

1. บทคัดย่อภาษาไทย ของโครงการย่อยที่ 1

การตรวจวัดมลพิษของน้ำ นับปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินสถานภาพมลพิษของน้ำในแหล่งน้ำสำคัญต่างๆ เพื่อให้การตรวจวัดเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพและครอบคลุมพื้นที่แหล่งน้ำประเภทต่างๆ ที่มีขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็ว คณะผู้วิจัยจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาขับเคลื่อนด้วย podded propulsion ของเรือ ให้สามารถปฏิบัติงานได้ทั้งในน้ำจืดและในทะเล ซึ่งการปฏิบัติการในทะเลจะเน้นเฉพาะบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล และ ปรับปรุงระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติตามจุดพิกัด GPS ที่กำหนด เพื่อลดความเสี่ยงและอำนวยความสะดวกต่อผู้ปฏิบัติการในระหว่างออกสำรวจพื้นที่จริง และ จะเพิ่มขีดความสามารถและขอบเขตในการปฏิบัติการของเรือในสภาพอากาศที่มีคลื่นลม โดยการติดตั้งทุ่นลอยช่วยการทรงตัวที่สามารถพับเก็บได้ อีกทั้งยังพัฒนาระบบระบายความร้อนเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการปฏิบัติการของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน และ ให้สามารถทนต่อสภาพความเค็มของโอทะเล ในโครงการวิจัยย่อยที่ 1 นี้จะประกอบไปด้วย

1. การพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบ podded propulsion ที่สามารถทำงานได้ในทะเล และ ทนต่อสภาพโอเค็มของน้ำทะเล โดย podded propulsion จะให้แรงผลักดันสูงสุดถึง 356 นิวตันทำให้ด้านกระแสน้ำได้ดีขึ้น และ ได้ออกแบบชุดบังคับเลี้ยวแบบสายพานและบังคับความเร็วของ podded propulsion ให้สามารถพับเก็บให้ขนานกับลำเรือได้ เพื่อสะดวกต่อการหลบหลีกสิ่งกีดขวางในน้ำและสะดวกต่อการขนย้าย ในการปฏิบัติงานจะสามารถควบคุมความเร็วใบพัดและทิศทางการหมุนซ้าย-ขวาของใบพัดผ่านคอมพิวเตอร์ได้ เพื่อนำไปใช้ร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ
2. การพัฒนาระบบระบายความร้อนและป้องกันไอน้ำและโอเค็มจากทะเลสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้าที่ใช้กับระบบควบคุม โดยออกแบบให้ห้องเก็บอุปกรณ์นั้นกันน้ำกระเด็นและมีพัดลมดูดอากาศเข้าออกจากห้องเก็บอุปกรณ์ พร้อมทั้งมีสารดูดความชื้นเพื่อป้องกันไอน้ำที่อาจเข้ามาได้ ซึ่งจากการทดสอบจะช่วยให้ระบบปฏิบัติการได้นานกว่า 2 ชั่วโมง
3. การพัฒนาทุ่นลอยช่วยการทรงตัวและเพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัวของเรือคายัค โดยใช้ทุ่นโฟมทรงกระบอกติดกับแกนที่ยึดออกไปทางด้านข้างของเรือเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสน้ำทางด้านข้าง ซึ่งช่วยป้องกันการโคลงของเรือคายัคเมื่อมุมโคลงน้อยกว่า 30 องศา เมื่อลงปฏิบัติการในพื้นที่ที่มีคลื่นต่ำกว่า 50 cm และลมแรงได้ เช่นใน ทะเล หรือ บริเวณรอบชายฝั่งทะเล นอกจากนั้นทุ่นลอยจะสามารถพับเก็บแนบกับเรือได้อีกด้วยเมื่อต้องการหลบสิ่งกีดขวางและไม่ใช้งาน
4. การพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือคายัค (kayak) ที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion โดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ (Full-State Feedback) และ ตัวสังเกตการณ์สถานะ (Observer) โดยเริ่มต้นได้สร้างแบบจำลองของเรือคายัคที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion และ สร้างระบบควบคุม แล้วทดสอบและปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือในโปรแกรมจนดีแล้ว จึงนำระบบควบคุมที่ได้มาประยุกต์ใช้กับเรือคายัคจริง ซึ่งจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ และ เพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่เข้าตามจุดพิกัดที่กำหนด

โดยเรือที่ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติด้วย podded propulsion ที่พัฒนาขึ้นมาจะสมารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และ มีความน่าเชื่อถือในการใช้ปฏิบัติการเป็นระยะเวลานานขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังได้ติดตั้งเซนเซอร์ echo sounder กับเรือคายัค เพื่อใช้ในการวัดความลึกของแหล่งน้ำต่างๆ และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคสนามจริง โดยการนำไปช่วยสำรวจความลึกของคลองต่างในจังหวัดกรุงเทพฯ และ ปทุมธานี เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการบริหารจัดการน้ำและเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับคลองและแม่น้ำของประเทศในอนาคตต่อไป

1. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ของโครงการย่อยที่ 1 (Abstract)

Measurement of water pollution is one of the most significant factors in evaluating pollution condition in various important water resources. To accelerate and to efficiently process the water-quality measurement, our research team proposes to develop a propulsion system driven by podded propulsion for a kayak boat such that it can be operated both in fresh and salt water, especially along the costal line. Also, an improvement on the autonomous way-point tracking system along specified GPS locations has been developed so that user risk is reduced and system is more convenient to operate in the field. Moreover, we expand the kayak boat's capability to handle wind and wave using a foldable buoy system for increasing roll stability and to protect electronics and electrical equipment from eliminate accumulated heat and sea salinity during long and continuous operation using a sealed cooling system. The first part of these research projects includes the following topics

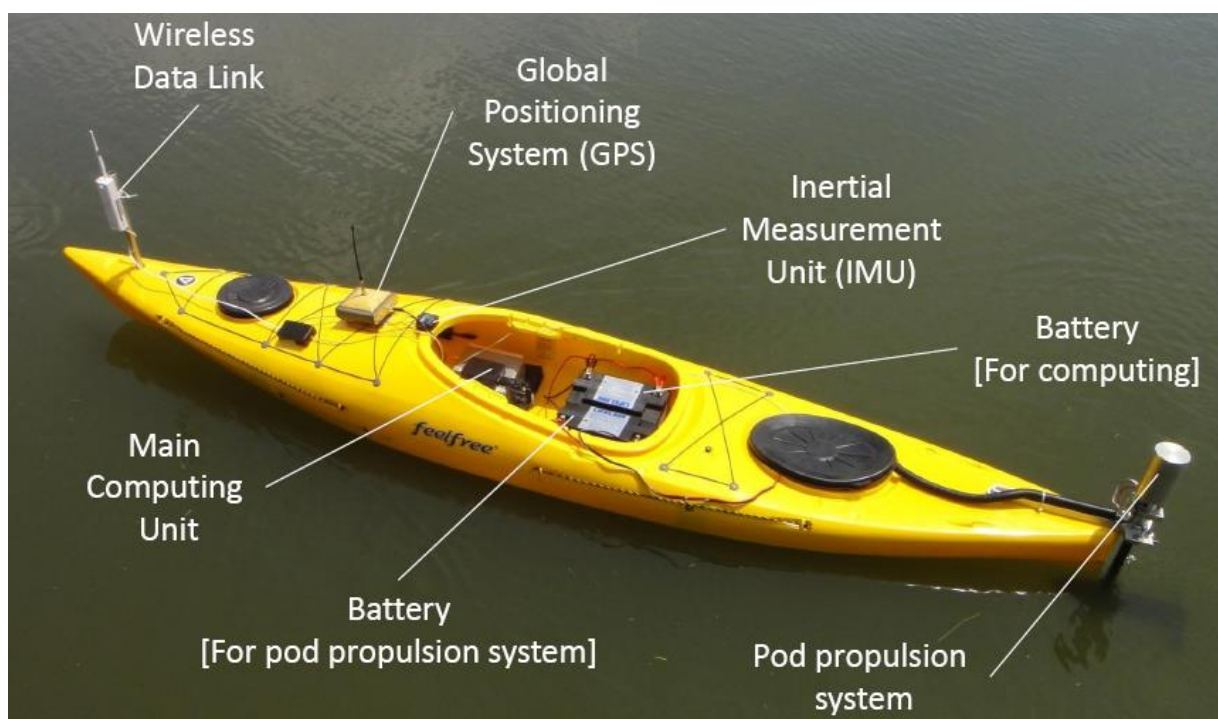
1. Development of a podded propulsion that is capable to operate in sea and to endure sea-water vapor. New podded propulsion provides maximum thrust of 356 N, as a result the kayak boat can overcome stronger flow current. This new design for timing-belt steering and controlling speed of podded propulsion can be folded parallel to the boat such that it can avoid obstacle in water and it is convenient for transporting. In field operation, both propeller speed as well as propeller thrust direction can be controlled through computer, which is useful for the autonomous way-point tracking integration.
2. Development of a cooling and water-tight system to prevent electrical and electronics equipment from over-heating in long and continuous operation and from fresh-water and sea-water corrosion. The electrical and electronics compartment is designed to protect water splash and to circulate internal air flow with inlet- and outlet-fans, to absorb internal moisture with silica gel. From testing, boat equipment can be operated more than 2 hour without any accumulated heat.

3. Development of a foldable buoy system to increase boat stabilizing when the boat encounters strong wind or wave in field operation. This buoy system, built from circular foams, can extend outward along boat side to increase side-span water-contact area. Moreover, rolling stability for roll angle $< 30^\circ$ and wave height < 50 cm can be achieved with this buoy system, thus the kayak boat can operate in mild sea or along shore line. Besides that this buoy system can be folded along boat side for avoiding obstacle or for transporting.
4. Development and improvement of the automatic way-point tracking system for the kayak driven by podded propulsion. This control technique combines a full-state feedback with an observer. First, the way-point tracking controller is constructed, tested, and improved using a mathematical model of kayak boat driven by podded propulsion. Second, this controller is then applied to use with the actual kayak boat to guarantee control system stability and to increase way-point tracking accuracy.

This kayak boat driven by podded propulsion can be conveniently used in field operation. These new developments help increasing efficiency and reliability in long and continuous operation. Moreover, this kayak boat, equipped with an echo sounder, has been deployed to survey canals' depth in Bangkok and Pathumthani provinces. The canals' and rivers' depth information will be used in water management and recorded in Thailand water resource database.

2. บทนำของโครงการย่อยที่ 1

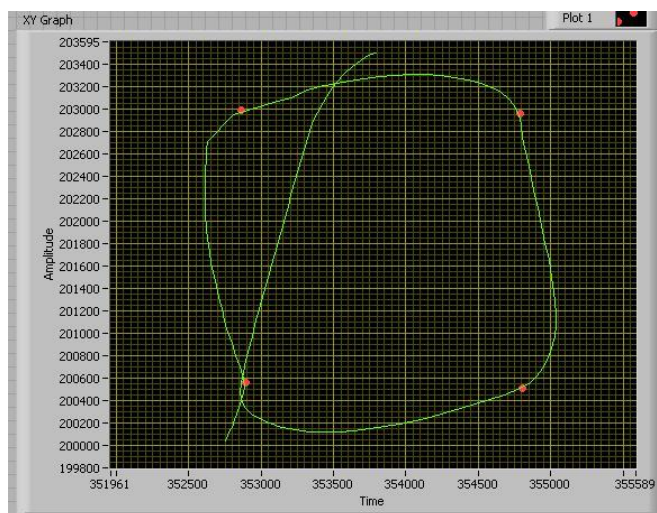
จากโครงการเรืออัตโนมัติที่ขับเคลื่อนโดย podded propulsion ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อใช้เก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 นั้นคณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการแสดงให้เห็นว่าระบบเรืออัตโนมัติสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่จุดเป้าหมายตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำโดยใช้ระบบนำร่องอัตโนมัติแบบ Double PD loop ซึ่งควบคุมการเลี้ยวและควบคุมระยะทางที่เหลือก่อนถึงเป้าหมายไปพร้อมกันแต่ทำงานแยกส่วนกันอย่างเป็นอิสระ ความสามารถดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการกิจต่างๆเช่นการติดตั้งระบบเก็บตัวอย่างน้ำอัตโนมัติบนเรือฯเพื่อใช้เก็บตัวอย่างน้ำในราชการของกรมวิทยาศาสตร์บริการ การประยุกต์ใช้เรือในการสำรวจพื้นที่ใต้น้ำโดยติดตั้งเครื่อง Echo Sounder แบบแนวตั้งบนเรือฯเพื่อตรวจหาความลึก ณ จุดต่างๆซึ่งอ้างอิงด้วย GPS (Global Positioning System) โดยสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร



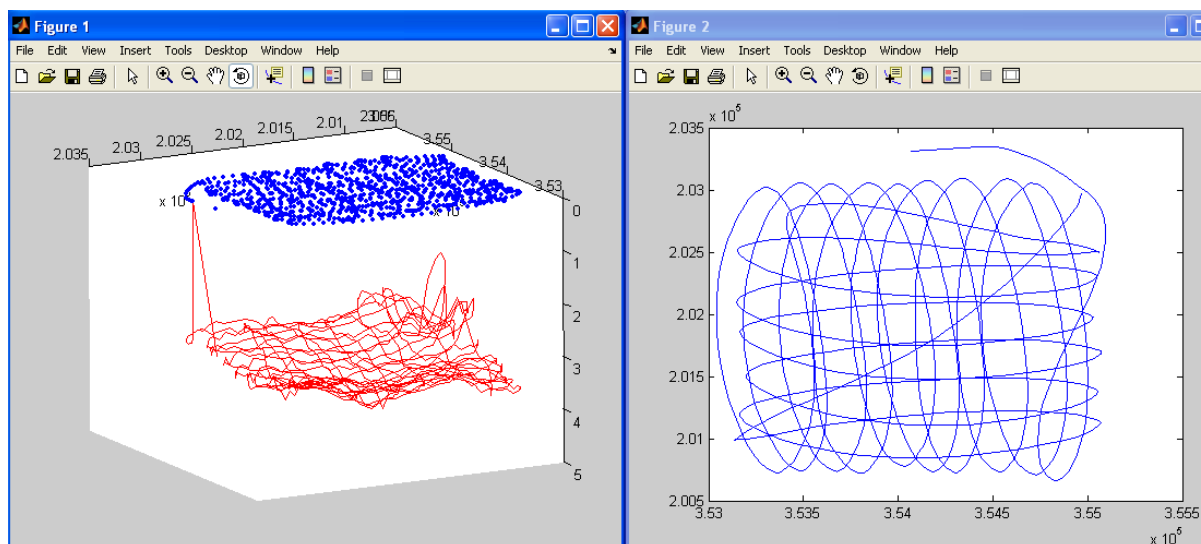
รูปที่ 2.1 เรืออัตโนมัติบนพื้นฐานเรือคายัคพร้อมอุปกรณ์สำหรับนำร่องเพื่อเคลื่อนที่ไปในจุดที่กำหนด

อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของเรือฯในปัจจุบันต้องการข้อมูลจากเซนเซอร์นำร่องการเคลื่อนที่สองรายการคือ GPS และ IMU (Inertial Measurement Unit) เนื่องจากเซนเซอร์ทั้งสองถึงแม้จะมีข้อดีคือมีความแม่นยำสูงแต่ก็มีราคาที่สูงมากตามไปด้วยทำให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างเรือฯมีราคาสูงตามไปด้วย ปัจจัยทางด้านราคาและค่าใช้จ่ายส่งผลให้การนำงานวิจัยไปใช้ ต่อยอด หรือถ่ายทอดเทคโนโลยี (เป็นความตั้งใจอย่างยิ่งยวดของคณะผู้วิจัย) ประสบปัญหา ทางคณะผู้วิจัยมีความเห็นตรงกันว่าจุดประสงค์หลักของการวิจัยในขั้นต่อไปคือการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีทางระบบควบคุมขั้นสูงในการทำให้ราคารวมของเรือฯถูกลงและยัง

คงไว้ซึ่งประสิทธิภาพในการปฏิบัติการ รวมทั้งปรับปรุงแก้ปัญหาย่อยอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะการเคลื่อนที่ของเรือและความเชื่อถือได้ในการปฏิบัติการเช่นการผนึกป้องกันน้ำเข้าสู่ระบบอิเล็กทรอนิกส์และระบบขับเคลื่อน การระบายความร้อนออกจากช่องเก็บอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ทดแทนอุปกรณ์ปัจจุบันที่มีน้ำหนักเบากว่าหรือมีขนาดกะทัดรัดกว่าเช่นการใช้คอมพิวเตอร์แบบ Single-board ที่มีความทนทานต่อสภาวะปฏิบัติการไม่ยิ่งหย่อนไปกว่า rugged PC ที่ใช้ในปัจจุบันแต่มีขนาดเล็กและเบากว่ามาก เป็นต้น



รูปที่ 2.2 การทดลองวิ่งตามจุดสี่จุดในบ่อน้ำจริงโดยเริ่มจากด้านบนวิ่งลงมาที่จุดล่างซ้ายและจบที่จุดล่างซ้าย เรือใช้ระบบควบคุมแบบ Double loop PD control



รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้เรือควบคุมคู่กับอุปกรณ์โซนาร์แนวตั้งในการวัดความลึกของพื้นที่ใต้น้ำ ภาพซ้ายแสดงพื้นที่ใต้น้ำจากข้อมูลที่ได้รับจากโซนาร์ (Echo Sounder) ภาพขวาแสดงรูปแบบการวิ่งใน 2 มิติขณะสแกนบ่อน้ำ

เหตุผลที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือภารกิจที่สำคัญอีกมากมายที่จำเป็นต้องใช้เรือฯมิได้จำกัดอยู่เพียงในพื้นที่น้ำจืดเท่านั้น มีภารกิจอีกเป็นจำนวนมากที่เกิดขึ้นบริเวณชายฝั่งทะเลหรือกลางทะเลเช่นการตรวจสอบ พิกัดเทียบกับภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทำโครงการป้องกันการกัดเซาะชายฝั่งทะเลซึ่งเป็นโครงการที่มีผลกระทบสูง มีความร่วมมือจากหลายหน่วยงาน การตรวจวัดคุณภาพน้ำเพื่อหาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของการรูก้ำของน้ำเค็ม การประยุกต์ใช้เรือฯในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์ทะเล การประยุกต์ใช้เรือฯในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายในทะเลสาบพันธุ์เฉพาะสำหรับผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยมีความเห็นว่าควรจะต้องปรับปรุงระบบเรือฯให้มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำทะเล รวมทั้งปรับปรุงการกระจายน้ำหนักของเรือให้มีเสถียรภาพมากที่สุดสำหรับใช้ในทะเล

3. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 1

Dorf และ Bishop [7] ได้แสดงให้เห็นในหนังสือบทเรียนเกี่ยวกับระบบควบคุมถึงพื้นฐานการใช้การออกแบบ observer ให้เป็นประโยชน์ต่อการควบคุมระบบที่เราอาจจะไม่มีเซนเซอร์ครบสำหรับการบ่งบอกค่า State Variable แต่ก็ยังสามารถควบคุมระบบนั้นได้ รวมถึงการออกแบบ observer สามารถที่จะใช้ในรูปแบบของการกรองสัญญาณ State variables ที่เราสนใจเพื่อให้ได้ค่าที่เสถียรมากขึ้น นอกจากนั้นยังได้แนะนำถึงวิธีการระบุวาระบบใดสามารถใช้การออกแบบ observer ในการประมาณค่า state variables โดยใช้เทคนิคการตรวจสอบ Observability Matrix ว่ามีลักษณะเป็น full rank หรือไม่

Greytak [9] นำเสนอการใช้การออกแบบ observer ในการควบคุมเรือคายัคเนื่องจากพลศาสตร์ของเรือคายัคไม่เหมาะต่อการใช้ในการควบคุมแบบธรรมดาที่สามารถหาเซนเซอร์มาวัดค่าของ State variables ได้ทุกค่า Greytak ใช้เซนเซอร์ที่มีอยู่คือ GPS และ DMU (Gyrosensor) ในการประมาณค่าความเร็วและอัตราการหักหัวเรือเพื่อช่วยให้การควบคุมเรือคายัคเป็นไปได้อย่างละเอียดและมีเสถียรภาพเพียงพอที่จะใช้สำหรับควบคุมเรือในที่คับขันมากๆ เช่น พื้นที่แคบ

Stettler [11] เสนอโมเดลของเรือคายัคของเขาเองโดยใช้ขั้นตอนการทดลอง วิเคราะห์ และทดสอบอย่างละเอียดในการหาค่าพารามิเตอร์ทุกอย่างที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรือ รวมทั้งได้ทำการวิเคราะห์พลศาสตร์การไหลของน้ำผ่านมอเตอร์ขับเคลื่อนเรือว่ามีผลต่อแรงขับเคลื่อนเรือเพียงใด การได้มาซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ส่งผลถึงความละเอียดและความใกล้เคียงของโมเดลเรือกับเรือจริงซึ่งมีผลต่อเนื่องถึงความแม่นยำและสมรรถนะของระบบควบคุมนำร่องเรือ

Bemporad และคณะ [5] นำเสนอผลการทดลองใช้ Observer กับระบบหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ได้ในการเคลื่อนที่ตามกำแพงอย่างช้าๆ โดยอ่านค่าจากโซนาร์และเอ็นโคดเดอร์ (เซนเซอร์วัดจำนวนรอบ) ผู้เขียนได้ใช้การออกแบบ observer แบบ Extended Kalman Filter ในการประมาณตำแหน่งของหุ่นยนต์ซึ่งช่วยให้หุ่นยนต์ของคณะวิจัยเคลื่อนที่ตามผนังกำแพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Hsiao และ Tomizuka [10] ทำวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมเสถียรภาพของยานพาหนะในแนวขวางซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเกิดอุบัติเหตุรถคว่ำในระบบ Automated Highway Systems (AHS) การควบคุมการเอียงตัวของรถใช้วิธีการอ่านค่าเปรียบเทียบกันระหว่างเซนเซอร์วัดความเอียงแบบแม่เหล็กเหนี่ยวนำสองตัว ผู้วิจัยได้คิดค้นวิธีการที่จะให้ระบบควบคุมยังทำงานได้อย่างเป็นปกติถึงแม้ว่าเซนเซอร์ตัวหนึ่งตัวใดจะหยุดทำงานไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้วิธีการที่ใช้คือการออกแบบ observer ให้สามารถนำค่าที่ได้จากเซนเซอร์ตัวที่สมบูรณ์มาชดเชยค่าของเซนเซอร์ตัวที่เสียไป

Carlson และ Murphy [6] ทำการศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดความล้มเหลวขณะปฏิบัติการของ Unmanned Ground Vehicles (UGVs) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในเหตุการณ์ก่อการร้ายตึก World Trade Center ซึ่งเป็น UGVs ในรูปแบบของหุ่นยนต์กู้ภัยและในรูปแบบของหุ่นยนต์สืบข่าวการสงครามใน

สงครามที่อิรัก พวกเขาพบว่าเวลาเฉลี่ยของการปฏิบัติการได้ของหุ่นยนต์เหล่านี้จะอยู่ที่ประมาณ 6-20 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ปัญหาที่หยุดหุ่นยนต์เหล่านี้คือ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ที่ไม่รัดกุมเพียงพอทำให้เกิดความไม่เสถียรระหว่างปฏิบัติการ การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์ที่ไม่สามารถทนกับทุกภาวะการก็เป็นจุดอ่อนอีกประการหนึ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก ส่วนที่เคลื่อนไหวย่อยๆ มีชิ้นส่วนหลายๆ ชิ้นเช่นแกนกลประจำหุ่นยนต์ก็เป็นจุดอ่อนที่เกิดความเสียหายบ่อยครั้ง นอกจากนี้ก็เป็นเรื่องของการสูญเสียสัญญาณภาพเคลื่อนที่ระหว่างทำงานอันเนื่องมาจากการเชื่อมต่อที่อ่อนแอของคลื่นวิทยุบังคับเป็นต้น

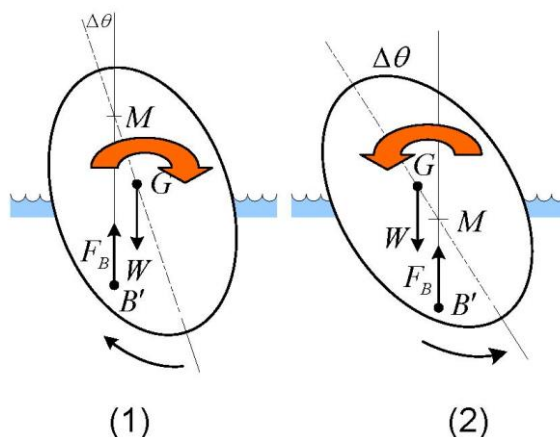
จันทร์เพ็ญ วุฒิวรวงศ์ และคณะ [1] ทำการศึกษาเรื่องผลของการเคลื่อนที่ของตะกอนต่อการจมตัวของปะการังเทียมเพื่อศึกษาปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการจมตัวของปะการังเทียมที่สร้างบนพื้นทราย โดยศึกษาลักษณะการเคลื่อนตัวของตะกอนทรายรอบปะการังเทียมบริเวณพื้นที่ทะเลที่เป็นทรายของอ่าวขาม เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง ห่างจากฝั่ง 200 เมตร ความลึกน้ำ 5-6 เมตร กระแสน้ำประจำถิ่นเป็นกระแสน้ำชายฝั่ง มีความเร็วกระแสน้ำในทิศตะวันออกเฉียงเหนือสูงสุดเท่ากับ 88 เซนติเมตร/วินาที

