม่มีความเสียหายใดๆเกิดขึ้นและไม่มีการรั่วซึมของน้ำแต่อย่างใด ดังนั้นถึงบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และชุดผลักสามารถนำไปใช้งานจริงได้ มีความน่าเชื่อถือ และใช้งานใต้เท้าได้อย่างปลอดภัยที่ความลึก 5 เมตร

ภาคผนวก ข

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรโตนามิกส์ของยานใต้น้ำ

ข.1 ทฤษฎีประกอบการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรโตนามิกส์ของยานใต้น้ำ

จากสมการ (3.1) คือ $M\dot{v} + D(v)v = \tau$ พิจารณาขณะเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน ตามแกน x และเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต (τ) ในแต่ละแกนไม่เกี่ยวเนื่องกัน สมการ (3.1) สามารถเขียนอยู่ในตัวแปรของการเคลื่อนที่ที่แกน x ได้เป็น

$$(m + m_a)\ddot{x} + (K_L + K_O|\dot{x}|)\dot{x} = \tau_x \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ m คือมวลของยานใต้น้ำ

m_a คือ มวลเพิ่มจากน้ำ ตามแนวแกน x

K_L คือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้น ตามแนวแกน x

K_O คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสอง ตามแนวแกน x

τ_x คือแรงอินพุต ตามแนวแกน x

\dot{x} คือความเร็วของยานตามแนวแกน x

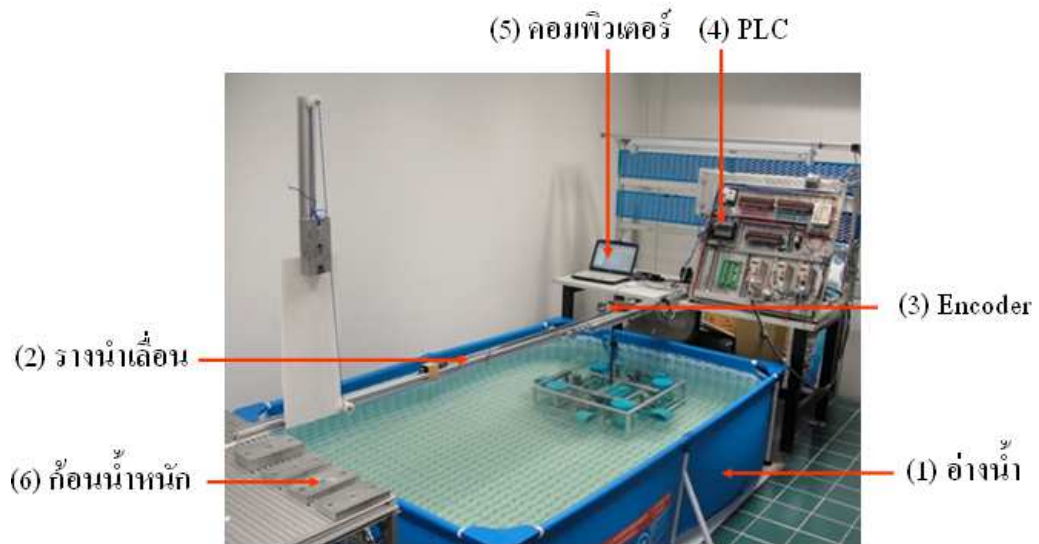
\ddot{x} คือความเร่งของยานตามแนวแกน x

จากสมการ (ข.1) m_a , K_L และ K_O คือสัมประสิทธิ์ไฮดรโตนามิกส์ของยานที่ต้องการทดลองหาค่า โดยใช้หลักการประมาณค่าแบบกำลังสอง (least square) [26]

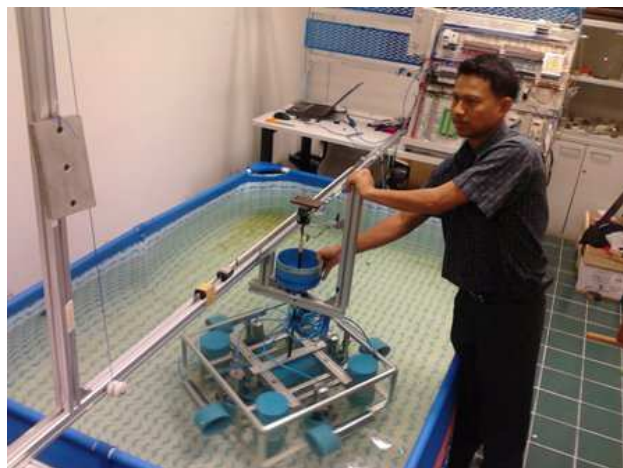
ข.2 อุปกรณ์ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรโตนามิกส์

ในรูปที่ ข.1 แสดงชุดทดลองและการติดตั้งยานใต้น้ำกับชุดทดลอง โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย (1) คืออ่างน้ำ ทำหน้าที่เป็นแหล่งน้ำนิ่ง (2) คือรางนำเลื่อน ทำหน้าที่บังคับการเคลื่อนที่ให้เป็นเส้นตรง (3) คือ Encoder ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์วัดระยะการเคลื่อนที่ (4) คือ PLC ทำหน้าที่บันทึกระยะการเคลื่อนที่ (5) คือคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการบันทึกค่าของ PLC และ (6) คือก้อนน้ำหนัก ทำหน้าที่สร้างแรงผลักดัน

ข.3 วิธีการทดลองและแนวทางการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์



(ก) ทดลองแรงจุดตามแนวแกน



(ข) ทดลองแรงบิดรอบแกน

รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ทดลองและการติดตั้งยานได้น้ำ

การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ตามแนวแกน กระทำโดยใช้แรงจุดสุทธิคงที่ 4 ค่า คือ 14.9, 24.5, 44.1 และ 83.3 นิวตัน ตามลำดับกระทำกับยานใต้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ ข.1(ก) และวัดค่าการตอบสนองของระยะทางการเคลื่อนที่ (x) ตามช่วงเวลาที่กำหนด ส่วนความเร็ว (\dot{x}) และความเร่ง (\ddot{x}) คำนวณโดยใช้หลักการเชิงตัวเลขดังนี้

$$\dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (\text{ข.2})$$

$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \quad (\text{ข.3})$$

โดย Δt คือช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง โดยในการทดลองจะทำการสุ่มตัวอย่างตำแหน่ง (x) ทุกๆ 0.1 วินาที ในทำนองเดียวกัน การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์รอบแกน กระทำโดยใช้แรงบิดจุดสุทธิคงที่ 4 ค่า คือ 0.454, 0.907, 1.361 และ 1.815 นิวตันเมตร ตามลำดับ กระทำกับยานใต้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ ข.1(ข) และวัดค่าการตอบสนองของมุมหันเห (ψ) ตามช่วงเวลาที่กำหนด ส่วนค่าอื่นๆ หาโดยวิธีการเดียวกับการทดลองตามแนวแกน และนำผลที่ได้มาประกอบการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ โดยมีแนวทางวิเคราะห์ 3 แนวทางดังนี้

แนวทางที่ 1 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ m_a , K_L และ K_Q ทั้งสามตัวโดยใช้ข้อมูลของความเร็วและความเร่งที่คำนวณได้จากสมการ (ข.2) และ (ข.3)

แนวทางที่ 2 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้ข้อมูลของความเร็วที่ได้จากการทำ curve fitting ของข้อมูลความเร็วที่คำนวณมาจากสมการ (ข.2) และความเร่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของ curve fitting ข้างต้นเทียบกับเวลา และนำผลของความเร็วและความเร่งที่ได้นี้ ไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ m_a , K_L และ K_Q ทั้งสามตัว

แนวทางที่ 3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์โดยใช้ข้อมูลของความเร็วที่สภาวะคงตัวที่คำนวณมาจากสมการ (ข.2) ไปคำนวณค่า K_L และ K_Q ก่อน และหลังจากนั้น นำค่า K_L และ K_Q ที่ได้ ไปคำนวณร่วมกับความเร่งที่ได้ตามแนวทางวิเคราะห์ที่ 2 เพื่อหาค่า m_a

ข.4 วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์

ข.4.1 การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 1

พิจารณากรณียานใต้น้ำเริ่มเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง จัดรูปสมการ (ข.1) ใหม่เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} + (m + m_a) \ddot{x} \quad (\text{ข.4})$$

จากนั้นใช้หลักการประมาณค่าแบบกำลังสอง (least square) เพื่อประมาณหาค่า K_L, K_Q และ m_a โดยจัดรูปสมการ (ข.4) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ เป็น

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}}_{\tau} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 & \ddot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 & \ddot{x}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i & \ddot{x}_i \end{bmatrix}}_H \underbrace{\begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \\ m + m_a \end{bmatrix}}_K + error \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่ x_i, \dot{x}_i และ \ddot{x}_i คือตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งที่เวลาต่างๆกัน ส่วน $i = 1, 2, 3 \dots$ คือจำนวนของตัวอย่าง (sample) จากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ และคำนวณหาค่าประมาณของ K หรือเรียกว่า \hat{K}_{LS} จาก

$$\hat{K}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \tau \quad (\text{ข.6})$$

ข.4.2 การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 2

ทำ curve fitting ของผลการทดลองช่วงที่ความเร็วยังไม่คงที่ โดยใช้การจำลองผลตอบสนองเป็นระบบลำดับที่ 1 (first-order system) ความสัมพันธ์ของความเร็วในทิศทาง x คือ \dot{x} กับเวลาเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\dot{x} = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (\text{ข.7})$$

โดยที่ A คือค่าขนาด (amplitude) และ τ คือค่าคงที่ของเวลา ทั้งสองหาได้จากผลทดลอง และหาอนุพันธ์ของสมการ (4.9) เทียบกับเวลา จะได้เป็นความเร่ง (\ddot{x}) หรือเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\ddot{x} = \frac{d(\dot{x})}{dt} = \frac{A}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{ข.8})$$

จากนั้นใช้ข้อมูล \dot{x}_i และ \ddot{x}_i ที่ได้จากสมการ (ข.7) และ (ข.8) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ด้วยสมการ (ข.5) และ (ข.6) เช่นเดียวกับแนวทางที่ 1

ข.4.2 การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 3

กรณียานได้นำเริ่มเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอแล้ว พจน์ของความเร่ง \ddot{x} จะกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการ (ข.4) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} \quad (\text{ข.9})$$

จากนั้นใช้หลักการประมาณค่าแบบกำลังสอง (least square) เพื่อประมาณหาค่า K_L, K_Q โดยจัดรูปสมการ (ข.9) ให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}}_{\tau} = \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}}_H \underbrace{\begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \end{bmatrix}}_{\hat{K}} + error \quad (\text{ข.10})$$

และคำนวณค่าประมาณของ K คือ \hat{K}_{LS} จาก $\hat{K}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \tau$ เมื่อได้ค่า K_L และ K_Q แล้ว ขั้นตอนต่อไปจัดรูปสมการ (ข.4) ใหม่เป็น

$$\tau_x - K_L \dot{x} - K_Q |\dot{x}| \dot{x} = (m + m_a) \ddot{x} \quad (\text{ข.11})$$

จากนั้นใช้หลักการ least square อีกครั้งเพื่อประมาณหาค่า $m + m_a$ โดยจัดรูปสมการ (ข.11) อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

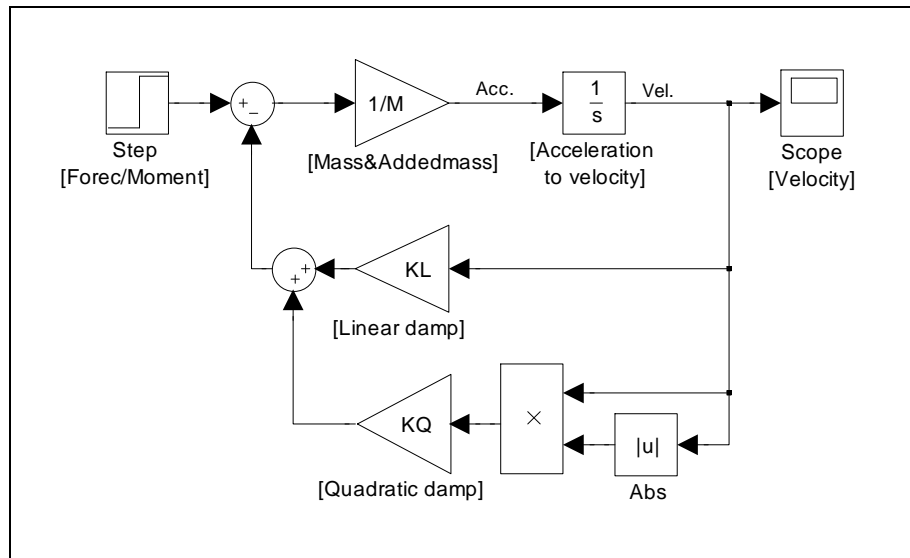
$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{x1} - K_L \dot{x}_1 - K_Q |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \tau_{x2} - K_L \dot{x}_2 - K_Q |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \tau_{xi} - K_L \dot{x}_i - K_Q |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}}_{\tau} = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix}}_H \underbrace{\left[(m + m_a) \right]}_K + error \quad (\text{ข.12})$$

และค่าประมาณของ K คือ \hat{K}_{LS} คำนวณได้จาก

$$\hat{K}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \tau \tag{ข.13}$$

ข.5 เกณฑ์การเลือกค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ

เมื่อได้ชุดข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ จากการคำนวณทั้งสามแนวทางข้างต้น นำชุดข้อมูลที่ได้ แทนลงในสมการที่ (ข.1) แล้วจำลองคุณตอบสนองของความเร็วด้วย MATLAB/Simulink ดังรูปที่ ข.2 และท้ายสุดก็เลือกชุดข้อมูลที่ให้ผลตอบสนองใกล้เคียงกับผลทดลองจริงที่สุดเพื่อใช้เป็นตัวแทนของค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ

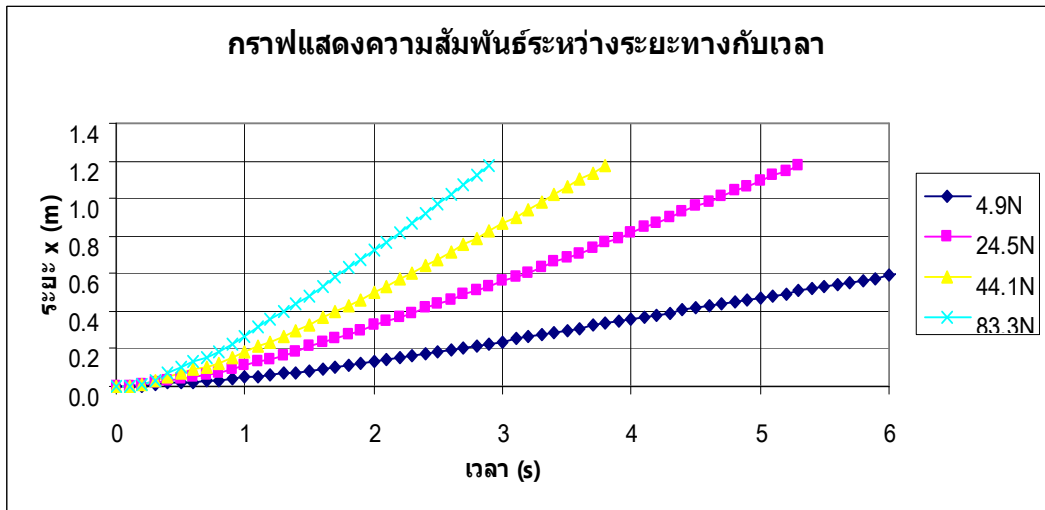


รูปที่ ข.2 แผนภาพกรอบแบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำที่สร้างจากสมการ (ข.1) เพื่อจำลองผลด้วย MATLAB/Simulink

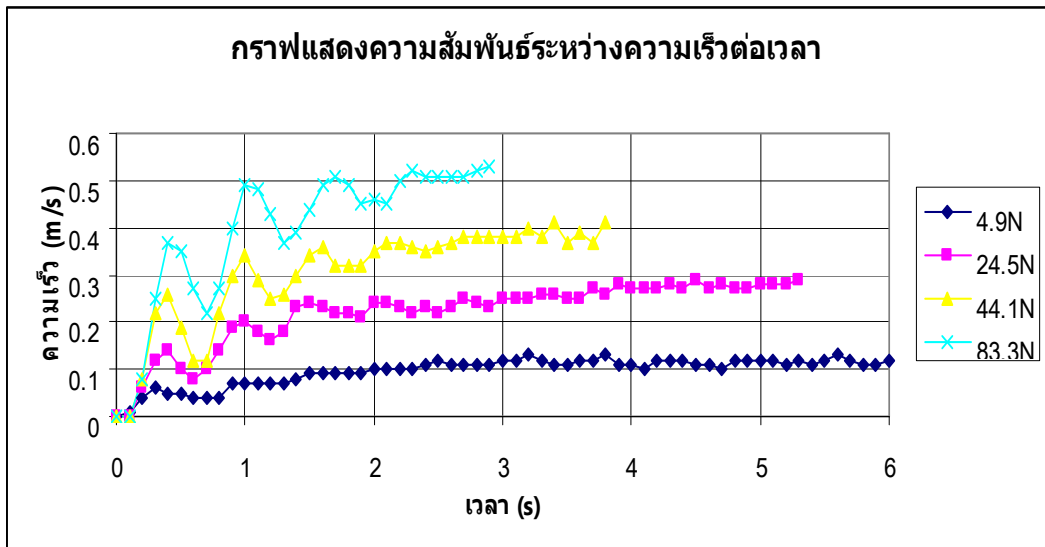
ข.6 ผลการทดลองแรงดูดคงที่กับยานใต้น้ำ BEMBAM-G2

ข.6.1 การทดลองการเคลื่อนที่เดินทาง

ผลการทดลองประกอบกับการคำนวณของการเคลื่อนที่เดินทางหรือตามแกน x ได้ผลดังแสดงในรูปที่ ข.3

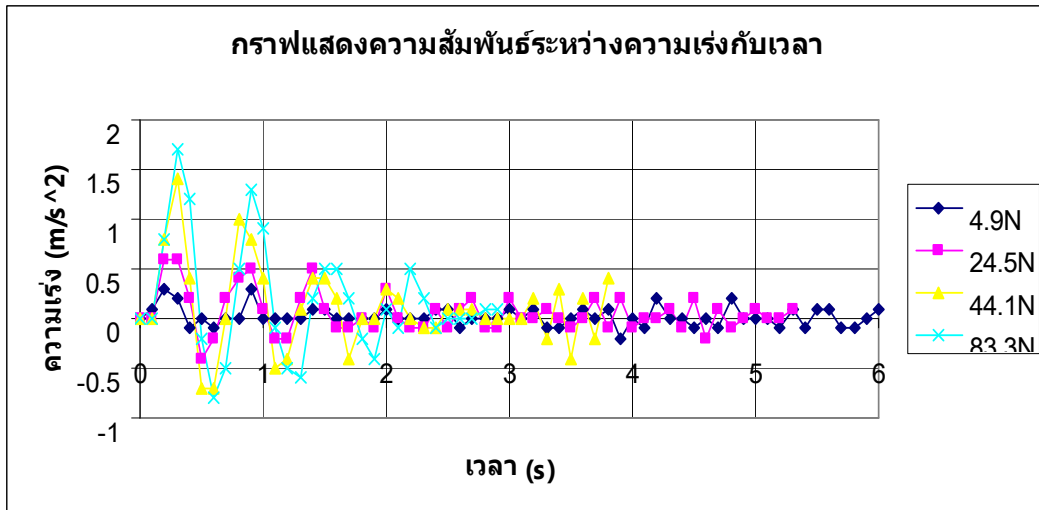


(ก) ระยะทางกับเวลา (จากการทดลอง)



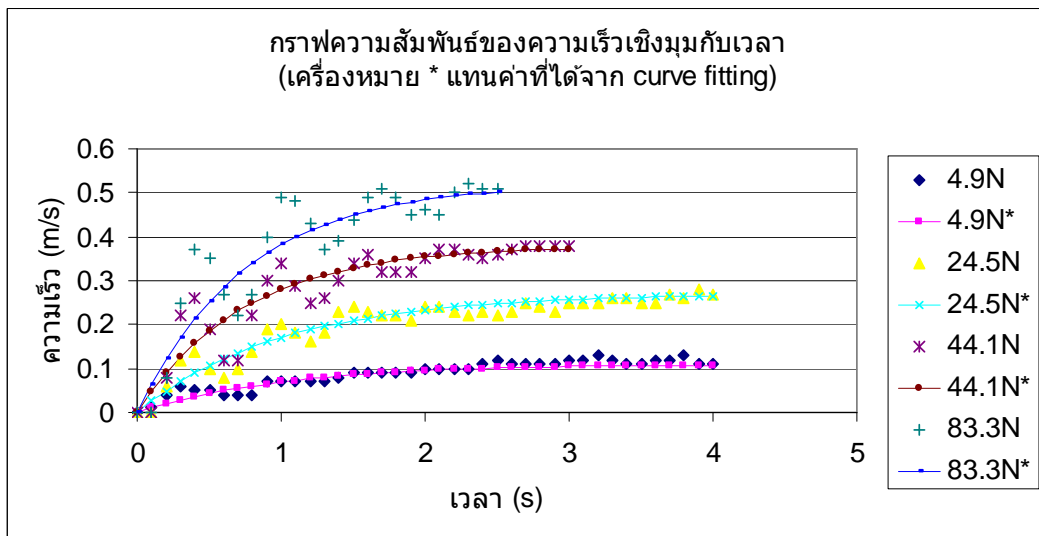
(ข) ความเร็วกับเวลา

รูปที่ ข.3 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการเคลื่อนที่บนพื้นน้ำ



(ค) ความเร่ง \ddot{x} กับเวลา

รูปที่ ข.3 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการเคลื่อนที่เดินทาง (ต่อ)



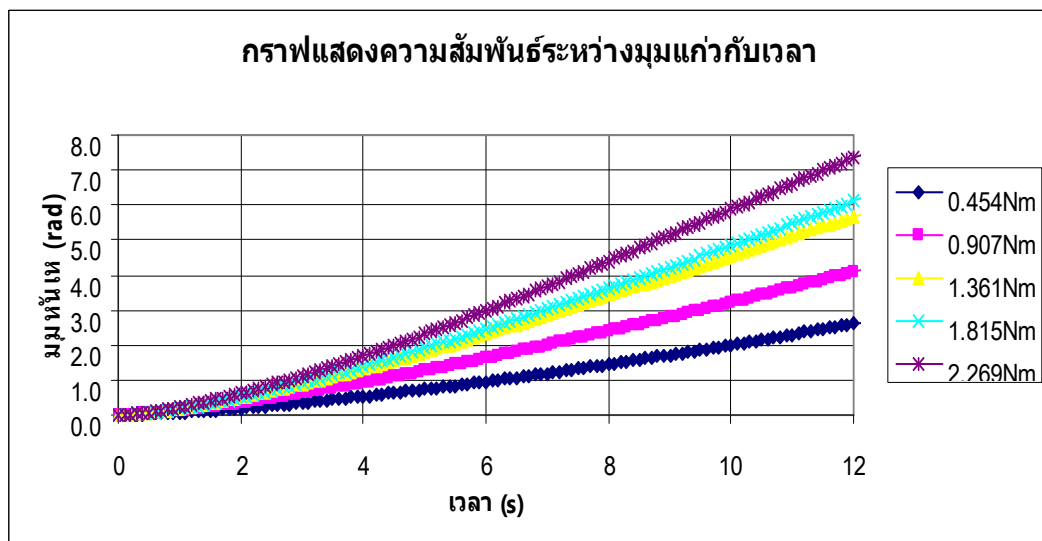
รูปที่ ข.4 ผลตอบสนองของความเร็วช่วง transient กับผลจาก curve fitting

เมื่อพิจารณาความเร็วชั่วขณะได้เวลาที่ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ที่แรงจุดเท่ากับ 4.9, 24.5, 44.1 และ 83.3 นิวตัน มีค่าประมาณเท่ากับ 4, 4, 3, 3 วินาทีตามลำดับและทำ curve fitting ของผลตอบสนองความเร็วในช่วง transient ได้ผลดังรูปที่ 4.11 ผลตอบสนองความเร็วในช่วง transient

สำหรับแรงจุด 4.9, 24.5, 44.1, 83.3 นิวตัน ได้ amplitude ของความเร็ว (A) เป็น 0.11, 0.27, 0.38, 0.51 และได้ค่าคงที่ของเวลา (τ) เป็น 1, 1, 0.75, 0.75 ตามลำดับ