สุจินต์ ดีแท้ และคณะ [4] ศึกษากระแสน้ำขึ้นน้ำลงบริเวณชายฝั่งแหลมผักเบี้ยอำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี โดยใช้ทฤษฎีการวัดความเร็วกระแสน้ำแบบ Lagrangian และ Eulerian ในการศึกษารูปแบบการเคลื่อนตัวของกระแสน้ำในเดือนธันวาคม 2541 เดือนพฤษภาคม 2542 พบว่าในเดือนธันวาคม 2541 กระแสน้ำขึ้นไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด 0.61 เมตรต่อวินาทีไปทางทิศเหนือ กระแสน้ำลงไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด 0.64 เมตรต่อวินาทีไปทางทิศใต้ ในเดือนพฤษภาคม 2542 กระแสน้ำขึ้นไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด 0.85 เมตรต่อวินาทีไปทางทิศเหนือ กระแสน้ำลงไหลด้วยความเร็วเฉลี่ยสูงสุด 0.78 เมตรต่อวินาทีไปทางทิศใต้ เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศของแหลมผักเบี้ยทำให้กระแสน้ำเคลื่อนตัวขนานชายฝั่งในแนวเหนือใต้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 1

3.1 การเพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัวของเรือคายัคด้วยหุ่น

โดยปกติแล้วเรือคายัคมีความสามารถในการต้านคลื่นลมอยู่แล้วเนื่องจากมีการออกแบบให้สามารถท่องเที่ยวตามแนวชายฝั่งทะเลได้ เรือคายัคปกติที่มีคนพายนั่งไปด้วยจะมีจุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass CM) สูงกว่าเรือหุ่นยนต์ซึ่งไม่ต้องมีคนนั่งประจำการดังนั้นเรือหุ่นยนต์จึงมีความสามารถต้านคลื่นลมได้มากกว่าเรือคายัคที่มีคนประจำการ ซึ่งเสถียรภาพในการลอยตัวสามารถพิจารณาได้จากแรงลอยตัวและโมเมนต์ที่เกิดจากแรงลอยตัวและน้ำหนักที่จะต้องคำนึงถึง แรงลอยตัวในแนวตั้ง (B) นั้น จะเท่ากับ น้ำหนักของของไหลที่ถูกแทนที่ด้วยวัตถุ ($B = \rho g V_{\text{จม}}$) แรงลอยตัวอาจไม่อยู่ในแนวเดียวกับน้ำหนักของวัตถุซึ่งอาจทำให้วัตถุลอยตัวอย่างเสถียรภาพหรือไม่เสถียรภาพก็ได้ ถ้าการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการลอยตัวของแรงลอยตัวและน้ำหนักนั้นก่อให้เกิดเป็นโมเมนต์กลับคืน (ที่ช่วยให้การลอยตัวอย่างเสถียร) ดังในรูปที่ 3.1 ด้านซ้าย หรือก่อให้เกิดเป็นโมเมนต์พลิกคว่ำ (ที่ทำให้การลอยตัวไม่มีเสถียรภาพ) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้านขวา ดังนั้นในการออกแบบระบบหุ่นลอยน้ำที่ติดกับเรือคายัคจะต้องทำให้เกิดเป็นโมเมนต์กลับคืน ซึ่งจะช่วยให้การลอยอย่างมีเสถียรภาพ



รูปที่ 3.1: เสถียรภาพของการลอยตัวเมื่อหุ่นยนต์ลอยอยู่ที่ผิวน้ำ (1) แสดงโมเมนต์กลับคืน (2) แสดงโมเมนต์พลิกคว่ำ [8]

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าเราสามารถเพิ่มเสถียรภาพให้เรือคายัคได้โดยการเสริมทุ่นสองข้างลำตัวเรือ การออกแบบแบบนี้เป็นที่นิยมทำกันในหมู่ผู้นิยมการตกปลาซึ่งต้องการความคล่องตัวขณะตกปลาทำให้ต้องการเสถียรภาพขณะยืนอยู่บนตัวเรือ เราสามารถนำตัวอย่างการออกแบบทุ่นเสริมดังกล่าวมาใช้กับเรือหุ่นยนต์ได้เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการดำน้ำคลื่อนได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำเรือคายัคอัตโนมัติไปประยุกต์ใช้งานได้จริงทางทะเล การติดทุ่นถึงแม้จะมีข้อดีในการช่วยเสริมสมรรถนะในการดำน้ำทางคลื่อนแต่ก็มีข้อเสียคือทุ่นทั้งสองจะเพิ่มแรงต้านในการขับเคลื่อนและการเลี้ยวของหุ่นยนต์เรือ ดังนั้นเราจะต้องคำนึงถึงความยืดหยุ่นในการออกแบบทุ่นโดยอาจจะต้องมีระบบช่วยยกทุ่นขึ้นในกรณีที่เรือต้องการความคล่องตัวในการเคลื่อนที่และวางทุ่นลงเมื่อต้องการความเสถียรในการปฏิบัติงาน



รูปที่ 3.2: การเสริมทุ่นสองข้างเรือคายัค เพื่อเพิ่มสมรรถนะการดำน้ำคลื่อนในขณะปฏิบัติการ [12]

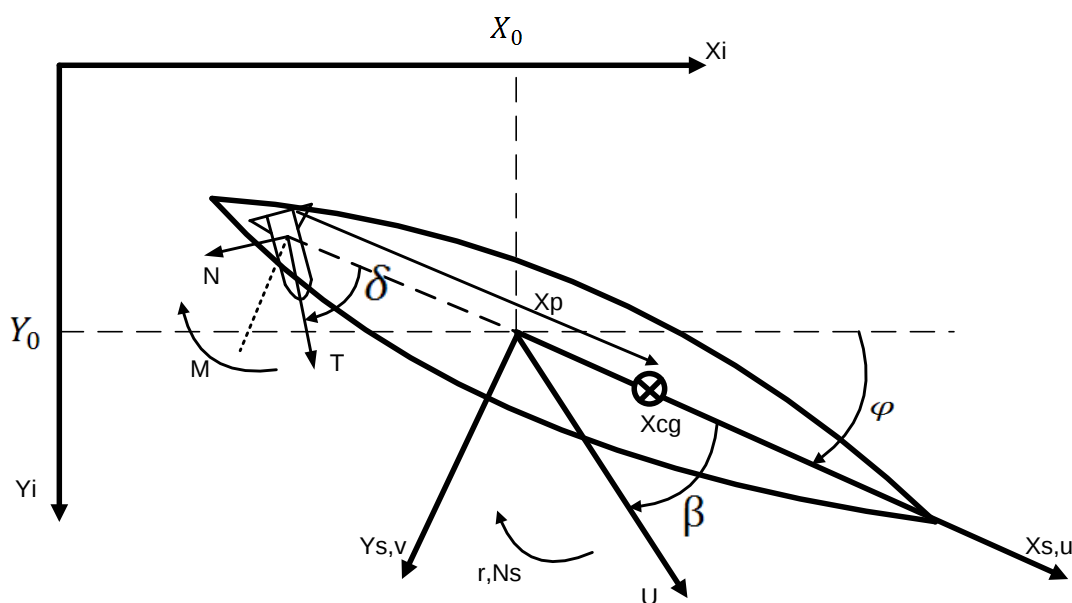
3.2 สมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพอร์เพลสชันที่นำมาวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จำลองการเคลื่อนที่ของเรือคายัค ซึ่งเป็นยานพาหนะผิวน้ำ (Surface Vehicle) โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับหรือ Full-State Feedback Control ร่วมกับ Observer และจะจำลองการเคลื่อนที่ของเรือให้เป็นไปตามจุดต่างๆที่กำหนดไว้ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำโปรแกรมมาแปลงเป็นภาษา LabVIEW เพื่อประยุกต์ใช้งานกับเรือคายัคจริง เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ตามพิกัดที่กำหนด

ในการศึกษาควบคุมอัตโนมัติ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือพลศาสตร์ของระบบที่เราจะทำการออกแบบตัวควบคุม J.W. Stettler [11] ได้แสดงสมการทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพอร์เพลสชันซึ่งอาจพิจารณาได้ว่าเป็นเคลื่อนที่บนผิวน้ำในระนาบ X-Y ดังแสดงในสมการที่ 3.1 โดยตัวแปรต่างๆได้แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.3

$$\begin{aligned}
 m(\ddot{u} - rv - x_{cg}r^2) &= X_0 + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u\Delta u + X_{uu}\Delta u^2 + X_{uuu}\Delta u^3 + X_wv^2 + X_{rr}r^2 + X_{wu}v^2\Delta u \\
 &+ X_{ru}r^2\Delta u + X_{vr}vr + X_{vru}vr\Delta u + F_{xp} + (\text{inter.terms}) \\
 m(\ddot{v} + ru + x_{cg}\dot{r}) &= Y_0 + Y_{0u}\Delta u + Y_{0uu}\Delta u^2 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{vv}v^3 + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_{rr}r^3 + Y_{vr}vr^2 + \\
 &Y_{vu}v\Delta u + Y_{vu}v\Delta u^2 + Y_{rv}rv^2 + Y_{ru}r\Delta u + Y_{ruu}r\Delta u^2 + F_y + (\text{inter.term}) \\
 I_z\dot{r} + mx_{cg}(\dot{v} + ru) &= N_0 + N_{0u}\Delta u + N_{0uu}\Delta u^2 + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_vv + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{rr}r^3 + N_{vv}v^3 + N_{vr}vr^2 + \\
 &N_{vu}v\Delta u + N_{vu}v\Delta u^2 + N_{rrr}r^3 + N_{rv}rv^2 + N_{ru}r\Delta u + N_{ruu}r\Delta u^2 + \\
 &x_pF_y + M + (\text{inter.terms})
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

โดยที่ X_i, Y_i = พิกัดอ้างอิงที่ไม่เคลื่อนที่ X_s, Y_s = พิกัดอ้างอิงของเรือที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ



รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่ปรากฏในสมการทางพลศาสตร์ การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพอร์เพลสชัน

โดยที่

m = น้ำหนักของเรือ (kg)

I_z = โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกน z (kg.m^2)

X_{cg} = จุดศูนย์กลางของมวล (m)

X_p = ระยะจากจุดศูนย์กลางของมวลของเรือไปถึงแกนเพลลาของพอดพรอเพาส์ชั้น (m)

U = เวกเตอร์ความเร็วเรือ (m/s)

u = ความเร็วในพิกัด x (m/s)

v = ความเร็วในพิกัด y (m/s)

r = ความเร็วเชิงมุมรอบแกน z (m/s)

φ = มุมของเรือกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉื่อย (earth-fixed frame) (degree)

δ = มุมที่พอดพรอเพาส์ชั้นกระทำกับพิกัดที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ (vehicle-fixed frame) (degree)

β = มุมความเร็วเรือที่เบี่ยงเบนจากพิกัดที่เคลื่อนที่ไปกับเรือ (vehicle-fixed frame) (degree)

F_x = แรงในพิกัด x จากพอดพรอเพาส์ชั้น (N)

F_y = แรงในพิกัด y จากพอดพรอเพาส์ชั้น (N)

N = แรงกระทำตั้งฉากกับพอดพรอเพาส์ชั้น (Normal Force) (N)

M = โมเมนต์ที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น (N.m)

จากสมการ 3.1 ซึ่งแสดงพลศาสตร์ของเรือที่เคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ แรง F_y คือแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นโดย พอดพรอเพาส์ชั้น M คือ Moment รอบพอดพรอเพาส์ชั้นจะเห็นว่าสมการ 3.1 มีลักษณะเป็น ไม่เชิงเส้น ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่เป็นไม่เชิงเส้น จะมีความยากและซับซ้อนมาก หากต้องการลดความซับซ้อนในการแก้สมการเราสามารถ Linearize สมการ 3.1 รอบความเร็ว u_0 ได้เป็น

$$(m - x_{\ddot{u}})\dot{u} = X_u u + F_x$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m x_{cg} - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_v v + Y_r r + F_y \quad (3.2)$$

$$(m x_{cg} - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_z \dot{z} - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_v v + N_r r + x_p F_y$$

เราสามารถเขียนสมการ 3.2 ในรูป Matrix ได้เป็น

$$M\dot{X} = NX + B_0F_y \quad (3.3)$$

โดย $X = [u \ v \ r]^T$ และ

$$M = \begin{bmatrix} (m - x_{\dot{u}}) & 0 & 0 \\ 0 & (m - Y_{\dot{v}}) & (mx_{cg} - Y_{\dot{r}}) \\ 0 & (mx_{cg} - N_{\dot{v}}) & (I_{zz} - N_{\dot{r}}) \end{bmatrix} \quad \text{และ}$$

$$N = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ x_p \end{bmatrix}$$

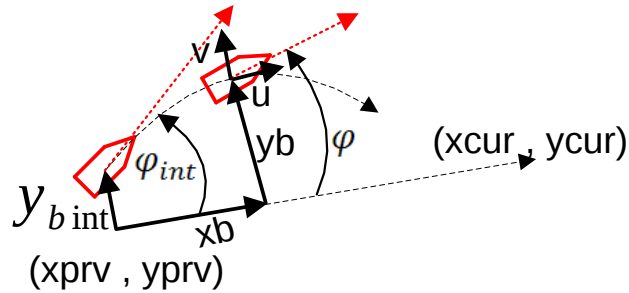
เราสามารถเขียนในรูปทั่วไปของ State Space Model ได้เป็น

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.4)$$

โดย $A = M^{-1}N$ และ $B = M^{-1}B_0$

ซึ่งสมการ 3.4 แสดงได้ในรูป

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} F_y \quad (3.5)$$



รูปที่ 3.4 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างจุดสองจุดใดๆ

พิจารณาเมื่อเรือเริ่มเคลื่อนที่จาก (x_{prv}, y_{prv}) ไปยัง (x_{cur}, y_{cur}) ไตๆมุมเริ่มต้นของเรือคือ ϕ_{int} และมุมที่เวลาใดๆคือ ϕ และตำแหน่งของเรือเทียบกับแนวแกนระหว่าง (x_{prv}, y_{prv}) กับ (x_{cur}, y_{cur}) ที่เรือเคลื่อนที่อยู คือ (x_b, y_b) จากรูปที่ 3.4 จะได้ว่า

$$\dot{x}_b = u \cos \phi - v \sin \phi \quad (3.6)$$

$$\dot{y}_b = u \sin \phi - v \cos \phi$$

เมื่อเรือเข้าใกล้ แนวการเคลื่อนที่ (φ มีค่าน้อยๆ) จะได้ $\sin\varphi \approx \varphi$, $\cos\varphi \approx 1$ สมการ 3.6 Linearize ได้เป็น

$$\dot{x}_b = u - v\varphi \cong u_0 \quad (3.7)$$

$$\dot{y}_b = u\varphi + v \cong u_0\varphi + v$$

จะเห็นว่าตัวแปรสถานะ (State) ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องมี 10 ตัว คือ

$$u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y$$

โดย $r = \frac{d\varphi}{dt}$, $\varphi = \frac{d\varphi_{int}}{dt}$, $y_b = \frac{dy_{bint}}{dt}$ เรานิยามตัวแปรสถานะทั้งหมดจะได้ว่า

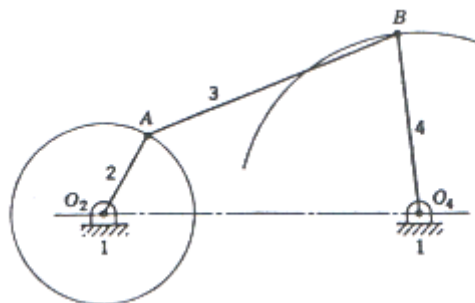
$$x = [u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y]^T \quad (3.8)$$

ซึ่งเป็นตัวแปรสถานะทั้งหมดที่เกี่ยวข้องซึ่งเราจะนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป

3.3 กลไกสี่แขนต่อ (Four-Bar Linkage)

กลไกชนิดนี้เป็นกลไกแบบง่ายๆ และมีประโยชน์มากชนิดหนึ่ง ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบพับเก็บหุ่นลอยน้ำเสริมข้างเรือคายัค โดยกลไกชนิดนี้จะประกอบไปด้วยชนิดต่อโยง 4 ชิ้น ชิ้นต่อโยง 1 อยู่กับที่ (Frame or Ground) ชิ้นต่อโยง 2 เป็นตัวขับ ซึ่งอาจหมุนได้รอบ (Rotate Completely) หรือเคลื่อนที่กลับไปกลับมา (Oscillate) ก็ได้ และจะทำให้ตัวตาม 4 เคลื่อนที่กลับไปกลับมา หรือหมุนได้รอบโดยขึ้นอยู่กับความยาวของชิ้นต่อโยงต่างๆ มีชิ้นต่อโยง 3 เป็นตัวผ่านการเคลื่อนที่ ทั้งนี้บางครั้งอาจจะใช้ชิ้นต่อโยง 4 เป็นตัวขับและชิ้นต่อโยง 2 เป็นตัวตามก็ได้

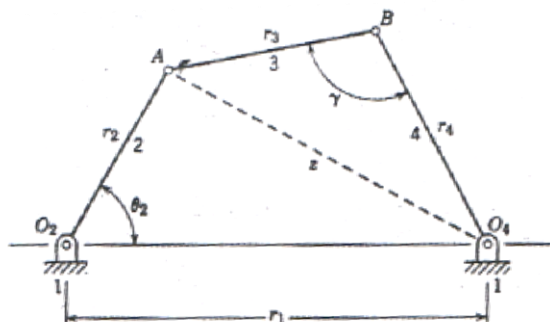
ในกรณีที่ชิ้นต่อโยง 2 ซึ่งเป็นขับหมุนได้รอบ จะไม่เกิดการติดขัด (Linkage Locking) แต่ถ้าชิ้นส่วนต่อโยง 2 เคลื่อนที่กลับไปกลับมาอาจเกิดการติดขัด ที่เรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า Dead Points ตำแหน่งที่เกิดจุดตาย (Dead Points) เป็นตำแหน่งปลายสุด ซึ่งเกิดเมื่อแนวเส้นส่งผ่านการเคลื่อนที่อยู่ในแนวเดียวกับชิ้นต่อโยง 4 การติดขัดแบบนี้อาจป้องกันได้ โดยพิจารณาสัดส่วนความยาวของชิ้นต่อโยงทั้งสิ้น ให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.5 กลไกชนิดต่อโยง 4 ชิ้น [2]

จุดตาย (Dead Points) จะเกิดขึ้นเหมือนกันถ้าเปลี่ยนให้ชิ้นต่อโยง 2 ซึ่งหมุนได้รอบเป็นตัวตามและชิ้นต่อโยง 4 ซึ่งเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นตัวขับ เมื่อกลไกเกิดติดขัด อาจจะใช้ล้อช่วยแรง (Flywheels)

ช่วยทำให้กลไกเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งจุดตาย (Dead Points) ไปได้ สิ่งสำคัญอีกอย่างหนึ่งซึ่งจะต้องพิจารณาในการออกแบบกลไกชนิดนี้ คือมุมการส่งผ่าน(Transmission) ซึ่งเป็นมุมระหว่างข้อต่อโยง 3 (Connecting Link or Coupler) และตัวตาม 4 เมื่อพิจารณากลไกในรูปที่ 3.6 มุม Transmission คือมุม γ ค่าของมุมการส่งผ่าน(Transmission) หาได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 มุมส่งผ่าน (Transmission) [2]

เมื่อนำกฎของโคไซน์ (Law of cosines) มาใช้กับ ΔAO_2O_4 และ ΔABO_4 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2 \quad (3.9)$$

$$z^2 = r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4 \cos \gamma \quad (3.10)$$

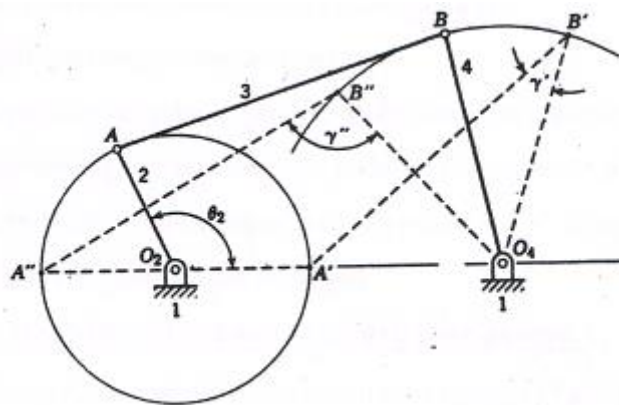
เมื่อให้ สมการ (3.9) = สมการ (3.10) จะได้

$$r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2 = r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4 \cos \gamma$$

$$\text{หรือ} \quad \cos \gamma = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2}{-2r_3r_4} \quad (3.11)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (3.11) ค่าของมุมการส่งผ่าน (Transmission (γ)) จะขึ้นอยู่กับความยาวของข้อต่อโยงทั้งสี่ของกลไกรวมทั้งมุม θ_2 ซึ่งเป็นมุมระหว่างตัวขับ 2 และข้อต่อโยง 1 ในตำแหน่งนั้น โดยทั่วไปในการออกแบบกลไกแบบสี่แขนต่อ (Four – Bar Linkage) มุมการส่งผ่าน (Transmission) จะมีค่าอยู่ระหว่าง $40^\circ - 140^\circ$ ถ้ามีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าช่วงที่กล่าวแล้วโอกาสที่กลไกจะเกิดติดขัดมีมาก ดังนั้นเมื่อมีการออกแบบกลไกชนิดนี้ ควรจะตรวจสอบ (Transmission) ด้วยรูปที่ 3.6 เป็นการแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่มุมการส่งผ่าน (Transmission) มีค่ามากที่สุด และน้อยที่สุดของกลไก Four – Bar Linkage ที่มีตัวขับ 2 หมุนได้รอบและตัวตาม 4 เคลื่อนที่กลับไปกลับมาโดย γ'' และ γ' เป็นมุมการส่งผ่าน (Transmission) ที่มีค่ามากที่สุด และน้อยที่สุดตามลำดับ

กลไกแบบสี่แขนต่อ (Four – Bar Linkage) แบ่งเป็น 3 ประเภทจากลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวขับและตัวตาม กล่าวคือ ประเภทที่ 1. ตัวขับหมุนได้รอบและตัวตามเคลื่อนที่กลับไปกลับมาจะเรียกว่า Crank Rocker ประเภทที่ 2. ตัวขับและตัวตามหมุนได้รอบ จะเรียกว่า Double Crank และ ประเภทที่ 3. เมื่อตัวตามและตัวขับเคลื่อนที่กลับไปกลับมา จะเรียกว่า Double Rocker



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่มุมการส่งผ่าน (Transmission) มีค่ามากที่สุด [2]

กฎของแกรชอฟท์ (Grashoff's Law) ช่วยให้สามารถแยกแยะประเภทของกลไกแบบสี่แขนต่อ (Four – Bar Linkage) ได้จากการพิจารณาขนาดของชิ้นต่อโยงต่างๆ ดังนี้

1. ถ้าผลบวกของความยาวของชิ้นต่อโยงที่ยาวที่สุดและสั้นที่สุด มากกว่าผลบวกของความยาวของชิ้นต่อโยงที่เหลือ กลไกนั้นจะเป็นประเภท Double Rocker

2. ถ้าผลบวกของความยาวของชิ้นต่อโยงที่ยาวที่สุดและสั้นที่สุด น้อยกว่าหรือเท่ากับผลบวกของความยาวของชิ้นต่อโยงที่เหลือ กลไกนั้นจะเป็นประเภทไหน ขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ดังนี้ คือ ก. Crank Rocker 2 แบบ ถ้าชิ้นต่อโยงที่สั้นที่สุดเป็นตัวขับ และชิ้นต่อโยงข้างเคียง (Adjacent Links) ทั้งสองชิ้นใดชิ้นหนึ่งเป็นชิ้นต่อโยงที่อยู่กับที่ และ ข. Double Crank เมื่อชิ้นต่อโยงที่สั้นที่สุดเป็นชิ้นต่อโยงที่อยู่กับที่ และ ค. Double Rocker เมื่อชิ้นต่อโยงที่อยู่ตรงข้ามชิ้นต่อโยงที่สั้นที่สุด เป็นชิ้นต่อโยงที่อยู่กับที่

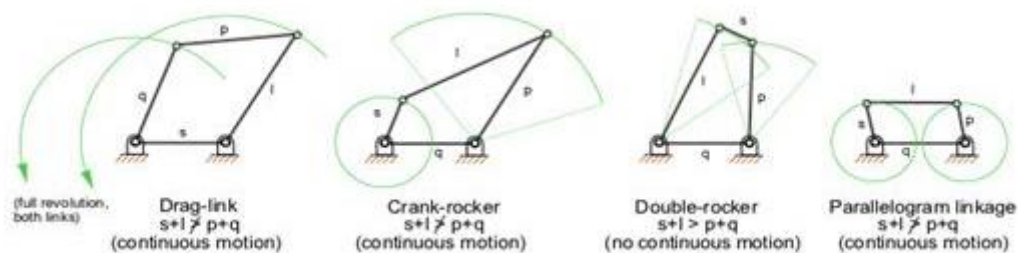
หรือกฎของแกรชอฟ (Grashof) ที่ใช้กันแพร่หลายในการศึกษากลไก 4 ก้านต่อว่าเป็นกลไกประเภทใดใน 4 ชนิดโดยดูจากสมการ (3.12)

$$s+1 < p+q \quad (3.12)$$

โดย l = ความยาวของก้านต่อที่ยาวที่สุด, s = ความยาวของก้านต่อที่สั้นที่สุด, p และ q = ก้านต่อที่เหลือชนิดของกลไกสี่ก้านต่อ