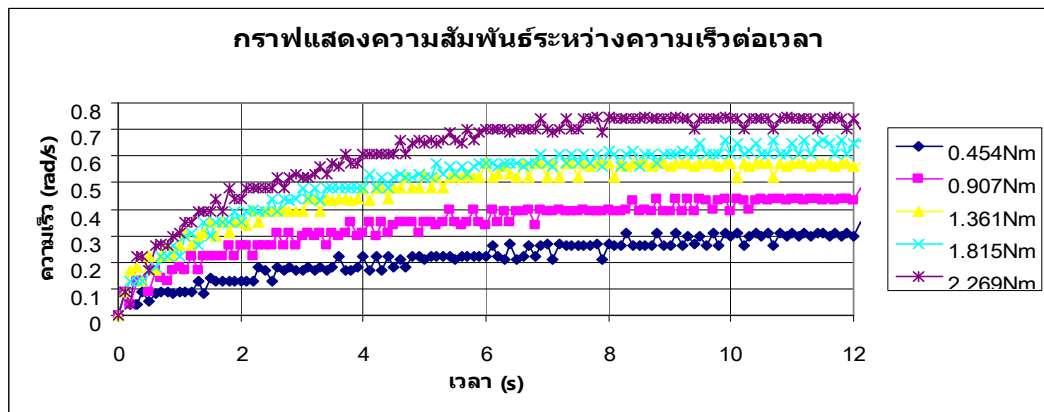
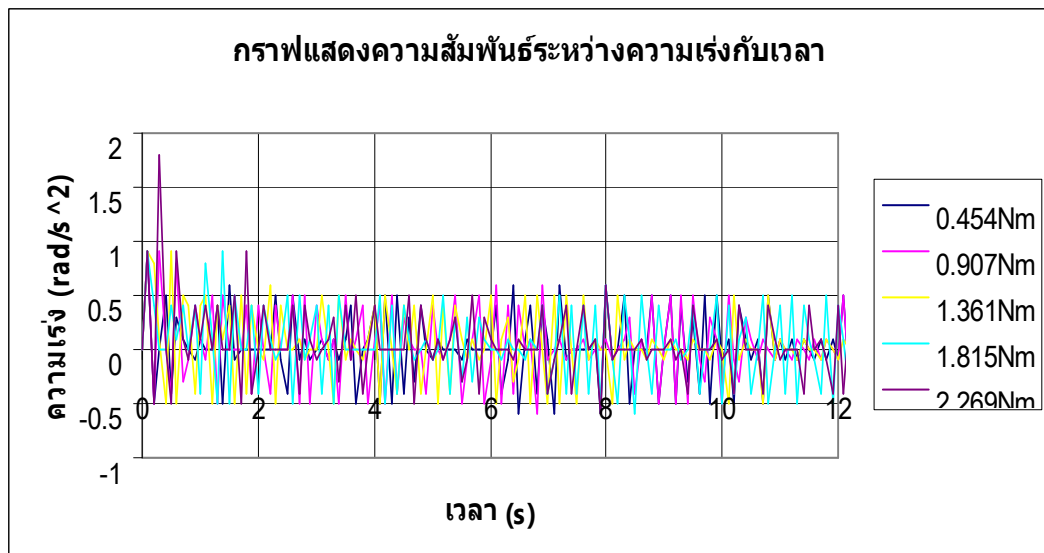
ข.6.1 การทดลองการหมุนรอบแกนแนวตั้ง

ผลการทดลองประกอบกับการคำนวณของการหมุนรอบแกนแนวตั้งได้ผลดังแสดงแสดงในรูปที่ ข.5 และผลการคำนวณหาความเร็วหันเหชั่วขณะตามแนวแกนแนวตั้ง (ψ) ได้เวลาที่ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ที่แรงบิดจุดเท่ากับ 0.454, 0.907, 1.361 และ 2.269 นิวตันเมตร โดยประมาณเท่ากับ 11, 11, 9, 9 วินาทีตามลำดับ เมื่อทำ curve fitting ของผลตอบสนองความเร็วหันเหในช่วง transient ได้ผลดังแสดงในรูปที่ ข.6 สำหรับแรงจุดบิด 0.454, 0.907, 1.361, 2.269 นิวตันเมตรได้ amplitude ของความเร็วหันเหเป็น 0.31, 0.44, 0.56, 0.74 และได้ค่าคงที่ของเวลาเป็น 2.75, 2.75, 2.25, 2.25 ตามลำดับ โดยผลการคำนวณตามแนวทางที่ 1, 2 และ 3 แสดงในตารางที่ ข.1 และนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโครไดนามิกส์แทนในสมการ (ข.1) และจำลองด้วย MATLAB/Simulink ได้ผลดังรูปที่ ข.7 และ ข.8

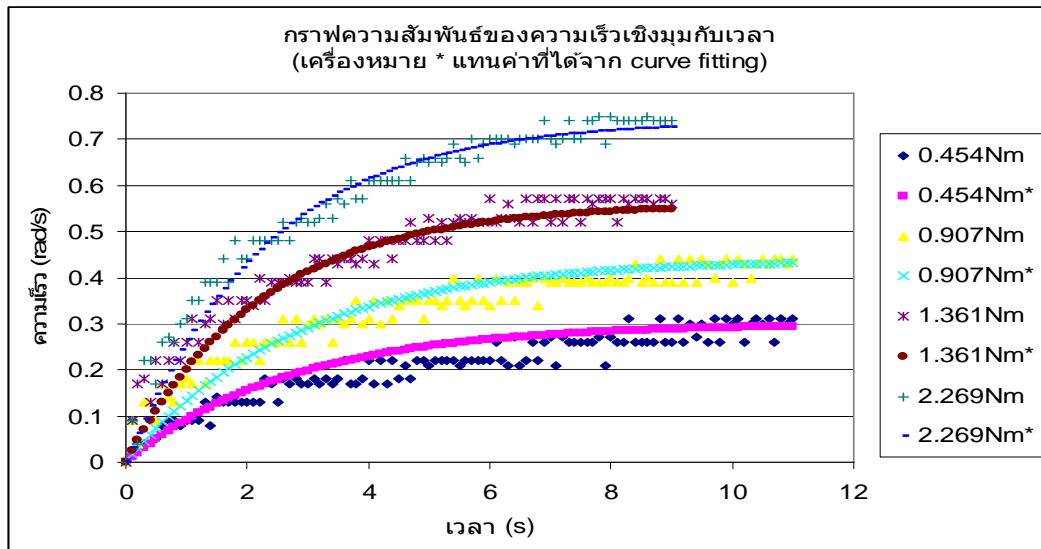


(ก) องศาการหันเห ψ กับเวลา

รูปที่ ข.5 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง

(ข) ความเร็วหันเห $\dot{\psi}$ กับเวลา(ค) ความเร่งหันเห $\ddot{\psi}$ กับเวลา

รูปที่ ข.5 ผลการทดลองและผลการคำนวณของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง (ต่อ)



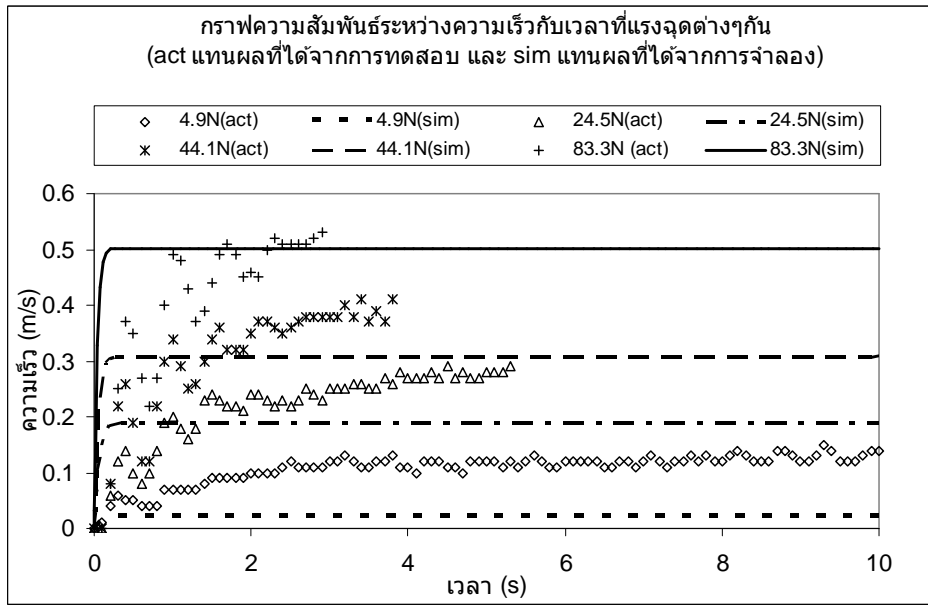
รูปที่ ข.6 ผลตอบสนองของความเร็วช่วง transient รอบแกนแนวดิ่งกับผลจาก curve fitting

ตารางที่ ข.1 สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้ เมื่อนำค่าต่างๆที่ได้มาคำนวณ

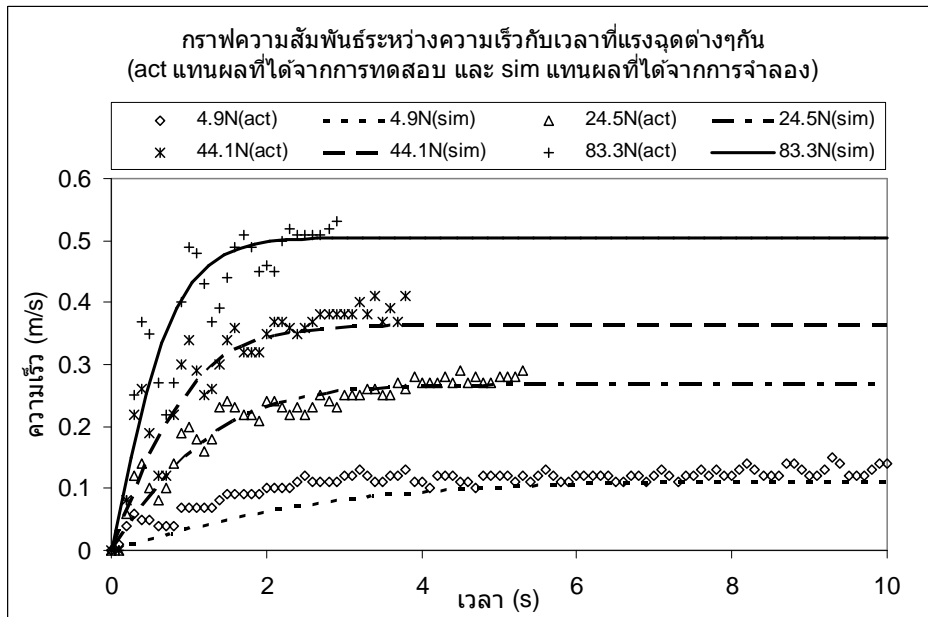
เดินหน้า	แนวทางที่ 1	แนวทางที่ 2	แนวทางที่ 3
$m + m_a$ [kg]	8.0907	133.2060	143.2591
K_L [N.s/m]	107.3427	8.8529	20.1603
K_Q [N.(s/m) ²]	116.3427	308.8443	241.1425
หมุนรอบแกนแนวดิ่ง	แนวทางที่ 1	แนวทางที่ 2	แนวทางที่ 3
I [kg.m ²]	0.0870	7.0796	7.9708
K_L [N.s/rad]	3.0057	0.4666	0.1192
K_Q [N.(s/rad) ²]	0.1486	3.4984	4.1228

ข.6.3 การเลือกค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานได้นำ

ผลการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่คำนวณได้จากทั้งสามแนวทางมาจำลองร่วมกับแบบจำลองพลวัตของยานได้นำแสดงดังรูปที่ ข.7 สำหรับการเคลื่อนที่เดินหน้า และรูปที่ ข.8 สำหรับการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง โดยจากการทดลองสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

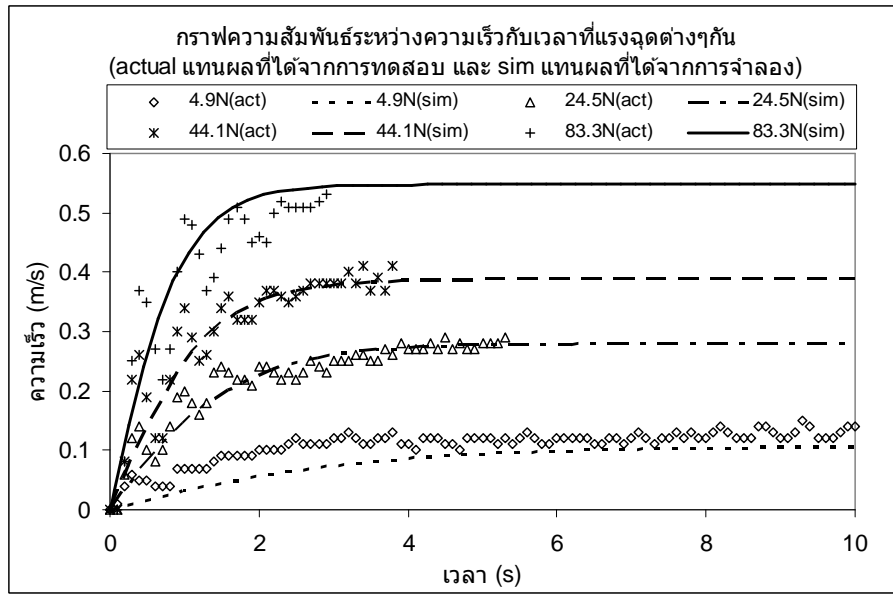


(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1



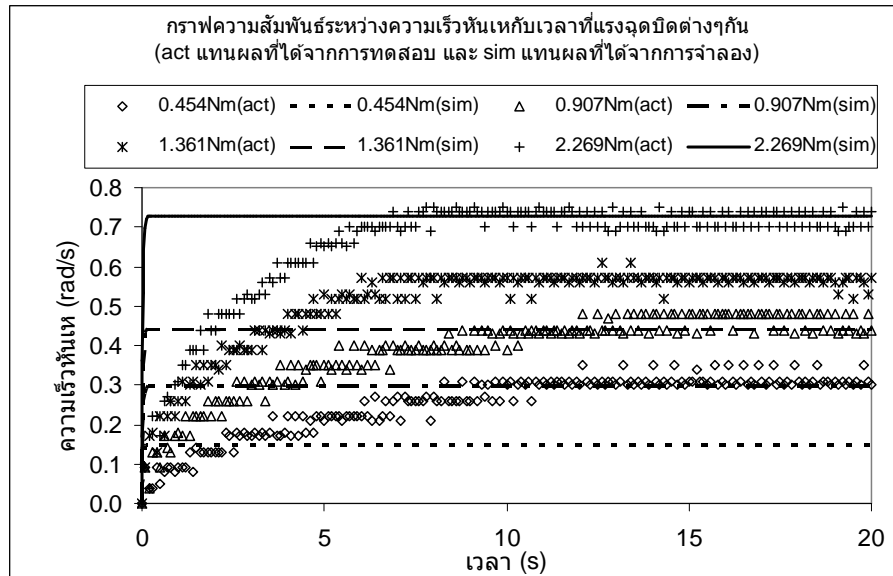
(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2

รูปที่ ข.7 ผลจำลองด้วย MATLAB/Simulink ของความเร็วเดินหน้า



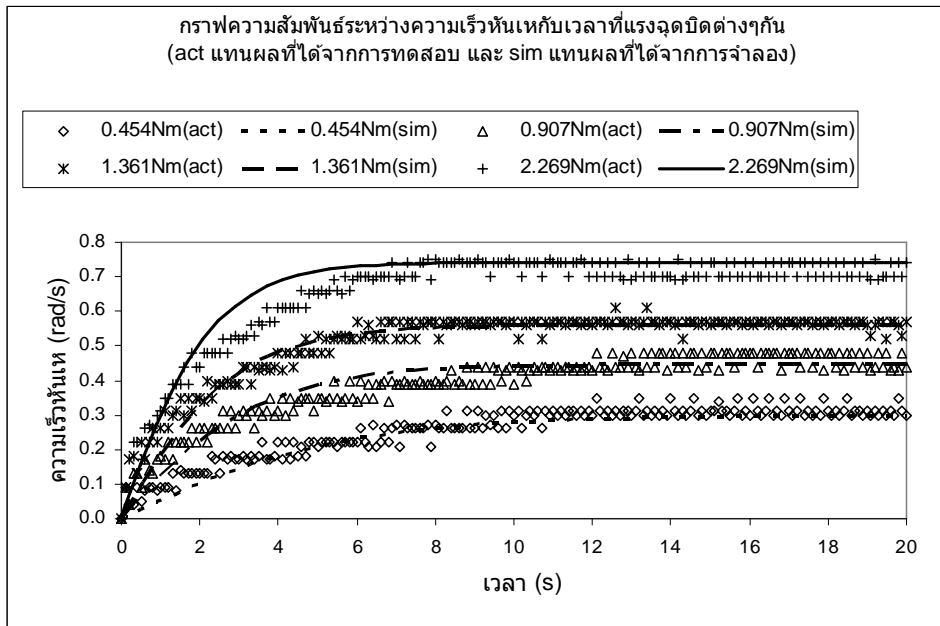
(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปที่ ข.7 ผลจำลองด้วย MATLAB/Simulink ของความเร็วเดินหน้า (ต่อ)

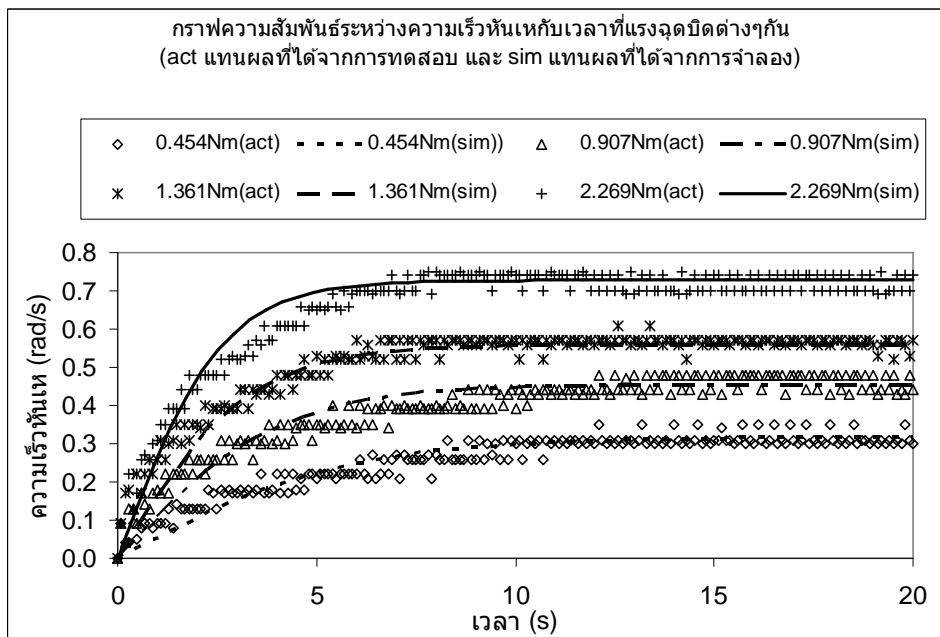


(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1

รูปที่ ข.8 ผลจำลองด้วย MATLAB/Simulink ของการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง



(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2



(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปที่ ข.8 ผลจำลองด้วย MATLAB/Simulink ของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง (ต่อ)

พิจารณารูปที่ ข.7 (ก) และ ข.8 (ก) พบว่าผลจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากผลทดลองสูงมากค่า ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 1 ไม่สามารถใช้เป็น ตัวแทนระบบได้ ต่อมาพิจารณารูปที่ ข.7 (ข) และ ข.8 (ข) พบว่าผลการจำลองการเคลื่อนที่และการหันเหได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดี ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 2 สามารถใช้เป็นตัวแทนระบบได้ ท้ายสุดพิจารณารูปที่ ข.7 (ค) และ ข.8 (ค) พบว่าผลการจำลองการเคลื่อนที่และการหันเหได้ผลใกล้เคียงกับการทดลองดีเช่นเดียวกับแนวทางที่ 2 แต่โดยรวม ผลการจำลองจะลากผ่านผลการทดลองจริงได้เฉลี่ยดีกว่า ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 3 จึงเหมาะที่จะเป็นตัวแทนระบบมากที่สุด

สรุป ค่าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนระบบของยาน BENBAM-G2 ที่มีมวลเท่ากับ 30 kg คือสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวหน้า m_a, K_L, K_Q มีค่า 113.2591 kg, 20.1603 Ns/m, 241.1425 N.(s/m)² และสำหรับการหมุน I, K_L, K_Q มีค่า 7.9708 kg.m², 0.1192 N.s/rad และ 4.1228 N.(s/rad)² ตามลำดับ

และทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ BEMNAM-G2 ในทิศสำหรับการเคลื่อนที่อื่นๆ และขยายผลใช้วิธีการเดียวกันนี้ทดสอบกับยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้ค่าที่เหมาะสมดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ BENBAM-G2 และ

BENMAB-G3		
ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์	BENBAM-G3	BENBAM-G2
X_u	424.67 kg	113.2591 kg
X_w	23.5 Ns/m	20.1603 Ns/m
$X_{w w }$	1415.7 N(s/m) ²	241.1425 N(s/m) ²
Y_v	454.02 kg	113.2591 kg
Y_w	126.977 Ns/m	20.1603 Ns/m
$Y_{v v }$	218.61 N(s/m) ²	241.1425 N(s/m) ²
Z_u	908.04 kg	113.2591 kg
Z_w	253.954 Ns/m	20.1603 Ns/m
$Z_{w w }$	437.22 N(s/m) ²	241.1425 N(s/m) ²

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ BENBAM-G2 และ BENMAB-G3 (ต่อ)

ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์	BENBAM-G3	BENBAM-G2
$I_z + N_r$	$2.69 \text{ kg-m}^2 + 15.1885 \text{ kg-m}^2$	7.9708 kgm^2
N_r	3.9267 N(s.rad)	0.1192 N(s.rad)
$N_{r v}$	$5.4667 \text{ N(s.rad)}^2$	$4.1228 \text{ N(s.rad)}^2$

ภาคผนวก ค
การทดลองหาสมรรถนะของชุดฝึก

การทดลองหาสมรรถนะของชุดผลึก

ค.1 ภาพรวมของการทดลองหาสมรรถนะของชุดผลึก

หลังจากการออกแบบและสร้างชุดผลึกแล้ว ได้ทำการทดลองเพื่อหาสมรรถนะของชุดผลึกด้วยวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อหาค่าแรงผลึกสูงสุดที่ชุดผลึกทำได้ 2) เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ของแรงผลึกกับความเร็วรอบ สำหรับประกอบการออกแบบระบบควบคุมชุดผลึก และ 3) เพื่อให้มั่นใจได้ว่าชุดผลึกที่นำไปใช้เป็นแรงจูงอินพุตให้กับยานใต้น้ำ BENBAM-G2 และ BENBAM-G3 มีความน่าเชื่อถือและคลาดเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในขั้นตอนและวิธีการทดลอง ชุดผลึกทั้งสองรุ่นมีวิธีการที่แตกต่างกัน โดยจะสอดคล้องกับการออกแบบของชุดผลึกแต่ละรุ่น

ค.2 การทดลองหาค่าสมรรถนะของชุดผลึกสำหรับยานใต้น้ำ BENBAM-G2

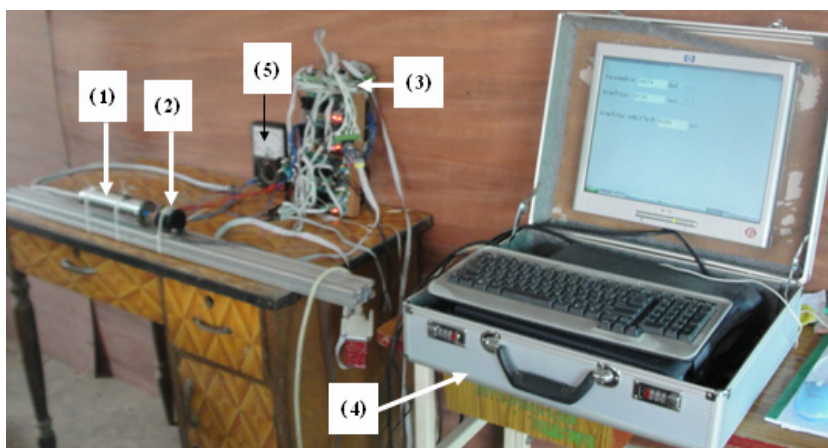
ชุดผลึกที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับยานใต้น้ำ BENBAM-G2 นั้นเป็นชุดผลึกที่ใช้การควบคุมแรงผลึกผ่านวิธีการควบคุมความเร็วรอบของใบพัดโดยใช้ตัวควบคุมแบบลูปปิด ควบคุมความเร็วรอบใบพัด ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงผลึกที่สัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของใบพัด เพื่อใช้เป็นแรงอินพุต และเพื่อให้ได้ความเร็วของใบพัดที่มีความเที่ยงตรง จึงได้ทำการทดลองหาค่าสมรรถนะของชุดผลึกด้วยการทดลองดังต่อไปนี้

ค.2.1 การสอบเทียบ Tachometer

ก่อนนำ tachometer ไปใช้วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ชุดผลึก ได้มีการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบจริง (ในหน่วยรอบต่อนาที) กับความเร็วรอบในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก Tachometer (ในหน่วยโวลต์) ด้วยอุปกรณ์และวิธีการทดสอบดังนี้

1) อุปกรณ์สอบเทียบ Tachometer

อุปกรณ์สอบเทียบ Tachometer (แสดงดังรูปที่ ค.1) ประกอบด้วยสองส่วน ส่วนที่หนึ่งทำหน้าที่วัดรอบของ tachometer ในหน่วยรอบต่อนาที ประกอบด้วย (1) คือมอเตอร์ชุดผลึกทำหน้าที่กำเนิดรอบ ซึ่งต่อตรงไปยัง tachometer (2) คือเอ็นโค้ดเดอร์ (encoder) ทำหน้าที่วัดมุมการหมุนของมอเตอร์และ tachometer (3) คือบอร์ดอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่บันทึกค่ามุมที่ได้จาก encoder และส่งค่าไปยังคอมพิวเตอร์ ทุกๆ 0.1 วินาที (4) คือคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมทำหน้าที่บันทึกมุมการหมุนคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงของมุมเทียบกับเวลา (0.1 วินาที) และคำนวณความเร็วการหมุนออกมาในหน่วยรอบต่อนาที ซึ่งความเร็วรอบที่ได้นี้ถือเป็นเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนที่สองทำหน้าที่วัดรอบในรูปของแรงดันไฟฟ้าที่ได้จาก tachometer ในหน่วยโวลต์ ประกอบด้วย (5) คือโวลต์มิเตอร์