จากรูปที่ 3.8 ถ้าในกรณี $s+1 < p+q$: การเคลื่อนที่จะเป็นแบบที่ 1 (drag-link) ถ้าก้านต่อ s เป็น frame ที่ติดกับพื้น หรือ การเคลื่อนที่จะเป็นแบบที่ 2 (crank-rocker) ถ้าก้านต่อ s เป็น crank และอยู่ติดกับ frame ที่ติดกับพื้น

จากรูปที่ 3.8 ถ้าในกรณี $s+1 > p+q$: การเคลื่อนที่จะเป็นแบบที่ 3 (double-rocker) ถ้าก้านต่อตรงข้าม s เป็น frame หรือ การเคลื่อนที่จะเป็นแบบที่ 4 (parallelogram linkage) ถ้าก้านต่อ $s = p$ และ ก้านต่อ $l = q$



รูปที่ 3.8 ชนิดกลไก 4 ก้านต่อ [2]

3.3.1 ระนาบการเคลื่อนที่ 2 มิติ (Plane motion 2D)

- การเลื่อน (Translation) – เส้นทางการเคลื่อนที่ของทุกๆจุดบนวัตถุเกร็งจะมีลักษณะขนานกัน การเลื่อนแบบเส้นตรง (Rectilinear translation) – เส้นทางการเคลื่อนที่ของทุกๆจุดเป็นแบบเส้นตรงที่ขนานกัน และ การเลื่อนแบบเส้นโค้ง (Curvilinear translation) – เส้นทางการเคลื่อนที่ของทุกๆจุดเป็นแบบเส้นโค้งที่ขนานกัน
- การหมุน (Rotation) – การเคลื่อนที่ที่ทำให้ระยะห่างจากจุดใดๆ กับแกนหยุดนิ่งหรือจุด มีค่าคงที่
- การเลื่อนและการหมุน (Translation and rotation) – การเคลื่อนที่แบบข้างบนรวมกัน

3.3.2 การเคลื่อนที่แบบสามมิติ (Spatial motion 3D) – การเคลื่อนที่แบบ translation และ rotation ของวัตถุในระบบสามมิติ

- การเคลื่อนที่แบบเกลียว (Helical motion) – การเคลื่อนที่บังคับแบบหมุนรอบแกนและการเลื่อน (translation) ในแนวแกน
- การเคลื่อนที่แบบทรงกลม (Spherical motion) – ระยะจากจุดใดๆ ไปยังจุดที่กำหนดคงที่
- การเคลื่อนที่แบบทรงกระบอก (Cylindrical motion) – การเคลื่อนที่แบบหมุนอย่างอิสระรอบแกนและการเลื่อนอย่างอิสระ (free translation) ในแนวแกน

3.3.3 นิยามของตัวแปรที่ใช้กับกลไกสี่แขนต่อ

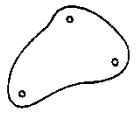
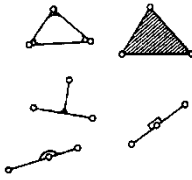
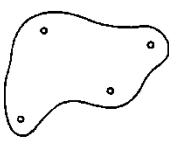
จุดต่อ (Joint) หรือ Kinematic pair – จุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนซึ่งอนุญาตให้มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์บังคับ (constrained relative motion) ตารางข้างล่างแสดงชนิดของจุดต่อ Joints ประเภทที่ 1 : คู่ที่ต่ำกว่า (Lower pairs) – การเชื่อมต่อของพื้นผิว (surface contact) และ ประเภทที่ 2 : คู่ที่สูงกว่า (Higher pairs) – การเชื่อมต่อของจุดหรือเส้น (Line or point contact)

ชนิดของชิ้นส่วน (Link types) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ประเภทที่ 1 : Binary link – ชิ้นส่วนแบบสองโนด และ ประเภทที่ 2 : Ternary link – ชิ้นส่วนแบบสามโนด และ ประเภทที่ 3 : Quaternary link – ชิ้นส่วนแบบสี่โนด

Linkage คือ กลไกที่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ได้อย่างน้อยสองชิ้น หรือ โครงสร้าง (Structure) ถ้าไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่เลย หรือ บางครั้ง Linkage (Kinematic chain) เป็นชุดของชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกันด้วยจุดเชื่อม

ระดับความอิสระ หรือ Degree of freedom (DOF) – จำนวนตัวแปรอิสระที่ใช้อธิบายตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งได้อย่างสมบูรณ์ เช่น DOF ของวัตถุแข็งเกร็งอิสระบนระนาบ = 3 และ DOF ของวัตถุแข็งเกร็งอิสระใน ปริภูมิ (space) = 6 และ DOF ของ joint, f – จำนวนตัวแปรอิสระที่จำเป็นต้องใช้ในการอธิบายตำแหน่งของชิ้นส่วนสองชิ้นที่เชื่อมต่อกัน

Degree of constraint ของ joint (DOC), u – ระดับความอิสระของวัตถุแข็งเกร็งอิสระ ที่เสียไปหลังจากถูกนำไปต่อเชื่อมกับชิ้นส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ด้วยจุดต่อ (joint) นั้นๆ เช่น DOF ของ joint (f) + DOC ของ joint (u) = DOF ของที่ว่าง (space) และ $f + u = 3$ ในระบบ 2D และ $f + u = 6$ ในระบบ 3D

Link types	Typical form	Skeleton diagram(s)
Binary		
Ternary		
Quaternary		

รูปที่ 3.9 ชนิดของชิ้นส่วน (Link types) [2]

3.4 ความเค้นเฉือนและมุมบิดในช่วงยึดหยุ่น

ในการออกแบบเพลลาที่ใช้ในการขับเคลื่อนอุปกรณ์ต่างๆ นั้นจะต้องคำนึงถึงค่าความเค้นเฉือนที่เกิดจากแรงบิด โดยเฉพาะเพลลาที่ยาว เช่น เพลลาของชุดขับ podded propulsion และ เพลลาของชุดขับเคลื่อนแบบขับเคลื่อนด้วยน้ำเสริมข้างเรือค้ายัค

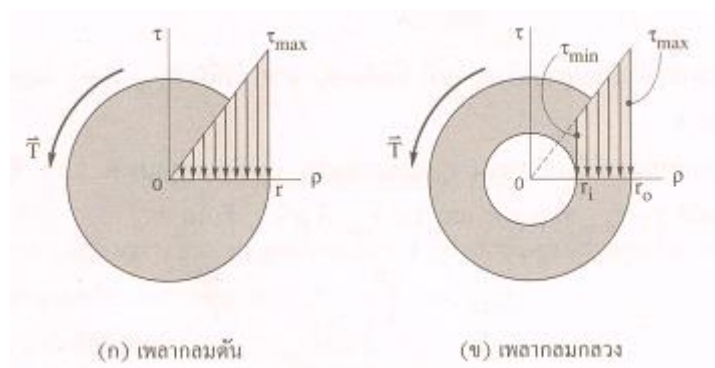
3.4.1 ความเค้นเฉือน

ในที่นี้พิจารณาเพลลากลมตันภายใต้ทอร์ก $\overline{T}$ (และมีขนาดเท่ากับ T) และกำหนดให้ความเค้นเฉือนมีค่าสูงสุดที่ผิวเพลลาแต่มีค่าไม่เกินความเค้นเฉือนคราก (τ_Y) ของวัสดุที่ใช้ทำเพลลา ในทางปฏิบัติแล้วจะพิจารณาให้ความเค้นเฉือนในเพลลาที่มีค่าสูงสุดไม่เกินขีดจำกัดความเค้นเฉือนและเป็นสัดส่วนและต่ำกว่าขีดจำกัดสภาพยึดหยุ่น อาศัยกฎของฮุกบอกความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) กับความเครียดเฉือน (γ) ของเพลลากลมตันในช่วงยึดหยุ่นในรูปของ

$$\tau = G\gamma \quad (3.13)$$

โดยที่ G คือมอดุลัสสภาพแข็งแรงแรงของวัสดุที่ใช้ทำเพลลา เมื่อแทนค่าความเครียดเฉือน (γ) ในสมการ 3.13 จะได้สมการหาความเค้นเฉือนในเพลลาดังนี้

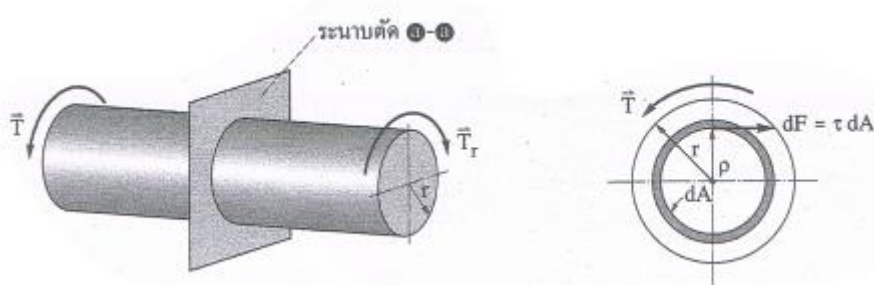
$$\tau = \left(\frac{\rho}{r}\right)\tau_{max} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.10 การกระจายของความเค้นเฉือนในเพลลาตันและกลวง [3]

ในสมการ 3.14 ถ้าความเค้นเฉือนในเพลลาตันมีค่าไม่เกินขีดจำกัดความเป็นสัดส่วนความเค้นเฉือนในเพลลาจะเปลี่ยนแปลงเชิงเส้นกับระยะ ρ ที่วัดในแนวรัศมีจากจุดศูนย์กลางของหน้าตัดเพลลา ถ้าพิจารณาการกระจายความเค้นเฉือนบนหน้าตัดของเพลลาตันจะได้ดังภาพ 3.10(ก) ที่จุดศูนย์กลางของหน้าตัดเพลลา ($\rho = 0$) นั้น $\tau = 0$ และที่ผิวเพลลา ($\rho = r$) นั้นเค้นเฉือนมีค่าสูงสุด ($\tau = \tau_{max}$) และภาพ 3.10(ข) แสดงการกระจายความเค้นเฉือนในเพลลาตันกลวงที่มีรัศมีภายใน r_i และภายนอก r_o ตามลำดับ จะเห็นว่าความเค้นเฉือนมีการกระจายเชิงเส้น โดยที่จุดศูนย์กลางนั้น $\tau = 0$ ที่ผิวเพลลาภายใน $\rho = r_i$ นั้น $\tau = \tau_{min}$ และที่ผิวเพลลาภายนอก ($\rho = r_o$) นั้น $\tau = \tau_{max}$ สำหรับเพลลาตันกลวง เนื่องจากในสมการ 3.14 นั้นแทนค่า $r = r_o$ และที่ $\rho = r_i$ นั้น $\tau = \tau_{min}$ ดังนั้น

$$\tau_{min} = \left(\frac{r_i}{r_o}\right)\tau_{max} \quad (3.15)$$



รูปที่ 3.11 แรงเฉือนด้านบนหน้าตัดของเพลลาส่วนที่อยู่ด้านซ้ายของระนาบตัด a – a [3]

พิจารณา τ_{max} สำหรับเพลลาตันรัศมี r ที่ถูกกระทำด้วยทอร์ก $\vec{T}$ และ $\vec{T}_r$ รอบแกนของเพลลา ในทิศทางภาพ 3.11 เลือกเพลลาส่วนที่อยู่ด้านซ้ายมือของระนาบตัด a – a เป็น FBD บนหน้าตัดเพลลา

พิจารณาพื้นที่วงแหวนรัศมี ρ และมีพื้นที่ dA แรงเฉือนต้าน $dF = \tau dA$ อยู่ในแนวตั้งฉากกับรัศมี ρ โดยโมเมนต์ต้านที่เกิดจากแรง dF รอบจุดศูนย์กลางจะมีทิศทางตรงข้ามกับการหมุนของ $\vec{T}$ และมีขนาดเท่ากับ $\int \rho dF = \int \rho \tau dA$ ภายใต้สภาวะสมดุลต่อการหมุนรอบแกนเพลลา จะได้

$$T = \int \rho dF = \int \rho \tau dA \quad (3.16)$$

จากสมการ 3.15 r และ τ_{max} เป็นค่าคงตัว ดังนั้น

$$T = \frac{\tau_{max}}{r} \int \rho^2 dA = \frac{\tau_{max}}{r} J \quad (3.17)$$

ดังนั้น

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} \quad (3.18)$$

ในสมการ 3.18 นี้ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้วรอบแกนเพลลาคลมตัน โดยที่ $J = \int \rho^2 dA$ มีหน่วยเป็น m^4 ส่วนทอร์ก T มีหน่วยเป็น $N.m$ และรัศมีเพลลา r มีหน่วยเป็น m จะได้ τ_{max} มีหน่วยเป็น N/m^2 หรือ Pa

สำหรับเพลลาคลมตันรัศมี r และเส้นผ่านศูนย์กลาง $d = 2r$ พบว่า $J = \pi r^4/2 = \pi d^4/32$ แทนค่าในสมการ 3.17 จะได้

$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad \text{สำหรับเพลลาคลมตัน} \quad (3.19)$$

3.4.2 มุมบิดของเพลลาคลม

ในรูปที่ 3.12 แสดงเพลลาคลมตันมีรัศมี r ยาว L โดยปลาย B เป็นปลายตรึง ปลาย A เป็นปลายอิสระ และมีทอร์ก $\vec{T}$ กระทำที่ปลาย A นั้น พิจารณามุมหน้าตัดเพลลาที่ปลาย A เมื่อเส้นขอบผิว AB บิดไปที่ตำแหน่ง $A'B$ มุมบิดของหน้าตัดระหว่างแนวเส้นรัศมี OA และ OA' เท่ากับ θ ดังนั้นความเครียดเฉือนที่ผิวเพลลา คือ $\gamma_{max} = \frac{r\theta}{L}$ โดยพิจารณาในช่วงยืดหยุ่น ตามกฎของฮุกที่ว่า

$\tau_{max} = \frac{\tau_{max}}{G}$ และสูตรคำนวณความเค้นเฉือนจากทอร์ก $\tau_{max} = \frac{Tr}{J}$ จะได้ $\gamma_{max} = \frac{Tr}{JG}$ ดังนั้น

$$\gamma_{max} = \frac{r\theta}{L} = \frac{Tr}{JG} \quad (3.20)$$

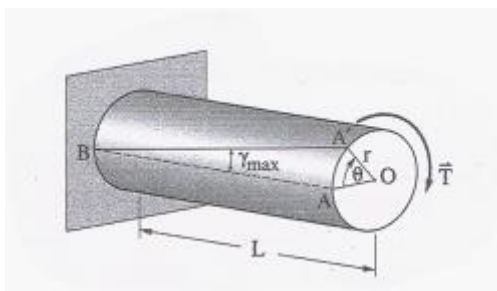
ดังนั้น

$$\theta = \frac{TL}{JG} \quad (3.21)$$

โดยที่ J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดทรงกลม ซึ่งคำนวณได้จากสูตร $J = \frac{\pi d^4}{32}$ ในสมการ

3.21 นี้ θ คือมุมบิด มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad) และกล่าวได้ว่า เมื่อเพลากลมรับภาระบิดในช่วงยืดหยุ่น จะพบว่ามุมบิดของเพลากลมจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับทอร์กภายนอกที่กระทำต่อเพลากลมดังกล่าว

ในการหามอดูลัสสภาพแข็งเกร็ง (G) ของวัสดุ จะอาศัยข้อมูลจากเครื่องทดสอบการบิด (torsion testing machine) โดยเตรียมชิ้นทดสอบเป็นแท่งทรงกระบอกตันที่ทราบความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง เครื่องทดสอบการบิดสามารถบันทึกมุมบิด θ ค่าต่างๆตามทอร์ก T ที่สามารถเพิ่มค่าได้ ภายใต้การพลอตกราฟระหว่าง T กับ θ จะได้กราฟเส้นตรง ความชันของเส้นกราฟที่ได้ก็คือปริมาณ JG/L และสามารถคำนวณค่า G ได้เนื่องจากทราบความยาว L และเส้นผ่านศูนย์กลาง d ของเพล



รูปที่ 3.12 มุมบิด θ ของเพลากลมตันภายใต้ทอร์ก $\vec{T}$ [3]

3.5 เรือและพอดพรอเพาส์ชั้น

3.5.1 เรือคายัค

เรือคายัค (kayak) เป็นเรือที่ใช้พลังงานมนุษย์ประเภทหนึ่ง มีลักษณะปิดทางด้านบนของเรือ และมีผ้าป้องกันน้ำเข้าเรือ (spray skirt) ใช้พายแบบมีใบพายสองด้าน คายัคต้นแบบถูกพัฒนาจากชนพื้นเมือง Aleut และ Inuit ซึ่งเป็นนักล่าจากเขตไต้อาร์คติก (อเมริกาเหนือ และกรีนแลนด์) เรือคายัคยุคใหม่นั้นมีการออกแบบและวัสดุที่หลากหลายมาก

คายัคนั้นสามารถบรรทุกผู้โดยสารได้หนึ่ง สอง หรือ สามในบางโอกาส ผ้าป้องกันน้ำเข้าเรือทำจากผ้ากันน้ำ ยึดติดกับขอบด้านบนของที่นั่ง ป้องกันคลื่นและละอองน้ำ และเป็นสิ่งที่ทำให้ "พลิกเรือ" หรือที่เรียกว่า Eskimo Roll ทำได้ ในกรณีที่เรือคว่ำน้ำ หากไม่มีผ้าหอน้ำเข้าเรือจะทำให้ น้ำไหลเข้าเรือ หรือช่วยให้ผู้พายสามารถออกจากเรือได้

คายัคนั้นมีความแตกต่างจากเรือแคนูอย่างสิ้นเชิงทั้งการออกแบบและประวัติความเป็นมาเรือแคนู เป็นเรือที่แทบจะเป็นเรือท้องแบน ใช้ใบพายเดี่ยว ถึงแม้ว่าเรือแคนูรุ่นใหม่ ๆ จะมีความยากสำหรับผู้ที่ไม่รู้เรื่องในการแยกแยะประเภทออกจากคายัคแต่สำหรับในอังกฤษและไอร์แลนด์ก็มีการเรียก คายัคว่าเป็นเรือแคนูแทน

การแยกประเภทของเรือคายัคนั้นสามารถแยกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) เรือคายัคแบบ Sit-inside เป็นคายัครูปแบบดั้งเดิมที่ผู้พายจะต้องสอดตัวเข้าไปในเรือโดยมีผ้าคลุมปิดเพื่อป้องกันน้ำเข้าเรือจะมีทั้งแบบเรือที่ใช้ท่องเที่ยวระยะไกล เรือแบบล่อง แก่ง ให้เลือกตามความต้องการในการใช้งาน

Atlantis 12 ดังแสดงในรูปที่ เป็น เรือคายัค Sit inside 1 ที่นั่ง ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เหมาะกับการพายทัวร์ริ่งและเพื่อการพักผ่อน (Recreational Touring) ด้วยการออกแบบให้มีความเพรียว โดยมีคุณสมบัติทางกายภาพ คือ มีความยาว 3.85 m, ความกว้าง 68 cm, น้ำหนักโดยไม่ได้บรรจุทุกโหลด 18.50 kg, รับน้ำหนักได้สูงสุด 104.30 kg ทำให้สามารถใช้ความเร็วในการพายได้ดี มีความมั่นคงสูง สะดวกสบาย ด้วยที่นั่งที่ออกแบบได้อย่างลงตัว นอกจากนี้ยังมีห้องเก็บสัมภาระกันน้ำด้าน หน้าและด้านหลัง สำหรับคนที่ต้องการแคมป์ปิ้ง และต้องการพายคายัคท่องเที่ยวลัดเลาะตามชายหาด หรืออยากที่จะไปค้างที่เกาะใดเกาะหนึ่งได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.13 เรือคายัคแบบ Sit-inside [13]

2) เรือคายัคแบบ Sit-on-top เป็นคายัครูปแบบใหม่ที่ได้พัฒนาให้พายได้ง่ายและสะดวก มากยิ่งขึ้น ข้อดีคือจะไม่จมน้ำเนื่องจากตัวเรือจะถูกปิดหมด โดยผู้พายจะนั่งอยู่ด้านบนของเรือ ถ้าเรือจะมีรูระบายน้ำเพื่อให้ น้ำที่สาดกระเซ็นเข้ามาสามารถระบายออกไปได้ ใช้พายเล่นท่องเที่ยวหรือล่องแก่งในระดับเริ่มต้น แต่จะไม่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากไม่มีช่องเก็บสัมภาระ



รูปที่ 3.14 เรือคายัคแบบ Sit-on-top [13]

3.5.2 พอดพรอเพาส์ชั้น

พอดพรอเพาส์ชั้น เป็นระบบขับเคลื่อนเรือด้วยใบพัดที่ติดกับมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนการควบคุมน้ำจะคล้ายกับเครื่องยนต์น้ำมันโดยการบังคับให้ใบพัดหมุนซ้ายหรือขวา โดยที่มอเตอร์ไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องมีการระบายความร้อนเนื่องจากอยู่ในน้ำอยู่แล้ว พอดพรอเพาส์ชั้นที่นิยมใช้จะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์, 24 โวลต์หรือ 36 โวลต์ รุ่นที่เลือกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นรุ่น Riptide Transom จาก Minn Kota ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งมีข้อดีหลักคือสามารถปฏิบัติงานในน้ำทะเลได้เนื่องจากได้ออกแบบให้มีแผ่นกันการออกซิไดซ์จากเกลือในน้ำทะเล โดยใบพัดจะเป็นแบบ Weedless Wedge ที่สามารถตัดวัชพืชที่เข้ามาติดพันได้ ส่วนก้านยึดมอเตอร์ไฟฟ้าจะทำจากวัสดุ composite ในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้าจะให้แรงขับสูงสุด 80 ปอนด์



รูปที่ 3.15 พอดพรอเพาส์ชั้นรุ่น Riptide Transom จาก Minn Kota [14]

4. ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยของโครงการวิจัยที่ 1

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น สี่ ส่วนหลักด้วยกัน ดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือที่ขับเคลื่อนโดย podded propulsion ในคอมพิวเตอร์โดยเน้นการออกแบบ Observer ที่เหมาะสมกับพลศาสตร์ของเรือ
2. การเขียนโปรแกรมควบคุมเรือฯจริงรวมถึงการทดสอบในน้ำเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองและการออกแบบ Observer
3. งานพัฒนาระบบและโครงสร้างบางส่วนของเรือเพื่อให้เหมาะต่อการนำไปใช้ในทะเลเช่นการฝึกกันน้ำ การเปลี่ยนไปใช้ระบบขับเคลื่อน (Trolling motor) แบบที่ทนต่อการกัดกร่อนของน้ำเค็ม การจัดวางอุปกรณ์ภายในเรือตามหลักการกระจายน้ำหนัก
4. การใช้งานวิจัยจากโครงการย่อยที่ 1 ในเรื่องของการประยุกต์ใช้เทคนิค Kalman Filtering ในการช่วยให้ข้อมูลในการควบคุมเรือมีความเชื่อมั่นได้มากยิ่งขึ้น
5. การใช้เครื่องมือทดสอบเช่นเครื่อง Salt Spray machine ในการทดสอบความสามารถในการทนการกัดกร่อนจากความชื้นและไอเค็มของกลไกหรือโครงสร้างที่จะประกอบเป็นระบบเรืออัตโนมัติ

โดยในระยะ 3 เดือน แรก จะเป็นช่วงสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือที่ขับเคลื่อนโดย podded propulsion ในคอมพิวเตอร์ และ ในขณะเดียวกัน ก็จะออกแบบระบบที่ 2 และ 3 ไปพร้อมกัน โดยจะต้องบูรณาการทั้ง 2 ระบบเข้าด้วยกัน และ ส่วนของระบบควบคุม Heading สามารถออกแบบกับแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ก่อนนำไปทดสอบกับเรือจริง แต่ในช่วง 6 เดือนต่อมา ในระบบแต่ละส่วนสามารถแยกพัฒนาและทดสอบไปพร้อมๆกันได้ ส่วนในช่วง 3 เดือนสุดท้าย จะนำทั้งสามระบบมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบทั้งหมด โดยระบบจะต้องมีเสถียรภาพและมีความผิดพลาดน้อย

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัยย่อยที่ 1 ของการศึกษาและพัฒนาเรืออัตโนมัติเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะใหญ่ๆด้วยกันดังนี้

- **ระยะที่ 1:** 1-3 เดือน :
 - a. การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือที่ขับเคลื่อนโดย podded propulsion ในคอมพิวเตอร์
 - b. ออกแบบโครงสร้าง ระบบ และกลไกต่างๆภายในเรืออัตโนมัติ (แบบปรับปรุงใหม่)
 - c. สอบถามราคาวัสดุอุปกรณ์
- **ระยะที่ 2:** 3-6 เดือน :
 - a. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์เพื่อนำมาปรับปรุงระบบเรืออัตโนมัติ
 - b. ออกแบบและทดสอบระบบควบคุม Heading ของเรืออัตโนมัติในคอมพิวเตอร์
 - c. เขียนรายงานความก้าวหน้า