รูปที่ ค.1 อุปกรณ์สอบเทียบ Tachometer

2) วิธีการสอบเทียบ

การทดสอบทำโดยจ่ายแรงดันไฟฟ้า ให้มอเตอร์หยุดผลัก รอให้รอบนิ่งแล้วอ่านค่าความเร็วรอบในหน่วยรอบต่อนาที กับความเร็วรอบในหน่วยโวลต์ จากนั้นก็ทดสอบตามวิธีการเดิม แต่ปรับระดับแรงดันเพื่อให้ได้รอบที่แตกต่างกัน

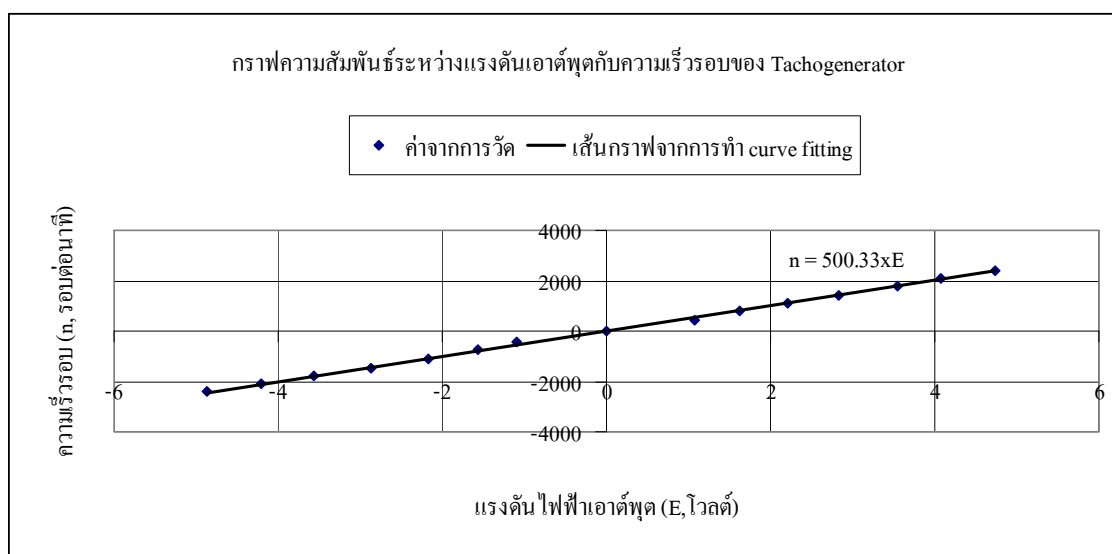
3) ผลการสอบเทียบ

จากการสอบเทียบได้ผลดังรูปที่ ค.2 เมื่อประมาณความสัมพันธ์ของผลที่ได้จากการทดลองเป็นสมการเชิงเส้น ได้ตามสมการ (ค.1)

$$n = \left(500.33 \frac{\text{rpm}}{\text{volt}} \right) \times E \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ n แทนความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น rpm และ E แทนแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โวลต์

และในการใช้งาน จำกัดความเร็วสูงสุดที่ 2500 rpm เนื่องจากตัวควบคุมสามารถวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 5 โวลต์ และความละเอียดของการวัดเท่ากับ 0.0196 โวลต์ ซึ่งเทียบเป็นความเร็วรอบได้ 10 rpm



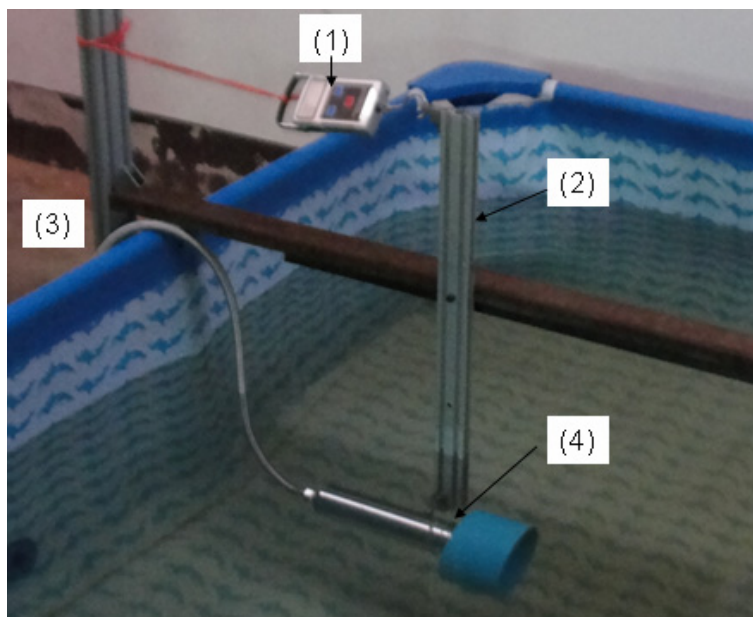
รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน ไฟฟ้าจาก tachometer กับความเร็วรอบ tachometer

ค.2.2 การทดสอบควบคุมความเร็วรอบและแรงผลักรวมของชุดผลักรวมในน้ำ

เพื่อให้มั่นใจว่า ผลที่ได้จากการสอบเทียบ tachometer เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมการทำงานของชุดผลักรวม สามารถควบคุมความเร็วรอบได้โดยเกิดความคลาดเคลื่อนในระดับที่ยอมรับได้ จึงทดสอบควบคุมความเร็วรอบจริง โดยนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วรอบไปประดิษฐ์เป็นโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบแบบเปิดปิด (24/0 โวลต์)

วิธีการทดสอบการทดสอบสมรรถนะชุดผลักรวม ทำโดย ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ตามกำหนด และวัดแรงดึงที่ได้จากตาชั่งแขวน โดยอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ ค.3 และมีส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) คือตาชั่งแขวน ทำหน้าที่วัดแรงดึง (2) คือแขนทดแรง ทำหน้าที่ทดแรงระหว่างชุดผลักรวมกับตาชั่ง (3) คือชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วมอเตอร์ที่รอบต่างๆ (4) คือชุดทดสอบก็คือชุดผลักรวม

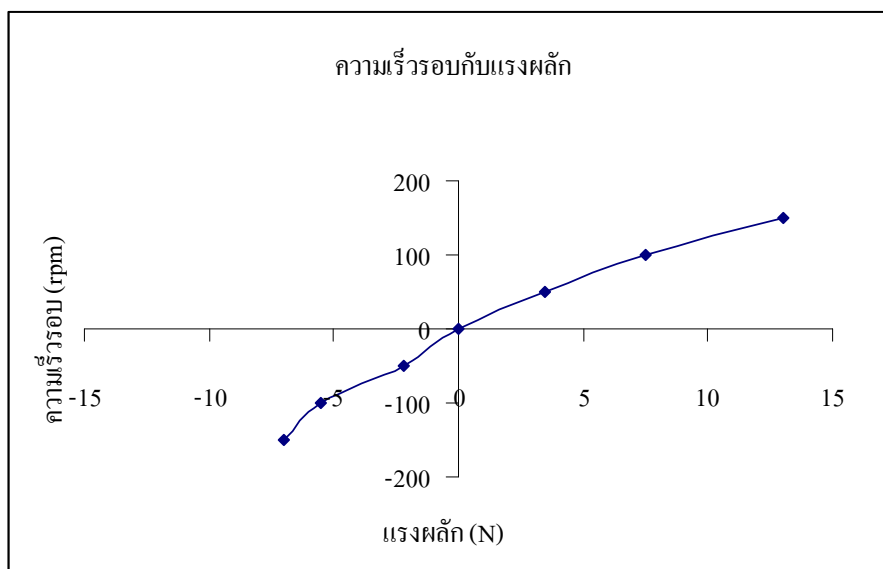
จากการทดลองเมื่อขับชุดผลักรวมในน้ำ ชุดผลักรวมได้สูงสุดที่ความเร็วรอบประมาณ 150 rpm โดยสาเหตุที่ทำให้ความเร็วรอบลดลงอย่างมาก เนื่องมาจาก แรงต้านจากน้ำมีค่าสูง และมอเตอร์ที่ใช้ทำชุดผลักรวมมีกำลังน้อย ดังนั้นจึงกำหนดการควบคุม ตั้งแต่ 0 ถึง 150 rpm และได้ผลการทดสอบตามตารางที่ ค.1 และจากผลการทดสอบ ได้แรงผลักรวมค่าบวกและค่าลบสูงสุดเท่ากับ 7 และ 13 N ตามลำดับ และความคลาดเคลื่อนของความเร็วรอบสูงสุดที่ 20%



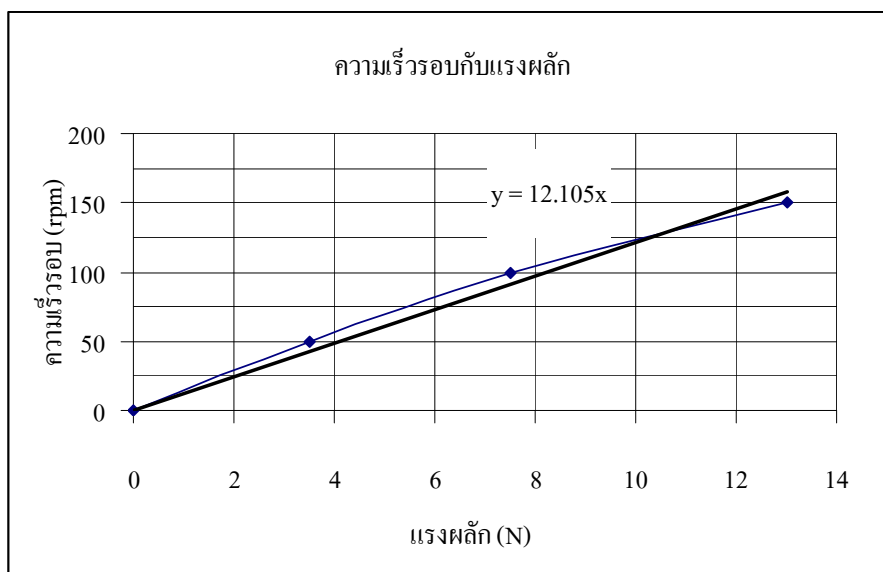
รูปที่ ๓.๓ การติดตั้งชุดผลัดกับชุดทดสอบแรงผลัด

ตารางที่ ๓.๑ ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลัดในน้ำ

ความเร็วอ้างอิง (rpm)	ความเร็วจริง (rpm)	ผลต่าง (rpm)	คลาดเคลื่อน (%)	แรงผลัด (N)
150	140	10	7	13
100	80	20	20	7.5
50	40	10	20	3.5
0	ไม่หมุน	0	0	0
-50	-40	10	20	2.2
-100	-90	10	10	5.5
-150	-140	10	7	7

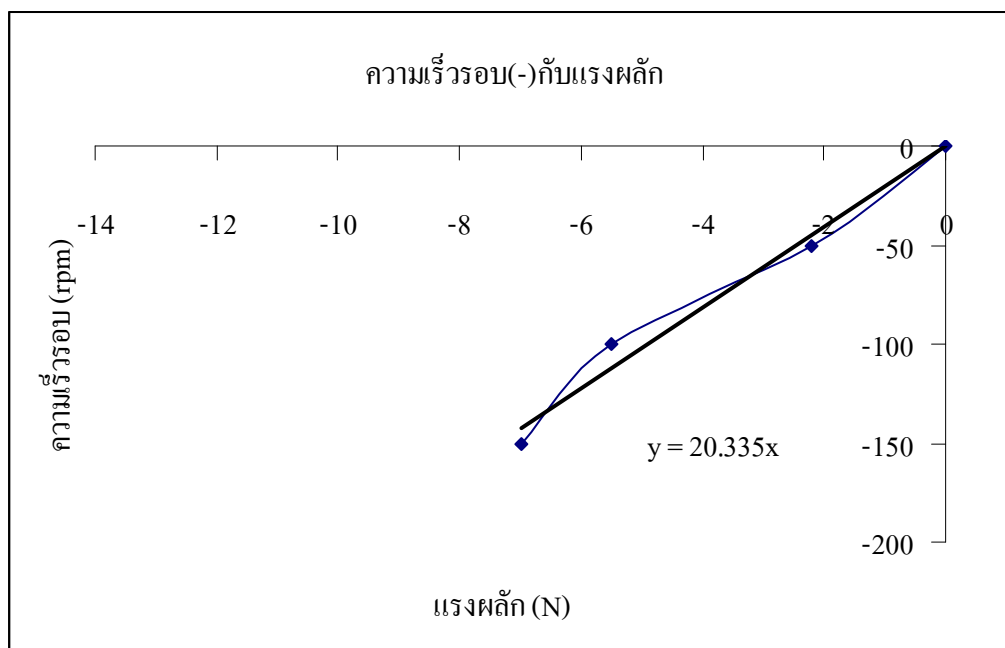


รูปที่ ค.4 ผลทดสอบแรงผลักรที่ความเร็วรอบกำหนด



(ก) แรงผลักรในทิศทางบวก

รูปที่ ค.5 ผลการทำ curve fitting แบบเชิงเส้นของแรงผลักรด้านบวกและด้านลบ



(ข) แรงผลักรทิศทางลบ

รูปที่ ค.5 ผลการทำ curve fitting แรงผลักรด้านบวกและด้านลบ (ต่อ)

จากการทำ curve fitting ได้สมการเส้นตรงของแรงผลักรกับแรงผลักรด้านบวก (+) และด้านลบดังสมการ (ค.2) และ (ค.3) ตามลำดับ

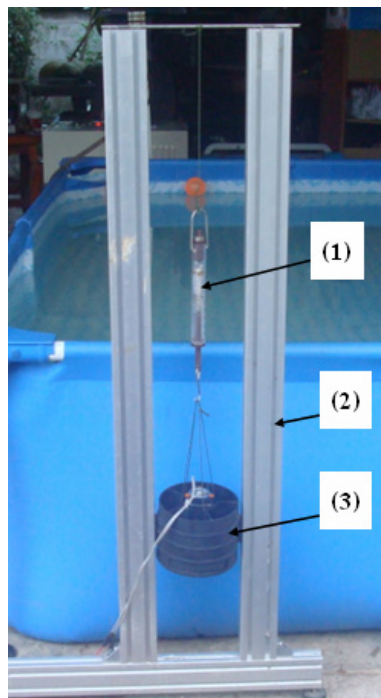
$$y = 12.1x \quad (\text{ค.2})$$

$$y = 20.3x \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อ y แทนความเร็วรอบ มีหน่วยเป็น rpm และ x แทนแรงผลักร มีหน่วยเป็น N

ค.3 การทดลองหาค่าสมรรถนะของชุดผลักรสำหรับยานใต้น้ำ BENBAM-G3

ชุดผลักรที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับยานใต้น้ำ BENBAM-G3 นั้นเป็นชุดผลักรที่ใช้การควบคุมแรงผลักรผ่านวิธีการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ PWM ควบคุมแรงผลักรโดยใช้ตัวควบคุมแบบลูปเปิด ดังนั้นเพื่อให้ได้แรงผลักรที่สัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ PWM เพื่อนำไปใช้เป็นแรงอินพุตที่มีความเที่ยงตรง จึงได้ทำการทดลองหาค่าสมรรถนะของชุดผลักรด้วยการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ ค.6 การติดตั้งชุดผลึกกับชุดทดสอบแรงผลึก

วิธีการทดสอบสมรรถนะชุดผลึก ทำโดยเปลี่ยนควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ตามกำหนด และวัดแรงดึงที่ได้จากตาชั่งแขวน โดยอุปกรณ์ทดสอบแสดงดังรูปที่ ค.6 ประกอบไปด้วย ส่วนประกอบหลักดังนี้ (1) คือตาชั่งแขวน ทำหน้าที่วัดแรงดึง (2) คือขาตั้งประกอบชุดผลึก ทำหน้าที่ประกอบชุดผลึกให้เคลื่อนตัวได้เฉพาะแนวตั้ง (3) คือชุดทดสอบก็คือชุดผลึก ซึ่งถูกต่อเข้ากับชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ ที่ทำหน้าที่ควบคุมเปอร์เซ็นต์ค่า PWM ของแรงดันไป 0/24 โวลต์ ที่จ่ายให้มอเตอร์ชุดผลึก

จากการทดลองเมื่อขับชุดผลึกในน้ำ โดยเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ PWM จาก 0 ถึง 100 % โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 % ทั้งในทิศทาง CCW และ CW ได้ผลดังตารางที่ ค.2 และ ค.3 ตามลำดับ

ตารางที่ ค.2 ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลัดทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

ค่าเปอร์เซ็นต์ PWM และทิศทางการหมุน CCW	แรงผลัด (N)	ค่าเปอร์เซ็นต์ PWM และทิศทางการหมุน CCW	แรงผลัด (N)
0	0	55	2.6
5	0.9	60	2.7
10	1.2	65	2.7
15	1.4	70	3.1
20	1.6	75	3.1
25	1.7	80	3.1
30	1.8	85	3.1
35	1.8	90	3.3
40	2	95	3.3
45	2.2	100	3.3
50	2.3		

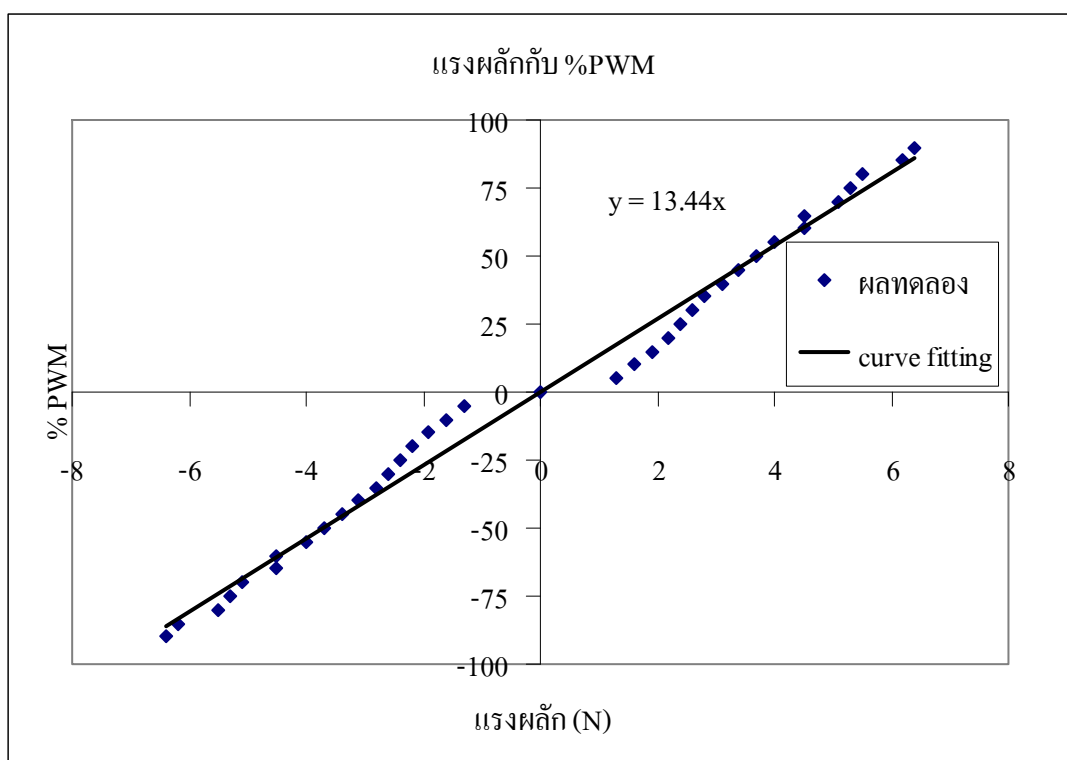
ตารางที่ ค.3 ผลการควบคุมความเร็วรอบชุดผลัดทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (CW)

ค่าเปอร์เซ็นต์ PWM และทิศทางการหมุน CW	แรงผลัด (N)	ค่าเปอร์เซ็นต์ PWM และทิศทางการหมุน CW	แรงผลัด (N)
0	0	55	4
5	1.3	60	4.5
10	1.6	65	4.5
15	1.9	70	5.1
20	2.2	75	5.3
25	2.4	80	5.5
30	2.6	85	6.2
35	2.8	90	6.4
40	3.1	95	6.4
45	3.4	100	6.4
50	3.7		

จากนั้นทำการจับคู่ชุดผลึกสำหรับสร้างแรงผลึก τ_1 , τ_2 และ τ_3 โดยวางแผนทิศทางการหมุนของใบพัดให้เสริมแรงกัน ระหว่าง CCW และ CW ดังรูปที่ ค.7 และทำ curve fitting ได้สมการเส้นตรงของแรงผลึกทั้งด้านบวก (+) และด้านลบดังสมการ (ค.4)

$$y = 13.44x \quad (\text{ค.4})$$

เมื่อ y แทน %PWM มีค่าเป็น % และ x แทนแรงผลึก τ_1 , τ_2 และ τ_3 มีหน่วยเป็น N



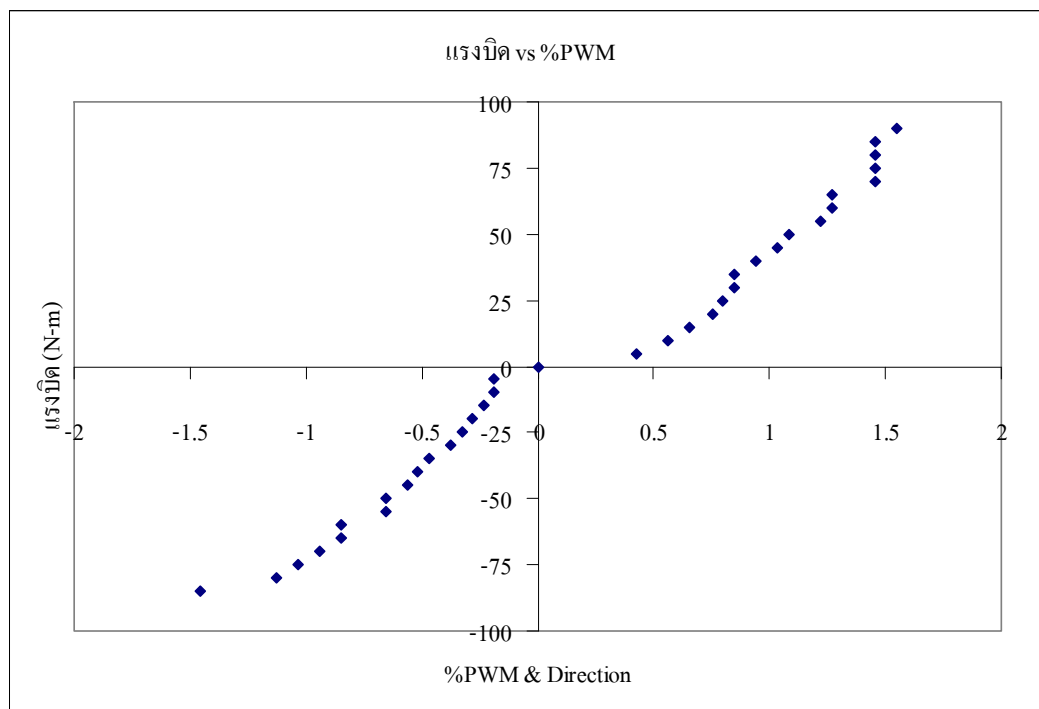
รูปที่ ค.7 สมรรถนะของชุดผลึกสำหรับสร้างแรงผลึก τ_1 , τ_2 และ τ_3

ส่วน τ_4 จับคู่ชุดผลึกโดยวางแผนทิศทางการหมุนของใบพัดให้เสริมแรงกัน ระหว่าง CCW กับ CCW และ CW กับ CW ได้ผลดังรูปที่ ค.7 และทำ curve fitting ได้สมการเส้นตรงของแรงผลึกทั้งด้านบวก (+) และด้านลบดังสมการ (ค.5) และ (ค.6) ตามลำดับ

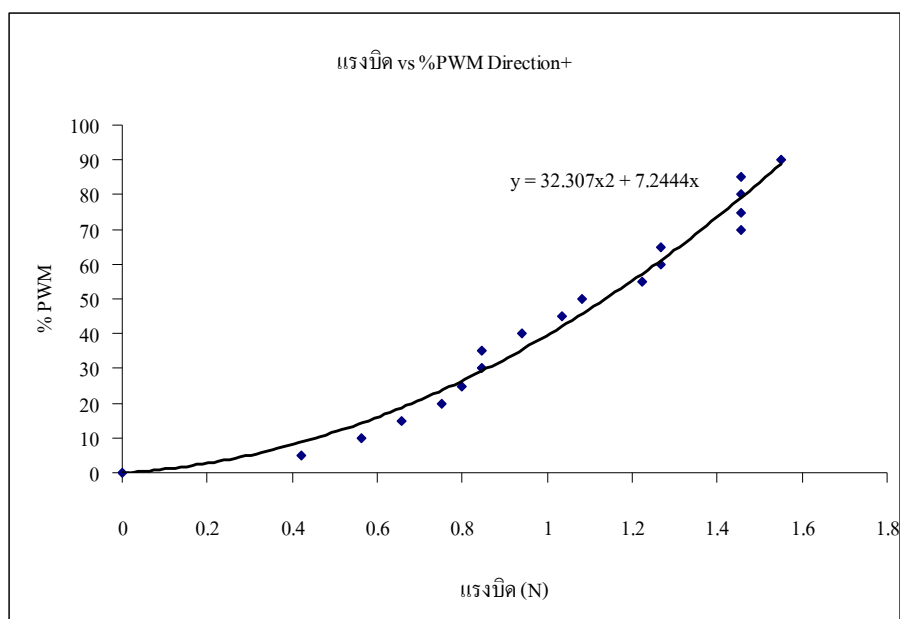
$$y = 32.307x^2 + 7.2444x \quad (\text{ค.5})$$

$$y = 17.358x^2 + 87.393x \quad (\text{ค.6})$$

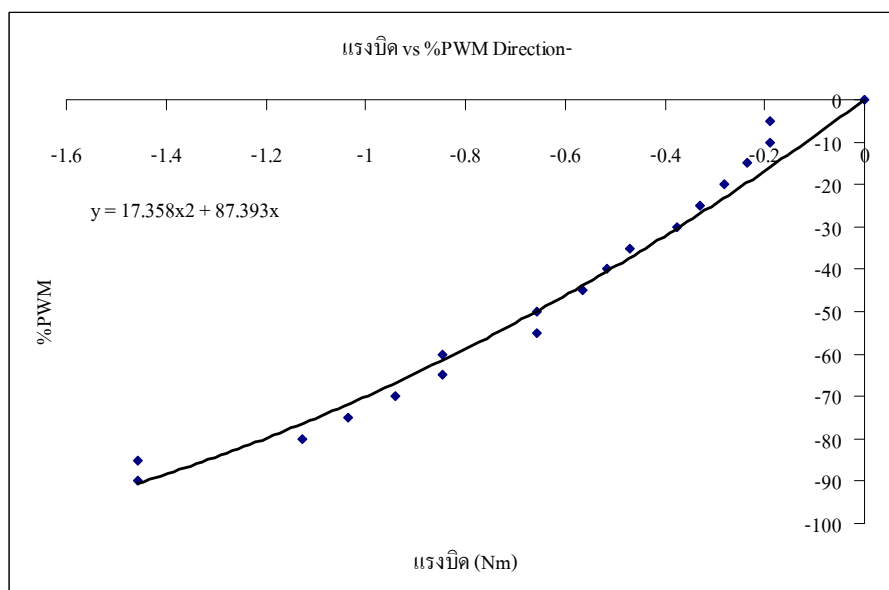
เมื่อ y แทน %PWM มีค่าเป็น % และ x แทนแรงพลิกที่ใช้สร้างแรงบิด τ_3 มีหน่วยเป็น N



รูปที่ ค.8 ผลทดสอบแรงพลิกที่ความเร็วรอบกำหนด



(ก) แรงผลักในทิศทางบวก



(ข) แรงผลักทิศทางลบ

รูปที่ ๙ ผลการทำ curve fitting แรงผลักด้านบวกและด้านลบ

ภาคผนวก ง
การหาสมการพหุนามของยานไต้ฟ้า BEMBAM-G3

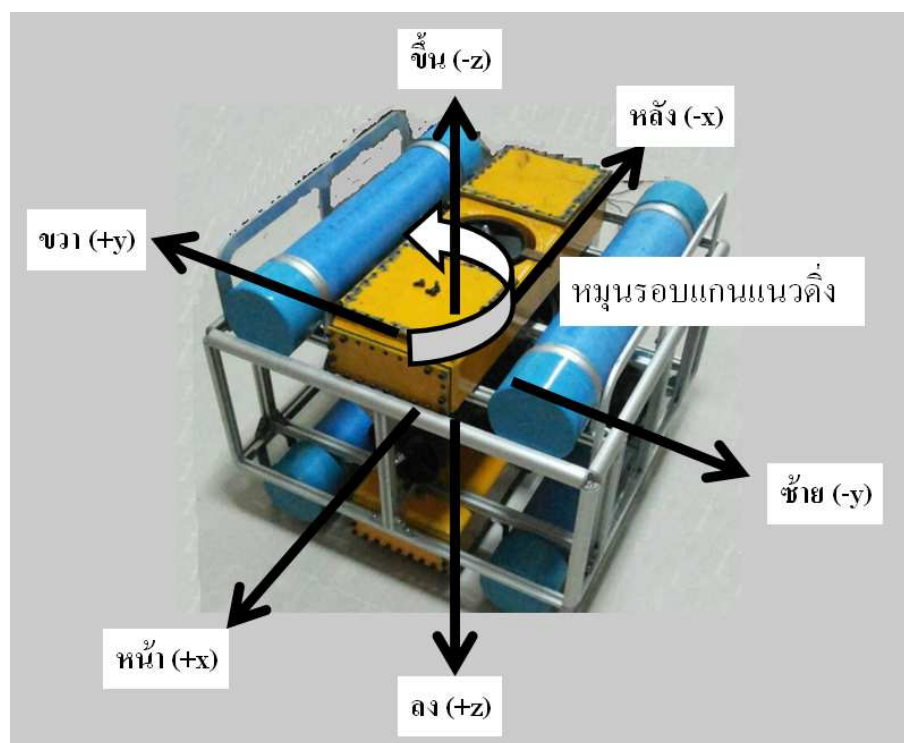
การหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

ง.1 ภาพรวมของการหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

ยานใต้น้ำ BEMBAM-G3 จะรองรับการเคลื่อนที่ 4 ลักษณะคือ เคลื่อนที่หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวดิ่ง ซึ่งทั้งหมดมีความอิสระในการเคลื่อนที่เท่ากับ 4 หรือ 4-DOF ในการออกแบบ ได้วางแผนการเคลื่อนที่ของตัวยานโดยใช้ชุดผลึก 4 คู่ แต่ละคู่ทำหน้าที่จับเคลื่อนเพียง 1 DOF เท่านั้น และหลังจากหาสมการพลศาสตร์ของยานได้แล้ว ทำการจัดสมการให้อยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะต่อไป

ง.2) การจัดสรรชุดผลึก

ลักษณะการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวดิ่ง ดังรูปที่ ง.1 และการจัดสรรหน้าที่ของชุดผลึกดังแสดงในตารางที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

ตารางที่ ง.1 การจัดสรรชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAM-G3

การเคลื่อนที่	หมายเลขชุดผลึก			
	คู่ที่ 1	คู่ที่ 2	คู่ที่ 3	คู่ที่ 4
1) เคลื่อนที่หน้า-หลัง	/			
2) เคลื่อนที่ซ้าย-ขวา		/		
3) ดำขึ้น-ลง			/	
4) หมุนรอบแกนแนวตั้ง				/

กำหนดให้ τ_1 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่หน้า - หลัง ($X_{\{B\}}$) τ_2 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่ซ้าย - ขวา ($Y_{\{B\}}$) τ_3 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้ดำขึ้น - ลงแนวตั้ง ($Z_{\{B\}}$) และ τ_4 คือแรงบิดที่ขับเคลื่อนยานให้หมุนรอบแกน $Z_{\{B\}}$

ง.3) แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

จากสมการที่ (2.25) - (2.27) ตามลำดับคือ

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

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T$$

เมื่อประยุกต์ใช้กับยานใต้น้ำ “BENBAM-3” ที่ถูกออกแบบให้มีความมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ แรงลอยตัวกระทำผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยาน น้ำหนักของยานเท่ากับแรงลอยตัว ($W = B$) หรือยานใต้น้ำจะลอยอย่างเป็นกลาง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ (0-0.5 เมตรต่อวินาที) ไม่มีการเคลื่อนที่ควบในแต่ละแกน และโดยปกติจะวางตัวอยู่ในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) และมีการเคลื่อนที่เฉพาะ หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวตั้ง ดังนั้น จากสมการข้างต้นสามารถลดรูปเป็น

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad r]^T \quad (3.2)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \psi]^T \quad (3.3)$$

เมตริกซ์ \mathbf{M} และ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ ลดรูปเป็น

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_x + X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_y + Y_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z + N\dot{r} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|w}w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|r}r \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

ส่วนเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต $\boldsymbol{\tau}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \mathbf{LU} \quad (3.6)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{Bmatrix}$$

จากแบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-3 ที่ได้ตั้งสมการที่ (ง.1) นั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถสังเกตได้จากพจน์ของเมตริกซ์ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม จึงทำการประมาณเป็นระบบแบบเชิงเส้นรอบจุดสมดุล \mathbf{v}_0 ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (ง.7)$$

เมื่อ

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} X_u + 2X_{|u|}u_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + 2Y_{|v|}v_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + 2Z_{|w|}w_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_r + 2N_{|r|}r_0 \end{bmatrix} \quad (ง.8)$$

โดยที่สถานะสมดุล กำหนดให้ ความเร็วหน้า-หลัง ซ้าย-ขวา มีค่าเป็น 0 หรือคงที่ ($u = v = 0$) ตำแหน่งของความลึกมีค่าคงที่ ($\dot{z} = w = 0$) และมุมหันเหมีค่าคงที่ ($\dot{\psi} = r = 0$) และแทนค่าที่สถานะสมดุลด้วยตัวห้อย 0 จะได้ $\mathbf{v}_0 = 0, \dot{\mathbf{v}}_0 = 0$ และ $\boldsymbol{\tau}_0 = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\Delta\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ w - w_0 \\ r - r_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} \quad (ง.9)$$

$$\Delta\dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{u} - \dot{u}_0 \\ \dot{v} - \dot{v}_0 \\ \dot{w} - \dot{w}_0 \\ \dot{r} - \dot{r}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (ง.10)$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (ง.11)$$

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} Z_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (3.7) จะได้

$$\begin{bmatrix} m_x + X_{\ddot{u}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_y + Y_{\ddot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z + Z_{\ddot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_z + N_{\ddot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{v} \\ \ddot{w} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ทั้ง 4 ทิศทางเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นสามารถแยกเป็น 4 สมการคือ

$$(m_x + X_{\ddot{u}})\ddot{u} + (X_u)u = \tau_1 \quad (3.14)$$

$$(m_y + Y_{\ddot{v}})\ddot{v} + (Y_v)v = \tau_2 \quad (3.15)$$

$$(m_z + Z_{\ddot{w}})\ddot{w} + (Z_w)w = \tau_3 \quad (3.16)$$

$$(I_z + N_{\ddot{r}})\ddot{r} + (N_r)r = \tau_4 \quad (3.17)$$

หรือเขียนอยู่ในเทอรรวมของ x , y , z และ ψ ได้เป็น

$$(m_x + X_u)\ddot{x} + (X_u)(\dot{x}) = \tau_1 \quad (จ.18)$$

$$(m_y + X_y)\ddot{y} + (Y_v)\dot{y} = \tau_2 \quad (จ.19)$$

$$(m + Z_w)\ddot{z} + (Z_w)\dot{z} = \tau_3 \quad (จ.20)$$

$$(I_z + N_r)\ddot{\psi} + (N_r)\dot{\psi} = \tau_4 \quad (จ.21)$$

สรุป สมการพลวัตที่ได้ข้างต้น สามารถออกแบบตัวควบคุมแยกเป็น 4 ตัว อิสระกันคือ ตัวควบคุมความเร็วหน้า - หลัง (u) ตัวควบคุมความเร็วซ้าย - ขวา (v) ตัวควบคุมความลึก (z) และตัวควบคุมองศาหันเห (ψ)

จ.4) สมการสถานะของของยานใต้น้ำ BEMBAM-G3

$$\text{รูปทั่วไปของสมการสมรรถนะคือ } \frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \text{ และ } \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$$

จ.4.1 การเคลื่อนที่หน้า - หลัง

สำหรับการเคลื่อนที่หน้า-หลัง เป้าหมายคือต้องการควบคุมความเร็ว (u) ดังนั้นจากสมการ ที่ (จ.18) พิจารณาเป็นระบบอันดับที่หนึ่ง โดยมีตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียว โดยกำหนดให้ ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_1 = [u]$ และเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมคือความเร็ว (u) เมื่อจัดรูปสมการที่ (จ.18) ใหม่ และโดยแทน \dot{x} และ \ddot{x} ด้วยตัวแปรสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d(\mathbf{x}_1)}{dt} = \underbrace{\left[-\left(\frac{X_u}{m + X_u} \right) \right]}_{\mathbf{A}_1} \underbrace{[u]}_{\mathbf{x}_1} + \underbrace{\left[\frac{1}{m + X_u} \right]}_{\mathbf{B}_1} \tau_1 \quad (จ.22)$$

$$\mathbf{y} = \underbrace{[1]}_{\mathbf{C}_1} u \quad (จ.23)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้เป็น

$$\mathbf{A}_1 = [-0.0475], \mathbf{B}_1 = [0.00202] \text{ และ } \mathbf{C}_1 = [1]$$

ง.4.2 การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา

สำหรับการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา เป้าหมายคือต้องการควบคุมความเร็ว (v) ดังนั้นจากสมการที่ (ง.19) พิจารณาเป็นระบบอันดับที่หนึ่ง โดยมีตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียว โดยกำหนดให้ ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_2 = [v]$ และเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมคือความเร็ว (v) เมื่อจัดรูปสมการที่ (ง.19) ใหม่ และโดยแทน \dot{y} และ \ddot{y} ด้วยตัวแปรสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d(x_2)}{dt} = \underbrace{\left[-\left(\frac{Y_u}{m + Y_{\dot{u}}} \right) \right]}_{A_2} [v] + \underbrace{\left[\frac{1}{m + Y_{\dot{u}}} \right]}_{B_2} \tau_2 \quad (\text{ง.24})$$

$$y = \underbrace{[1]}_{C_2} [v] \quad (\text{ง.25})$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้เป็น

$$A_2 = [-0.2423], B_2 = [0.00191], C_2 = [1]$$

ง.4.3 การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้ง เป้าหมายคือต้องการควบคุมความลึก (z) ดังนั้นจากสมการที่ (ง.19) สามารถพิจารณาเป็นระบบอันดับที่สอง โดยมีตัวแปรสถานะสองตัว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ z และจัดรูปสมการที่ (ง.19) ใหม่

$$\dot{w} = -\left(\frac{Z_w}{m + Z\dot{w}} \right) w + \tau_3 \quad (\text{ง.26})$$

และ $w = \dot{z} \quad (\text{ง.27})$

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ ได้เป็น

$$\underbrace{\begin{bmatrix} w \\ \dot{w} \end{bmatrix}}_{\frac{d(x_3)}{dt}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{Z_w}{m+Z_{\dot{w}}}\right) \end{bmatrix}}_{A_3} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}}_{x_3} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m+Z_{\dot{w}} \end{bmatrix}}_{B_3} \tau_3 \quad (จ.28)$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_{C_3} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (จ.29)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้เป็น

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.2596 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00102 \end{bmatrix}, C_3 = [1 \ 0]$$

จ.4.3 การเคลื่อนที่รอบแกนแนวดิ่ง

สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวดิ่ง เป้าหมายคือต้องการควบคุมมุมแก่ง ψ ดังนั้นจากสมการที่ (จ.20) สามารถพิจารณาเป็นระบบอันดับที่สอง โดยมีตัวแปรสถานะสองตัว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_4 = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ ψ และจัดรูปสมการที่ (จ.20) ใหม่

$$\dot{r} = -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right)r + \tau_4 \quad (จ.30)$$

และ $r = \dot{\psi} \quad (จ.31)$

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของของสมการสถานะได้เป็น

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r \\ \dot{r} \end{bmatrix}}_{\frac{d(x_4)}{dt}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right) \end{bmatrix}}_{A_4} \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}}_{x_4} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix}}_{B_4} \tau_4 \quad (จ.32)$$

$$y = \underbrace{[1 \quad 0]}_{C_4} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้เป็น

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.2196 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05593 \end{bmatrix}, C_4 = [1 \quad 0]$$

ภาคผนวก จ

การหาสมการพหุนามของยานไต้ฟ้า BEMBAM-G2

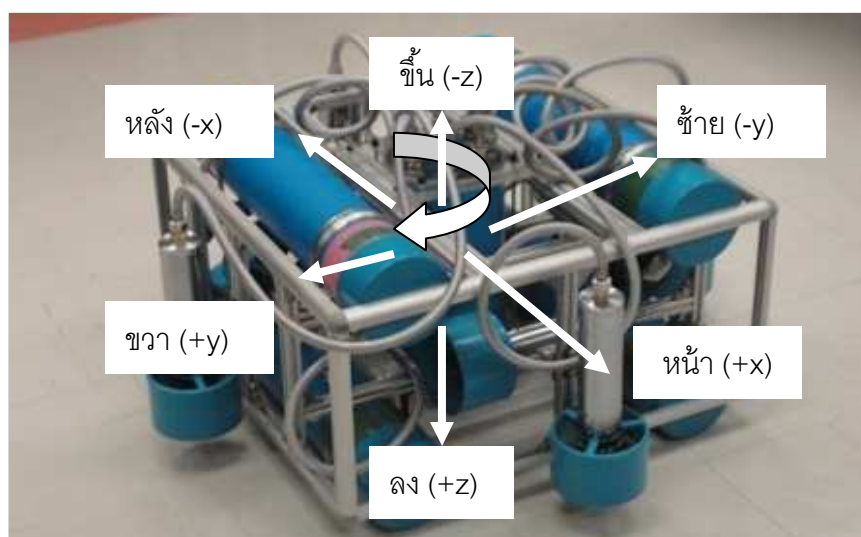
การหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2

จ.1 ภาพรวมของการหาสมการพลศาสตร์ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2

ยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 จะรองรับการเคลื่อนที่ 6 ลักษณะคือ เคลื่อนที่หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวตั้ง 3 แกน คือแกน x , y และ z ซึ่งทั้งหมดมีความอิสระในการเคลื่อนที่เท่ากับ 6 หรือ 6-DOF แต่ในการออกแบบระบบควบคุมจริง จะกำหนดให้ยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 สามารถเคลื่อนที่ 4 ลักษณะเท่านั้น ซึ่งก็คือ 1) เคลื่อนที่หน้า-หลัง 2) ซ้าย-ขวา 3) ดำขึ้น-ลง และ 4) หมุนรอบแกนแนวตั้ง และวางแผนการเคลื่อนที่ของตัวยานโดยใช้ชุดผลึกเพียง 3 คู่ แต่จะแบ่งให้ระบบควบคุมหรือพลศาสตร์ของยานเป็น 2 โหมด เพื่อให้ชุดผลึกแต่ละคู่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนเพียง 1 DOF เท่านั้น และหลังจากหาสมการพลศาสตร์ของยานได้แล้ว ทำการจัดสมการให้อยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะต่อไป

จ.2) การจัดสรรชุดผลึก

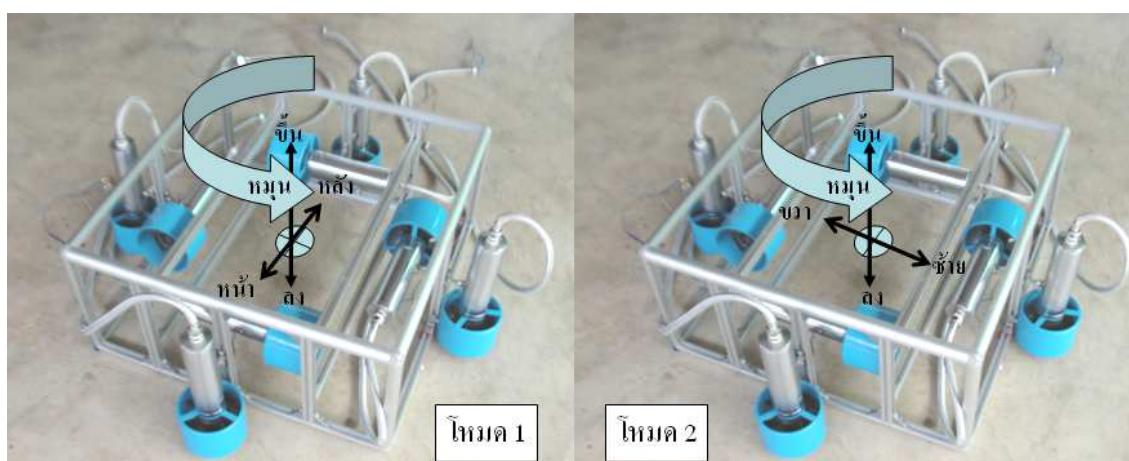
ลักษณะการเคลื่อนที่ในทิศทางที่ หน้า-หลัง ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวตั้ง ดังรูปที่ จ.1 และการจัดสรรหน้าที่ของชุดผลึกดังแสดงในตารางที่ จ.1



รูปที่ จ.1 ทิศทางการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2

ตารางที่ จ.1 การจัดสรรชุดผลึกของยานใต้น้ำ BENBAM-G2

โหมด	การเคลื่อนที่	หมายเลขชุดผลึก							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.1 เคลื่อนที่หน้า-หลัง	/	/						
	1.2 หมุนรอบแกนแนวตั้ง			/	/				
	1.3 ดำขึ้น-ลง					/	/		
2	2.1 เคลื่อนที่ซ้าย-ขวา			/	/				
	2.2 หมุนรอบแกนแนวตั้ง	/	/						
	2.3 ดำขึ้น-ลง					/	/		



รูปที่ จ.2 การเคลื่อนที่โหมด 1 และ 2 ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2

วางแผนการเคลื่อนที่ในโหมด 1 โดยกำหนดให้ τ_1 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่หน้า - หลัง ($X_{(B)}$) τ_2 คือแรงบิดที่ขับเคลื่อนยานให้หมุนรอบแกน $Z_{(B)}$ τ_3 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้ดำขึ้น - ลงแนวตั้ง ($Z_{(B)}$)

วางแผนการเคลื่อนที่ในโหมด 2 โดยกำหนดให้ τ_4 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่ซ้าย - ขวา ($Y_{(B)}$) τ_5 คือแรงบิดที่ขับเคลื่อนยานให้หมุนรอบแกน $Z_{(B)}$ และ τ_3 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้ดำขึ้น - ลงแนวตั้ง ($Z_{(B)}$) เช่นเดียวกับโหมด 1

จ.3) แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 ในการทำงานโหมด 1

จากสมการที่ (2.25) - (2.27) ตามลำดับคือ

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

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T$$

เมื่อประยุกต์ใช้กับยานใต้น้ำ “BENBAM-2” ที่ถูกออกแบบให้มีความมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ แรงลอยตัวกระทำผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของยาน น้ำหนักของยานเท่ากับแรงลอยตัว ($W = B$) หรือยานใต้น้ำจะลอยอย่างเป็นกลาง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ (0-0.5 เมตรต่อวินาที) ไม่มีการเคลื่อนที่ควบในแต่ละแกน และโดยปกติจะวางตัวอยู่ในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) แลมีการเคลื่อนที่เฉพาะ “หน้า-หลัง ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวตั้ง” ดังนั้น จากสมการข้างต้น สามารถลดรูปเป็น

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (\text{จ.1})$$

$$\mathbf{v} = [u \quad w \quad r]^T \quad (\text{จ.2})$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad z \quad \psi]^T \quad (\text{จ.3})$$

เมตริกซ์ \mathbf{M} และ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ ลดรูปเป็น

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_x + X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m_z + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (\text{จ.4})$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}u & 0 & 0 \\ 0 & Z_w + Z_{w|w}w & 0 \\ 0 & 0 & N_r + N_{r|r}r \end{bmatrix} \quad (จ.5)$$

ส่วนเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต $\boldsymbol{\tau}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (จ.6)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

จากแบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-2 ที่ได้ตั้งสมการที่ (จ.1) นั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถสังเกตได้จากพจน์ของเมตริกซ์ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม จึงทำการประมาณเป็นระบบแบบเชิงเส้นรอบจุดสมดุล \mathbf{v}_0 ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (จ.7)$$

เมื่อ

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} X_u + 2X_{u|u}u_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_w + 2Z_{w|w}w_0 & 0 \\ 0 & 0 & N_r + 2N_{r|r}r_0 \end{bmatrix} \quad (จ.8)$$

โดยที่สถานะสมดุล กำหนดให้ความเร็วหน้า-หลัง มีค่าเป็น 0 หรือคงที่ ($u = 0$) ตำแหน่งของความลึกมีค่าคงที่ ($z = w = 0$) และมุมหันเหมีค่าคงที่ ($\psi = r = 0$) และแทนค่าที่สถานะสมดุลด้วยตัวห้อย 0 จะได้ $\mathbf{v}_0 = 0, \dot{\mathbf{v}}_0 = 0$ และ $\boldsymbol{\tau}_0 = 0$ ดังนั้นจะได้

$$\Delta \mathbf{v} = \begin{bmatrix} u - u_0 \\ w - w_0 \\ r - r_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ w \\ r \end{bmatrix} \quad (จ.9)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{u} - \dot{u}_0 \\ \dot{w} - \dot{w}_0 \\ \dot{r} - \dot{r}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (จ.10)$$

$$\Delta \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (จ.11)$$

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (จ.12)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (จ.7) จะได้

$$\begin{bmatrix} m + X_u & 0 & 0 \\ 0 & m + Z_w & 0 \\ 0 & 0 & I_z + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (จ.13)$$