- **ระยะที่ 3:** 6-9 เดือน :
 - a. สร้างหรือประกอบระบบที่ได้ออกแบบปรับปรุงแล้ว
 - b. นำระบบควบคุม Heading ที่ได้ออกแบบในคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้จริง
- **ระยะที่ 4:** 10-12 เดือน :
 - a. ทำการทดสอบระบบต่างๆเข้าด้วยกัน และทำการปรับปรุงแก้ไข
 - b. สรุปผลการดำเนินงาน
 - c. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

5. ผลการวิจัยของโครงการย่อยที่ 1

สามารถแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อหลักๆได้ดังนี้

1. การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว (Full-State Feedback Control Design)
2. การออกแบบและสร้างชุดเครื่องท้ายเรือคายัคอัตโนมัติสำหรับใช้งานในทะเล
3. ฟันลอยสำหรับการทรงตัว (Balance Buoys)
4. ระบบระบายอากาศภายในห้องคอมพิวเตอร์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ประจำเรือ
5. การสร้างวงจรวัดแรงดันแบตเตอรี่เรือเพื่อตรวจสอบระยะเวลาที่เหลือในการปฏิบัติการ

5.1 การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว (Full-State Feedback Control Design)

ในการนำตัวแปรสถานะ ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง มาใช้ในระบบการควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัวเราจะต้องสร้าง State Space Model ดังสมการ 3.4 โดยนำ ตัวแปรสถานะ (State) ทั้งหมด มาประกอบเป็นสมการ 3.4 จะมีเมตริกซ์ A และ B ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \lambda_1 \lambda_2 \quad 0]^T \quad (5.2)$$

และ $u = F_{ycmd} \quad (5.3)$

ในตอนนี้เราสามารถแสดงแบบจำลองในรูปสมการของตัวแปรสถานะได้เป็น

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5.4)$$

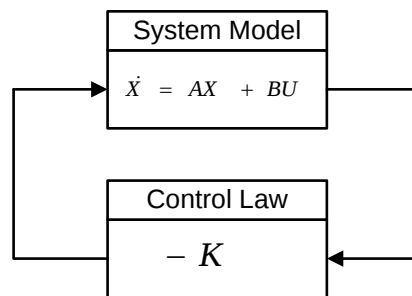
โดยตัวแปรสถานะของระบบคือ

$$x = [u \quad v \quad r \quad \varphi \quad \varphi_{int} \quad x_b \quad y_b \quad y_{bint} \quad \dot{F}_y \quad F_y]^T$$

โดย u, v คือความเร็วในแนวแกน x และ y ของเรือ และ r, φ คืออัตราเร็วเชิงมุม และองศาการหมุนของหัวเรือ และ x_b, y_b คือตำแหน่งของเรือ ณ เวลาต่างๆ และ $F_y, \dot{F}_y$ คือแรงและอนุพันธ์ของแรงที่มากระทำจากพอดพรวดพราดขึ้นและ φ_{int}, y_{bint} คือเงื่อนไขเริ่มต้นของเรือในช่วงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากพิกัดเริ่มต้นไปยังพิกัดปลาย ในการวิจัยนี้ใช้ $\lambda_1 = 6, \lambda_2 = 4, u_0 = 1$

ในขั้นแรก จะแสดงการออกแบบ ค่าคงที่ในการควบคุมแบบป้อนกลับโดย ถ้าพิจารณา ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัว ดังรูปที่ 5.1 โดยกำหนด ทฤษฎีระบบควบคุมให้เป็นแบบ PID Control แรงในแนวแกน y (F_{ycmd}) เพื่อควบคุม ให้เรือเคลื่อนที่ ตามแนวเส้นตรงจากจุดพิกัดเริ่มต้น ไปยังจุดพิกัดปลาย โดยจะนิยาม (F_{ycmd}) ดังนี้ [2]

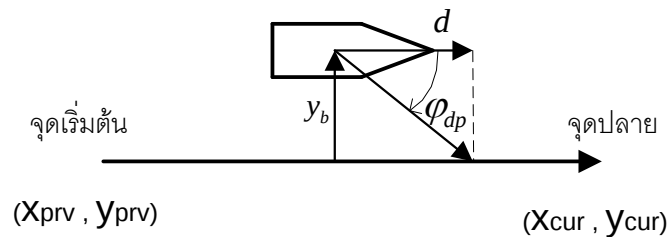
$$F_{ycmd} = -K_{pH}(\varphi - \varphi_d) - K_{dH}r - K_{iH} \int (\varphi - \varphi_d) dt \quad (5.5)$$



รูปที่ 5.1 Full-State Feedback Block Diagram

ซึ่งจะต้องพิจารณาค่า K ที่เหมาะสมต่อไป

พิจารณาในขณะที่เรือเคลื่อนที่โดยอยู่นอกเส้นทางเป็นระยะ y_b ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนภาพขณะเรือเคลื่อนที่อยู่นอกเส้นทาง

จะได้ว่า
$$\varphi_{dp} = -\tan^{-1} \frac{y_b}{d} \quad (5.6)$$

ถ้ามีขนาดเล็กลงสมการที่ (5.6) สามารถ Linearize ได้เป็น

$$\varphi_{dp} = -\frac{1}{d} y_b = -K_p y_b \quad (5.7)$$

ซึ่งค่า $1/d$ ก็คือ Proportional Gain (K_p) ของ กฎควบคุม (Control Law) ส่วนควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control) และ ส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) ถูกรวมเข้าไปใน กฎ

ควบคุม (Control Law) เพื่อชดเชยแรงจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่มากระทำกับเรือ เช่นคลื่น ลม และเพื่อให้ระบบมี การแกว่ง เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจากส่วนควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Control)คือ

$$\varphi_{di} = -K_i y_{bint} \quad (5.8)$$

และทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก ส่วนควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) คือ

$$\varphi_{dd} = -K_d(v + u_0\varphi) \quad (5.9)$$

ดังนั้นทิศทางของหัวเรือที่ต้องการเนื่องจาก ส่วนควบคุม ทุกตัวเขียนได้เป็น

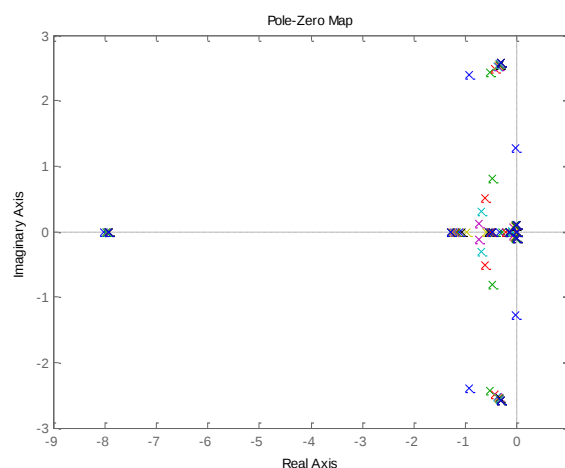
$$\varphi_d = \varphi_{dp} + \varphi_{di} + \varphi_{dd} \quad (5.10)$$

นำ (5.7),(5.8),(5.9) และ (5.10) แทนใน (5.11) และจัดรูปใหม่จะได้

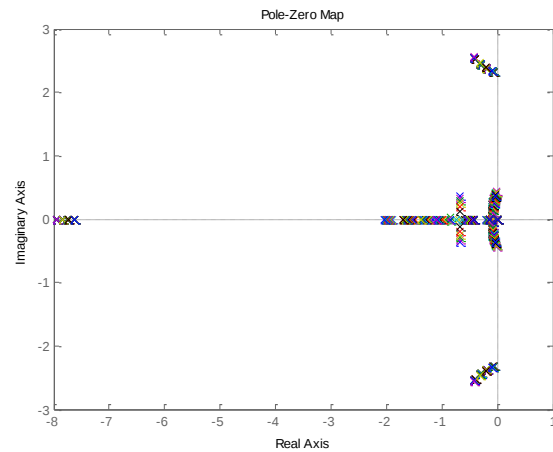
$$F_{ycmd} = -Kx \quad (5.11)$$

โดยที่ $K = [0 \quad K_{pH}K_d \quad K_{dH} \quad K_{pH}(1 + K_d u_0) \quad K_{iH} \quad 0 \quad K_{pH}K_p \quad K_{pH}K_i \quad 0 \quad 0]$ (5.12)

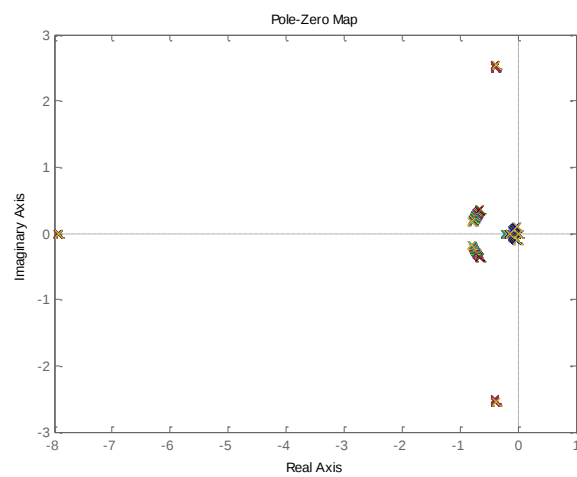
จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ตำแหน่ง Pole-Zero ของการป้อนกลับแบบลูปิดเมื่อค่า d เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า d ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-15 (K_p อยู่ในช่วง 0.066-1) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ในงานวิจัยนี้ได้เลือก d=4 ($K_p=0.25$) เมื่อใช้ d=4 และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ ตำแหน่ง Pole-Zero ของการป้อนกลับแบบลูปิด เมื่อ K_i , K_d และ K_{iH} เปลี่ยนแปลงจะได้ว่าค่า K_i ที่ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพ มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.15 และ K_d มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.3 ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ K_{iH} มีค่าอยู่ในช่วง 0 - 0.004 ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.3 Close-Loop Pole-Zero ของ d=1 ถึง 15



รูปที่ 5.4 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$, $k_i=[0-0.15]$ และ $k_d=[0-0.3]$



รูปที่ 5.5 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$, $k_i=[0-0.15]$, $k_d=[0-0.3]$ และ $K_{IH}=[0-0.004]$

จากงานวิจัยของ Greytak [15] ได้ให้ความสัมพันธ์ K_{pH} และ K_{dH} ที่สัมพันธ์กับตัวแปรของเรือไว้ดังนี้

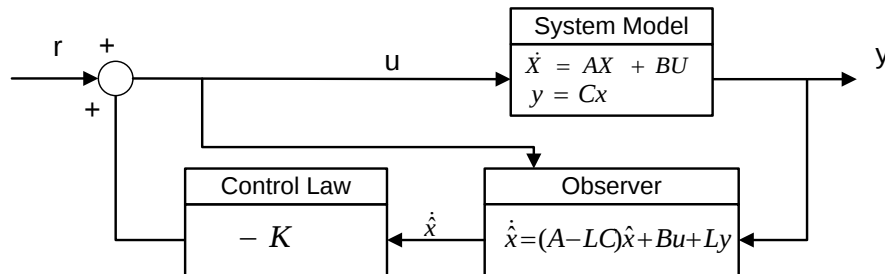
$$K_{dH} = \frac{2\lambda(I_{zz} - N_r) + N_r}{x_p} \quad (5.13)$$

$$K_{pH} = \frac{\lambda^2(I_{zz} - N_r)}{x_p} \quad (5.14)$$

ในงานวิจัยนี้ ถ้าใช้ตัวแปรของเรือที่สร้างขึ้นจะได้ $K_{pH}=0.0183$ $K_{dH}=0.226$ ซึ่งจะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกับค่า K_i , K_d และ K_{IH} ที่เราเลือกใช้

5.1.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะทุกตัวร่วมกับ Observer Estimator [13]

เราสามารถนำ Observer มาใช้เพื่อประมาณค่า State ของเรือเพื่อใช้ร่วมกับ กฎควบคุม (Control Law) ดังแสดงใน รูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 Block Diagram ของ Full Order Observer

DG Luenberger ได้ให้นิยามของ Observer ของระบบไว้ดังนี้

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (5.15)$$

โดย $\hat{x}$ คือ ค่าประมาณของตัวแปรสถานะ State (x) และ L คือ Observer Gain Matrix โดย Observer มี อินพุต 2 ตัวคือ u และ y และให้ เอาพุต เป็น $\hat{x}$ เนื่องจากเราไม่รู้ค่าเริ่มต้นของ $x(t_0)$ เราจึงต้องกำหนด ค่า เริ่มต้น $\hat{x} = 0$ ให้แก่ Observer ด้วยตามหลักการของ Observer เมื่อ $t \rightarrow \infty$ ค่าประมาณของ State จะมีค่า เข้าใกล้ค่า State ($\hat{x} \rightarrow x$) ค่าความผิดพลาด $e(t)$ ค่าประมาณที่ได้จาก Observer แสดงได้ดังนี้

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (5.16)$$

และค่าความผิดพลาดจะเข้าใกล้ศูนย์เมื่อ $t \rightarrow \infty$ จะได้ $e(t) \rightarrow 0$ จากความจริงอันนี้ เราจึงสามารถหาค่า L ที่ทำให้ $e(t)$ มีความเสถียรได้ จากสมการ (5.16) หาอนุพันธ์ของความผิดพลาด $e(t)$ จะได้

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} \quad (5.17)$$

แทน (5.4) และ (5.15) ลงใน (5.17) จะได้

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (5.18)$$

จะได้ว่า ทุกค่าเริ่มต้น $e(t_0)$ ใดๆ เมื่อ $t \rightarrow \infty$ จะทำให้ $e(t) \rightarrow 0$ ถ้าหาก

เมตริก $A-LC$ มีรากอยู่ด้านซ้ายมือของ S-Plane

$$\det(\lambda I - (A - LC)) = 0 \quad (5.19)$$

ซึ่งจะนำมาใช้ในการปรับค่า L จากตำแหน่ง Pole ที่ต้องการได้

5.1.2 การลดลำดับชั้น (Reduced-Order) ของเทคนิคการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

ในการใช้งานทางการควบคุมทั่วไป มักจะพบปัญหาว่า ตัวแปรสถานะ บางตัวสามารถวัดค่าได้ แต่บางตัวไม่สามารถวัดค่าได้ เนื่องจากสาเหตุต่างๆไป เช่น อุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์บางตัวมีราคาสูงมาก หรือพารามิเตอร์บางตัวไม่สามารถ วัดด้วยเซนเซอร์ในงานจริงที่มีสภาพแวดล้อมที่จำกัดได้ เราสามารถใช้หลักการ Reduced-Order เพื่อให้ Observer ประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดได้ด้วยเซนเซอร์ที่มีอยู่ในงานวิจัยนี้ เรามีตัวแปรสถานะ 10 ตัว คือ

$$x = [u \ v \ r \ \varphi \ \varphi_{int} \ x_b \ y_b \ y_{bint} \ \dot{F}_y \ F_y]^T \quad (5.20)$$

สมมติว่าเรากำหนดให้ $u \ v \ \dot{F}_y \ F_y$ เป็นตัวแปรสถานะที่ไม่สามารถวัดค่าได้ เราจะประยุกต์ใช้หลักการ Reduced-Order ได้โดยการจัดเรียงสมการตัวแปรสถานะ (Partition State Equation) ให้เป็นส่วนที่วัดค่าได้และส่วนที่วัดค่าไม่ได้

$$A = \begin{bmatrix} a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} & \vdots & 0 & b_1 \\ a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} & \vdots & 0 & b_2 \\ a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & \vdots & 0 & b_3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ \hline 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \left. \begin{array}{l} \text{วัดค่าไม่ได้} \\ \text{วัดค่าได้} \end{array} \right\}$$

สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{array}{cccc} \text{mx1} & \text{mxm} & \text{mx(n-m)} & \text{mx1} \\ x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}; C = [I_m \ 0] & (5.21) \\ \text{(n-m)x1} & \text{(n-m)xm} & \text{(n-m)x(n-m)} & \text{(n-m)x1} \end{array}$$

โดยในระบบของเรื้อจะมีตัวแปรสถานะและเมตริกซ์ย่อยในสมการ 5.21 ดังนี้

$$x_1 = [r \ \varphi \ \varphi_{int} \ x_b \ y_b \ y_{bint}]^T, \quad x_2 = [u \ v \ \dot{F}_y \ F_y]^T$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{12} \\ a_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{21} & a_{22} \\ a_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & a_{32} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & b_1 \\ 0 & b_2 \\ 0 & b_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & u_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -(\lambda_1 + \lambda_2) & -\lambda_1 \lambda_2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad \text{และ} \quad B_2 = [0 \ 0 \ \lambda_1 \lambda_2 \ 0]^T$$

จากส่วน สมการตัวแปรสถานะที่วัดค่าไม่ได้ทางด้านล่างในสมการ (5.21) จะได้ว่า

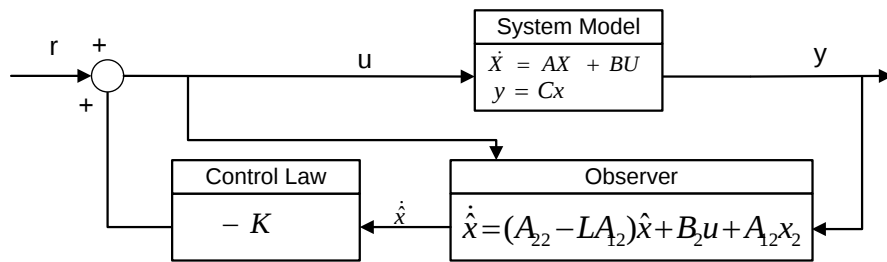
$$\dot{x}_2 = A_{22}x_2 + \{A_{21}x_1 + B_2u\} \quad (5.22)$$

จากส่วน สมการตัวแปรสถานะที่วัดค่าได้ทางด้านบนในสมการ (5.21) จะได้ว่า

$$\{\dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1u\} = A_{12}x_2 \quad (5.23)$$

โดย $\{A_{21}x_1 + B_2u\}$ คือ อินพุต และ $\{\dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1u\}$ คือเอาต์พุต

ทำให้เราได้ว่าระบบ Reduced-Order Observer ดังแสดงในรูปที่ 5.7 Reduced-Order Observer ที่ได้จากวิธีการนี้บางครั้งมีชื่อว่า Luenberger Reduced-Order Observer



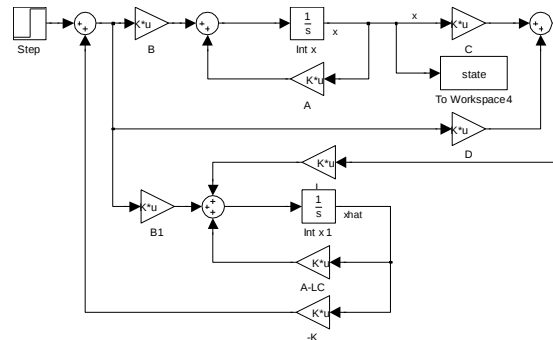
รูปที่ 5.7 Block Diagram ของ Reduced Order Observer

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer ที่ประยุกต์ใช้กับเรือ จะเห็นว่าขนาดของ เมทริกซ์ สำหรับ Reduced-Order Observer มีขนาดน้อยกว่าขนาดของเมทริกซ์สำหรับ Full-Order Observer เนื่องจากในเทคนิค Reduced-Order Observer ไม่จำเป็นต้องประมาณค่าตัวแปรสถานะทั้ง 6 ตัว $[r, \varphi, \varphi_{int}, x_b, y_b, y_{bint}]$ หรือนำค่าที่วัดได้จริงจากเซนเซอร์ มาใช้ในการป้อนกลับค่า Gain โดยตรงได้เลย ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของ Reduced-Order Observer ที่ทำให้ตัวแปรในการคำนวณน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลของระบบควบคุมลงด้วย ดังจะเห็นได้ว่า เวลาที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือคายัคใน MATLAB/Simulink โดยเป็นเวลาในการจำลองการเคลื่อนที่จากจุดพิกัดหนึ่งไปยังอีกจุดพิกัดหนึ่งที่มีระยะห่างกัน 20 เมตร

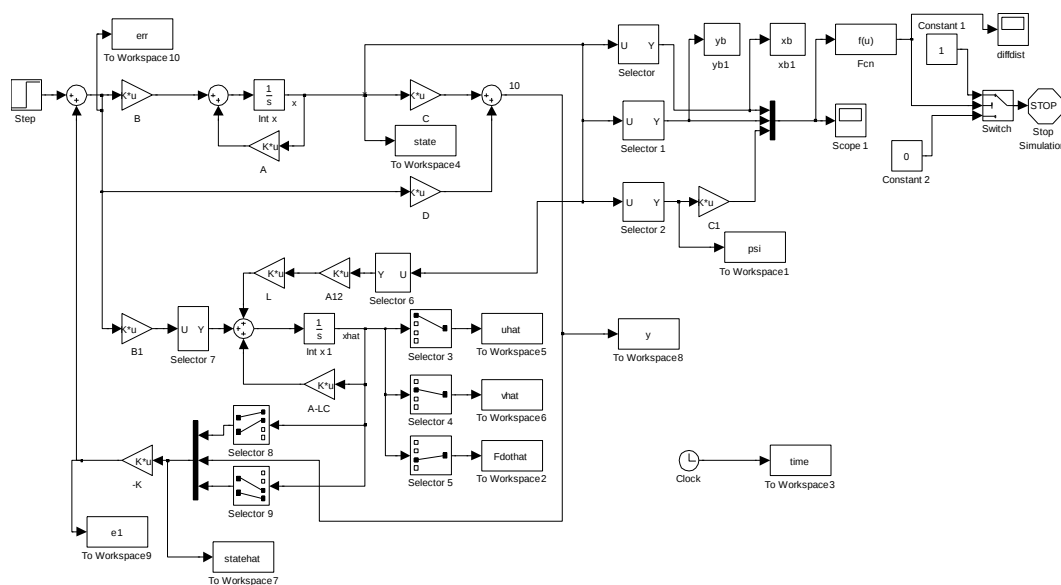
5.1.3 การจำลองการเคลื่อนที่ของเรือด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

การจำลองการเคลื่อนที่ในที่นี่ใช้ โปรแกรม MATLAB ในการ จำลองการเคลื่อนที่ โดยสร้าง พารามิเตอร์ต่างๆของเรือไว้ใน M-File และเรียกใช้ Simulink ในการแก้สมการเพื่อคำนวณหาผลลัพธ์ของ ตัวแปรสถานะ ที่เวลาต่างๆ โดยการใช้ระบบควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Full-Order Observer ดังแสดงในรูปที่ 5.8 และการควบคุมแบบ Full-State Feedback ร่วมกับ Reduced-Order Observer ดังแสดง ในรูปที่ 5.9

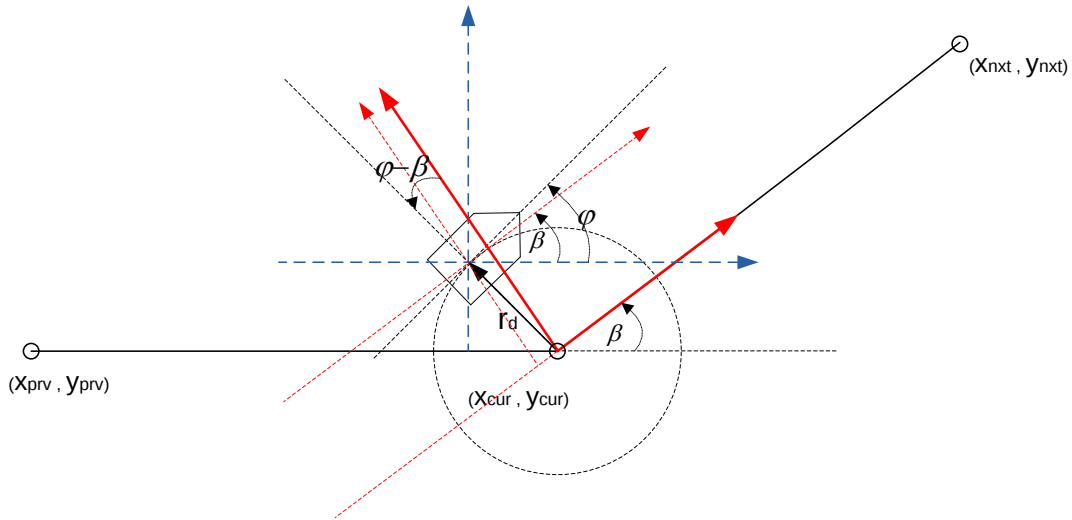
การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ไปยังแนวการเคลื่อนที่ใหม่ นั้นจะพิจารณาได้ดังนี้ เดิมการเคลื่อนที่ของ เรือ จะอยู่ในแนวเส้นตรงระหว่างจุดพิกัด (x_{prv}, y_{prv}) กับ (x_{cur}, y_{cur}) และกำลังจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่ไปใน แนวเส้นตรงที่สองระหว่างจุดพิกัด (x_{cur}, y_{cur}) กับ (x_{nxt}, y_{nxt}) เราจะสร้างวงกลมรัศมี r_d เป็นตัวช่วยบ่งบอก การสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงแรกและจะเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงที่สอง ดัง แสดงในรูปที่ 15 โดย ϕ คือทิศทางของการเคลื่อนที่ของหัวเรือ



รูปที่ 5.8 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Full-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink



รูปที่ 5.9 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Reduced-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink



รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ จากแนวเส้นตรงแรกไปยังแนวเส้นตรงที่สอง

จากรูปที่ 5.10 เราจะได้ว่า มุมสัมพัทธ์ระหว่างแนวการเคลื่อนที่เก่าและใหม่ (β) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\beta = \tan^{-1} \frac{(y_{nxt} - y_{cur})}{(x_{nxt} - x_{cur})} - \tan^{-1} \frac{(y_{cur} - y_{prv})}{(x_{cur} - x_{prv})} \quad (5.24)$$