จากสมการที่ (จ.13) พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ทั้ง 3 ทิศทางเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นสามารถแยกเป็น 3 สมการคือ

$$(m_x + X_u)\dot{u} + (X_u)u = \tau_1 \quad (จ.14)$$

$$(m_z + Z_w)\dot{w} + (Z_w)w = \tau_3 \quad (จ.15)$$

$$(I_z + N_r)\dot{r} + (N_r)r = \tau_2 \quad (จ.16)$$

หรือเขียนอยู่ในเทอรัมของ x , z และ ψ ได้เป็น

$$(m_x + X_{\ddot{u}})\ddot{x} + (X_u)(\dot{x}) = \tau_1 \quad (จ.17)$$

$$(m + Z_{\ddot{w}})\ddot{z} + (Z_w)\dot{z} = \tau_3 \quad (จ.18)$$

$$(I_z + N_{\ddot{r}})\ddot{\psi} + (N_r)\dot{\psi} = \tau_2 \quad (จ.19)$$

สรุป สมการพลวัตที่ได้ข้างต้น สามารถออกแบบตัวควบคุมในโหมด 1 แยกเป็น 3 ตัวอิสระกันคือ ตัวควบคุมความเร็วหน้า - หลัง (u) ตัวควบคุมความลึก (z) และตัวควบคุมองศาหันเห (ψ)

จ.4) สมการสถานะของของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 ในการทำงานโหมด 1

$$\text{รูปทั่วไปของสมการสมรรถนะคือ } \frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \text{ และ } \mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$$

จ.4.1 การเคลื่อนที่หน้า-หลัง

สำหรับการเคลื่อนที่หน้า-หลัง เป้าหมายคือต้องการควบคุมความเร็ว (u) ดังนั้นจากสมการ ที่ (จ.17) พิจารณาเป็นระบบอันดับที่หนึ่ง โดยมีตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_1 = [u]$ และเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมคือความเร็ว (u) เมื่อจัดรูปสมการที่ (จ.17) ใหม่ และโดยแทน \dot{x} และ \ddot{x} ด้วยตัวแปรสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d(\mathbf{x}_1)}{dt} = \underbrace{\left[-\left(\frac{X_u}{m + X_{\ddot{u}}} \right) \right]}_{\mathbf{A}_1} \underbrace{\left[\begin{matrix} u \\ \dot{x}_1 \end{matrix} \right]}_{\mathbf{x}_1} + \underbrace{\left[\frac{1}{m + X_{\ddot{u}}} \right]}_{\mathbf{B}_1} \tau_1 \quad (จ.20)$$

$$\mathbf{y} = \underbrace{\left[\begin{matrix} 1 \\ 0 \end{matrix} \right]}_{\mathbf{C}_1} \mathbf{x}_1 \quad (จ.21)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ได้เป็น

$$A_1 = [-0.1407], B_1 = [0.007] \text{ และ } C_1 = [1]$$

จ.4.2 การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา

ไม่มีในการเคลื่อนที่ของโหมค 1

จ.4.3 การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้ง เป้าหมายคือต้องการควบคุมความลึก (z) ดังนั้นจากสมการที่ (จ.18) สามารถพิจารณาเป็นระบบอันดับที่สอง โดยมีตัวแปรสถานะสองตัว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_3 = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ z และจัดรูปสมการที่ (จ.18) ใหม่

$$\dot{w} = -\left(\frac{Z_w}{m + Z\dot{w}}\right)w + \tau_3 \quad (\text{จ.22})$$

และ $w = \dot{z}$ (จ.23)

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ ได้เป็น

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} w \\ \dot{w} \end{Bmatrix}}_{\frac{d(x_3)}{dt}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{Z_w}{m + Z\dot{w}}\right) \end{bmatrix}}_{A_3} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}}_{x_3} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m + Z\dot{w} \end{bmatrix}}_{B_3} \tau_3 \quad (\text{จ.24})$$

$$y = \underbrace{[1 \quad 0]}_{C_3} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (\text{จ.25})$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ได้เป็น

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1407 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.007 \end{bmatrix} \text{ และ } C_3 = [1 \quad 0]$$

จ.4.3 การเคลื่อนที่รอบแกนแนวตั้ง

สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้ง เป้าหมายคือต้องการควบคุมมุมแก่ง ψ ดังนั้นจากสมการที่ (จ.19) สามารถพิจารณาเป็นระบบอันดับที่สอง โดยมีตัวแปรสถานะสองตัว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ ψ และจัดรูปสมการที่ (จ.19) ใหม่

$$\dot{r} = -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right)r + \tau_2 \quad (\text{จ.26})$$

และ

$$r = \dot{\psi} \quad (\text{จ.27})$$

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของของสมการสถานะได้เป็น

$$\underbrace{\begin{bmatrix} r \\ \dot{r} \end{bmatrix}}_{\frac{d(\mathbf{x}_2)}{dt}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right) \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_2} \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_2} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_2} \tau_2 \quad (\text{จ.28})$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_2} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (\text{จ.29})$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ได้เป็น

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

จ.5) แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 ในการทำงานโหมด 2

จากสมการที่ (2.25) - (2.27) ตามลำดับคือ

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

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T$$

เมื่อประยุกต์ใช้กับยานใต้น้ำ “BEMBAM-2” ที่ถูกออกแบบให้มีความมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ แรงลอยตัวกระทำผ่านตำแหน่งจุดศูนย์กลางของยาน น้ำหนักของยานเท่ากับแรงลอยตัว ($W = B$) หรือยานใต้น้ำจะลอยอย่างเป็นกลาง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ (0-0.5 เมตรต่อวินาที) ไม่มีการเคลื่อนที่ควบในแต่ละแกน และโดยปกติจะวางตัวอยู่ในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) และมีการเคลื่อนที่เฉพาะ “ซ้าย-ขวา ดำขึ้น-ลง และหมุนรอบแกนแนวตั้ง” ดังนั้น จากสมการข้างต้น สามารถลดรูปเป็น

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (จ.30)$$

$$\mathbf{v} = [v \quad w \quad r]^T \quad (จ.31)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [y \quad z \quad \psi]^T \quad (จ.32)$$

เมตริกซ์ \mathbf{M} และ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ ลดรูปเป็น

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_y + X_{\dot{v}} & 0 & 0 \\ 0 & m_z + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & 0 & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (จ.33)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} Y_v + Y_{v|v}v & 0 & 0 \\ 0 & Z_w + Z_{w|w}w & 0 \\ 0 & 0 & N_r + N_{r|r}r \end{bmatrix} \quad (จ.34)$$

ส่วนเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต $\boldsymbol{\tau}$ สามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (จ.35)$$

$$\text{โดยที่ } \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix}$$

จากแบบจำลองพลวัตยานได้นำ BENBAM-2 ที่ได้ตั้งสมการที่ (จ.30) นั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถสังเกตได้จากพจน์ของเมตริกซ์ $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม จึงทำการประมาณเป็นระบบแบบเชิงเส้นรอบจุดสมดุล \mathbf{v}_0 ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (จ.36)$$

เมื่อ

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} Y_v + 2Y_{v|v}v_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_w + 2Z_{w|w}w_0 & 0 \\ 0 & 0 & N_r + 2N_{r|r}r_0 \end{bmatrix} \quad (จ.37)$$

โดยที่สถานะสมดุล กำหนดให้ ความเร็วซ้าย-ขวา มีค่าเป็น 0 หรือคงที่ ($v=0$) ตำแหน่งของความลึก มีค่าคงที่ ($\dot{z}=w=0$) และมุมหันเหมีค่าคงที่ ($\dot{\psi}=r=0$) และแทนค่าที่สถานะสมดุลด้วยตัวห้อย 0 จะได้ $\mathbf{v}_0=0, \dot{\mathbf{v}}_0=0$ และ $\boldsymbol{\tau}_0=0$ ดังนั้นจะได้

$$\Delta \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v - v_0 \\ w - w_0 \\ r - r_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \\ w \\ r \end{bmatrix} \quad (จ.38)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{v} - \dot{v}_0 \\ \dot{w} - \dot{w}_0 \\ \dot{r} - \dot{r}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (จ.39)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{v} - \dot{v}_0 \\ \dot{w} - \dot{w}_0 \\ \dot{r} - \dot{r}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (จ.40)$$

$$\Delta \boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix} \quad (จ.41)$$

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} X_v & 0 & 0 \\ 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (จ.42)$$

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (จ.36) จะได้

$$\begin{bmatrix} m + Y_v & 0 & 0 \\ 0 & m + Z_w & 0 \\ 0 & 0 & I_z + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_v & 0 & 0 \\ 0 & Z_w & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_4 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix} \quad (จ.43)$$

จากสมการที่ (จ.43) พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ทั้ง 3 ทิศทางเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นสามารถแยกเป็น 3 สมการคือ

$$(m_y + Y_v)\dot{v} + (Y_v)v = \tau_4 \quad (จ.44)$$

$$(m_z + Z_{\dot{w}})\dot{w} + (Z_w)w = \tau_3 \quad (จ.45)$$

$$(I_z + N_{\dot{r}})\dot{r} + (N_r)r = \tau_5 \quad (จ.46)$$

หรือเขียนอยู่ในเทอรัมของ x , z และ ψ ได้เป็น

$$(m_y + Y_v)\ddot{y} + (Y_v)\dot{y} = \tau_4 \quad (จ.47)$$

$$(m + Z_{\dot{w}})\ddot{z} + (Z_w)\dot{z} = \tau_3 \quad (จ.48)$$

$$(I_z + N_{\dot{r}})\ddot{\psi} + (N_r)\dot{\psi} = \tau_5 \quad (จ.49)$$

สรุป สมการพลวัตที่ได้ข้างต้น สามารถออกแบบตัวควบคุมในโหมด 2 แยกเป็น 3 ตัวอิสระกันคือ ตัวควบคุมความเร็วซ้าย - ขวา (v) ตัวควบคุมความลึก (z) และตัวควบคุมองศาหันเห (ψ)

จ.6) สมการสถานะของของยานใต้น้ำ BEMBAM-G2 ในการทำงานโหมด 2

รูปทั่วไปของสมการสมรรถนะคือ $\frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$ และ $\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$

จ.6.1 การเคลื่อนที่หน้า - หลัง

ไม่มีในการเคลื่อนที่ของโหมด 2

จ.6.2 การเคลื่อนที่ซ้าย - ขวา

สำหรับการเคลื่อนที่ซ้าย-ขวา เป้าหมายคือต้องการควบคุมความเร็ว (v) ดังนั้นจากสมการที่ (จ.47) พิจารณาเป็นระบบอันดับที่หนึ่ง โดยมีตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียว โดยกำหนดให้ ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_4 = [v]$ และเอาต์พุตที่ต้องการควบคุมคือความเร็ว (v) เมื่อจัดรูปสมการที่ (จ.47) ใหม่ และโดยแทน \dot{y} และ \ddot{y} ด้วยตัวแปรสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d(x_4)}{dt} = \underbrace{-\left(\frac{Y_u}{m+Y_{ii}}\right)}_{A_4} \underbrace{[v]}_{x_4} + \underbrace{\left[\frac{1}{m+Y_{ii}}\right]}_{B_4} \tau_4 \quad (จ.50)$$

$$y = \underbrace{[1]}_{C_4} [v] \quad (จ.51)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ได้เป็น

$$A_4 = [-0.1407], B_4 = [0.007] \text{ และ } C_4 = [1]$$

จ.6.3 การเคลื่อนที่ขึ้น - ลง แนวตั้ง

การเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้ง ในโหมด 2 จะเป็นเช่นเดียวกับ โหมด 1 เพราะได้ออกแบบให้ใช้แรงจลุดินพุตเดียวกันคือ τ_3

จ.4.3 การเคลื่อนที่รอบแกนแนวตั้ง

สำหรับการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้ง เป้าหมายคือต้องการควบคุมมุมแก่ง ψ ดังนั้นจากสมการที่ (จ.49) สามารถพิจารณาเป็นระบบอันดับที่สอง โดยมีตัวแปรสถานะสองตัว โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $x_5 = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ ψ และจัดรูปสมการที่ (จ.49) ใหม่

$$\dot{r} = -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right)r + \left(\frac{1}{I_z + N_{\dot{r}}}\right)\tau_5 \quad (จ.52)$$

และ

$$r = \dot{\psi} \quad (จ.53)$$

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของของสมการสถานะได้เป็น

$$\frac{d(x_5)}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{A_5} - \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ N_r \\ I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix}}_{x_5} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix}}_{B_5} \tau_5 \quad (จ.54)$$

$$y = \underbrace{[1 \quad 0]}_{C_5} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (จ.55)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยานไต้ฟ้า BENBAM-G2 ได้เป็น

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix}, B_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix} \text{ และ } C_5 = [1 \quad 0]$$

ภาคผนวก จ
การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ

ฉ.1 ภาพรวมของการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ

การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ ทำการทดสอบเฉพาะยานใต้น้ำ BENBAM-G3 เท่านั้น ด้วยเหตุผลคือยานใต้น้ำ BENBAM-G3 ได้มีการปรับปรุงให้ง่ายต่อการควบคุม อีกทั้งโครงสร้างต่างๆของยานใต้น้ำ BENBAM-G3 มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาไปสู่การใช้งานจริงมากกว่ายานใต้น้ำ BENBAM-G2 โดยการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่นั้น กระทำในอ่างน้ำ ที่จำลองสภาพน้ำให้เป็นน้ำนิ่ง ลดการรบกวนของกระแสน้ำไหลและคลื่นของน้ำให้มีผลน้อยที่สุด

ฉ.2 การทดสอบการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง และซ้าย-ขวา

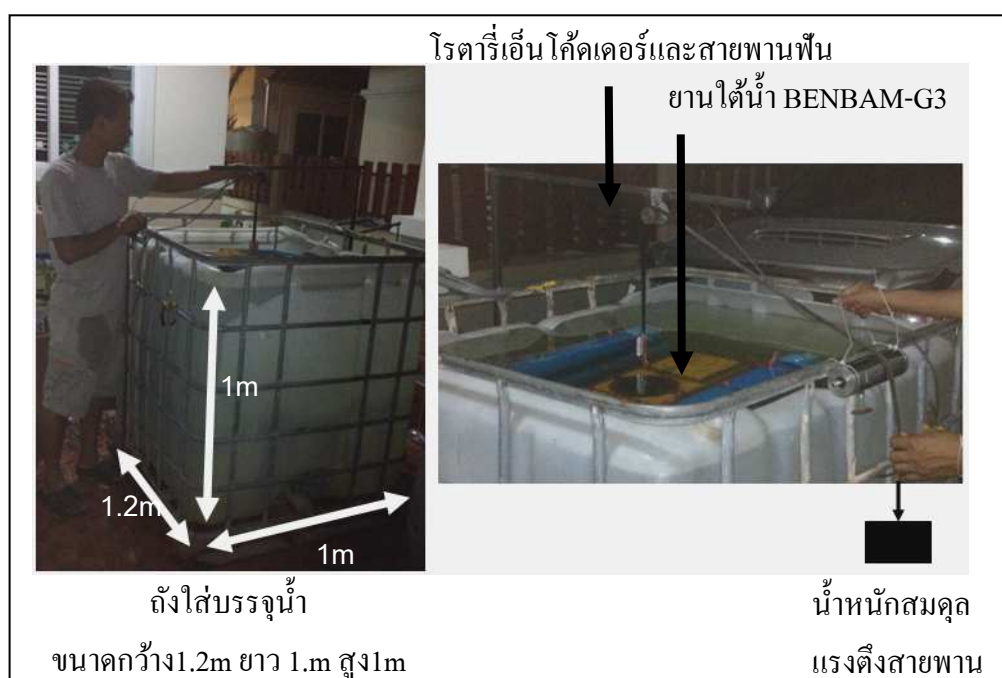
การทดสอบการควบคุมความเร็วหน้า-หลังและซ้าย-ขวา ทำการทดสอบควบคุมเฉพาะความเร็วเดินทาง (ทิศทาง +x) และความเร็วทางด้านขวา (ทิศทาง+y) ในช่วงความเร็ว 0 ถึง 0.03 m/s และ 0 ถึง 0.05 m/s ภายใต้ขีดจำกัดของสมรรถนะชุดผลึก โดยมีอุปกรณ์ทดลองหลักคือ 1) อ่างน้ำ ทำหน้าที่จำลองน้ำนิ่ง 2) โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์และสายพาน ทำหน้าที่วัดระยะทางการเคลื่อนที่ 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม ทำหน้าที่คำนวณกฎการควบคุม และ 4) ยานใต้น้ำ BENBAM-G3



รูปที่ ฉ.1 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมความเร็วหน้า-หลัง และซ้าย-ขวา

ฉ.3 การทดสอบการควบคุมความลึก

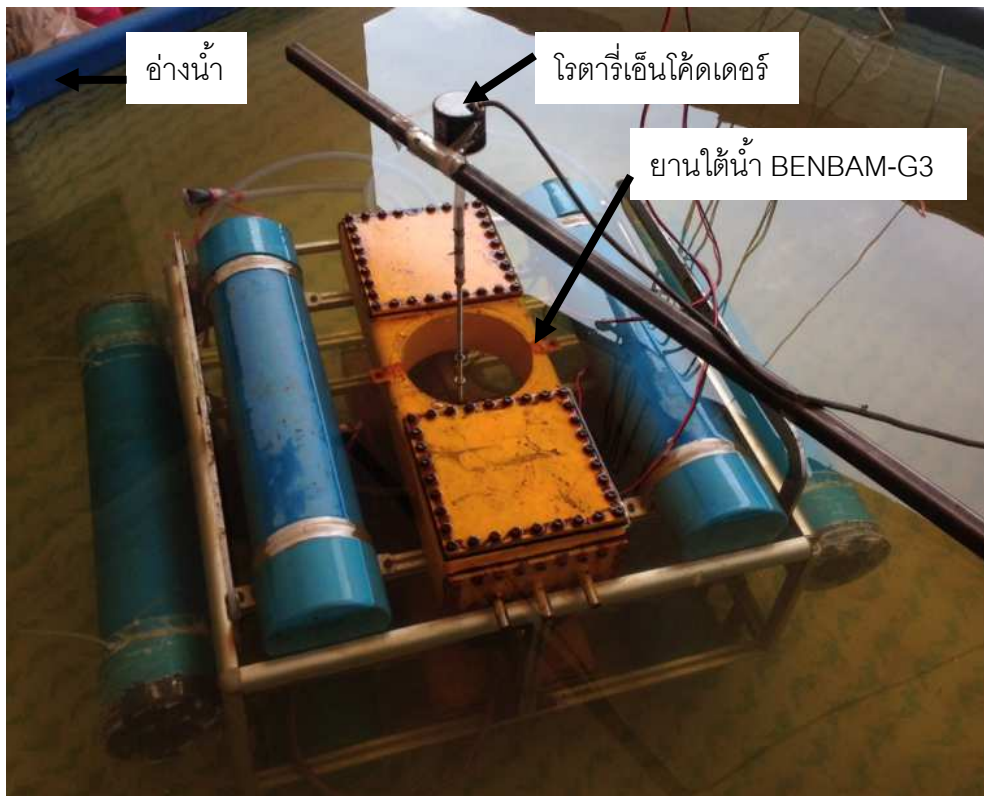
การทดสอบการควบคุมความลึก ทำการทดสอบเฉพาะค่าลงที่ระดับความลึก 0.1 m และ 0.2 m (ทิศทาง +z) อันเนื่องมาจากความลึกที่จำกัดของอ่างน้ำ โดยมีอุปกรณ์ทดลองหลักคือ 1) อ่างน้ำ ทำหน้าที่จำลองน้ำนิ่ง 2) โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์และสายพาน ทำหน้าที่วัดความลึกของยานใต้น้ำ 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม ทำหน้าที่คำนวณผลการควบคุม และ 4) ยานใต้น้ำ BENBAM-G3



รูปที่ ฉ.2 การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมความลึก

ฉ.4 การทดสอบการควบคุมมุมการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง

การทดสอบมุมการหมุนรอบแกนแนวดิ่ง (แกน z) ทำการทดสอบ ที่มุมหันเหเท่ากับ 0, ± 5 , ± 90 และ ± 180 องศา โดยมีอุปกรณ์ทดลองหลักคือ 1) อ่างน้ำ ทำหน้าที่จำลองน้ำนิ่ง 2) โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ ทำหน้าที่วัดมุมหันเหของยานใต้น้ำ 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม ทำหน้าที่คำนวณผลการควบคุม และ 4) ยานใต้น้ำ BENBAM-G3



รูปที่ ๓.๓ การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบการควบคุมการหมุนรอบแกนแนวตั้ง

ภาคผนวก ข
ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยแรงจูงคงที่

Experimental Estimation of Hydrodynamics Coefficients of Underwater Vehicle Using Constant Towing Force

ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต¹ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²

¹สถาบันไทย-เยอรมัน

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยการออกแบบยานใต้น้ำอัตโนมัติ โดยนำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบระบบควบคุมแบบอัตโนมัติของยานใต้น้ำ การหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ทำได้โดยออกแรงจูงคงที่กระทำในทิศทางเคลื่อนที่ของยานในแต่ละแกนสมมาตรและวัดระยะการเคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ เพื่อนำมาหาความเร็วและความเร่งขณะนั้นๆ และนำค่าที่ได้คือระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ด้วยวิธี least square ในสามรูปแบบ 1) ใช้ผลตอบสนองสัมบูรณ์ 2) ใช้ผลตอบสนองช่วงเริ่มเคลื่อนที่ 3) ใช้ผลตอบสนองช่วงคงที่ การทดสอบในทิศทางเดินหน้า (แกน x) ใช้แรงจูงคงที่ 4 ค่าคือ 4.9 24.5 44.1 และ 83.3 นิวตัน ส่วนการทดสอบการหมุนรอบแกนในระนาบแนวนอน (ระนาบ xy) ใช้แรงจูงคงที่เพื่อสร้างโมเมนต์บิด 4 ค่าคือ 0.454 0.907 1.361 และ 2.269 นิวตันเมตร โดยนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานและจำลองการตอบสนองด้วย MATLAB/Simulink เปรียบเทียบกับผลทดสอบจริงแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถใช้เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบระบบควบคุมของยานใต้น้ำได้ดีและมีความน่าเชื่อถืออีกวิธีหนึ่ง โดยค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่เหมาะสมกับยานใต้น้ำ “BENBAM” สามค่าคือ ค่าสัมประสิทธิ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นจากรถ (Added mass) ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสอง จะเป็น 113.2591 kg 20.1603 Ns/m 241.1425 N.(s/m)² สำหรับการเคลื่อนที่ที่เดินหน้า และ 7.9708 kg.m² 0.1192 N.s/rad และ 4.1228 N.(s/rad)² สำหรับการหมุนในแนวตั้ง

คำสำคัญ: การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ยานใต้น้ำ การประมาณค่าแบบ Least Square

Abstract

This article is part of the control design research for an underwater vehicle. The method to estimate the hydrodynamic coefficients of the underwater vehicle was proposed in this study. This method was especially important for controller design of the underwater vehicle. The process of this method was to apply a constant towing force in the direction along with each symmetry-axes of the vehicle and to measure the vehicle movement at each step in order to calculate its velocity and acceleration. The hydrodynamic coefficients was estimated from experimental data by applying the least square method for 1) total response, 2) transient response, and 3) steady-state response. With regard to the forward motion along the x axis, it was found that four values of constant towing force were 4.9 N, 24.5 N, 44.1 N, and 83.3 N, respectively. Regarding the angular motion about the z-axis, it was found that four values of constant spinning torque were 0.454 N-m, 0.907 N-m, 1.361 N-m, and 2.269 N-m, respectively. A first-order dynamic model of vehicle using estimated hydrodynamic coefficients was simulated within MATLAB/Simulink, and then the simulated results were compared with actual tests. The estimated hydrodynamic coefficients using these methods yielded accurate and reliable parameters that could be employed with the vehicle controller design. These hydrodynamic coefficients: added mass, linear damping, and quadratic damp were suitable for "BENBAM" underwater vehicle at 113.2591 kg, 20.1603 Ns/m, 241.1425 N.(s/m)² for forward motion, and 7.9708 kg.m², 0.1192 N.s/rad 4.1228 N.(s/rad)² for angular motion.

Keywords : *estimated hydrodynamic coefficient, underwater vehicle, least square estimation*

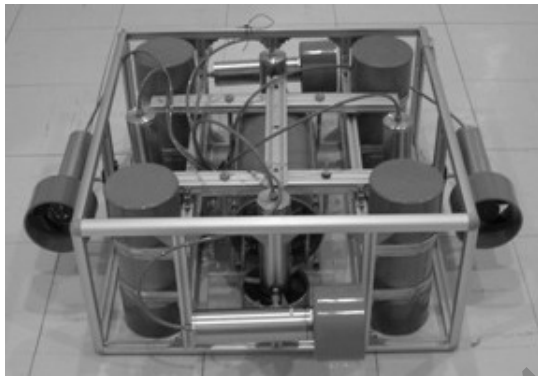
1. บทนำ

ปัจจุบัน ได้มีการนำยานใต้น้ำ (underwater vehicle) มาใช้ปฏิบัติงานใต้น้ำกันอย่างกว้างขวาง เช่น งานสำรวจตรวจสอบ เก็บตัวอย่างน้ำ และกู้ภัยเป็นต้น และการออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำนับเป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งที่มีความน่าสนใจ การออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ เช่น ออกแบบรูปร่างตามความเหมาะสมกับการใช้งาน หากค่าพารามิเตอร์ของตัวยานเพื่อประกอบการออกแบบระบบควบคุม ออกแบบระบบควบคุม ทดสอบระบบและปรับแต่งก่อนนำไปใช้งานจริง

การออกแบบระบบควบคุมยานใต้น้ำให้ได้ผลที่ดีประการหนึ่งที่สำคัญคือต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยาน โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์นี้อาจทำได้โดยวิธีการคำนวณ ซึ่งจะเหมาะกับยานที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน หรืออาจหาโดยวิธีการทดสอบประกอบการคำนวณ ซึ่งจะเหมาะกับยานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยทั้งสองวิธีก็ให้ผลแม่นยำแตกต่างกัน สำหรับบทความนี้ นำเสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยวิธีการทดสอบประกอบการคำนวณ ซึ่งทดลองโดยออกแรงจุดคงที่กระทำในทิศทางการเคลื่อนที่ของยานในแต่ละแกนสมมาตรและวัดระยะการเคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ

เพื่อนำมาหาความเร็วและความเร่งขณะนั้นๆ และนำค่าที่ได้คือ ระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง มาประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ของยาน เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ด้วยวิธี least square

แบบจำลองพลวัต ในรูปภาพที่ 1 แสดงยานใต้น้ำที่ได้สร้างขึ้นและจะทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์



รูปภาพที่ 1 ยานใต้น้ำ BENBAM

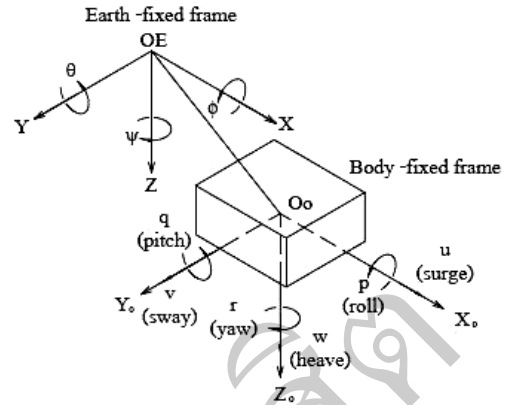
โดยมีกรอบอ้างอิง (reference frame) สำหรับ 6 องศาอิสระในการเคลื่อนที่คือบอกพิกัดตำแหน่งของตัวยาน (X, Y, Z) และมุมการหมุนใน 3 แกน (ψ , θ , ϕ) ดังรูปภาพที่ 2 โดยที่ตัวแปรสถานะ (state) ต่างๆ ของยานใต้น้ำมีดังนี้

u, v, w คือความเร็วเชิงเส้นตามแกน x, y, z

p, q, r คือความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y, z

ψ, θ, ϕ คือองศาการหันเห (yaw angle) องศาการปีกและเอียง (pitch angle) และองศาการกลิ้ง (roll angle)

เมื่อพิจารณากรอบอ้างอิงที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ของยาน โดยที่ยานมีความสมมาตร (symmetry) ในทั้ง 3 แกน สำหรับยานที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ แบบจำลองพลวัตสามารถเขียนได้ในสมการที่ (1) (Fossen and Thor, 1994)



รูปภาพที่ 2 ยานใต้น้ำในกรอบอ้างอิงของตัวยาน

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

โดยที่ M คือเมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) รวมกับ Added mass, $C(v)$ คือเมตริกซ์ Coriolis และ Centripetal รวมกับ Added mass, $D(v)$ คือเมตริกซ์ความหน่วงและแรงยกทาง Hydrodynamic, $g(\eta)$ คือเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง แรงลอยตัวและโมเมนต์, τ คือเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต ตัวแปรสถานะคือ $v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ และยานใต้น้ำที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้ถูกออกแบบให้แรงลอยตัวมีค่าเท่ากับมวลของยานและกระทำผ่านจุดศูนย์กลางมวล ดังนั้นสมการที่ (1) ลดรูปได้เป็นสมการที่ (2)

$$M\dot{v} + D(v)v = \tau \quad (2)$$

สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ เมื่อพิจารณาขณะเคลื่อนที่ในระนาบแนวนอนตามแกน x และเวกเตอร์ของแรงและแรงบิดของอินพุต (τ) ในแต่ละแกนจะไม่เกี่ยวเนื่องกัน สมการ (2) สามารถเขียนอยู่ในตัวแปรของแกน x ได้ดังสมการที่ (3)

$$(m + m_a)\ddot{x} + (K_L + K_Q|\dot{x}|)\dot{x} = \tau_x \quad (3)$$

โดยที่ m คือมวลของยานใต้น้ำ

m_a คือ Added mass

K_L คือค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแบบเชิงเส้น

เส้น

K_0 คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอันดับสอง

τ_x คือแรงอินพุต

\dot{x} คือความเร็วของยานตามแนวแกน $x = u$

\ddot{x} คือความเร่งของยานตามแนวแกน $x = \dot{u}$

จากสมการที่ (3) การออกแบบระบบควบคุมจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ก่อน คือ m_a , K_L และ K_0 ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่าง ผิวของยานได้น้ำ กรณียานได้น้ำมีรูปร่างซับซ้อนสามารถประมาณค่าด้วยวิธีการทดสอบ

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อหาสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ของยานได้น้ำ BENBAM (ดังรูปภาพที่ 1) ด้วยวิธี least square เมื่อมีแรงลุดคองที่

3. อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์ทดสอบ

ในรูปภาพที่ 3 แสดงถึงชุดทดสอบและการติดตั้งยานได้น้ำกับชุดทดสอบ โดยอุปกรณ์หลักประกอบด้วย (1) อ่างน้ำ, (2) รางน้ำเลื่อน, (3) Encoder, (4) PLC, (5) คอมพิวเตอร์ และ (6) ก้อนน้ำหนัก

3.2 วิธีการทดสอบและหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์

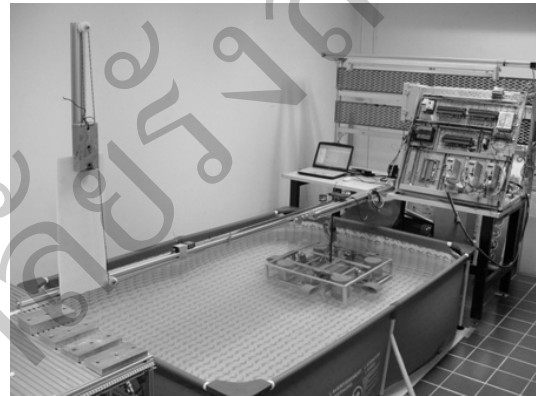
การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์ตามแนวแกนกระทำโดยใช้แรงลุดคองที่ 4 ค่า คือ 4.9 , 24.5 , 44.1 และ 83.3 นิวตัน ตามลำดับกระทำกับยานได้น้ำ (ดังแสดงในรูปภาพที่ 3(ก)) และวัดค่าการตอบสนองของระยะทางการเคลื่อนที่ x ส่วนความเร็ว \dot{x} และความเร่ง \ddot{x} หาโดยใช้หลักการเชิงตัวเลขดังนี้

$$\dot{x}_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad (4)$$

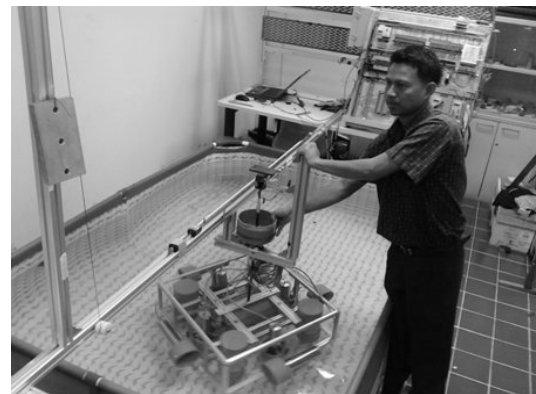
$$\ddot{x}_{i+1} = \frac{\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i}{\Delta t} \quad (5)$$

โดย Δt คือช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง โดยการทดลองจะทำการสุ่มตัวอย่างตำแหน่ง x ทุกๆ 0.1 วินาที

ในการทำงานเดียวกัน การทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮดรอดินามิกส์รอบแกนกระทำโดยใช้แรงบิดลุดคองที่ 4 ค่า คือ 0.454 , 0.907 , 1.361 และ 1.815 นิวตันเมตร ตามลำดับกระทำกับยานได้น้ำดัง



(ก) ทดสอบแรงลุดคองตามแนวแกน



(ข) ทดสอบแรงบิดลุดคองรอบแกน

รูปภาพที่ 3 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ทดสอบ และการติดตั้งยานได้น้ำ

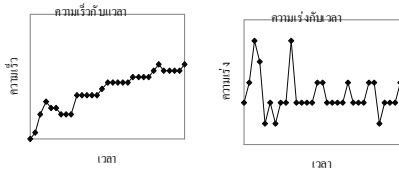
แสดงในรูปภาพที่ 3 (ข) และวัดค่าการตอบสนองของมุมหันเห ส่วนค่าอื่นๆหาโดยวิธีการเดียวกับการทดสอบตามแนวแกน และนำผลที่ได้มาประกอบการคำนวณ

เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์โดยมีแนวทางดังนี้

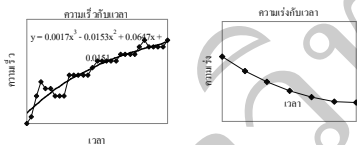
แนวทางที่ 1 หาโดยใช้ความเร็วและความเร่งที่คำนวณโดยตรงจากการทดลอง ดังรูปภาพที่ 4

แนวทางที่ 2 หาโดยใช้ความเร็วที่ได้จากการทำ curve fitting และความเร่งเป็นค่าที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของ curve fitting เทียบกับเวลา ดังรูปภาพที่ 5

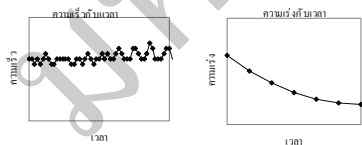
แนวทางที่ 3 หาโดยใช้ความเร็วที่สภาวะคงตัวร่วมกับความเร่งเป็นค่าที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของ curve fitting เทียบกับเวลา ดังรูปภาพที่ 6



รูปภาพที่ 4 ความเร็วและความเร่งจากการทดลอง



รูปภาพที่ 5 ความเร็วและความเร่งจากอนุพันธ์ของ curve fitting



รูปภาพที่ 6 ความเร็วจากการทดสอบและความเร่งจากอนุพันธ์ของ curve fitting

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 1 กรณียานได้นำเริ่มเคลื่อนที่จากสภาวะหยุดนิ่ง จักรูปสมการ (3) ได้เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} + (m + m_a) \ddot{x} \quad (6)$$

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 2 ทำ curve fitting ของผลการทดลองช่วงที่ความเร็วยังไม่คงที่ โดยใช้การจำลองผลตอบสนองเป็นระบบลำดับที่ 1 (first-order system) ความสัมพันธ์ของความเร็วในทิศทาง x คือ \dot{x} กับเวลาเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\dot{x} = A \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

โดยที่ A คือค่า amplitude และ τ คือค่าคงที่ของเวลาทั้งสองหาได้จากผลทดลอง และหาอนุพันธ์ของสมการ (7) เทียบกับเวลา จะได้เป็นความเร่ง \ddot{x} หรือเขียนเป็นฟังก์ชันได้เป็น

$$\ddot{x} = \frac{d(\dot{x})}{dt} = \frac{A}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

การวิเคราะห์สำหรับแนวทางที่ 3 กรณียานได้นำเริ่มเคลื่อนที่ความเร็วสม่ำเสมอแล้วพจน์ของความเร่ง \ddot{x} จะกลายเป็นศูนย์ จักรูปสมการ (3) ได้เป็น

$$\tau_x = K_L \dot{x} + K_Q |\dot{x}| \dot{x} \quad (9)$$

และใช้สมการที่ (9) ร่วมกับสมการ (3) ที่จัดรูปใหม่คือ

$$\tau_x - K_L \dot{x} - K_Q |\dot{x}| \dot{x} = (m + m_a) \ddot{x} \quad (10)$$

จากนั้นใช้หลักการ least square (Ljung and Lennart, 1987) เพื่อประมาณหาค่า K_L, K_Q และ m_a โดยจักรูปสมการ (6), (9) และ (10) อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้เป็นสมการ (11), (12) และ (13) ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}_\tau = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 & \ddot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 & \ddot{x}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i & \ddot{x}_i \end{bmatrix}_H \begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \\ m + m_a \end{bmatrix}_K + error \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \vdots \\ \tau_{xi} \end{bmatrix}_\tau = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 & |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots & \vdots \\ \dot{x}_i & |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}_H \begin{bmatrix} K_L \\ K_Q \end{bmatrix}_K + error \quad (12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \tau_{x1} - K_L \dot{x}_1 - K_D |\dot{x}_1| \dot{x}_1 \\ \tau_{x2} - K_L \dot{x}_2 - K_D |\dot{x}_2| \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \tau_{xi} - K_L \dot{x}_i - K_D |\dot{x}_i| \dot{x}_i \end{bmatrix}}_{\tau} = \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \vdots \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix}}_H \underbrace{\left[\begin{matrix} (m + m_a) \\ \vdots \\ K \end{matrix} \right]}_K + error \quad (13)$$

โดยที่ x_i , \dot{x}_i และ \ddot{x}_i คือตำแหน่ง ความเร็ว และ ความเร่งที่เวลาต่างๆกัน เมื่อ $i=1, 2, 3...$ คือจำนวนของ ตัวอย่าง (sample) จากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์ และ ค่าประมาณของ K คือ \hat{K}_{LS} คำนวณได้จาก

$$\hat{K}_{LS} = (H^T H)^{-1} H^T \tau \quad (14)$$

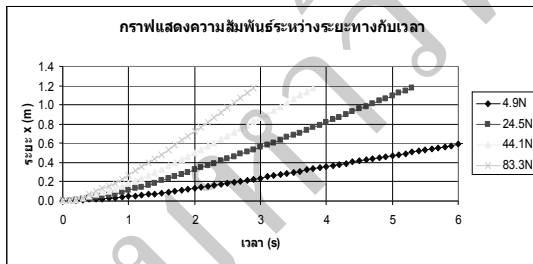
ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

$$\hat{\sigma}_K = \sqrt{\text{diag}(\text{cov}(\hat{K}_{LS}))} \quad (15)$$

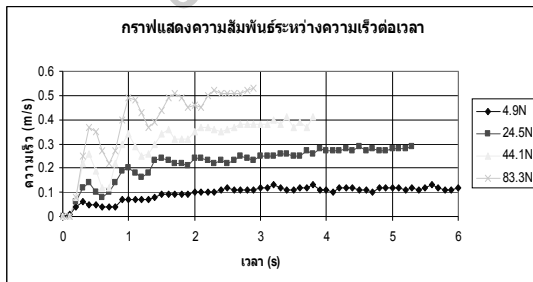
โดยที่ $\text{cov}(\hat{K}_{LS}) = \hat{\sigma}^2 (H^T H)^{-1}$

4. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

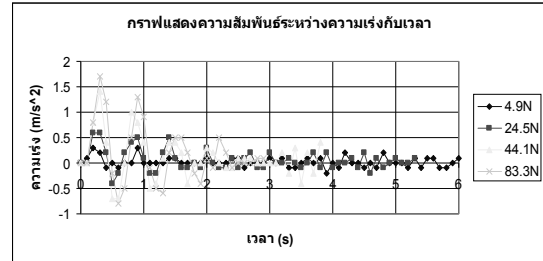
การเคลื่อนที่ที่เห็นหน้า ผลการทดลองที่ได้จาก ยานได้นำมาแสดงในรูปภาพที่ 7 ประกอบกับการคำนวณของ การเคลื่อนที่ที่เห็นหน้าตามแกน x ดังแสดงในรูปภาพที่ 8



(ก) ระยะทาง (x) กับเวลา (t)

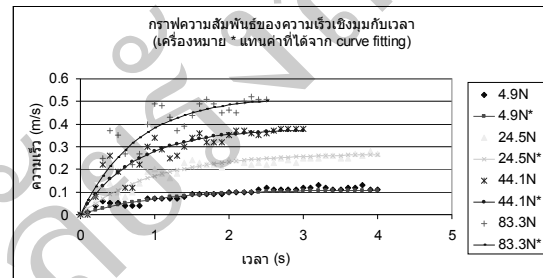


(ข) ความเร็ว (\dot{x}) กับเวลา (t)



(ค) ความเร่ง (\ddot{x}) กับเวลา (t)

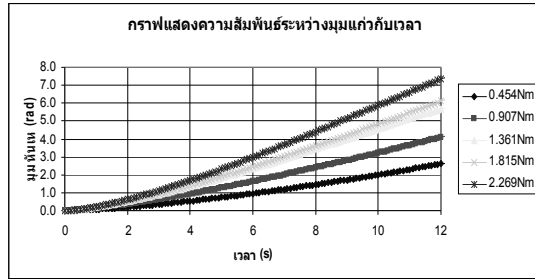
รูปภาพที่ 7 ผลการทดลองกับการคำนวณของการเคลื่อนที่เชิงเส้นในแนวแกน x



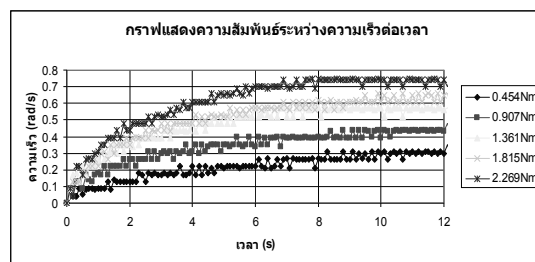
รูปภาพที่ 8 ผลตอบสนองของความเร็วในช่วง transient กับ curve fitting

เมื่อพิจารณาความเร็วชั่วขณะได้เวลาที่ ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่ ที่แรงจุดเท่ากับ 4.9, 24.5, 44.1 และ 83.3 นิวตัน มีค่าประมาณเท่ากับ 4, 4, 3, 3 วินาทีตามลำดับและทำ curve fitting ของผลตอบสนอง ความเร็วในช่วง transient ได้ผลดังรูปภาพที่ 8 ผลตอบสนองความเร็วในช่วง transient สำหรับแรงจุด 4.9, 24.5, 44.1, 83.3 นิวตัน ได้ amplitude ของความเร็ว (A) เป็น 0.11, 0.27, 0.38, 0.51 และได้ค่าคงที่ของเวลา (τ) เป็น 1, 1, 0.75, 0.75 ตามลำดับ

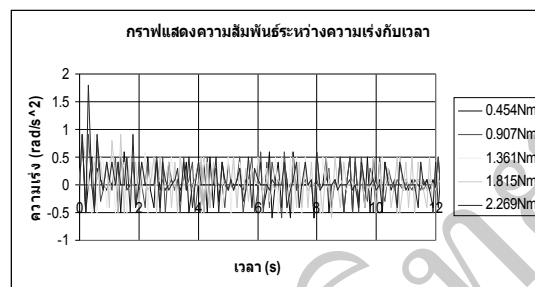
การหมุนรอบแกน ผลการทดลองที่ได้จากยาน ได้นำมาแสดงในรูปภาพที่ 9 ประกอบกับการคำนวณของ การหมุนรอบแกน z ได้ผลดังแสดงในรูปภาพที่ 10



(ก) องศาการหันเห (ψ) กับเวลา (t)

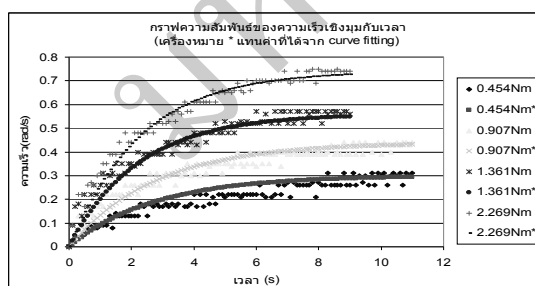


(ข) ความเร็วหันเห ($\dot{\psi}$) กับเวลา (t)



(ค) ความเร่งหันเห ($\ddot{\psi}$) กับเวลา (t)

รูปภาพที่ 9 ผลการทดลองกับการคำนวณของการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน z



รูปภาพที่ 10 ผลตอบสนองของความเร็วในช่วง transient กับ curve fitting

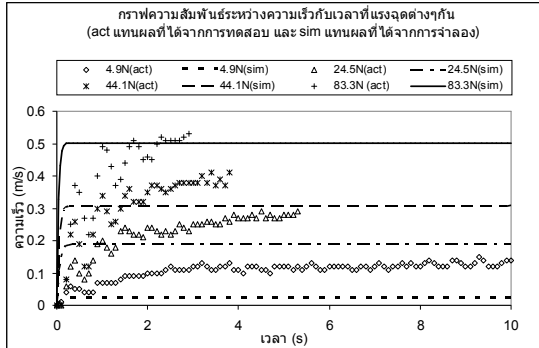
และผลการคำนวณหาความเร็วหันเหชั่วขณะตามแนวแกน z ($\dot{\psi}$) ได้เวลาที่ผลตอบสนองเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่

ที่แรงบิดจุดเท่ากับ 0.454, 0.907, 1.361 และ 2.269 นิวตันเมตรโดยประมาณเท่ากับ 11, 11, 9, 9 วินาทีตามลำดับ เมื่อทำ curve fitting ของผลตอบสนองความเร็วหันเหในช่วง transient ได้ผลดังแสดงในรูปภาพที่ 10 สำหรับแรงบิด 0.454, 0.907, 1.361, 2.269 นิวตันเมตรได้ amplitude ของความเร็วหันเหเป็น 0.31, 0.44, 0.56, 0.74 และได้ค่าคงที่ของเวลาเป็น 2.75, 2.75, 2.25, 2.25 ตามลำดับ โดยผลการคำนวณตามแนวทางที่ 1, 2 และ 3 แสดงในตารางที่ 1 และนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์แทนในสมการที่ 3 และจำลองด้วย MATLAB/Simulink ได้ผลดังรูปภาพที่ 11 และ 12

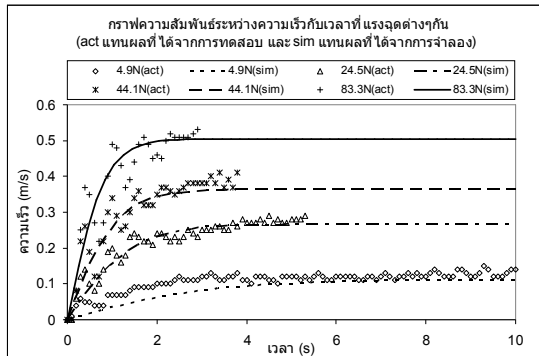
ตารางที่ 1 สัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่คำนวณจากผลการวัดค่าในช่วง transient

เชิงเส้น	แนวทาง		
	1	2	3
$m + m_a$ [kg]	8.0907	133.2060	143.2591
K_L [N.s/m]	107.3427	8.8529	20.1603
K_Q [N.(s/m) ²]	116.3427	308.8443	241.1425

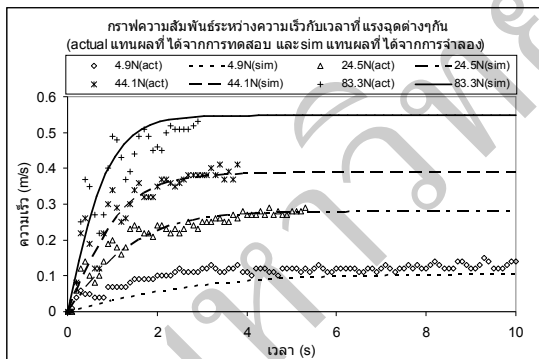
เชิงมุม	แนวทาง		
	1	2	3
I [kg.m ²]	0.0870	7.0796	7.9708
K_L [N.s/rad]	3.0057	0.4666	0.1192
K_Q [N.(s/rad) ²]	0.1486	3.4984	4.1228



(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1



(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2



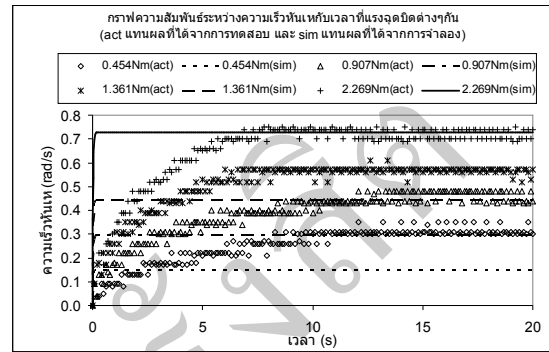
(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปภาพที่ 11 ผลจำลองที่ได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานในการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน x

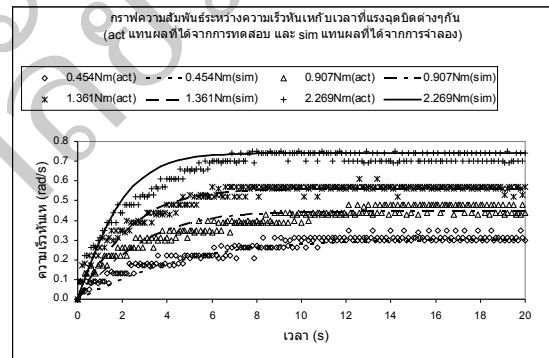
5. การอภิปรายผล

ผลการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่คำนวณได้จากทั้งสามแนวทางมาจำลองร่วมกับแบบจำลองพลวัตของยานได้น้ำแสดงดังรูปภาพที่ 11 และ 12 โดยสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้ พิจารณารูปภาพ

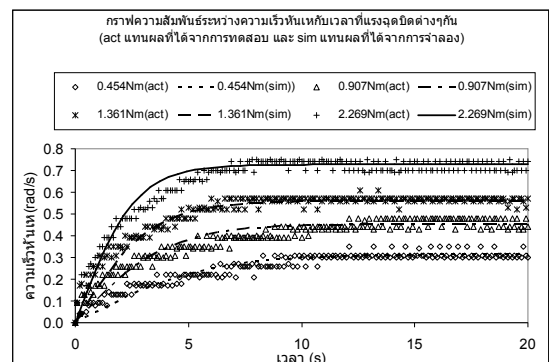
ที่ 11(ก) และ 12(ก) พบว่าผลจากการจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบสูงมาก ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 1 ไม่สามารถใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบได้