เราสามารถกำหนดค่ามุมเริ่มต้นของเรือเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\varphi_{new} = \varphi - \beta \quad (5.25)$$

และสามารถกำหนด ตำแหน่งเริ่มต้นเทียบกับพิกัดใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} x_{new} &= -r_d \cos(\varphi - \beta) \\ y_{new} &= r_d \sin(\varphi - \beta) \end{aligned} \quad (5.26)$$

ในการจำลองการเคลื่อนที่ เราจะเขียนคำสั่งใน M-File ให้มีการกำหนดค่าเริ่มต้นของ φ, x, y ใหม่เมื่อเรือเข้ามาอยู่ในรัศมีของของวงกลม r_d จะเกิดการเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดใหม่ ทำให้แบบจำลองเรือสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดต่างๆที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง

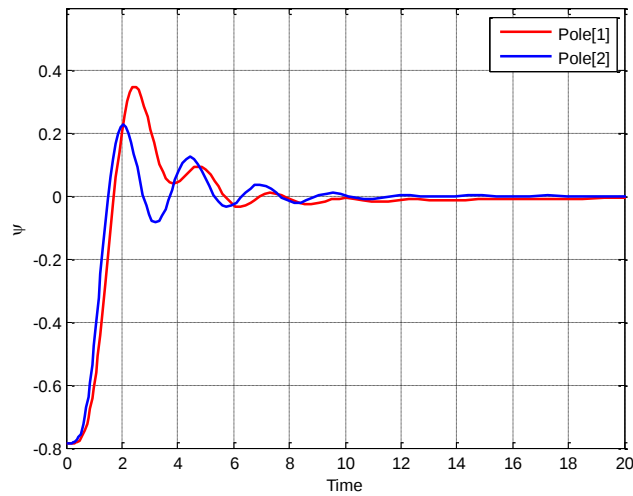
5.1.4 ผลตอบสนองของระบบที่ควบคุมด้วยการป้อนกลับตัวแปรสถานะ

รูปที่ 16 แสดงผลตอบสนองเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้นมี $\varphi_0 = -45^\circ$ ผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole ชุดที่ (2) ได้จากการเลือก Pole Placement ที่ไปทางด้านซ้ายมือของ S-Plane มากกว่า จะมีความรวดเร็ว มากกว่า ผลตอบสนองเมื่อใช้ Pole ชุดที่ (1) และจะเห็นว่าระบบมีขนาดที่มีการแกว่งน้อยลง ถ้า Pole ที่เลือกไปทางด้านซ้ายมากขึ้น หรือใช้ Pole ชุดที่ (2) โดยจะพิจารณากรณีที่หนึ่งมีค่าเป็น

Pole ชุดที่ (1)=[-5; -1+1i; -1-1i; -1+1i; -1-1i; -0.5+1i; -0.5-1i; -0.1+0.1i; -0.1-0.1i; -5];

และจะพิจารณากรณีที่สองมีค่าเป็น

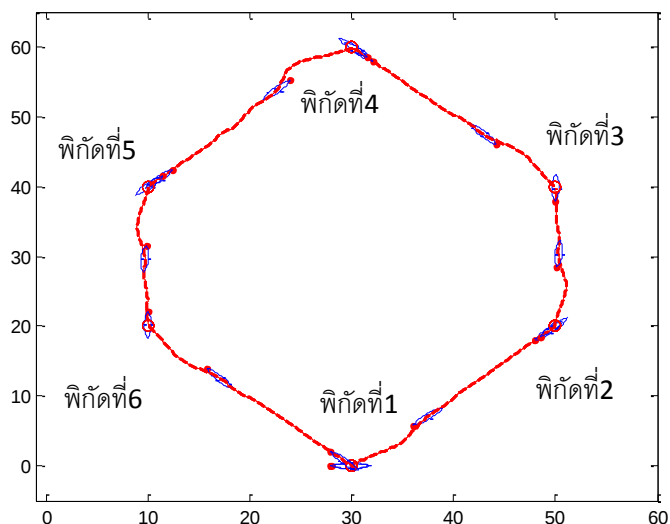
Pole ชุดที่ (2)=[-10; -3+3i; -3-3i; -3+3i; -3-3i; -1+2i; -1-2i; -0.3+0.3i; -0.3-0.3i; -10];



รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของมุมของเรือกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉลิย (φ)
ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ $\varphi_0 = -45^\circ$ เมื่อใช้ Poleชุดที่(1) และ Poleชุดที่(2)

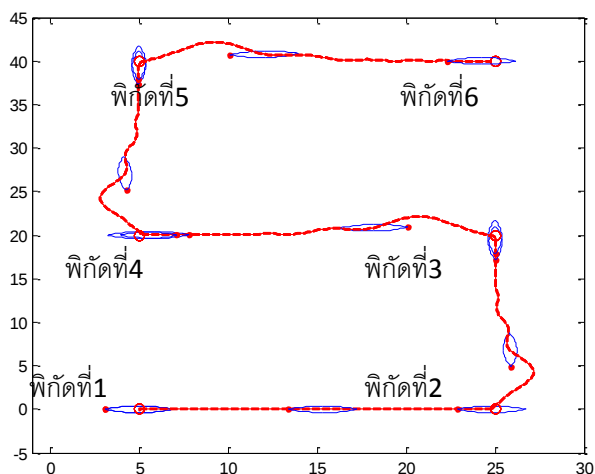
การจำลองการเคลื่อนที่ ได้กำหนดให้เรือเคลื่อนที่ ไปตามจุดพิกัดที่กำหนด (Waypoint Tracking) โดยทดลองการเคลื่อนที่เป็น 2 ลักษณะคือ

1. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular configuration)
2. แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S หรือแบบ Grid



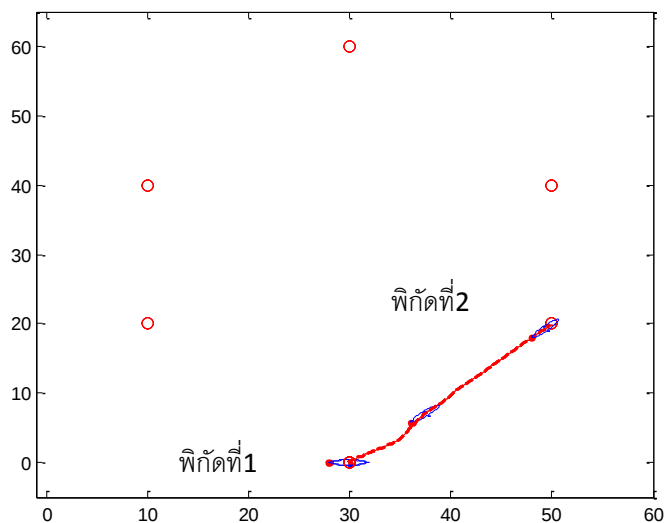
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่1 เป็นรูปวงกลม

ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 5.12 และ 5.13 จะเห็นว่าแบบจำลองการควบคุมเรือทางคณิตศาสตร์สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้ โดยเส้นสีแดงแสดงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของเรือ ส่วนจุดสีแดงแสดงถึงตำแหน่งของ Trolling Motor ที่ใช้ขับเคลื่อนเรือและจุดวงกลมคือจุดพิกัดที่ต้องการให้เรือเคลื่อนที่ผ่านทั้ง 6 จุด



รูปที่ 5.13 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 2 เป็นแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบ S หรือแบบ Grid

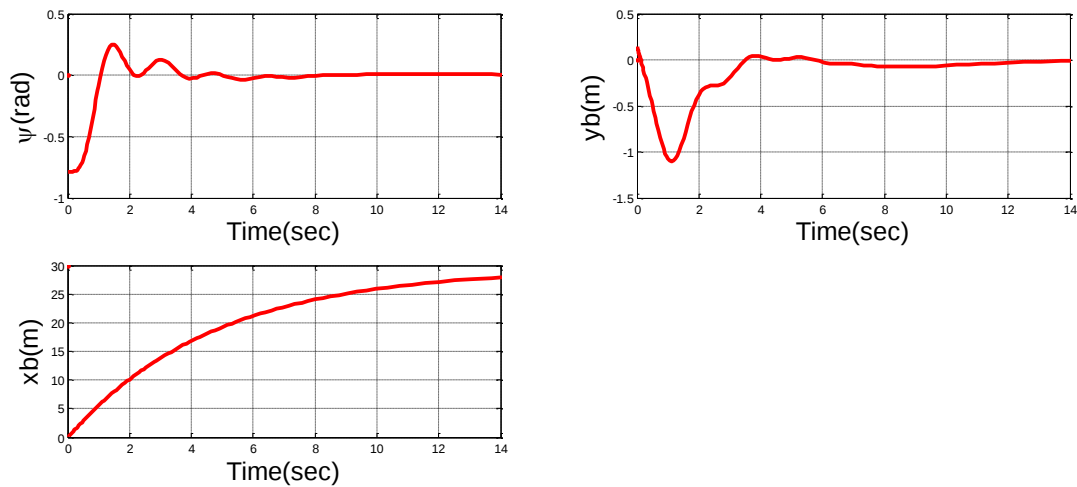
เพื่อเปรียบเทียบ ตัวแปรสถานะ (State) กับ ค่าประมาณของตัวแปรสถานะ (Estimate State) ถ้าพิจารณาเฉพาะการจำลองการเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular configuration) เฉพาะในช่วงที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 การเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1

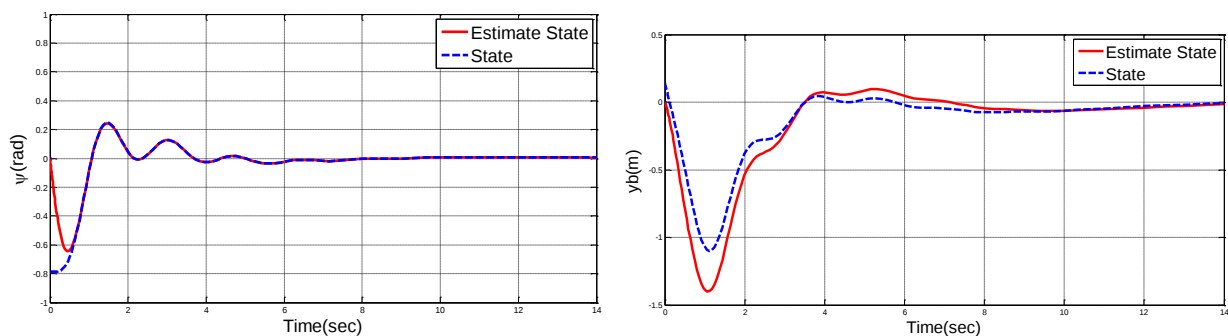
การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะ φ, x_b, y_b จะเห็นว่า ทิศทางของหัวเรือเมื่อเริ่มต้นมีค่า -45 องศา และจะถูกปรับเปลี่ยนจนเป็น 0 องศา เมื่อทิศทางของหัวเรือเข้าสู่ทิศทางที่ต้องการ ส่วน x_b เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นค่า x_b จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆตามเวลาจนถึงเวลาที่มีการ

เปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ใหม่ ส่วน y_b เมื่อเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 0 หลังจากนั้นก็จะเปลี่ยนไปและกลับเป็น 0 อีก ครั้งเมื่อเรือเคลื่อนเข้าใกล้จุดพิภักต์ปลายทางที่ต้องการดังแสดงในรูปที่ 5.15



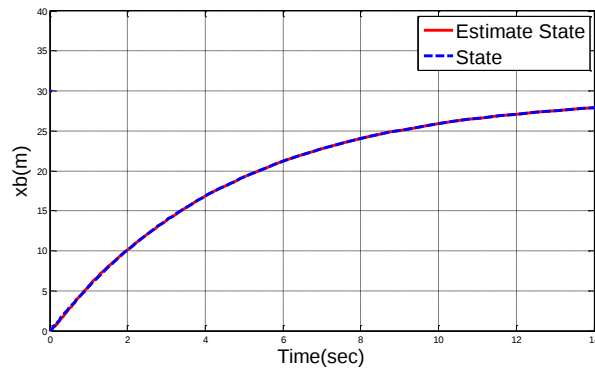
รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ: φ , x_b , y_b

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ(x) และ ค่าประมาณตัวแปรสถานะ(x) ในที่นี้ พิจารณาเฉพาะ ตัวแปรสถานะ: φ , x_b , y_b ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1 รูปที่ 5.16 แสดง การเปลี่ยนแปลงของ φ เทียบกับ $\hat{\varphi}$ จะเห็นว่าเมื่อเริ่มต้น ค่าประมาณของทิศทางหัวเรือจะมีค่า = 0 องศา ตามที่กำหนดไว้หลังจากนั้น ก็จะเปลี่ยนแปลงไปจนมีค่าเข้าใกล้ ตัวแปรสถานะ ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าว ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันสำหรับ ตัวแปรสถานะ y_b ดังแสดงในรูปที่ 5.16

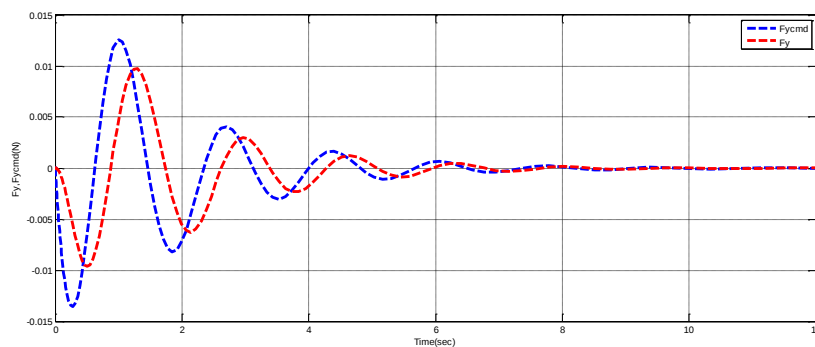


รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงของ φ เทียบกับ $\hat{\varphi}$ (ซ้าย) และ y_b เทียบกับ $\hat{y}_b$ (ขวา)

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรสถานะ และ ค่าประมาณของตัวแปรสถานะ ของ x_b นั้นมีค่าเท่ากัน ตลอดเนื่องจาก x_b นั้นไม่ได้ถูกควบคุมโดย F_{ycmd} จึงมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตาม ความเร็วเริ่มต้น และ F_{xcmd} โดย เป็นอิสระจาก F_{ycmd} ดังแสดงในรูปที่ 5.17 F_y จะมีการแกว่งที่น้อยกว่า F_{ycmd} เนื่องจากในสมการพลศาสตร์ได้ ถูกกรองสัญญาณด้วย low-pass filter อันดับสอง ดังแสดงในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงของ x_b เทียบกับ $\hat{x}_b$



รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงของ F_y เทียบกับ F_{ycmd}

5.1.5 การเปรียบเทียบระหว่าง Full-Order Observer กับ Reduced-Order Observer

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ระหว่าง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จะแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าขนาดของเมทริกซ์ (แสดงค่าในวงเล็บ) ของ Reduced-Order Observer มีขนาดน้อยกว่า ซึ่งเป็นข้อดีอีกข้อหนึ่งของ Reduced-Order Observer ที่ทำให้ใช้เวลาหรือตัวแปรในการคำนวณน้อยลง ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการประมวลผลลงด้วยดังจะเห็นได้ว่า เวลาที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือคายัคใน MATLAB/Simulink เวลาในการคำนวณของ Reduced-Order Observer ในหนึ่ง Loop น้อยกว่าเวลาในการคำนวณของ Full-Order Observer ประมาณ 37% โดยเป็น เวลาในการจำลองการเคลื่อนที่ในแต่ละช่วงจุดของวงกลม จากจุดพิกัดหนึ่งไปยังอีกจุดพิกัดหนึ่งที่มีระยะห่างกัน 20 เมตร

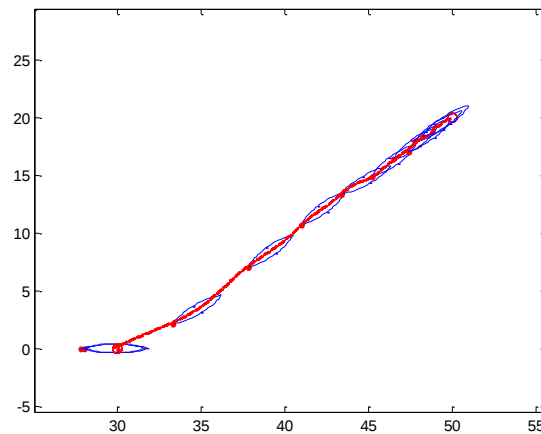
5.1.6 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอก (Noise) ของสัญญาณ GPS และ IMU

จะเห็นว่าแม้ว่าเซนเซอร์ จะได้รับสัญญาณรบกวนสูงกว่าในระดับที่ระบุไว้ใน ตารางคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้นๆเล็กน้อย ระบบก็ยังคงสามารถถูกควบคุมได้อยู่ และระบบยังคงค่าประมาณของตัวแปรสถานะเมื่อใช้ Full-State Feedback Control ร่วมกับ Full-Ordered Observer ในการควบคุมการเคลื่อนที่จากจุดพิกัดที่ 1 ไปยังจุดพิกัดที่ 2 ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.19

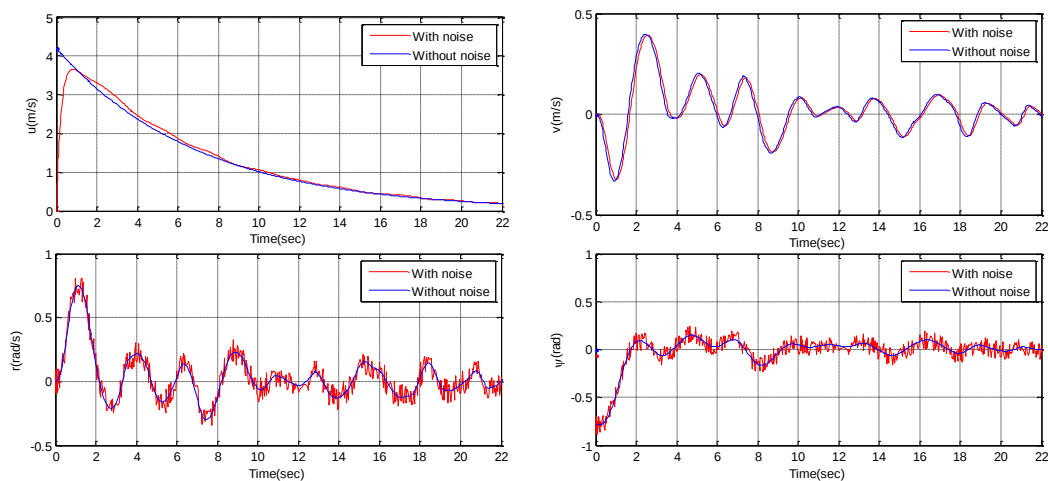
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จากระบบของเรือที่ใช้ในการวิจัยนี้

หัวข้อ	Full-Order Observer	Reduced-Order Observer
ตัวแปรสถานะ	X (10x1)	X2 (4x1)
อินพุต	Bu (10x1)	$\{A_{21}x_1 + B_2u\}$ (4x1)
เมตริกซ์ของระบบ	A (10x10)	A22 (4x2)
เอาต์พุต	C (10x10)	A12 (6x2)
สัญญาณเอาต์พุต	y (10x1)	$\{\dot{x}_1 - A_{11}x_1 - B_1u\}$ (6x1)
สัญญาณอินพุต	Du	-----
ค่าเฉลี่ยของเวลาในการประมวลผล*	0.794 วินาที	0.421 วินาที

*ค่าเฉลี่ยของเวลาในการประมวลผลของการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB /Simulink จากการจำลองการเคลื่อนที่ โดยคอมพิวเตอร์ใช้ Note Book Aspire 4736G ซึ่งมีหน่วยประมวลผลเป็น Intel Core2 Duo processor (2.1 GHz)



รูปที่ 5.19 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือจากจุดพิกัดที่ 1 ไป 2 โดยจำลองให้มี สัญญาณรบกวน IMU (φ, r) = ± 0.1 rad และสัญญาณรบกวน GPS (x_b, y_b) = ± 1 m



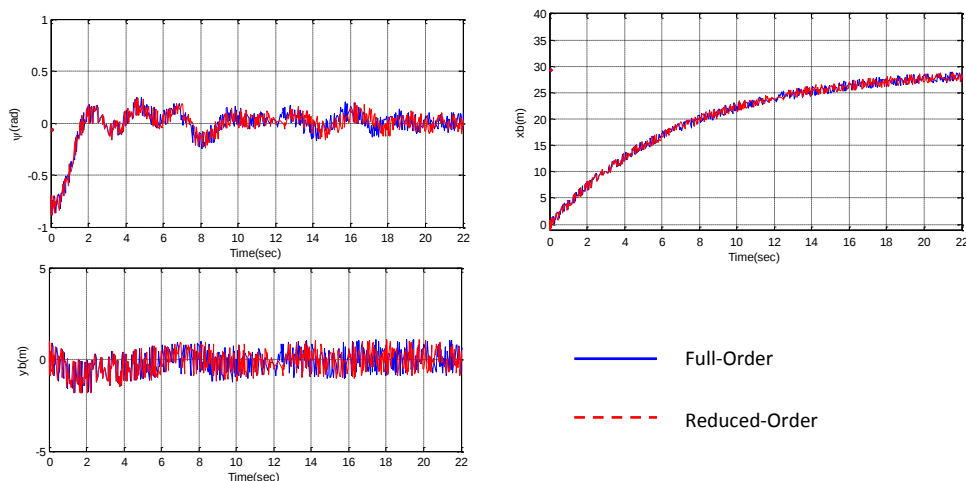
รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองของ u, v, r, φ โดยจำลองให้มีสัญญาณรบกวน IMU (φ, r) = ± 0.1 rad และสัญญาณรบกวน GPS (x_b, y_b) = ± 1 m

5.1.7 การเปรียบเทียบการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนภายนอก (Noise) ระหว่าง Full-Order และ Reduced-Order Observer

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบ Error (y_b) ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อจำลองให้ φ, r, x_b, y_b มีสัญญาณรบกวนดังนี้ IMU(φ, r) และสัญญาณรบกวน GPS (x_b, y_b) โดยนิยาม ค่าความผิดพลาดของ y_b จากแนวการเคลื่อนที่เส้นตรงระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายว่า Error y_b โดยที่

$$Error\ y_b = \sqrt{\sum (y_b)^2}$$

ซึ่งสามารถใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุมของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer ได้โดยจากตารางที่ 5.2 จะเห็นว่า Error (y_b) ของทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนัก และไม่สามารถบ่งชี้ได้ชัดเจนว่าแบบไหนมีประสิทธิภาพในการควบคุมเรือได้ดีกว่ากัน ถ้ามีสัญญาณรบกวนภายนอกเข้ามารบกวน



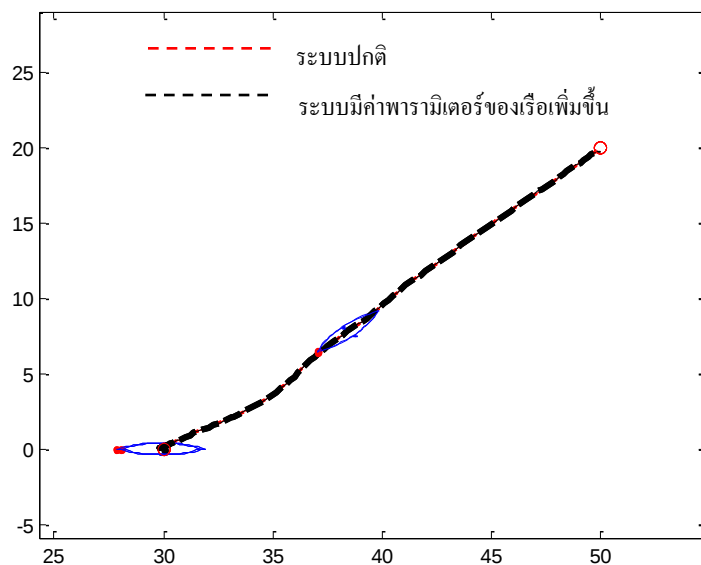
รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนระหว่าง Full- และ Reduced-Order Observer

จากรูปที่ 5.21 จะเห็นว่า φ, x_b, y_b ของทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีค่าใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันมากนักกล่าวคือทั้ง Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer มีประสิทธิภาพในการควบคุมได้ดีพอๆกัน เมื่อระบบมีสัญญาณรบกวนภายนอกเข้ามารบกวน

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบ Error (y_b) ของ Full- และ Reduced-Order Observer เมื่อมีสัญญาณรบกวน

ระดับสัญญาณรบกวน	Error y_b	
	เมื่อใช้เทคนิค Full-Order Observer	เมื่อใช้เทคนิค Reduced-Order Observer
0.01	4.5747	4.5631
0.10	6.3917	6.6098
1.00	16.2703	15.4844
5.00	59.1271	62.7242

5.1.8 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของเรือเมื่อพารามิเตอร์ของเรือค้ายัคมีค่า เพิ่มขึ้น 50%



รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่เมื่อ พารามิเตอร์ของเรือค้ายัคมีค่า เพิ่มขึ้น 50%