(ก) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 1

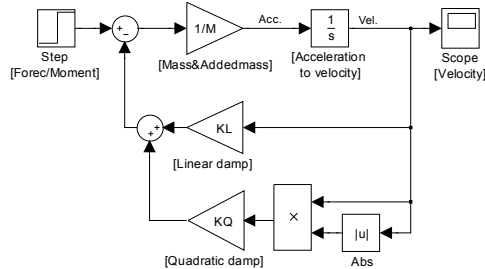


(ข) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 2



(ค) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทาง 3

รูปภาพที่ 12 ผลจำลองที่ได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์มาใช้กับแบบจำลองพลวัตของยานในการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน z



รูปภาพที่ 13 แผนภาพกรอบของแบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ (สร้างจากสมการที่ (3)) ที่ใช้จำลองผลด้วย MATLAB/Simulink

ต่อมาพิจารณารูปภาพที่ 11(ข) และ 12(ข) พบว่าผลการจำลองได้ผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ที่ได้จากแนวทางที่ 2 สามารถใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบได้ ท้ายสุดพิจารณารูปภาพที่ 11(ค) และ 12(ค) พบว่าผลการจำลองได้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบมากเช่นเดียวกับในแนวทางที่ 2 แต่โดยรวมแล้ว การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ในการจำลองโดยใช้แนวทางที่ 3 โดยเฉลี่ยจะให้ผลคล้ายกับผลการทดสอบมากที่สุด ดังนั้นแนวทางที่ 3 จึงเหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ทั้งการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและเชิงมุม

6. บทสรุป

จากผลการทดสอบแรงจุดคงที่กระทำต่อยานใต้น้ำ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นและแนวเชิงมุม แสดงให้เห็นว่าการทดสอบด้วยวิธีการในแนวทางที่ 3 โดยใช้ความเร็วที่สภาวะคงตัวและอนุพันธ์ของ curve fitting ของความเร็วเพื่อหาความเร่ง สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำที่เหมาะสมโดยค่าที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นค่าประมาณระบบของยาน BENBAM ที่มีมวลเท่ากับ 30 kg สำหรับการเคลื่อนที่เดินทางคือ m_d, K_L, K_Q จะมีค่าเป็น 113.2591 kg,

20.1603 Ns/m, 241.1425 N.(s/m)² และสำหรับการหมุนคือ I, K_L, K_Q จะมีค่าเป็น 7.9708 kg.m², 0.1192 N.s/rad และ 4.1228 N.(s/rad)² ตามลำดับ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับทดสอบ และคุณกุ่มหลวง คำบุผา ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประกอบ และการทดสอบจนสำเร็จได้ด้วยดี

8. เอกสารอ้างอิง

- Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Ljung, Lennart (1987). *System identification*. New Jersey: Prentice Hall

การควบคุมความลึกและมุมหันของยานใต้น้ำ “BENBAM-G2” ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต

Depth and Yaw-Angle Controls for “BENBAM-G2” Underwater Vehicle using Output Feedback Controller

ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต^{1*} และ ปรัชญาเปรมปราณีรัชต์²

¹ สถาบันไทย-เยอรมัน 700/1 ม.1 ถนนบางนา-ตราด ตำบลคลองตำหรุ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก คลองหก ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

*ติดต่อ: E-mail narongsak.khun@gmail.com, โทรศัพท์ 086 696 7692

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยการออกแบบยานใต้น้ำอัตโนมัติ โดยนำเสนอวิธีการควบคุมเพื่อรักษาความลึกและมุมหันของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต โดยตัวควบคุมมีหลักการคือ นำค่าเอาต์พุตตำแหน่งความลึกของยานที่สามารถหาค่าได้จากเซนเซอร์วัดความดันและมุมหันที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุม มาประมาณค่าตัวแปรสถานะที่เซนเซอร์ของยานไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งก็คือความเร็วในแนวตั้งและความเร็วเชิงมุมรอบแกนแนวตั้ง จากนั้นนำค่าเวกเตอร์สถานะคูณกับค่าขยายแล้วรวมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงซึ่งก็คือค่าความลึกและมุมหันที่ต้องการ เพื่อกำเนิดเป็นสัญญาณสร้างแรงผลักดันให้กับยานใต้น้ำ เพื่อควบคุมและรักษาระดับความลึกกับมุมหันของยานให้ได้ตามต้องการ และจากการจำลองผลการควบคุมเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสัญญาณอินพุตให้ผลเป็นที่น่าพอใจกว่า

คำหลัก: การควบคุมความลึก, การควบคุมมุมหัน, ตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต, ยานใต้น้ำ

Abstract

This article is a part of control design research for an underwater vehicle. The output feedback controller is formulated in this study to maintain a constant depth as well as heading angle of “BENBAM-G2” underwater vehicle. The principle of this controller is to feedback a depth position measured from a pressure sensor and a yaw angle measured from a magnetometer into an observer to estimate all state variables. The unmeasured states are vehicle vertical velocity, rotational velocity around z-axis for depth and heading controls. Then, estimated states are multiplied with feedback gain and combined with reference depth and heading signals to generate control inputs for vehicle thrusters so that the desired depth and heading angle can be maintained. From dynamics simulations, the output feedback controller yield better performance than the PID controller for both depth and heading control of this underwater vehicle.

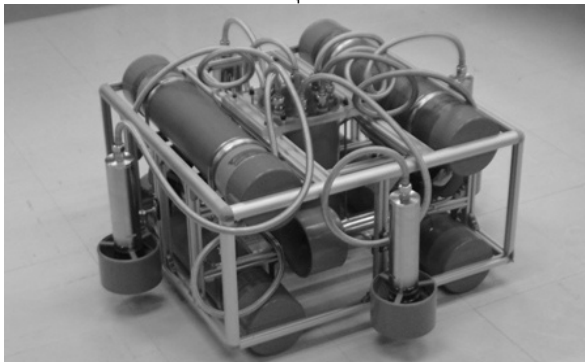
Keywords: Depth Control, Heading Control, Output Feedback Controller, Underwater Vehicle

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำยานใต้น้ำ (underwater vehicle) มาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่นการสำรวจใต้น้ำ ถ่ายภาพใต้น้ำ เก็บตัวอย่างน้ำ สำรวจความเสียหายของระบบใต้น้ำเช่นระบบท่อ ปฏิบัติการกู้ภัยใต้น้ำ เป็นต้น และปัจจุบันก็มีผู้ที่สนใจและทำการศึกษาด้านยานใต้น้ำกันอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ เช่น อีริยูท ซาติชเนฮินยง [1] ทำการศึกษาออกแบบตัวควบคุมแบบสไลดิงโหมดเพื่อควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำ อนุพันธ์ พิมพ์ช่วย และคณะ [7]

นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบยานสำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ อีริกัทร หลิมบุญเรืองและคณะ [8] นำเสนอการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบสำหรับการสำรวจใต้น้ำ Wei Wang [6] ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติของ ROV เพื่อเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้การควบคุมแบบ sliding mode ควบคุมความลึกของยาน

การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำจะไม่เป็นเชิงเส้นสูง ระบบควบคุมสมัยใหม่จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ ซึ่งระบบควบคุมสมัยใหม่จำเป็นต้องทราบค่าของตัวแปรสถานะเพื่อใช้ร่วมกับกฎการควบคุม โดยอาจวัดค่าด้วยเซนเซอร์ หรืออีกวิธีคือใช้ตัวสังเกตสถานะเพื่อประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งในนี้จะนำเสนอวิธีการควบคุมเพื่อรักษาความลึกและมุมหันของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต โดยตัวควบคุมมีหลักการคือ นำค่าเอาต์พุตของตำแหน่งความลึกและมุมหันของยานที่สามารถหาค่าได้จากเซนเซอร์วัดความดันและเซนเซอร์วัดมุม มาประมาณค่าตัวแปรสถานะที่เซนเซอร์ของยานไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งก็คือความเร็วในแนวตั้งและความเร็วเชิงมุมรอบแกนแนวตั้งของยาน จากนั้นนำค่าเวกเตอร์สถานะคูณกับค่าขยายแล้วรวมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงซึ่งก็คือค่าความลึกและมุมหันที่ต้องการ เพื่อกำเนิดเป็นสัญญาณสร้างแรงผลักดันให้กับยานใต้น้ำ เพื่อควบคุมและรักษาระดับความลึกและมุมหันของยานให้ได้ตามต้องการ รูปที่ 1 เป็นรูปของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ที่ทำการควบคุม



รูปที่ 1 ยานใต้น้ำ “BENBAM-G2”

1.1 .สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ [1-2]

$\{B\}$: กรอบอ้างอิงบนตัวยาน

$\{E\}$: กรอบอ้างอิงบนพื้นโลก

X^o, Y^o, Z^o : แกน x, y, z ของกรอบอ้างอิงบนตัวยาน

X, Y, Z : แกน x, y, z ของกรอบอ้างอิงบนพื้นโลก

x, y, z : ตำแหน่งเทียบกับแกน x, y, z

u, v, w : ความเร็วเชิงเส้นตามแนวแกน x, y, z

p, q, r : ความเร็วเชิงเส้นมุมรอบแกน x, y, z

ϕ, θ, ψ : Yaw, pitch, roll angle

m : มวลของยาน

W, B : น้ำหนักยานและแรงลอยตัว

\mathbf{v} : เวกเตอร์สถานะ

$\boldsymbol{\eta}$: เวกเตอร์ตำแหน่งและทิศทาง

\mathbf{M} : เมทริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) รวมกับ

Added mass

$\mathbf{C}(\mathbf{v})$: เมทริกซ์ Coriolis และ Centripetal

$\mathbf{D}(\mathbf{v})$: เมทริกซ์ความหน่วงและแรงยก ทาง-Hydrodynamic

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$: เวกเตอร์แรงโน้มถ่วง แรงลอยตัวและโมเมนต์

$\boldsymbol{\tau}$: เวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต

I_x, I_y, I_z : โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลรอบแกน x, y และ z

X_{ii}, Y_{ii}, Z_{ii} : Added mass ตามแนวแกน x, y และ z

$K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}$: Added mass รอบแกน x, y และ z

$X_{u|u}, Y_{v|v}, Z_{w|w}$: สัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงเส้น ตามแนวแกน x, y และ z

K_p, M_q, N_r : สัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงเส้นรอบแกน x, y และ z

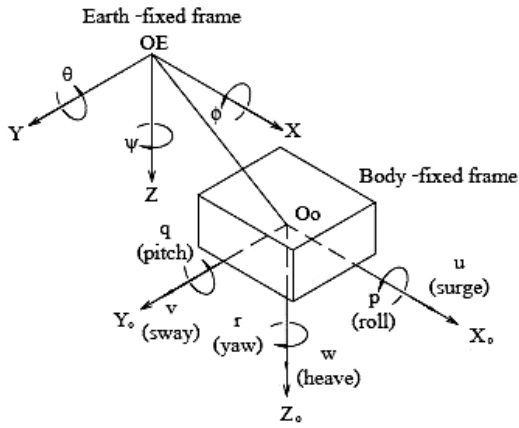
$X_{u|u|u}, Y_{v|v|v}, Z_{w|w|w}$: สัมประสิทธิ์ความหน่วงกำลังสองตามแนวแกน x, y และ z

$K_{p|p|p}, M_{q|q|q}, N_{r|r|r}$: สัมประสิทธิ์ความหน่วงกำลังสองรอบแกน x, y และ z

2. แบบจำลองพลวัต

2.1 กรอบอ้างอิง

กรอบอ้างอิง (reference frame) สำหรับบ่งบอกตำแหน่งและทิศทางของยานใต้น้ำมีสองส่วนคือ กรอบอ้างอิงที่เทียบกับตำแหน่งของตัวยานหรือเรียกว่า Body-fixed frame และกรอบอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งบนโลกหรือเรียกว่า Earth-fixed frame ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กรอบอ้างอิงของยานใต้น้ำ [2]

2.2 แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ

สมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของยานใต้น้ำที่มีองศาอิสระเท่ากับ 6 (6 degree of freedom: 6 DOF) เขียนเป็นรูปทั่วไปในกรอบอ้างอิงของตัวยาน ได้ดังสมการที่ (1) [3]

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

$$\mathbf{v} = [u \quad v \quad w \quad p \quad q \quad r]^T \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \quad (3)$$

เมื่อพิจารณาเป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นเชิงเส้นสมการ (1) เขียนใหม่ได้เป็น [3]

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_c(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} + \left. \frac{\partial \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}{\partial \boldsymbol{\eta}} \right|_{\boldsymbol{\eta}_0} \Delta\boldsymbol{\eta} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (4)$$

โดยที่ตำแหน่งที่ทำการปฏิบัติงานนั้นจะแสดงได้เป็น

$$\mathbf{v}_0 = [u_0 \quad v_0 \quad w_0 \quad p_0 \quad q_0 \quad r_0]^T \quad (5)$$

$$\text{และ } \boldsymbol{\eta}_0 = [x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad \phi_0 \quad \theta_0 \quad \psi_0]^T \quad (6)$$

$$\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0 \quad (7)$$

$$\Delta\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_0 \quad (8)$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_0 \quad (9)$$

$$f_c(\mathbf{v}) = \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (10)$$

$$f_d(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} \quad (11)$$

สำหรับยานใต้น้ำที่ตัวยานมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ ไม่มีการเคลื่อนที่ควบ (non-couple motion) สองทิศทางพร้อมกัน แรงลอยตัวกระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (center of gravity) ของยาน วางตัวในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) และเมื่อยานมีความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ต่ำ พจน์ของเมตริกซ์ $\mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ สามารถตัดทิ้ง

ได้ [3] ส่วนเมตริกซ์อื่นๆ ในสมการที่ (1) มีองค์ประกอบย่อยดังนี้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \quad (12)$$

$$\mathbf{M}_{RB} = \text{diag}[m_x, m_y, m_z, I_x, I_y, I_z] \quad (13)$$

$$\mathbf{M}_A = \text{diag}[X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}] \quad (14)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})_L + \mathbf{D}(\mathbf{v})_Q \quad (15)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_L = \text{diag}[X_{u|u}, Y_{v|v}, Z_{w|w}, K_{p|p}, M_{q|q}, N_{r|r}] \quad (16)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_Q = \text{diag} \begin{bmatrix} X_{u|u|u}u, Y_{v|v|v}v, Z_{w|w|w}w, \\ K_{p|p|p}p, M_{q|q|q}q, N_{r|r|r}r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = - \begin{bmatrix} (W - B)\sin\theta \\ -(W - B)\cos\theta\sin\phi \\ -(W - B)\cos\theta\cos\phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.3 แบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-G2

ยานใต้น้ำ "BENBAM-G2" ดังรูปที่ 1 ถูกออกแบบให้มีความมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ แรงลอยตัวกระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของยาน น้ำหนักของยานเท่ากับแรงลอยตัว ($W = B$) หรือยานใต้น้ำจะลอยอย่าง เป็นกลาง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ (0-0.5 เมตรต่อวินาที) ไม่มีการเคลื่อนที่ควบในแต่ละแกน และโดยปกติจะวางตัวอยู่ในระนาบ ($\phi = \theta = 0$) สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงแนวตั้ง (z) หมุนรอบแกนแนวตั้ง (ψ) และขณะเคลื่อนที่ขึ้นลงนั้นไม่มีองค์ประกอบของความเร็วหน้าหลัง และซ้ายขวา ($u = v = 0$) ดังนั้นจะได้สมการแบบจำลองทางพลวัตที่ลดรูปลงเป็น

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \quad (19)$$

$$\mathbf{v} = [w \quad r]^T \quad (20)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [z \quad \psi]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_z + Z_w & 0 \\ 0 & I_z + N_r \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} Z_w + Z_{w|w}w & 0 \\ 0 & N_r + N_{r|r}r \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\tau} = L\mathbf{U} \quad (24)$$

เมื่อ L คือ mapping matrix ขึ้นอยู่กับการติดตั้งชุดผลึก (thrustor) ส่วน \mathbf{U} คือ thrustor vector เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ควบและง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม

จึงออกแบบให้ชุดผลึกที่ใช้สร้างแรงและแรงบิดจุดเป็นอิสระกัน จึงจัดสรรการใช้งานของชุดผลึกดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดชุดผลึกที่ใช้สร้างแรงและแรงบิด

Thruster No.	1	2	3	4	5	6	7	8
เคลื่อนที่หน้าหลัง	/	/						
หมุนรอบแกน Z			/	/				
ดำขึ้นลง					/	/		

โดยกำหนดแรงจุดอินพุตเป็นดังนี้

τ_1 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่หน้าหลัง ($X_{\{B\}}$)

τ_2 คือแรงบิดที่ขับเคลื่อนยานให้หมุนรอบแกน $Z_{\{B\}}$

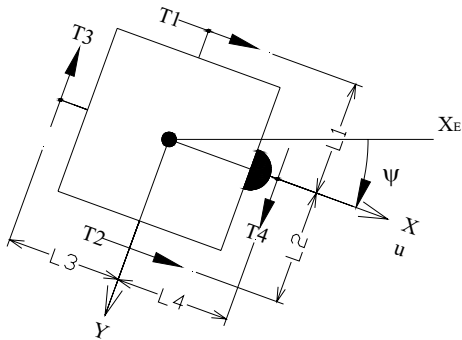
τ_3 คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้ดำขึ้นลงในแนวตั้ง ($Z_{\{B\}}$)

โดย T_i คือแรงผลึกของ thruster ตัวที่ 1 ถึง 8 ส่วน L_i คือระยะตั้งฉากของแรงผลึกถึงศูนย์กลางมวลของยาน และออกแบบให้ $T_1 = T_2, T_3 = T_4, T_5 = T_6, L_3 = L_4$ และ $L_5 = L_6$ จึงไม่มีผลของ couple ดังนั้นจึงได้แรงจุดอินพุตเป็น

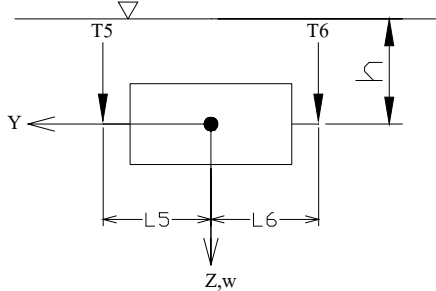
$$\tau_1 = T_1 + T_2 \quad (25)$$

$$\tau_2 = L_3 T_3 + T_4 L_4 \quad (26)$$

$$\tau_3 = T_5 + T_6 \quad (27)$$



(ก) มุมมองในระนาบ x-y



(ข) มุมมองในระนาบ y-z

รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งตัวผลึกและการใช้งาน

และสำหรับในที่นี้ ออกแบบตัวควบคุมเฉพาะเคลื่อนที่แนวตั้งและหมุนรอบแกนแนวตั้งเท่านั้น ส่วนการเคลื่อนที่หน้าหลังถูกออกแบบตัวควบคุมแยกออกไป τ_1 จึงไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นจากสมการที่ (24) จะได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

โดยที่ $L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ และ $U = \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$

2.4 การประมาณแบบจำลองพลวัตเป็นระบบเชิงเส้น

จากแบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ที่ได้ดังสมการที่ 19 นั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการประมาณเป็นระบบแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (4) รอบจุดสมดุล \mathbf{v}_0 ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} \Delta\mathbf{v} = \Delta\boldsymbol{\tau} \quad (29)$$

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} Z_w + 2Z_{w|w}w_0 & 0 \\ 0 & N_r + 2N_{r|r}r_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

ที่สภาวะสมดุล ในที่นี้เป็นการรักษาตำแหน่งของความลึกและมุมหันเห กำหนดให้ตัวแปรต่างๆเขียนแทนด้วยตัวห้อย 0 และมีค่าดังนี้

$$\mathbf{v}_0 = [w_0 \ r_0]^T = [0 \ 0], \dot{\mathbf{v}}_0 = 0, \boldsymbol{\tau}_0 = [0 \ 0]$$

ดังนั้นจะได้ $\Delta\mathbf{v} = \begin{bmatrix} w - w_0 \\ r - r_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix} \quad (31)$

$$\Delta\dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{w} - \dot{w}_0 \\ \dot{r} - \dot{r}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\left. \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial \mathbf{v}} \right|_{\mathbf{v}_0} = \begin{bmatrix} Z_w & 0 \\ 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (34)$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (29) จะได้

$$\begin{bmatrix} m + Z_w & 0 \\ 0 & I_z + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_w & 0 \\ 0 & N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

จากสมการที่ (35) พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่แนวตั้งกับรอบแกนเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นสามารถแยกเป็นสองสมการได้ดังนี้

$$(m_z + Z_w)\dot{w} + (Z_w)w = \tau_3 \quad (36)$$

$$(I_z + N_r)\dot{r} + (N_r)r = \tau_2 \quad (37)$$

หรือเขียนอยู่ในเทอรัมของ z และ ψ ได้เป็น

$$(m + Z_w)\ddot{z} + (Z_w)\dot{z} = \tau_3 \quad (38)$$

$$(I_z + N_r)\ddot{\psi} + (N_r)\dot{\psi} = \tau_2 \quad (39)$$

สมการที่ (38) และ (39) สามารถออกแบบตัวควบคุมแยกเป็นสองตัวได้ คือตัวควบคุมความลึก (z) และตัวควบคุมองศาหันเห (ψ)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2

เคลื่อนขึ้นลง	หมุนรอบแกน z
$m_z = 30 \text{ kg}$	$I_z = -$
$Z_w = 113.2591 \text{ kg}$	$N_r = -$
$Z_w = 20.1603 \text{ N.s/m}$	$N_r = 0.1192 \text{ N.s/rad}$
$Z_{w w} = 241.1425 \text{ N.(s/m)^2}$	$N_{r r} = 4.1228 \text{ N.(s/rad)^2}$
$m + Z_w = 143.2591 \text{ kg}$	$I_z + N_r = 7.9708 \text{ kg.m}^2$

2.5 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ

ให้ $G_{pz}(s)$ และ $G_{p\psi}(s)$ แทนฟังก์ชันถ่ายโอนของสมการ (38) และ (39) ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่างๆจะได้

$$G_{pz} = \frac{Z(s)}{\tau_2(s)} = \frac{1}{s((143.2591)s + 20.1603)} \quad (40)$$

$$G_{p\psi} = \frac{\psi(s)}{\tau_3(s)} = \frac{1}{s((7.9708)s + 0.1192)} \quad (41)$$

2.6 สมการสถานะของระบบ

สมการสถานะเขียนอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (42)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (43)$$

โดยที่ \mathbf{x} คือตัวแปรสถานะ \mathbf{y} คือเอาต์พุต \mathbf{u} คืออินพุต การหาสมการสถานะของการเคลื่อนที่แนวตั้งทำได้โดย

กำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$ และเอาต์พุตคือ z

และจัดรูปสมการที่ (36) ใหม่

$$\dot{w} = -\left(\frac{Z_w}{m + Z_w}\right)w + \tau_3 \quad (44)$$

และ $w = \dot{z}$ (45)

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ ได้เป็น

$$\frac{d(\mathbf{x}_1)}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{Z_w}{m + Z_w}\right) \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_1} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ m + Z_w \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_1} \tau_3 \quad (46)$$

$$\mathbf{y} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_1} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (47)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1407 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.007 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ส่วนการหาสมการสถานะของการหมุนรอบแกนแนวตั้ง

ทำได้โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ $\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix}$ และ

เอาต์พุตคือ ψ และจัดรูปสมการที่ (37) ใหม่

$$\dot{r} = -\left(\frac{N_r}{I_z + N_r}\right)r + \tau_2 \quad (48)$$

และ $r = \dot{\psi}$ (49)

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะได้เป็น

$$\frac{d(\mathbf{x}_2)}{dt} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{N_r}{I_z + N_r}\right) \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_2} \underbrace{\begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_z + N_r \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_2} \tau_2 \quad (50)$$

$$\mathbf{y} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}_2} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (51)$$

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยาน BENBAM จะได้ดังนี้

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3 การออกแบบตัวควบคุม

3.1 เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม

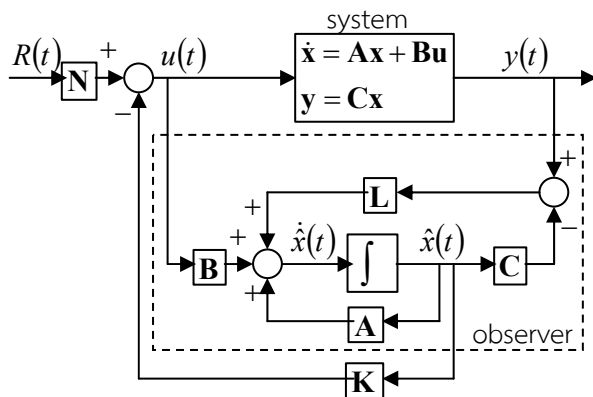
ในการออกแบบตัวควบคุมทั้งแบบป้อนกลับเอาต์พุตและแบบ PID นั้นออกแบบภายใต้ข้อกำหนดเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการออกแบบ

ตัวควบคุมความลึก (z)	ตัวควบคุมมุมแกว่ง (ψ)	
Damping ration: ζ	0.707	0.707
Settling time : t_s	1	1
Steady state error : e_{ss}	0	0
การเคลื่อนที่แนวตั้งจะเคลื่อนที่ เป็นระดับความลึกที่เพิ่มหรือลดลง จากเดิมครั้งละ 0.1 เมตร	การหมุนรอบแกนแนวตั้งจะ หมุนเป็นองศาที่เพิ่มหรือลดลง จากเดิมครั้งละ 5 องศา	