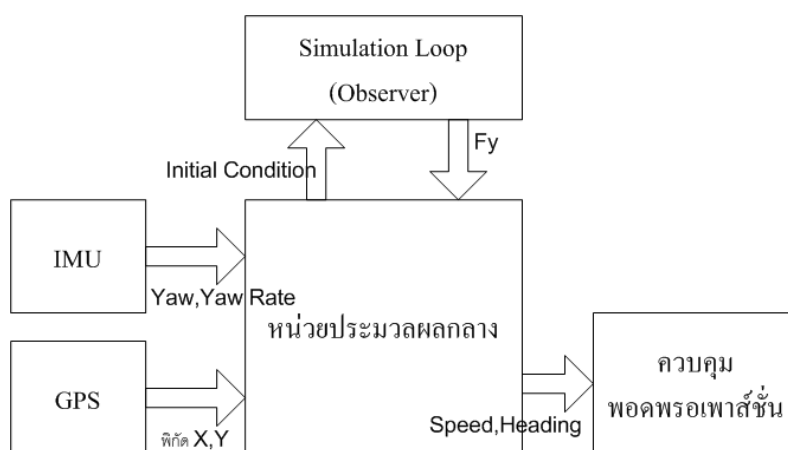
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบ Error (y_b) ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อ พารามิเตอร์ของเรือเพิ่มจาก 0% ถึง 50%

พารามิเตอร์เรือเพิ่มขึ้น	Error y_b	
	เมื่อใช้เทคนิค Full-Order Observer	เมื่อใช้เทคนิค Reduced-Order Observer
0%	4.44	4.34
10%	4.52	4.36
20%	4.62	4.39
30%	4.71	4.41
40%	4.82	4.41
50%	4.93	4.42

จากตารางที่ 5.3 เมื่อเปรียบเทียบเปรียบเทียบ ค่าความผิดพลาด y_b ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่ม จะเห็นว่า Reduced-Order Observer มีความสามารถในการควบคุมเรือ เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเปลี่ยนแปลงไปดีกว่าแบบ Full-Order Observer เล็กน้อย

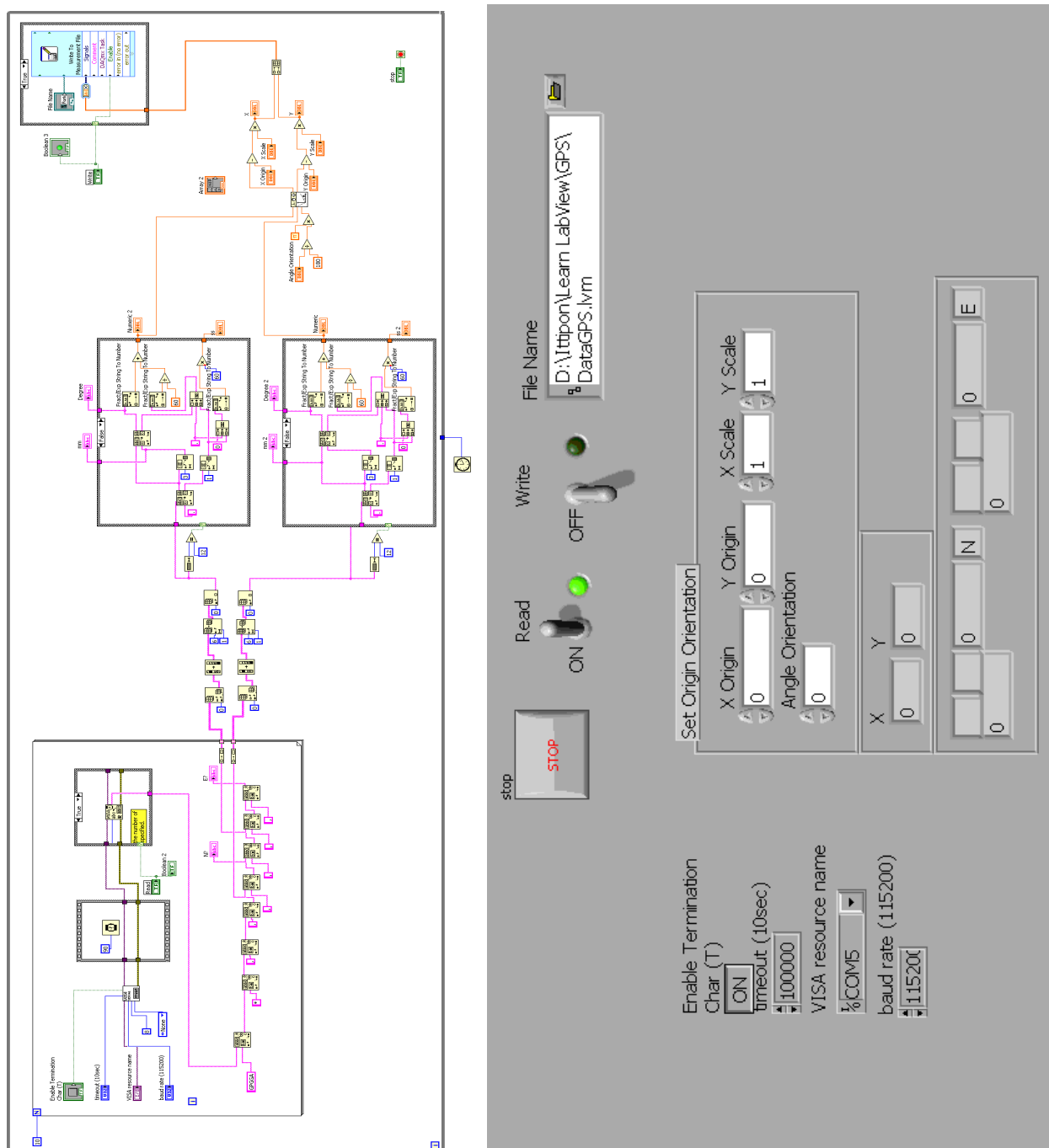
5.1.9 การใช้โปรแกรม LabVIEW ในการทดสอบกับเรือจริง

โปรแกรม LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการออกแบบแอปพลิเคชัน โดยมีรูปแบบการเข้ารหัสแบบ โค้ดรูปภาพแทนการเขียนด้วยตัวหนังสือ ทำให้การพัฒนาแอปพลิเคชัน เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ในการใช้ โปรแกรม LabVIEW ในการประมวลผลเพื่อควบคุมเรือจะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือส่วนรับค่าสัญญาณจาก GPS, ส่วนรับค่าสัญญาณจาก IMU , ส่วนการประมาณค่าโดยใช้ระบบ Observer , ส่วนควบคุมหลัก และส่วน ควบคุมพอดพรวดพราด



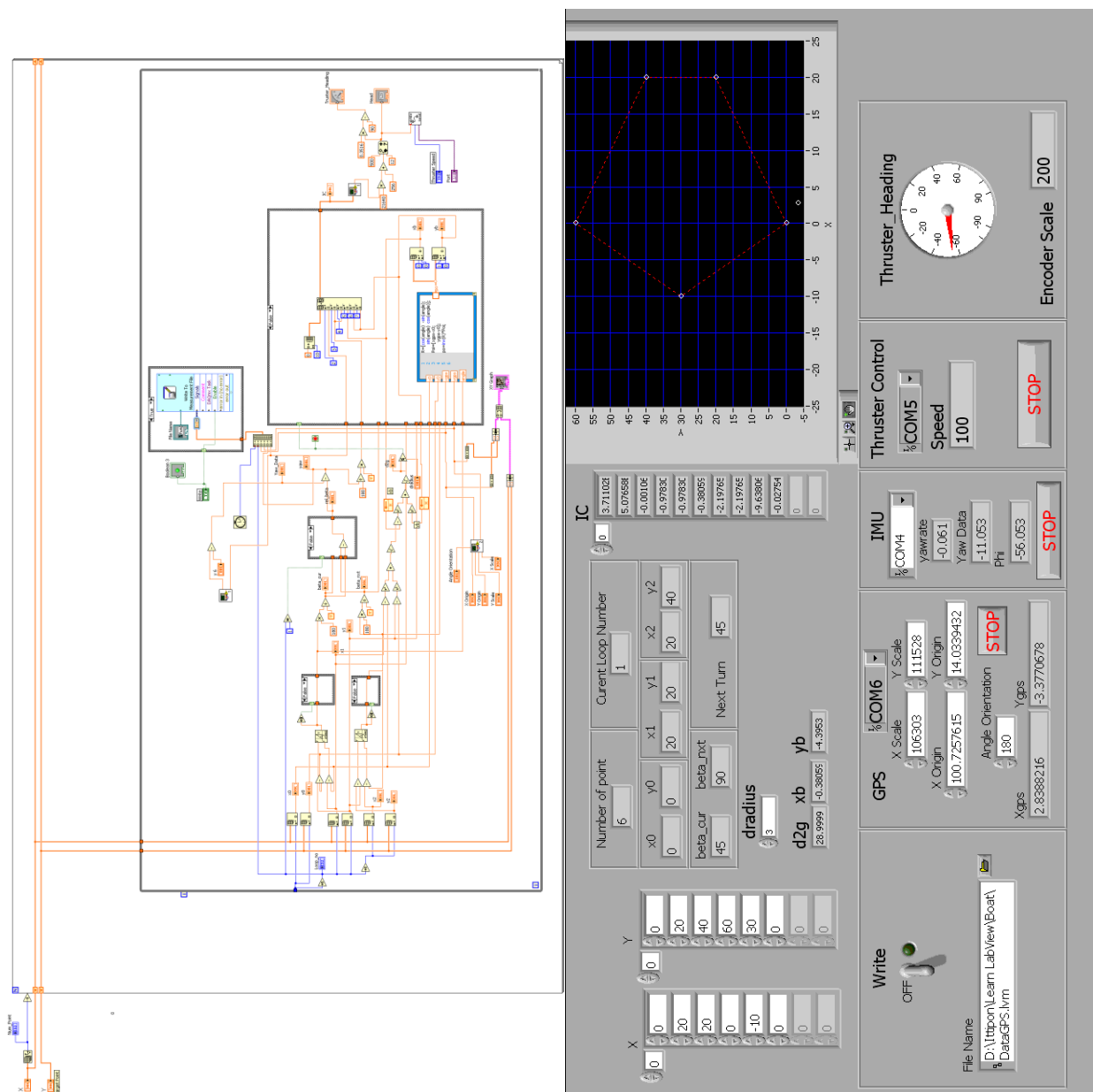
รูปที่ 5.23 แสดง การทำงานร่วมกันของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น

ส่วนรับค่าจาก GPS



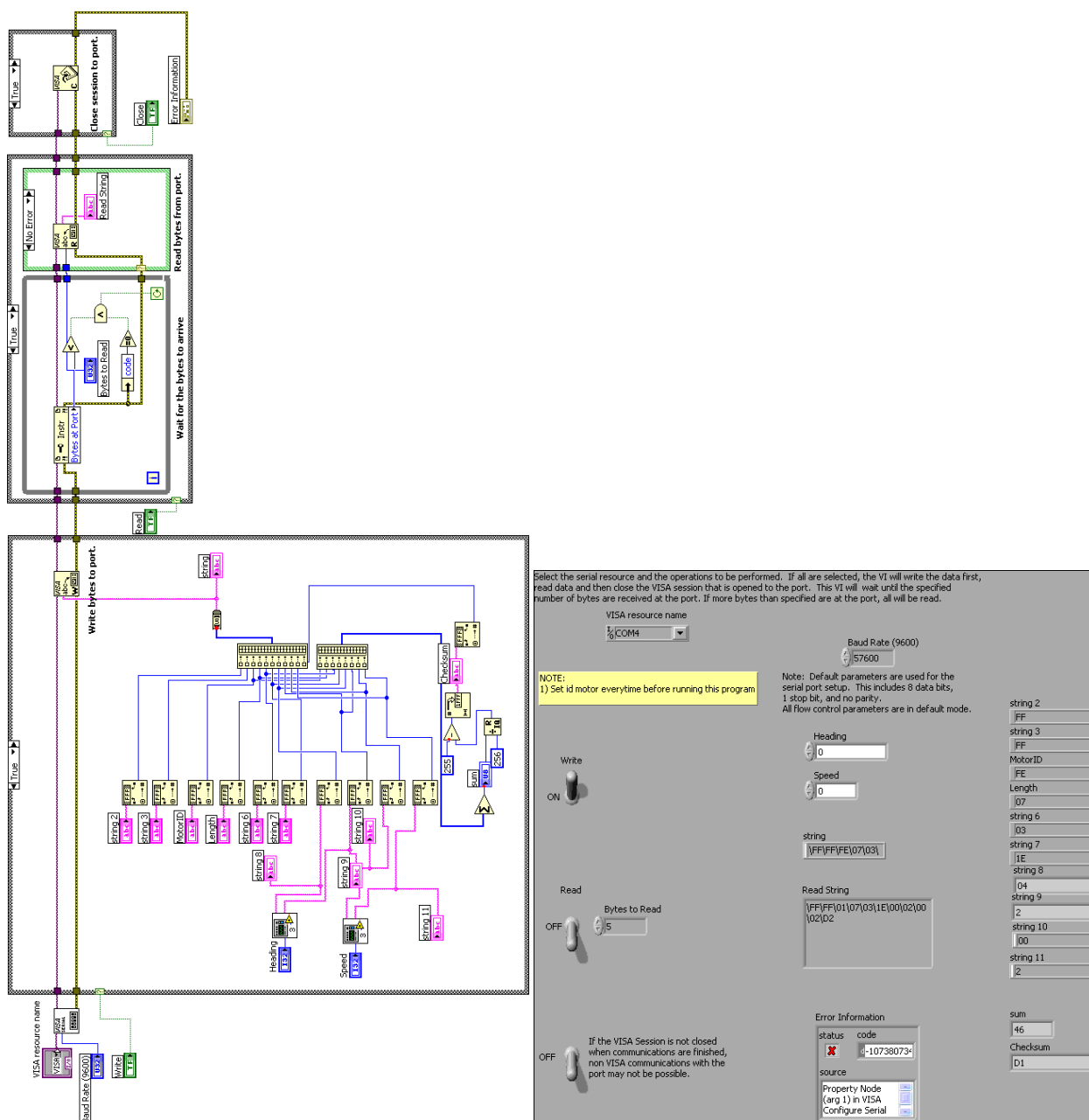
รูปที่ 5.24 แสดง Block-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ของโปรแกรมรับค่าจาก GPS จาก Topcon รุ่น Hiper GA-Series

ส่วนระบบควบคุมหลัก



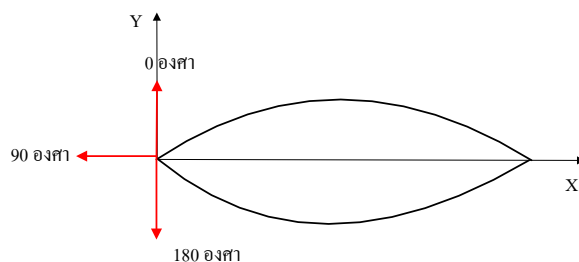
รูปที่ 5.27 แสดงBlock-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ในส่วนควบคุมหลัก

ส่วนควบคุมพอดพรอเพาส์ชั้น



รูปที่ 5.28 แสดง Block-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ในส่วนควบคุมพอดพรอเพาส์ชั้น

5.1.10 ผลการทดสอบแรง เมื่อพอดพรอเพาส์ชั้น หมุนไปที่มุมต่างๆ



รูปที่ 5.29 แสดงการกำหนดมุมต่างๆที่ทำการวัดแรง

จากการทดสอบแรงที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น เมื่อหันพอดพรอเพาส์ชั้นไปที่มุมต่างๆจะได้ผลดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงแรงที่เกิดจากพอดพรอเพาส์ชั้น เมื่อหันพอดพรอเพาส์ชั้นไปที่มุมต่างๆ

แรงในแกน (N)	มุม δ (องศา)		
	0	90	180
F_x	-6.131	487.525	13.704
F_y	-570.844	2.786	527.226
F_z	23.5785	23.2095	23.4355

จากตาราง 5.4 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง F_y (N) และ δ (Radian) จะได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ระหว่าง F_y (N) และ δ (Radian) ดังนี้

$$\delta = 0.0029F_y + 1.6104 \quad (5.27)$$

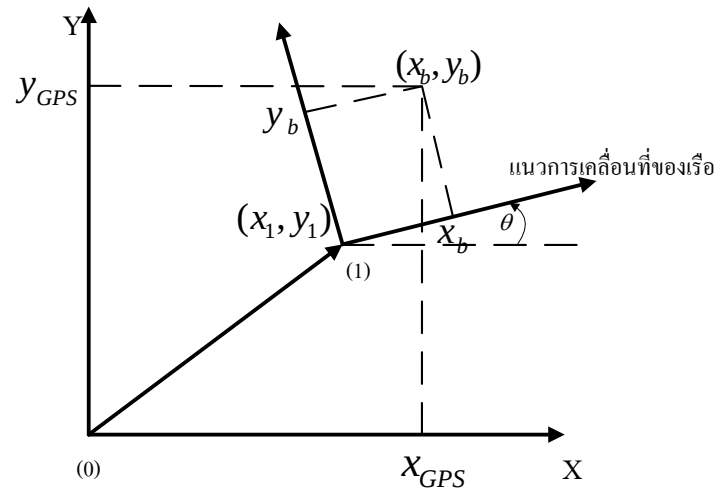
5.1.11 การแปลงพิกัดที่อ่านได้จาก GPS เพื่อใช้กับระบบควบคุม

การแปลงพิกัดที่อ่านได้จาก GPS ซึ่งเป็นพิกัดที่เทียบกับพิกัดโลก ไปเป็นพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ สามารถทำได้ดังนี้พิจารณาภาพที่ 5.20 จากการแปลงพิกัดใน 2 มิติจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + {}^{01}R \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

โดย

$${}^{01}R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5.29)$$



รูปที่ 5.30 แสดงพิกัดจาก GPS และพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ

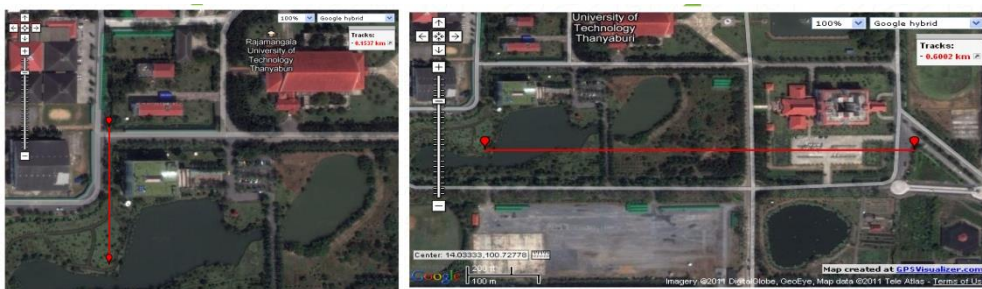
หากเราต้องการแปลงพิกัดจากค่าที่อ่านได้จาก GPS ไปเป็นพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ สามารถหาได้จาก

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = {}^{01}R^{-1} \left(\begin{bmatrix} x_{GPS} \\ y_{GPS} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \right) \quad (5.30)$$

การแปลงค่าจากเซนเซอร์รับสัญญาณ GPS เป็นพิกัด X,Y ใช้โปรแกรม GPS Distance Map จาก <http://www.gpsvisualizer.com/calculators> เป็นเครื่องมือคำนวณระยะทางบนพื้นโลกแล้วทำการคำนวณหาค่าอัตราส่วนระยะทาง X_{scale} และ Y_{scale} โดย

$$X_{scale} = \frac{\text{ระยะทางบนผิวโลก}(m)}{\Delta \text{Longitude}} \quad (5.31)$$

$$Y_{scale} = \frac{\text{ระยะทางบนผิวโลก}(m)}{\Delta \text{Latitude}} \quad (5.32)$$



รูปที่ 5.31 แสดงการใช้ โปรแกรม GPS เพื่อหาระยะทางจากแผนที่ (GPS Distance Map) จาก

<http://www.gpsvisualizer.com/calculators>

จะได้ว่า

$$x = (Point_{Longitude} - Origin_{Longitude}) \times X_{scale} \quad (5.33)$$

และ

$$y = (Point_{Latitude} - Origin_{Latitude}) \times Y_{scale} \quad (5.34)$$

จากการโปรแกรม GPS Distance Map จะได้ว่าในบริเวณที่จะทดสอบเรือจริง $X_{scale} = 108036$ และ $Y_{scale} = 110664$ ซึ่งเป็นค่าที่เราใช้ในการคำนวณค่าจุดพิกัด (x,y) และจากการทดสอบโดยสร้างจุดสองจุดห่างกัน 5 เมตรและใช้โปรแกรมที่สร้างขึ้นเก็บค่า จุดพิกัด (x,y) ปรากฏว่าโปรแกรมที่สร้างขึ้นสามารถอ่านค่าได้ 5.04 เมตรซึ่งถือว่ามีความแม่นยำเพียงพอสำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้

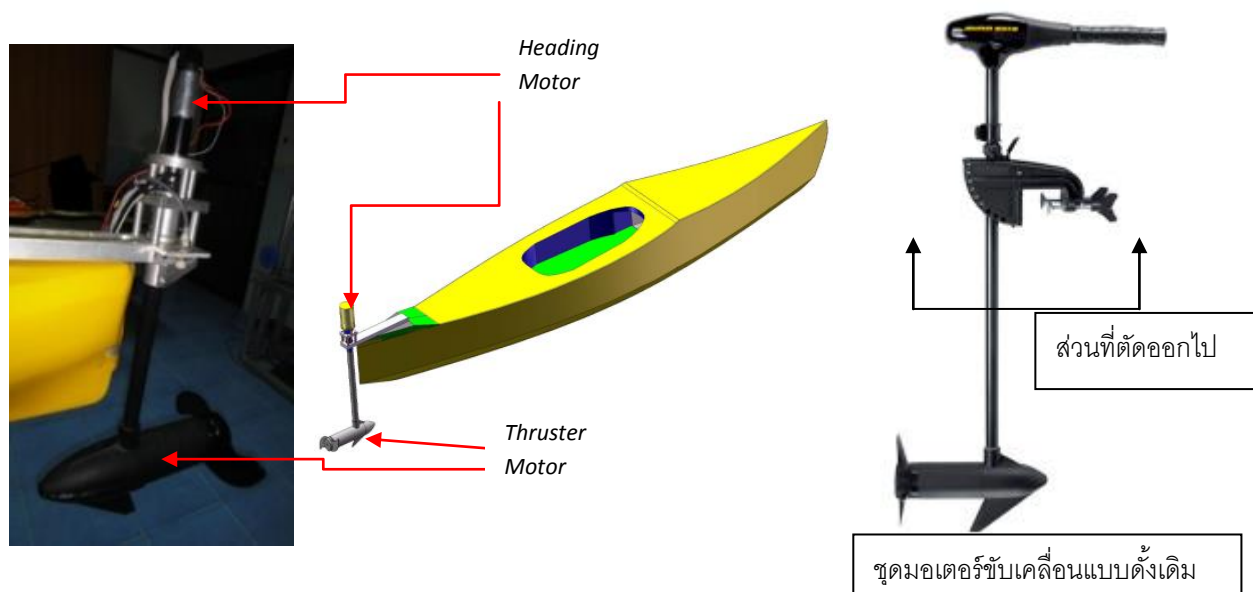
5.3 การออกแบบและสร้างชุดเครื่องท้ายเรือคายัคอัตโนมัติสำหรับใช้งานในทะเล

ชุดมอเตอร์ท้ายเรือแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5.32 เป็นแบบติดตายตัวไม่สามารถพับมอเตอร์ขับเคลื่อนขึ้นไว้เหนือน้ำได้ นอกจากนี้เรายังต้องตัดแกนมอเตอร์ที่ให้กับเครื่องเพื่อดัดแปลงติดตั้ง DC servo motor สำหรับการบังคับเลี้ยว ข้อดีของการออกแบบแบบเดิมคือมีความกะทัดรัดและความสูงที่เพิ่มขึ้นของเรือเนื่องจากการติดตั้งมอเตอร์นั้นก็ไม่สูงมากขึ้นมากนักสามารถมุดผ่านสะพานขนาดเล็กและเตี้ยได้ แต่เนื่องจากการเป็นารออกแบบที่ตายตัวทำให้ไม่สามารถยกเครื่องขึ้นจากน้ำได้ในกรณีที่ต้องการยกเครื่องให้พ้นจากสิ่งกีดขวางใต้น้ำ รวมทั้งยังต้องตัดแกนของมอเตอร์ขับเคลื่อนเดิมทิ้งทำให้ไม่สามารถประกอบเป็นชุดขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมเหมือนตอนแกะกล่องได้อีก

ข้อกำหนดในการออกแบบสำหรับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบใหม่

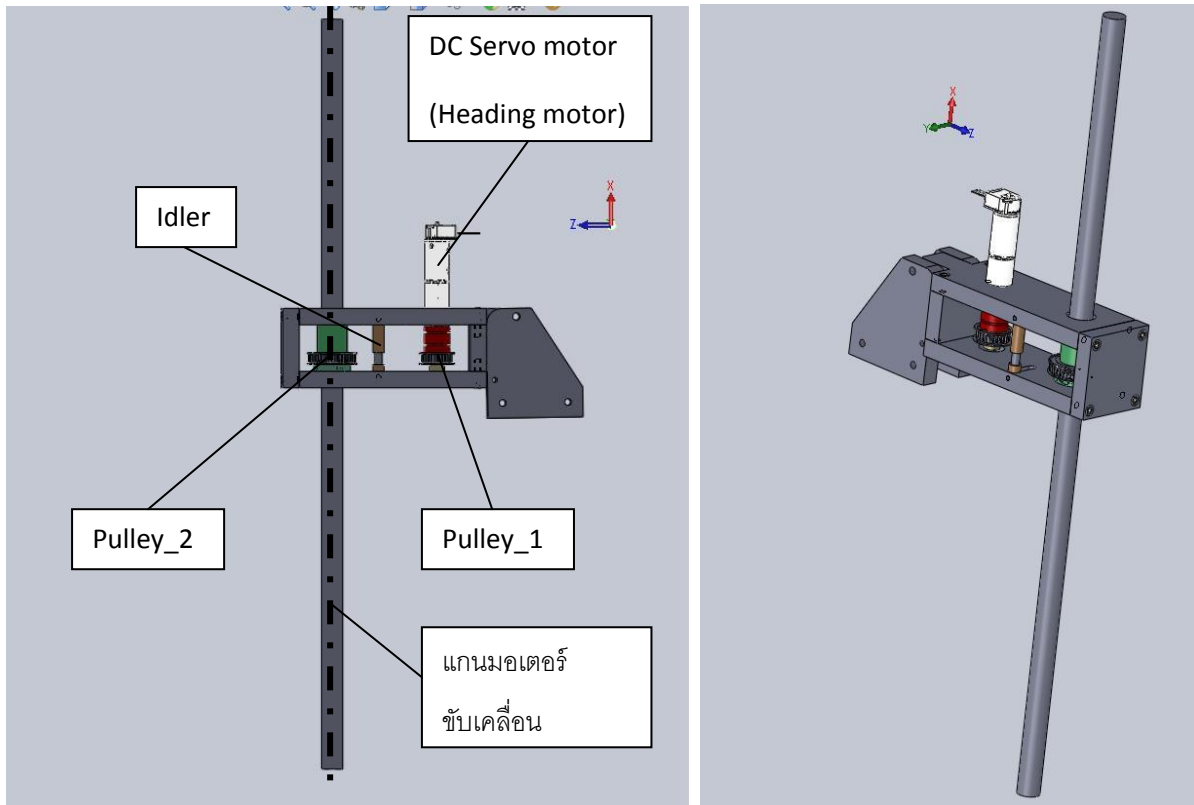
- สามารถใช้งานในทะเลได้โดยที่น้ำทะเลไม่สามารถซึมผ่านเข้าไปสัมผัสกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือ กลไกทางกลของชุดขับเคลื่อน
- สามารถพับเก็บตัวเครื่องเมื่อไม่ใช้งานได้
- ต้องไม่ตัดทำลายโครงสร้างดั้งเดิมของมอเตอร์ขับเคลื่อน
- ยังสามารถใช้งานได้ทั้งในรูปแบบควบคุมด้วยมือหรือแบบเคลื่อนที่อัตโนมัติเหมือนเดิม

จากข้อกำหนดการออกแบบและการใช้งานเบื้องต้นเราจึงย้ายตำแหน่งของมอเตอร์บังคับเลี้ยว (Heading motor) ให้อยู่นอกแนวแกนมอเตอร์ขับเคลื่อนเพื่อจะได้ไม่ต้องตัดทำลายโครงสร้างเดิมของแกนมอเตอร์ขับเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องใช้ชุดเฟืองแบบ Pulley/timing belt สำหรับส่งกำลังจากมอเตอร์บังคับเลี้ยวเพื่อบังคับทิศทางการหมุนของแกนมอเตอร์ขับเคลื่อน Timing belt จะช่วยให้การส่งกำลังเป็นไปได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ (low backlash) เราใช้อัตราส่วนการขับเคลื่อนที่ 1:2 ซึ่งจะเพิ่มแรงบิดในการบังคับเลี้ยว แต่จะลดความเร็วของแกนหมุนลงครึ่งหนึ่ง กล่าวคือการเลี้ยวของเรือหุ่นยนต์จะทำได้ช้าลง แต่ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของเรือคายัคโดยรวมค่อนข้างใกล้เคียงกับแบบเดิม นอกจากนั้นแล้ว ยังได้ปรับเปลี่ยนชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนมาเป็นรุ่น Riptide Transom RT50/SC/S จาก Minn Kota ซึ่งสามารถให้แรงขับสูงสุดได้ถึง 50 ปอนด์ ที่จะสามารถสู้กับกระแสน้ำในทะเลได้

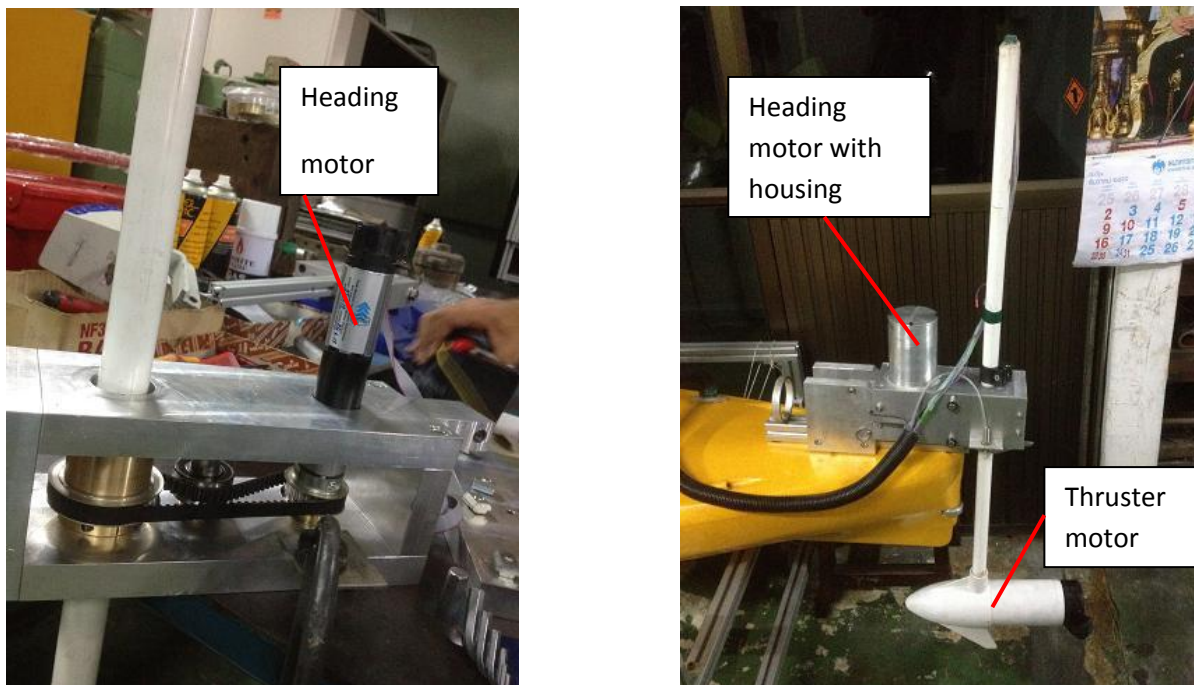


รูปที่ 5.32: การดัดแปลงมอเตอร์ขับเคลื่อน (thruster motor) แบบเดิมเพื่อติดตั้ง DC servo motor สำหรับเป็นมอเตอร์บังคับเลี้ยว (heading motor) สำหรับหุ่นมอเตอร์ขับเคลื่อน (รูปซ้าย) รูปมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่มาพร้อมกับชุดบังคับติดตั้งด้านบนซึ่งถูกตัดออกไป (รูปขวา)

หลังจากได้ออกแบบบนคอมพิวเตอร์แล้วดังรูปที่ 5.33 เราได้สร้างระบบทางกลขึ้นดังรูปที่ 5.34 เมื่อคำนึงถึงข้อกำหนดที่จะต้องปฏิบัติการในทะเลเราได้ปิดส่วนที่เป็นระบบส่งกำลัง รวมทั้งสร้างฝากรอบมอเตอร์บังคับเลี้ยวเพื่อป้องกันไม่ให้น้ำทะเลสัมผัสกับระบบทางกลได้ ในส่วนของแนวรอยต่อระหว่างชิ้นงานเราใช้ซิลิโคนยาตามรอยเพื่อไม่ให้น้ำหรือความชื้นซึมผ่าน



รูปที่ 5.33: การออกแบบทางกลของชุดบังคับเลี้ยวเรือแบบใหม่โดยมอเตอร์บังคับเลี้ยวแยกออกจากแกนมอเตอร์ขับเคลื่อนเพื่อแก้ปัญหการตัดทำลายแกนเดิม



รูปที่ 5.34: กลไกขับเคลื่อนทางกลสำหรับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือที่สร้างเสร็จแล้ว (ภาพซ้าย) ติดตั้งพร้อมใช้งานที่ท้ายเรือคายัคโดยติดแผงปิดชุดเฟืองพร้อมยาซิลิโคนป้องกันน้ำเข้าสู่กลไก (ภาพขวา)

คุณสมบัติข้อดีอีกประการหนึ่งของชุดขับเคลื่อนท้ายเรือคือจะต้องสามารถยกให้พ้นเหนือน้ำได้ในกรณีที่จอดเรือในที่ตื้นหรือวางเรือบนพื้น จากรูปที่ 5.35 จะเห็นว่าเราสามารถยกเครื่องขึ้นได้โดยการสร้างจุดหมุนที่โครงสร้าง เมื่อต้องการจะพับชุดขับเคลื่อนขึ้นก็เพียงแค่ถอดสลักด้านล่างจุดหมุนออกก็สามารถพับเครื่องขึ้นได้ตามต้องการ



รูปที่ 5.35: การออกแบบกลไกการพับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือให้พ้นเหนือน้ำ

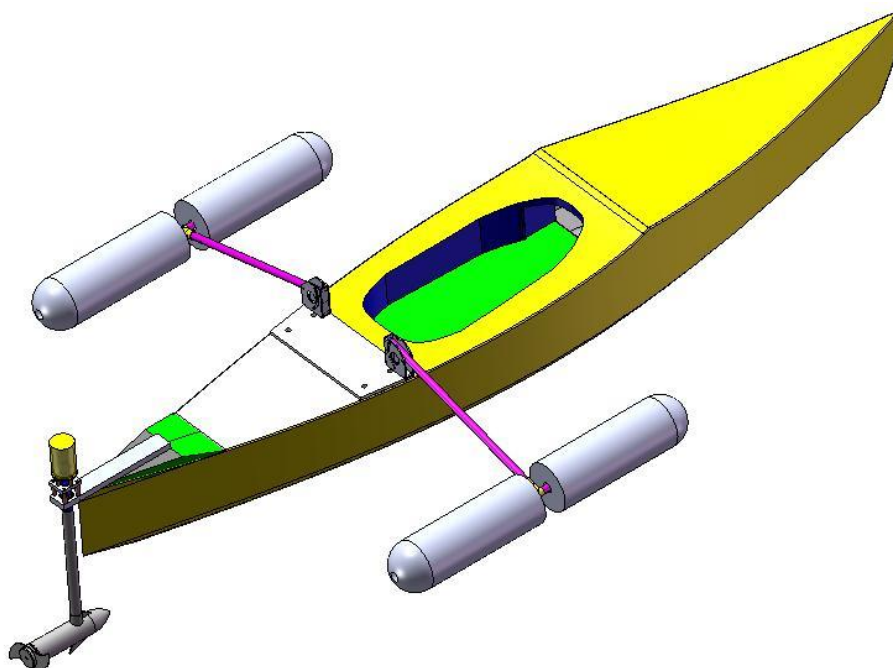


รูปที่ 5.36: การทดสอบกลไกขับเคลื่อนทางกลสำหรับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือที่จะใช้ลงทะเลในสระว่ายน้ำ

5.4 พุนลอยสำหรับการทรงตัว (Balance Buoys)

ในการออกแบบเรือหุ่นยนต์ในขั้นต้นนั้นผู้วิจัยได้คำนึงถึงเสถียรภาพของเรือหุ่นยนต์ขณะปฏิบัติการเป็นอันดับแรกโดยได้พยายามจัดให้ตำแหน่งของน้ำหนักของอุปกรณ์ภายในเรืออยู่ ณ ตำแหน่งที่ต่ำที่สุดของท้องเรือเพื่อให้เรือพลิกคว่ำได้ง่าย ซึ่งจากการนำเรือออกปฏิบัติการในพื้นที่เช่น แม่น้ำและคลองขนาดกลาง คลองขนาดเล็ก อ่างเก็บน้ำ ไม่มีรายงานการพลิกคว่ำของเรือ แต่ถ้าต้องปฏิบัติการในพื้นที่ที่มีคลื่นสูงประมาณ

1 เมตร โครงสร้างเรือแบบเดิมอาจจะไม่สามารถป้องกันการพลิกคว่ำได้ เราจึงออกแบบทุ่นลอยสำหรับการทรงตัวให้เรือหุ่นยนต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพขณะปฏิบัติการ

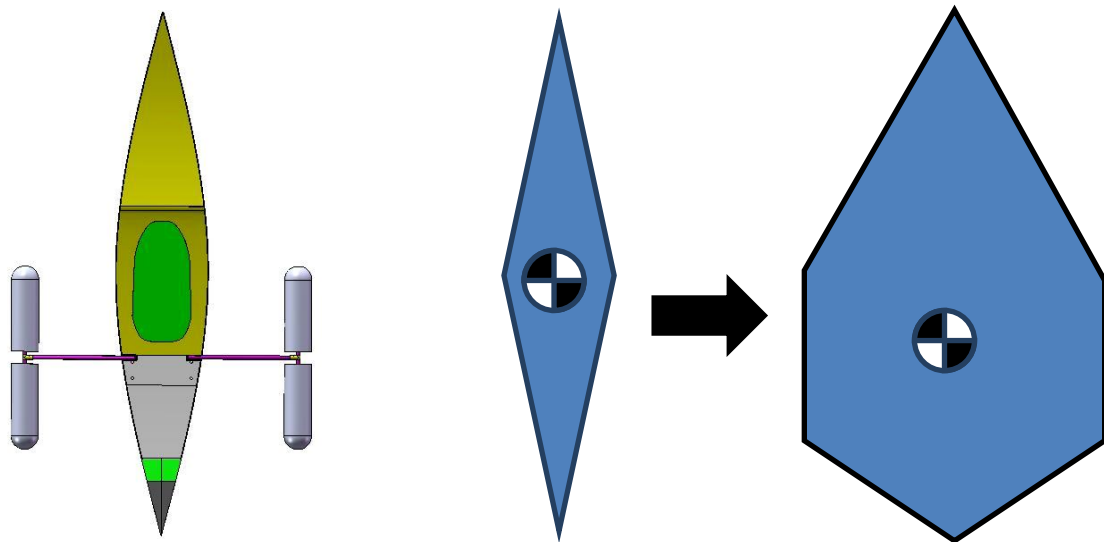


รูปที่ 5.37 เรือหุ่นยนต์พร้อมทุ่นลอยช่วยการทรงตัว

5.4.1 หน้าทีของทุ่นลอยช่วยการทรงตัวมีดังนี้

5.4.1.1) เพิ่มพื้นที่ Polygon of Support

Polygon of support คือรูปทรงหลายเหลี่ยมที่เกิดจากการลากเส้นรอบตัวเรือคายัค ถ้าจุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass or CM) ของเรือคายัคตกอยู่ภายใน Polygon of Support เรือคายัคจะอยู่ในสภาพเสถียรและไม่เกิดการพลิกคว่ำ หรือ ล้ม ในกรณีกลับกันถ้าจุด CM ตกอยู่ภายนอก Polygon of Support ซึ่งอาจเกิดจากการโคลงอย่างรุนแรงเนื่องจากคลื่นหรือลม เรือคายัคอาจจะพลิกคว่ำทันที เรือแบบเดิมที่ไม่มีทุ่นลอยจะมี Polygon of support ไม่กว้างขวางเท่ากับเรือที่มีทุ่นลอยติดตั้ง Polygon of support ที่กว้างขวางจะเพิ่มเสถียรภาพให้กับเรือได้เป็นอย่างดีในขณะปฏิบัติการในพื้นที่ที่มีคลื่น

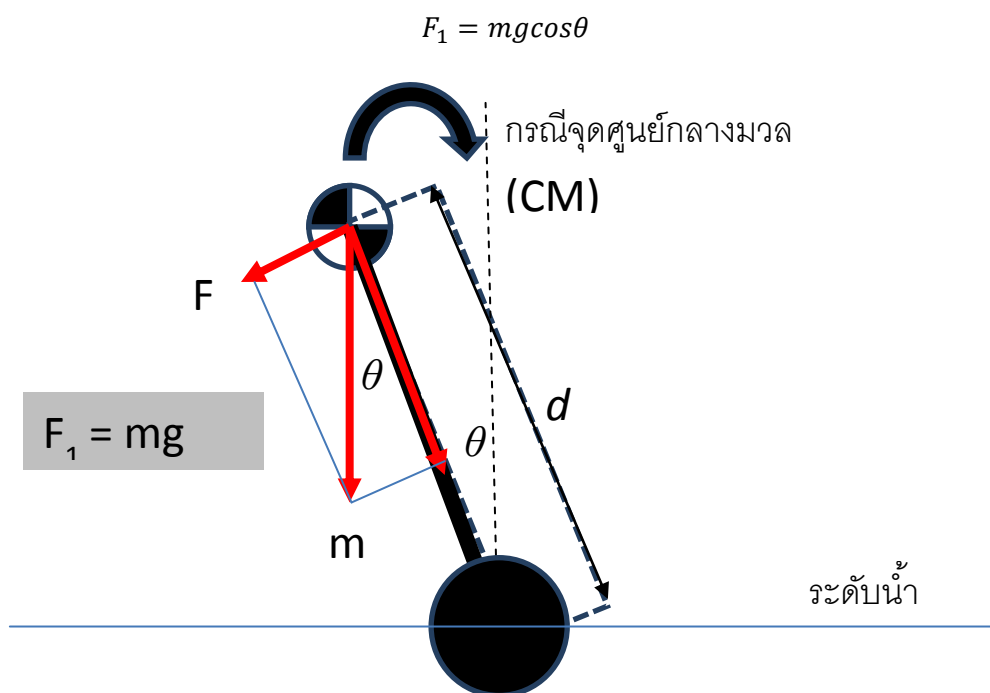


รูปที่ 5.38 การเพิ่มพื้นที่ Polygon เมื่อใช้หุ่นลอยช่วยการทรงตัว

5.4.1.2) ด้านการโคลงตัวของเรือ

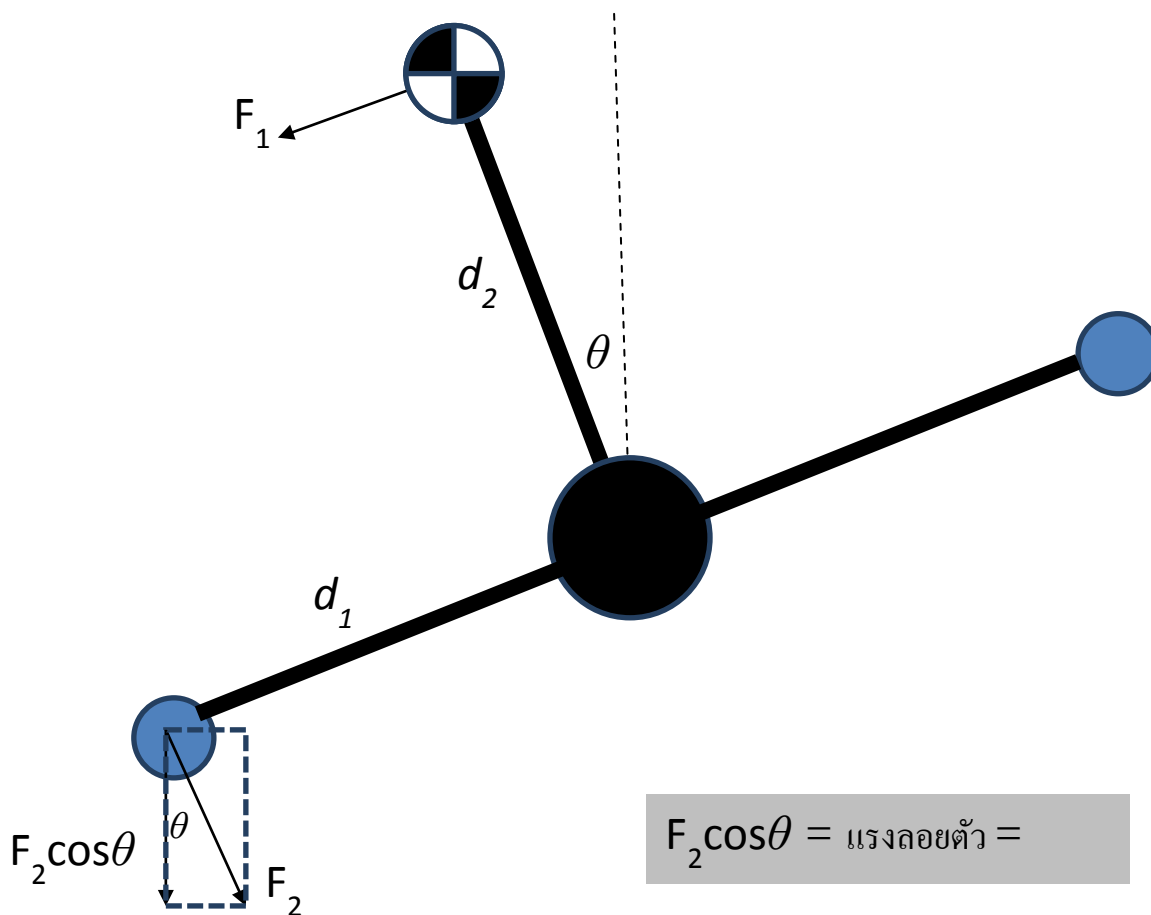
ในกรณีที่จุด CM ของเรือยังไม่เคลื่อนตัวออกจาก Polygon of Support ตัวหุ่นลอยๆ จะต้องสามารถ ด้านการโคลงตัวของเรือได้ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการ Coupling Torque ดังนี้

สมมติให้เรือเอียงตัวประมาณมุม θ และ ไม่คือน้ำหนักของหุ่นลอยๆ จุด CM มีระยะสูงจากลำเรือประมาณ ระยะ d_2 แรง Couple F_1 สามารถหาได้จากการกระจายน้ำหนักของจุด CM ดังนี้



รูปที่ 5.39 การคำนวณหา Coupling Torque ที่จะทำให้เกิดการพลิกคว่ำ เมื่อยังไม่ใช้หุ่นลอยช่วยการทรงตัว

จากการคำนวณ ทุ่นลอยฯปริมาตร 11,400 ลูกบาศก์เซนติเมตร (ขนาดมิติประมาณ 19 เซนติเมตร x 10 เซนติเมตร x 60 เซนติเมตร) สามารถรับการโคลงตัว 30 องศาของจุดศูนย์กลางมวลขนาด 50 กิโลกรัมได้โดยจุด CM มีความสูงจากลำเรือ 50 เซนติเมตรและวางทุ่นห่างจากเรือประมาณ 1 เมตร รวมทั้งได้ให้ค่า Safety factor = 2 โดยการวางทุ่นลอยเพิ่มจากหนึ่งทุ่นเป็นสองทุ่นต่อข้าง



รูปที่ 5.40 การคำนวณหา Coupling Torque ที่จะทำให้เกิดการพลิกคว่ำ เมื่อใช้ทุ่นลอยช่วยการทรงตัว