3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต

การควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต (output feedback control) เป็นการใช้นำตัวสังเกตสถานะร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับสถานะในการควบคุม โดยที่ตัวควบคุมจะใช้เวกเตอร์ \hat{x} ซึ่งเป็นค่าประมาณการของเวกเตอร์สถานะ x ในการคำนวณค่าสัญญาณ u



รูปที่ 4 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต จะสังเกตว่าโครงสร้างโดยรวมของการควบคุมจะเป็นการป้อนกลับเฉพาะเอาต์พุต [4] แสดงดังในรูปที่ 4 ที่มีกฎการควบคุมคือ

$$u = -K\hat{x} + \bar{N} \quad (52)$$

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุตทำได้หลายวิธีการ สำหรับการออกแบบนี้มีขั้นตอนคือ

ขั้นที่หนึ่ง ตรวจสอบคุณสมบัติความสามารถควบคุมได้ (Controllability) และความสามารถสังเกตได้ (Observability) ของระบบดังนี้

สำหรับระบบแบบ LTI ที่ถูกแสดงโดย

$$\dot{x} = Ax + Bu \text{ และ } y = Cx + Du$$

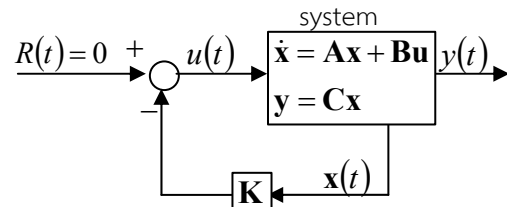
โดยมี $x \in R^n, u \in R^m$ และระบบมีเมตริกซ์ความสามารถควบคุมได้ (Co) และมีเมตริกซ์ความสามารถสังเกตการณ์ได้ (Oo) เป็น

$$Co = \begin{pmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{pmatrix}$$

$$Oo = \begin{pmatrix} C^T & A^T C^T & A^{T^2} C^T & \dots & A^{T^{n-1}} C^T \end{pmatrix}$$

ระบบจะสามารถควบคุมได้ถ้า $rank(Co) = n$ และจะสามารถสังเกตการณ์ได้ถ้า $rank(Oo) = n$ แทนค่าต่างๆสำหรับการเคลื่อนที่แนวตั้งโดยมี $n=2$ ได้ค่า $rank(Co) = 2 = n$ และ $rank(Oo) = 2 = n$ และสำหรับการหมุนรอบแกนแนวตั้งโดยมี $n=2$ ได้ค่า $rank(Co) = 2 = n$ และ $rank(Oo) = 2 = n$ ดังนั้นแสดงว่าระบบทั้งสองเป็นระบบที่สามารถควบคุมได้และสังเกตการณ์ได้

ขั้นที่สอง หาค่า K ของการควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต โดยพิจารณาตัวควบคุมเป็นแบบป้อนกลับสถานะเพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุลคือ $R(t) = 0$ ตามแผนภาพกรอบในรูปที่ 5 ที่มีกฎการควบคุมคือ



รูปที่ 5 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับสถานะ เพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุล

$$u = -k_1x_1 - k_2x_2 \dots - k_nx_n = -Kx \quad (53)$$

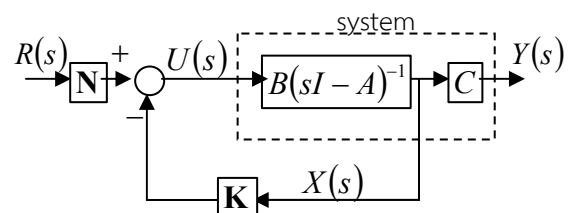
โดยที่ K คืออัตราขยายที่จะทำให้ระบบควบคุมมีค่าโพลตามต้องการ กรณีเป็นระบบลำดับที่สอง สามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของระบบควบคุมคือ

$$\det(Is - (A - BK)) = 0 \quad (54)$$

กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการคือ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (55)$$

ขั้นตอนที่สาม หาค่า N ของการควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต โดยใช้วิธีปรับรูปร่างอินพุตเพื่อตามสัญญาณอ้างอิง $R(t)$ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะคงตัวตามต้องการ [4-5]



รูปที่ 6 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเมื่อมีการปรับรูปร่างอินพุต ในโดเมน s

จากแผนภาพกรอบในรูปที่ 6 ฟังก์ชันถ่ายโอน $T(s)$ คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = C(sI - (A - BK))^{-1} BN(s) \quad (56)$$

และ $(sI - (A - BK))^{-1}$ สามารถหาได้จาก

$$(sI - (A - BK))^{-1} = \frac{adj[sI - (A - BK)]}{\det[sI - (A - BK)]} \quad (57)$$

และความคลาดเคลื่อนของสัญญาณอ้างอิงกับเอาต์พุต ($E(s)$) คือ

$$E(s) = R(s) - Y(s) = (1 - T(s))R(s) \quad (58)$$

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (e_{ss}) ของระบบดังรูปที่ 6 หาได้จากทฤษฎีค่าสุดท้ายคือ

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (59)$$

ในที่นี้สัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชันขั้นบันได ดังนั้นจะได้

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \left[\left(1 - C \frac{\text{adj}[sI - (A - BK)]}{\det[sI - (A - BK)]} BN(s) \right) \frac{1}{s} \right] \quad (60)$$

ดังนั้นสามารถหาค่า N โดยการเทียบสมการ (60) กับค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวที่ต้องการ

ขั้นตอนที่สี่ ออกแบบตัวสังเกตสถานะอันดับสมบูรณ์ ($\hat{x}(t)$) ตามแผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตในรูปที่ 4 โดยตัวสังเกตสถานะอันดับสมบูรณ์เขียนอยู่ในสมการได้เป็น

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu - Ly \quad (61)$$

โดยที่ เมทริกซ์ L เป็นเมทริกซ์ค่าขยายของตัวสังเกตสถานะและเมื่อแทน x ด้วย \hat{x} กฎการควบคุมป้อนกลับสถานะในสมการที่ (53) เขียนใหม่เป็น

$$u = -k_1\hat{x}_1 - k_2\hat{x}_2 \dots - k_n\hat{x}_n = -K\hat{x} \quad (62)$$

โดยสมการที่ (62) ก็คือกฎการควบคุมของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตนั่นเองที่ยังไม่มีการปรับรูปร่างอินพุต การหาค่าเมทริกซ์ L ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการหาค่า K กรณีเป็นระบบลำดับที่สองสามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของตัวสังเกตสถานะคือ

$$\det(Is - (A - LC)) = 0 \quad (63)$$

กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการคือ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (64)$$

3.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม

จากเงื่อนไขการออกแบบประกอบกับวิธีการออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตตั้งแต่ขั้นตอนที่หนึ่งถึงสาม ได้พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

ผลการออกแบบตัวควบคุมความถี่เมื่อตำแหน่งโพลของระบบควบคุมเป็น $-4 \pm 4i$ และตำแหน่งโพลตัวสังเกตสถานะเป็น $-8 \pm 8i$ ได้

$$K_1 = [k_1 \quad k_2] = [4571 \quad 1163],$$

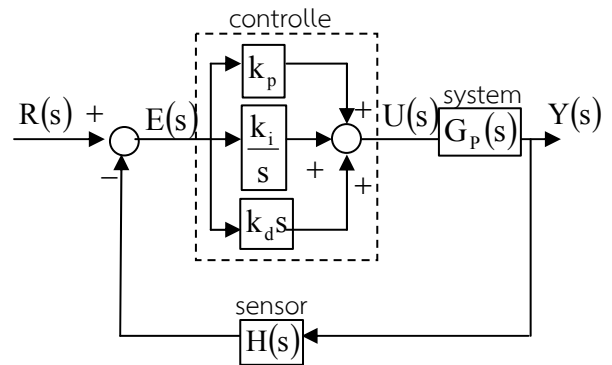
$$N_1 = [4571] \text{ และ } L_1 = [L_1 \quad L_2]^T = [16 \quad 134]^T$$

ผลการออกแบบตัวควบคุมมุมแกว่งเมื่อตำแหน่งโพลของระบบควบคุมเป็น $-4 \pm 4i$ และตำแหน่งโพลตัวสังเกตสถานะเป็น $-8 \pm 8i$ ตามลำดับ ได้

$$K_2 = [k_1 \quad k_2] = [255.1 \quad 63.9], \quad N_2 = [255.1]$$

$$\text{และ } L_2 = [L_1 \quad L_2]^T = [16 \quad 128.2]^T$$

3.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID



รูปที่ 7 แผนภาพกรอบของการควบคุม PID

กฎการควบคุมแบบ PID เขียนอยู่ในรูปสมการคือ

$$U(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) E(s) \quad (65)$$

หรือ $U(s) = G_c(s)E(s)$ โดยที่ $G_c(s)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$G_c(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \right) \quad (66)$$

$U(s)$ คือสัญญาณควบคุม $E(s)$ คือผลต่างของสัญญาณอ้างอิง ($R(s)$) กับเอาต์พุต ($Y(s)$) $G_p(s)$ คือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ $H(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของเซนเซอร์วัด ส่วน k_p , k_i และ k_d เป็นค่าอัตราขยายของพจน์ P, I และ D ตามลำดับ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบลูปปิด ($T(s)$) คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)H(s)} \quad (67)$$

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของทั้งสองระบบภายใต้สมมุติฐานเมื่อผลตอบสนองของเซนเซอร์ไวกว่าระบบมากและเป็นค่าของเอาต์พุตโดยตรง ดังนั้นจึงให้ $H(s) = 1$ และจะได้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับขนาดหนึ่งหน่วย (unity feedback) ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนป้อนไปข้างหน้าโดยกำหนดให้เป็น $G(s)$ ดังสมการ

$$G(s) = G_c(s)G_p(s) \quad (68)$$

และสามารถหาผลต่างที่สภาวะคงตัว (steady state error) เมื่ออินพุตเป็น ฟังก์ชันขั้นบันไดต่อหนึ่งหน่วยอินพุตได้จาก

$$e_{ss} = e_{step}(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \quad (69)$$

ข้อสังเกตจากสมการที่ (67) กรณียังไม่เพิ่มตัวควบคุมพจน์ I และ D ให้กับระบบ หรือ $G_c(s) = 1$ พบว่าผลต่างที่สภาวะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในที่นี้จึงเพิ่มตัวควบคุม D เพียงอย่างเดียวเพื่อควบคุมความเร็วของผลตอบสนอง ดังนั้นตัวควบคุมจึงลดรูปเป็น PD

จากนั้นแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (67) จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมความลึกและมุมหันเหตามสมการที่ (70) และ (71) ตามลำดับ

$$T(s)_z = \frac{0.007(k_p + k_d s)}{s^2 + (1.404 + 0.007k_d)s + 0.007k_p} \quad (70)$$

$$T(s)_\psi = \frac{0.125(k_p + k_d s)}{s^2 + (0.015 + 0.125k_d)s + 0.125k_p} \quad (71)$$

จากนั้นใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองมาตรฐานคือ

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (72)$$

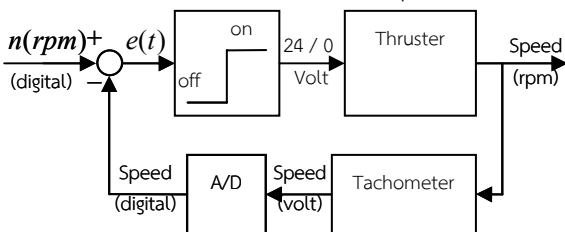
จากเงื่อนไขการออกแบบตามตารางที่ 3 ได้ค่าพามีเตอร์ $\zeta = 0.707$ และ $\omega_n = 5.658 \text{ rad/s}$ และจะได้

$$s^2 + 8s + 32 = 0 \quad (73)$$

ผลจากการเทียบสัมประสิทธิ์ ของระบบควบคุมความลึกได้ $k_p = 4573$ และ $k_d = 942$ ส่วนระบบควบคุมมุมแกว่งได้ $k_p = 256$ และ $k_d = 64$

3.5 การออกแบบตัวควบคุมชุดผลึก

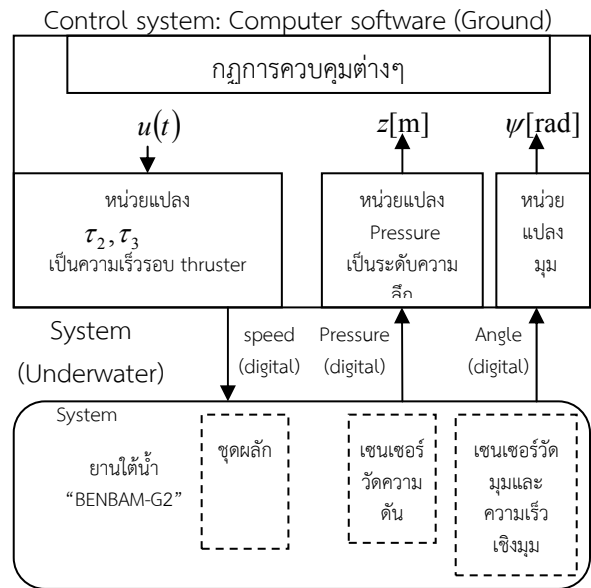
การควบคุมความเร็วรอบของชุดผลึก ทำโดยใช้ตัวควบคุมแบบเปิดปิด (on-off control) ที่ความถี่สูง โดยแสดงเป็นแผนภาพกรอบดังรูปที่ 8 โดยมีสมมุติฐานการออกแบบคือ ความไวในการตอบสนองของชุดผลึกสูงกว่าความไวของยานมากๆ และชุดผลึกสามารถสร้างแรงและแรงบิดได้ตามต้องการทำให้ error ของชุดผลึกเป็น 0



รูปที่ 8 แผนภาพกรอบการควบคุมความเร็วรอบชุดผลึก

3.6 Software และ Hardware

ระบบควบคุมจริงประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ Software และ Hardware ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยใช้คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ รับสัญญาณอ้างอิง คำนวณค่าตัวแปรสถานะและกฎการควบคุม พร้อมทั้งแปลงสัญญาณอินพุต $u(t)$ เป็นความเร็วรอบเพื่อให้ thruster unit หมุนเพื่อสร้าง τ_2, τ_3 ตามต้องการ

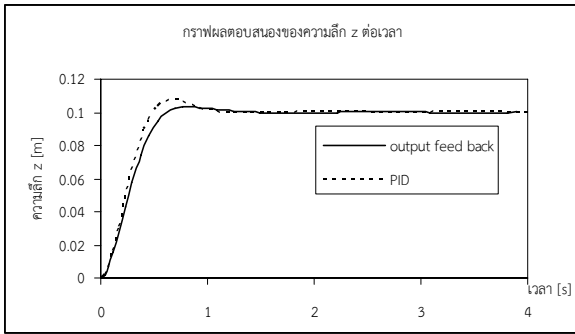


รูปที่ 7 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมจริง

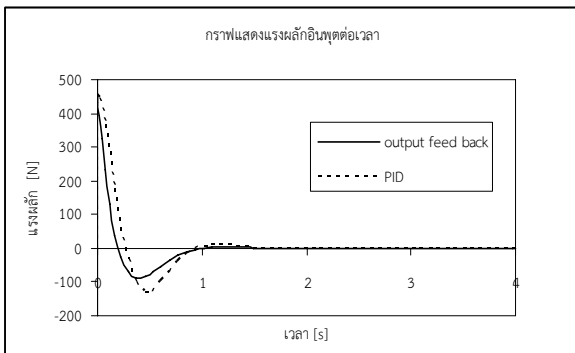
4. ผลการทดลอง

เพื่อเปรียบเทียบกฎการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตในหัวข้อ 3.3 กับกฎการควบคุมแบบ PID ในหัวข้อ 3.4 โดยการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

- 1) เมื่อต้องการให้ยานใต้น้ำรักษาระดับอยู่ที่ความลึก 0.1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 และเมื่อเพิ่มเงื่อนไขให้แรงผลึกจากใบพัดมีการอิมิตัวที่ $\pm 30 \text{ N}$ ดังแสดงในรูปที่ 10
- 2) เมื่อต้องการให้ยานใต้น้ำเกิดการหมุนรอบแกน z ด้วยมุมหันเห 5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 9 และเมื่อเพิ่มเงื่อนไขให้แรงบิดจากใบพัดมีการอิมิตัวที่ $\pm 15 \text{ N-m}$ ดังแสดงในรูปที่ 11

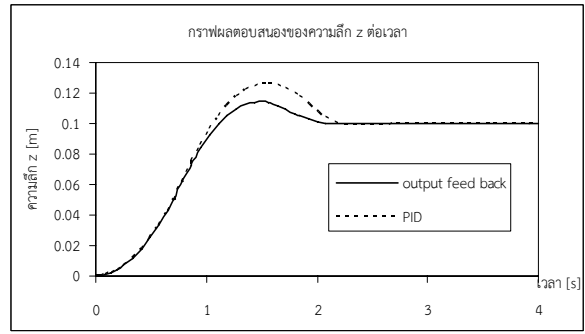


(ก) ความลึกต่อเวลา

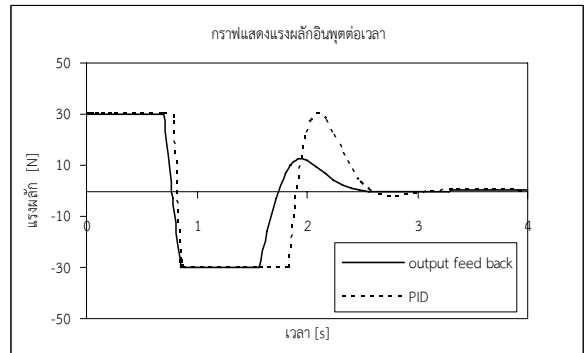


(ข) แรงผลักดันต่อเวลา

รูปที่ 8 ผลจำลองการควบคุมความลึกที่ระดับ 0.1 ม
ภายใต้เงื่อนไขที่แรงผลักดันไม่เกิดการอิมพัลส์

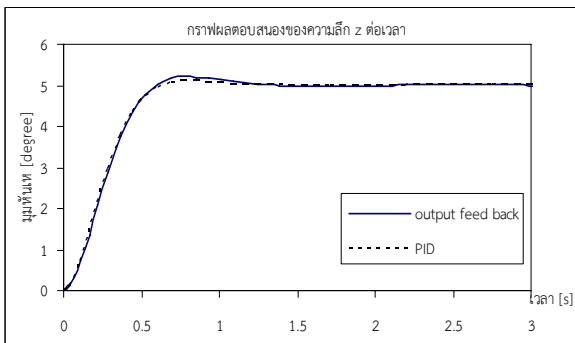


(ก) ความลึกต่อเวลา

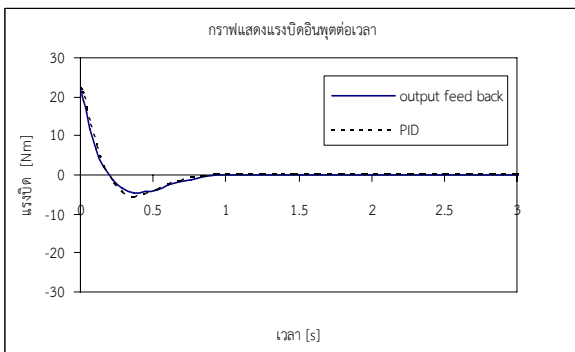


(ข) แรงผลักดันต่อเวลา

รูปที่ 10 ผลจำลองการควบคุมความลึกที่ระดับ 0.1 ม
ภายใต้เงื่อนไขที่แรงผลักดันเกิดการอิมพัลส์ที่ ± 30 N

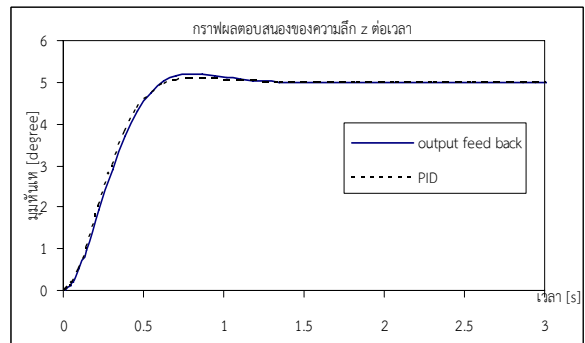


(ก) มุมหันเหต่อเวลา

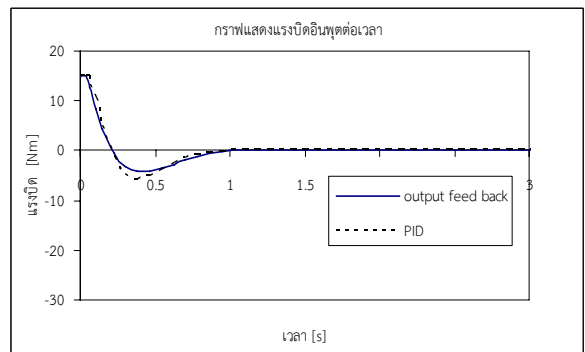


(ข) แรงบิดอินพุตต่อเวลา

รูปที่ 9 ผลจำลองการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา
ภายใต้เงื่อนไขที่แรงบิดอินพุตไม่เกิดการอิมพัลส์



(ก) มุมหันเหต่อเวลา



(ข) แรงบิดอินพุตต่อเวลา

รูปที่ 11 ผลจำลองการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา
ภายใต้เงื่อนไขที่แรงบิดอินพุตเกิดการอิมพัลส์ที่ ± 15 Nm

5.สรุป

ระบบควบคุมที่ทำการออกแบบทั้งชนิดป้อนกลับสัญญาณอินพุตและชนิด PID เมื่อจำลองผลการควบคุมด้วย MATLAB/Simulink ภายใต้เงื่อนไขแรงผลักและแรงบิดอินพุตไม่อิมิตัว ในการควบคุมความลึกที่ระดับ 0.1 เมตร (ตามรูปที่ 8) แสดงให้เห็นว่าผลต่างที่สภาวะคงตัวไม่แตกต่างกันแต่ตัวควบคุมชนิดป้อนกลับสัญญาณอินพุตเกิดการ overshoot และมีค่าแรงผลักอินพุตที่น้อยกว่าและมีผลในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของชุดขับเคลื่อนมากกว่า แต่การควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา (ตามรูปที่ 9) ให้ผลไม่แตกต่างกันมาก ส่วนผลจำลองภายใต้เงื่อนไขแรงผลักและแรงบิดอินพุตอิมิตัวที่ ± 30 N และ ± 15 Nm ตามลำดับ ในการควบคุมความลึก (ตามรูปที่ 10) แสดงให้เห็นว่า setting time เพิ่มขึ้นจากที่ได้ออกแบบไว้คือ 1 วินาทีเป็นประมาณ 2 วินาทีแต่ตัวควบคุมชนิดป้อนกลับสัญญาณอินพุตเกิดการ overshoot ที่น้อยและมีค่าแรงผลักอินพุตที่น้อยกว่าด้วยการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา (ตามรูปที่ 11) setting time ยังมีค่าตามออกแบบ และให้ผลอื่นที่ไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นจากผลจำลอง โดยสรุปการควบคุมมุมหันเห ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำได้ดี ส่วนการควบคุมความลึกนั้นตัวควบคุมแบบป้อนกลับสัญญาณอินพุตให้ผลเป็นที่น่าพอใจกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ สถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดลอง คุณคัมพลวง คำบุปผา ผู้ช่วยเหลือด้านการทดลอง ท้ายที่สุดนี้ขอบคุณเพื่อนๆญาติๆการยาและลูกที่เป็นกำลังใจตลอดมา

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ธีระยุทธ ชาติชนะยีนยง (2553). การควบคุมหุ่นยนต์ใต้น้ำอัตโนมัติด้วยวิธีสไลด์โหมด, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 29, 4 (ต.ค. - ธ.ค. 53), หน้า 478 – 484.
- [2] ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต และ ปรีชญา เปรมปราณีรัชต์ (2555). การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ของยานใต้น้ำด้วยแรงดูดคงที่, การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2555, มหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี

[3] Fossen, Thor I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, New York.

[4] สุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2552). วิศวกรรมการควบคุมอัตโนมัติ, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

[5] Gene F. Franklin, J.David Powell and Abbas Emami-Naeini (1994). *Feedback Control of Dynamic Systems*, 3rd edition, ISBN: 0-201-53487-8, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA.

[6] Wei Wang (2006), Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV, Master thesis, University of Waterloo, Ontario Canada

[7] อนุพนธ์ พิมพ์ช่วยและคณะ (2548). ต้นแบบยานสำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19

[8] ธีรภัทร หล่มบุญเรืองและคณะ (2549). หุ่นยนต์ต้นแบบสำหรับการสำรวจใต้น้ำ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 24 พฤษภาคม 2521
ที่อยู่	14 ม.10 ต. เขาเจ็ยก อ.เมือง จ.พัทลุง 93000
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ.2544
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรซ่อมบำรุงเครื่องกล บริษัทสหวิริยาสตีลอินดัสตรี จำกัด (มหาชน) พ.ศ.2545-2546 วิศวกรออกแบบ บริษัทไดกิ้นแอกคอนดิชันนิง (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ.2547-2550 วิศวกรออกแบบ บริษัทซิสเต็มอับเกรดโซลูชั่นบีเคเค จำกัด พ.ศ.2550-2551 วิศวกรแมคคาทรอนิกส์ อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ สถาบันไทย-เยอรมัน พ.ศ. 2551-2556 วิศวกรออกแบบ บริษัทฮีมาสเอนเนอร์ยีเซอร์วิส (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2556 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	06-2006-8450
อีเมล	narongsak.khun@gmail.com