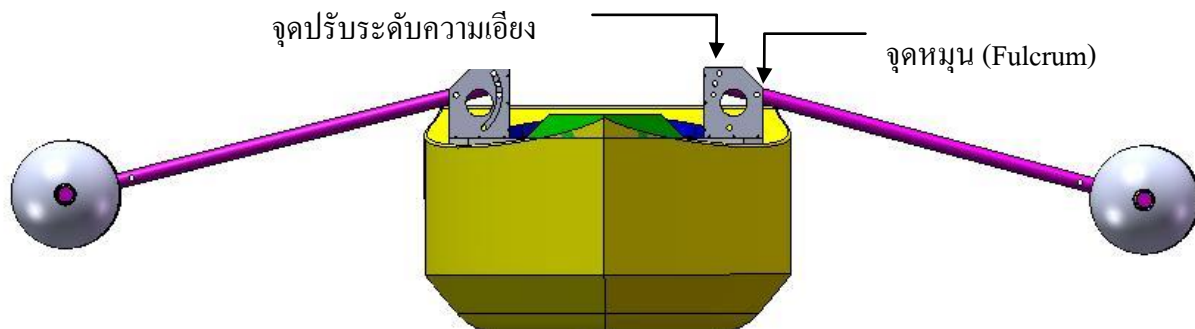
$$F_1 \cdot d_2 = F_2 \cdot d_1$$

$$F_2 \cos \theta = \rho V g$$

ρ : ความหนาแน่นของน้ำ

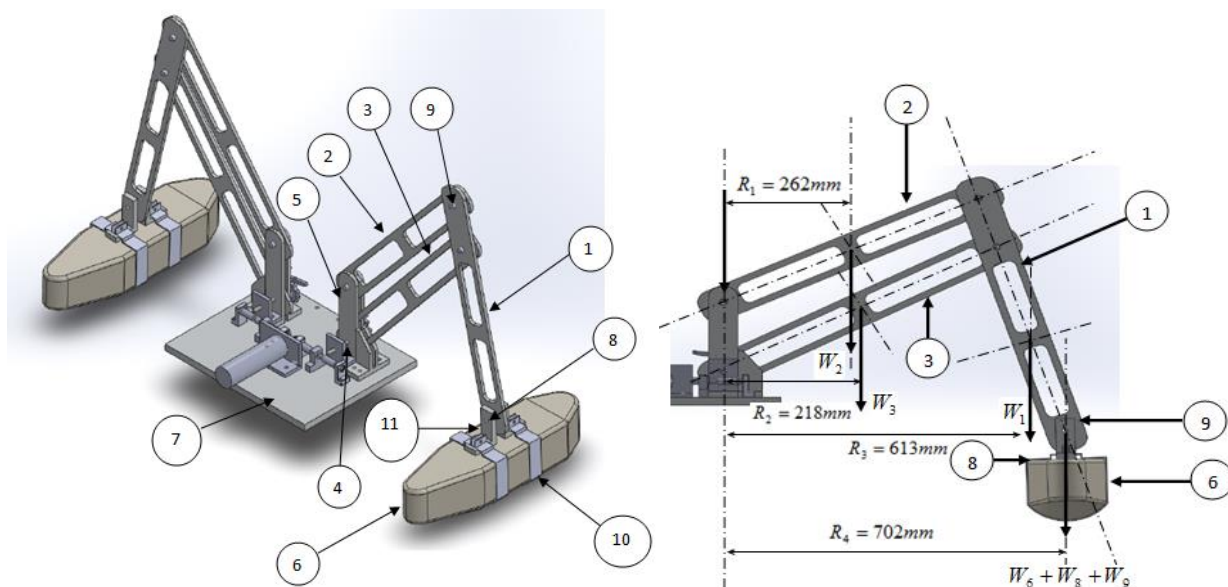
V : ปริมาตรของวัตถุส่วนจม

g : ความเร่งตามแรงโน้มถ่วงของโลก

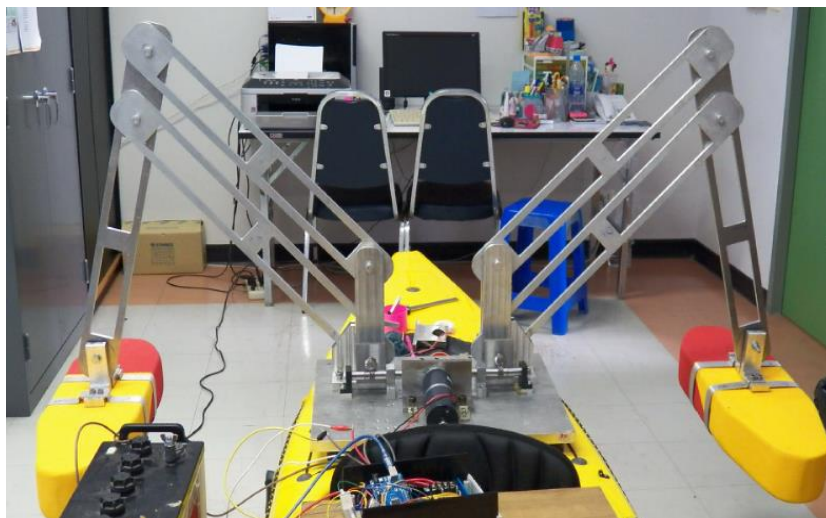


รูปที่ 5.41 ท่อนลอยเชื่อมต่อกับเรือหุ่นยนต์ที่แทนปรับมุมซึ่งสามารถปรับระดับความเอียงได้ 3 ระดับ

ในสภาวะปกติท่อนลอยจะยกอยู่ในระดับเหนือน้ำเพื่อลดแรงฉุด (Drag) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสระหว่างท่อนลอยและน้ำ เมื่อเรือหุ่นยนต์เริ่มโคลงมากขึ้นตามสภาวะของผิวน้ำ ท่อนจะเอียงลงมาแตะผิวน้ำเพื่อดำเนินการโคลงตัว แต่ถ้าเป็นการปฏิบัติการในพื้นที่จำกัดเช่นในแม่น้ำ หรือ คลอง นั้นจำเป็นต้องสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ จึงมีแนวคิดในการพัฒนาท่อนลอยช่วยการทรงตัวในรูปแบบที่สอง ดังแสดงในรูปที่ 5.42 ที่จะสามารถพับเก็บได้โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและหลักการของกลไกแบบ 4 แขนต่อ ดังได้อธิบายในหัวข้อ 3.3 แขนท่อนลอยสามารถยืดออกได้มากที่สุดเท่ากับ 72 cm จากตัวเรือ และสามารถพับเข้ามาชิดกับขอบเรือ นอกจากนั้นแล้วยังสามารถล็อคให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆกันได้ถึง 7 ตำแหน่งในขณะปฏิบัติการ ดังแสดงในรูปที่ 5.43 ซึ่งจะมีประโยชน์ในการลงปฏิบัติการในพื้นที่จริงดังเช่นในการสำรวจคลอง ดังในรูปที่ 5.44 ที่จะต้องมีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางประเภทต่างๆ เช่น สะพานคนเดิน สะพานรถยนต์ และ ผักตบชวา



รูปที่ 5.42 ท่อนลอยช่วยการทรงตัวที่สามารถพับเก็บได้



รูปที่ 5.43 กลไกที่ใช้ในการล๊อคหุ่นลอยช่วยการทรงตัวให้อยู่นิ่งในขณะปฏิบัติการหรือในขณะอยู่นิ่ง



รูปที่ 5.44 การลงสำรวจคลองรังสิตประยูรศักดิ์ ที่ต้องมีการหลบหลีกอุปสรรค เช่น สะพานและกอผักตบชวา โดยใช้วิทยุบังคับในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัค

5.5. ระบบระบายอากาศภายในห้องคอมพิวเตอร์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ประจำเรือ

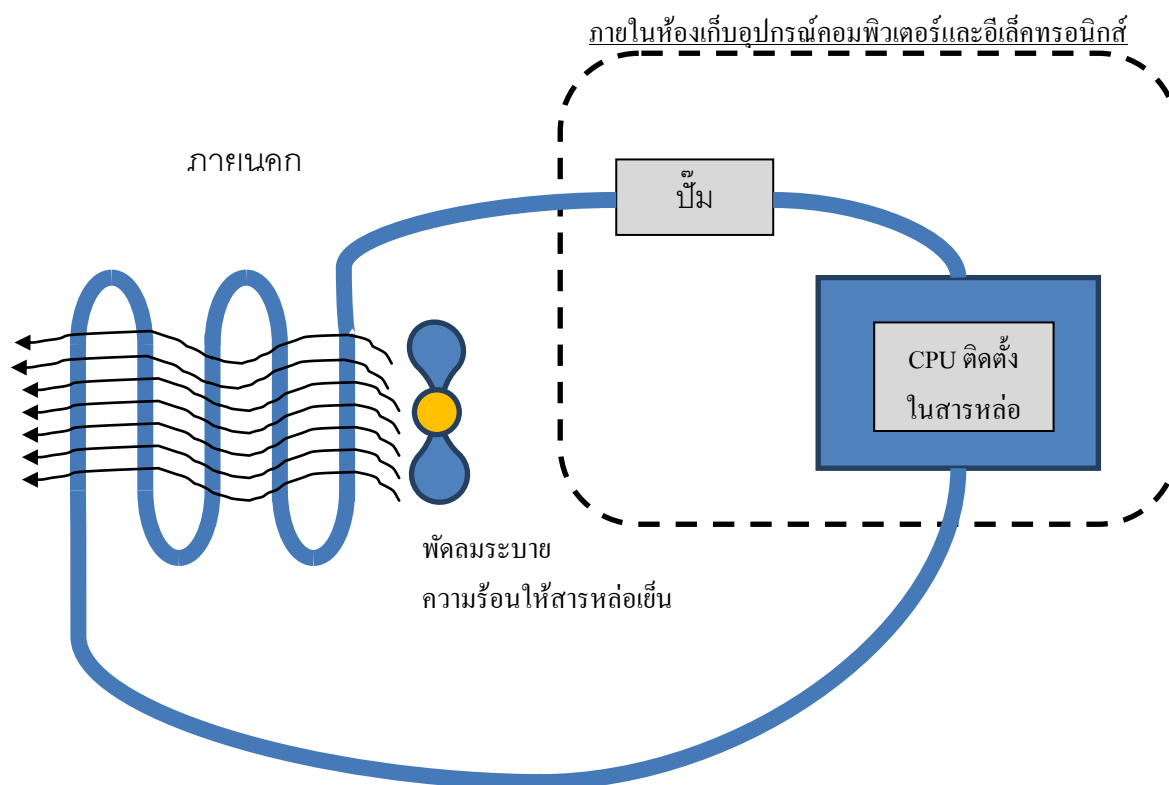
ระบบระบายอากาศมีความจำเป็นมากในการเพิ่มความวางใจในการปฏิบัติการของเรือหุ่นยนต์ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์และระบบไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้เรือหุ่นยนต์ปฏิบัติการได้อย่างแม่นยำและถูกต้องตามที่โปรแกรม ความร้อน ความชื้นและความเค็มเป็นศัตรูสำคัญที่ทำให้การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บกพร่องหรืออาจเกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

หลักการ

- ทำให้ระบบของเรามีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกโดยอุณหภูมินั้นๆจะไม่สูงหรือต่ำเกินขีดความทนทานของอุปกรณ์ของเราทั้งนี้เพื่อป้องกันการกลั่นตัวเป็นหยดน้ำในระบบ
- ทำให้ระบบมีความชื้นน้อยที่สุด
- ป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอมเข้ามาในระบบ สิ่งแปลกปลอมเช่น ฝุ่นละออง ไอเกลือ เป็นต้น

ในกรณีของเรือหุ่นยนต์เรากำลังศึกษาวิธีที่จะป้องกันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากตัวการทั้งสามดังต่อไปนี้

5.5.1 การระบายความร้อนด้วยน้ำ

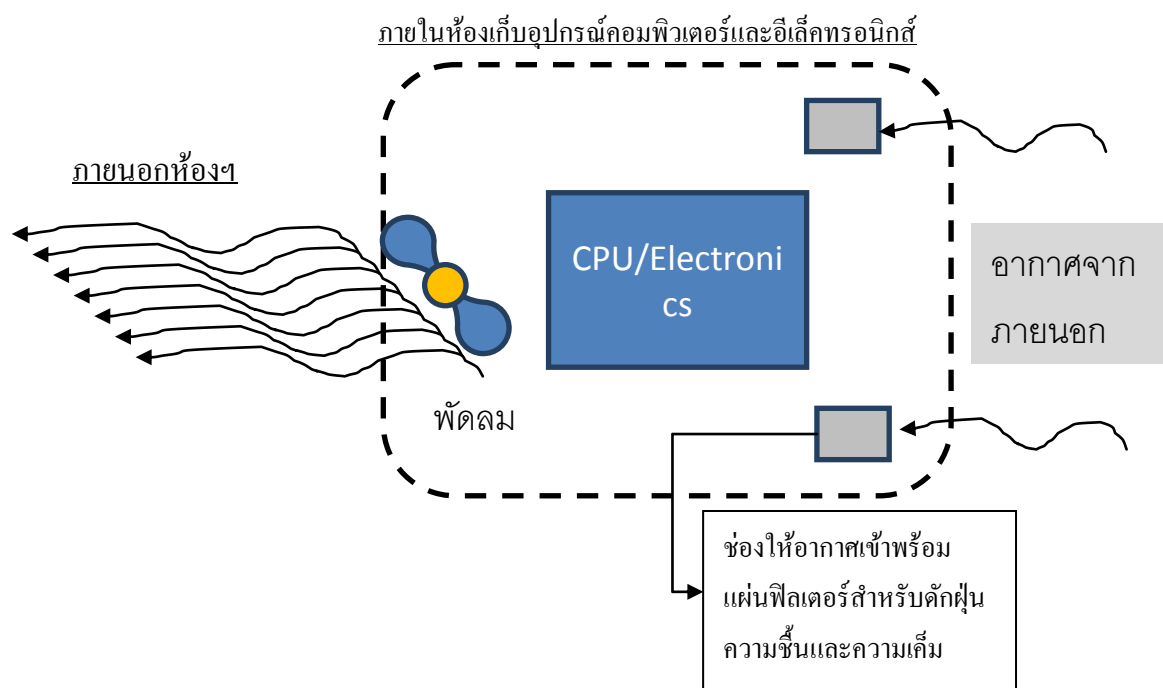


รูปที่ 5.45 ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ

ข้อดีของระบบการระบายความร้อนด้วยน้ำคือสามารถระบายความร้อนได้เต็มประสิทธิภาพโดยสิ่งที่เราต้องการระบายความร้อนไม่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมนอกระบบเลยทำให้มั่นใจได้ว่าระบบคอมพิวเตอร์หรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เราต้องการระบายความร้อนจะไม่เกิดการสึกกร่อนเสียหายจากการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเช่น น้ำ ความชื้น ไอทะเล เป็นต้น แต่ระบบระบายความร้อนแบบนี้จำเป็นต้องใช้ปั๊มเพื่อสร้างความดันหมุนเวียนในระบบและต้องมีพัดลมสำหรับระบายความร้อนให้กับสารหล่อเย็นที่ผ่านมาจากอุปกรณ์ที่เรา

ต้องการระบายความร้อน บีมและพัดลมอาจจะเป็นจุดอ่อนของระบบเนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองชำรุดเสียหายง่าย นอกจากนี้ยังต้องมีข้อต่อสำหรับของไหลหลายจุดซึ่งอาจเป็นจุดที่เกิดการรั่วซึมของสารหล่อเย็นก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อื่นๆได้ เราสามารถเพิ่มความสามารถในการกำจัดความชื้นโดยใส่สารดูดความชื้นเช่น silica gel ไว้ในห้องเก็บอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

5.5.2 การระบายความร้อนด้วยระบบระบายอากาศ



รูปที่ 5.46 ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศภายในห้องคอมพิวเตอร์ประจำเรือ

ระบบระบายอากาศนี้เป็นระบบที่สามารถระบายความร้อนและความชื้นได้ดีช่วยปรับอุณหภูมิภายในและภายนอกให้ใกล้เคียงกันได้ แผ่นฟิลเตอร์ที่ช่องทางเข้าอากาศจากภายนอกจะช่วยดักฝุ่นละออง ความชื้น และไอทะเลได้เป็นส่วนใหญ่ ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่ซับซ้อนมากและมีเพียงพัดลมดูดอากาศเท่านั้นที่อาจชำรุดเสียหายได้ง่าย ระบบกินไฟต่ำเนื่องจากมีเพียงพัดลมดูดอากาศเท่านั้น ข้อด้อยของระบบนี้คือความจำเป็นที่ต้องหมั่นดูแลหรือเปลี่ยนแผ่นกรอง รวมทั้งระบบไม่สามารถแยกจากการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างสิ้นเชิงเหมือนการระบายความร้อนด้วยน้ำ อากาศจากภายนอกอาจจะเข้ามาสัมผัสกับระบบภายในห้องทางช่องพัดลมและช่องอากาศเข้าได้ ได้ เราสามารถเพิ่มความสามารถในการกำจัดความชื้นโดยใส่สารดูดความชื้นเช่น silica gel ไว้ในห้องเก็บอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

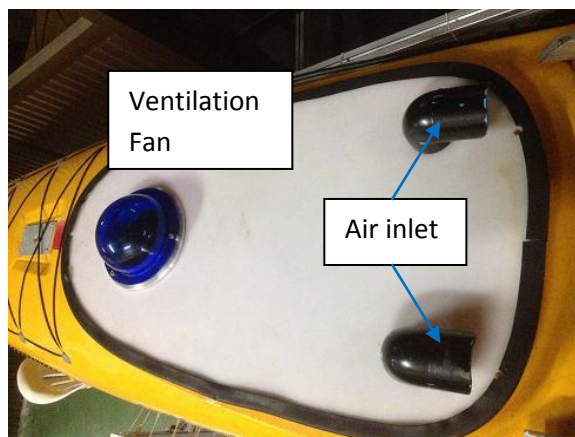
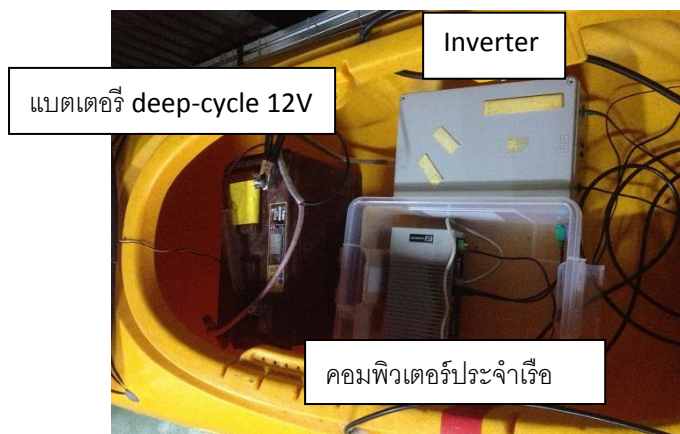
ทางคณะผู้วิจัยเลือกระบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่แสดงได้ดังรูปที่ 5.45 เนื่องจากเหตุผลดังนี้

ข้อดี : 1) ไม่ซับซ้อนมากและมีเพียงพัดลมดูดอากาศเท่านั้นที่อาจจะชำรุดเสียหายได้ง่าย 2) ระบบกินไฟต่ำเนื่องจากมีเพียงพัดลมดูดอากาศเท่านั้น 3) แผ่นฟิลเตอร์ที่ช่องทางเข้าอากาศจากภายนอกจะช่วยดักฝุ่นละออง ความชื้นและไอทะเลได้เป็นส่วนใหญ่

ข้อด้อย : 1) ความจำเป็นที่ต้องหมั่นดูแลหรือเปลี่ยนแผ่นกรอง 2) ไม่สามารถแยกจากการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้อย่างสิ้นเชิงเหมือนการระบายความร้อนด้วยน้ำ อากาศจากภายนอกอาจจะเข้ามาสัมผัสกับระบบภายในห้องฯทางช่องพัดลมและช่องอากาศเข้าได้ เราสามารถเพิ่มความสามารถในการกำจัดความชื้นโดยใส่สารดูดความชื้นเช่น silica gel ไว้ในห้องเก็บอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

การคำนวณหาขนาดของพัดลมดูดอากาศที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาตรของห้องเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเวลาในการเคลื่อนย้ายมวลอากาศปริมาตรนั้นให้ออกไปจากห้อง ห้องเก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีปริมาตรประมาณ $65 \times 145 \times 30 = 282750$ ลูกบาศก์เซนติเมตร = 9.985 ลูกบาศก์ฟุต เราเลือกพัดลมระบายอากาศที่มีพื้นที่หน้าตัดพัดลมขนาด 25 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งสามารถระบายอากาศทั้งหมดพร้อมทั้งดูดอากาศใหม่เข้ามาแทนที่ได้ในอัตราประมาณ 9.79 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที ซึ่งจะใช้เวลาในการระบายอากาศได้ภายในเวลาประมาณ 1 นาที

ระบบไฟในเรือทั้งหมดใช้ไฟขนาด 12 โวลต์มาจากแบตเตอรี่แบบ Deep-cycle ในการให้พลังงานกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ประจำเรือเป็นแบบ Rugged PC ขนาดเล็กใช้ไฟ 220 โวลต์กระแสสลับทำให้จำเป็นต้องติดตั้งอินเวอร์เตอร์สำหรับการใช้งานคอมพิวเตอร์ประจำเรือ Rugged PC สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 60 องศาเซลเซียสและที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90%



รูปที่ 5.47 การจัดวางอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และแบตเตอรี่ในเรือและการติดตั้งฝาปิด (Hatch) พร้อมระบบระบายอากาศ

5.6. การสร้างวงจรวัดแรงดันแบตเตอรี่เรือเพื่อตรวจสอบระยะเวลาที่เหลือในการปฏิบัติการ

ในการปฏิบัติการในพื้นที่จริงนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบระยะเวลาการปฏิบัติการในพื้นที่เพื่อที่จะได้เตรียมความพร้อมในการเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับมอเตอร์ขับเคลื่อนหรือพอดพโรเพาส์ชั้น และสามารถวางแผนในการหาตำแหน่งที่จะนำเรือเข้าเทียบท่าเพื่อทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ถ้าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีค่าต่ำกว่า 12 V จะต้องนำเรือเข้ามาเทียบท่าเพื่อเตรียมเปลี่ยนแบตเตอรี่ลูกใหม่ จากประสบการณ์ในการสำรวจคลองเมื่อขับเคลื่อนเรืออย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วประมาณ 10 km/hr แบตเตอรี่ deep-cycle ของ 3K จะสามารถใช้งานได้นานเฉลี่ยประมาณ 2 ชั่วโมง



รูปที่ 5.48 การนำเรือเข้าเทียบท่าเพื่อทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ในคลองรังสิตประยูรศักดิ์

5.6.1 การสร้างภาควัดแรงดันแบตเตอรี่

ก่อนที่จะเราจะเจาะลึกสู่การออกแบบวงจรมาลองศึกษาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรกันก่อน จากรูป กำหนดให้ V_i คือแรงดันอินพุตซึ่งมีย่านแรงดันระหว่าง $V_i(\min)$ ถึง $V_i(\max)$ ในทำนองเดียวกัน V_o คือแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการโดยมีย่านแรงดันระหว่าง $V_o(\min)$ ถึง $V_o(\max)$

วงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงย่านแรงดันอินพุต V_i ไปเป็นย่านแรงดันเอาต์พุต V_o ที่ต้องการ ซึ่งการแปลงนี้มีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรงนั่นเองในการแปลงแบบค่าเป็นบวก ค่าแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตามกันคือ ถ้าแรงดันอินพุต V_i มีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและถ้าแรงดันอินพุต V_i มีค่าลดลง แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าลดลงเช่นกัน แต่ถ้าเป็นการแปลงแบบค่าเป็นลบ ค่าแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตมีค่าเปลี่ยนแปลงตรงกันข้าม คือถ้าแรงดันอินพุต V_i มีค่าเพิ่มขึ้น แรงดันเอาต์พุต V_o จะมีค่าเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตในกราฟการแปลงทั้งสองแบบ สามารถแสดงเป็นสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการเส้นตรงดังนี้

$$V_o = m \times V_i(\min) \quad (5.35)$$

เมื่อ m คือค่าความชันของเส้นตรง

$V_i(\max)$ และ $V_i(\min)$ คือ แรงดันอินพุตสูงสุด และ ต่ำสุด ตามลำดับ

$V_o(\max)$ และ $V_o(\min)$ คือ แรงดันเอาต์พุตสูงสุด และ ต่ำสุด ตามลำดับ

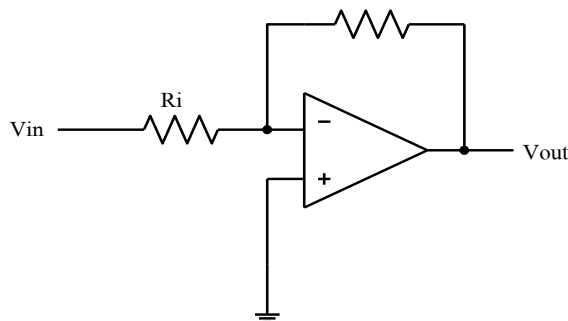
จากสมการเส้นตรง หาค่า m (ค่าความชัน) ได้จาก

$$m = \frac{(V_o(\max) - (V_o(\min)))}{(V_i(\max) - (V_i(\min)))} \quad (5.36)$$

จากสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ เราต้องออกแบบวงจรที่ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต เป็นไปตามสมการทางคณิตศาสตร์เหล่านั้น เพื่อปรับความต่างศักย์ในสมการ (5.35) ให้ได้ถูกต้องจะต้องใช้ วงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟสโดยจะป้อนแรงดันอินพุตเข้า ทางขาอินพุตผ่าน ตัวต้านทานอินพุต (R_i) และตัวต้านทานป้อนกลับ (R_f) ต่ออยู่ระหว่าง ขาเอาต์พุตกับขาอินพุตลบ ส่วนขา อินพุตบวก ต่ออยู่กับกราวด์เฟสของสัญญาณทางเอาต์พุต จะตรงกันข้ามกับเฟสของสัญญาณทางอินพุต

$$\text{สัญญาณเอาต์พุต } (V_{out}) = -V_{in} \times \frac{R_f}{R_i} \quad (5.37)$$

$$\text{อัตราขยาย } (A_{cl}) = -\frac{R_f}{R_i} \quad (5.38)$$



รูปที่ 5.49 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ (วงจร Inverting)

5.6.2 การออกแบบวงจรวัดแรงดัน

วงจรมูลฐานที่ใช้ออกแบบวงจร คือวงจรออปแอมป์แบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) ดังภาพที่ 5.63

สูตรการหาแรงดันเอาต์พุตของวงจรออปแอมป์แบบอินเวอร์ตติ้ง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$V_o = - \frac{R_f}{R_i} \quad (5.39)$$

วงจรภาควัดแบตเตอรี่ให้แรงดันเอาต์พุต 0 โวลต์ ที่แรงดันต่ำสุด และ 3.3 โวลต์ที่แรงดันสูงสุด ซึ่งจะ
ไปต่อกับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ช่อง ADC เพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลซึ่งต้องการ
แรงดันอินพุตในย่าน 0-3.3 โวลต์

วงจร ที่ใช้ในการอินเตอร์เฟสภาควัดแรงดันแบตเตอรี่ กับ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 ต้องมีย่าน
แรงดันอินพุตและเอาต์พุตดังนี้

$$V_i(\max) = 3.3 \text{ โวลต์} \quad V_o(\max) = 3.3 \text{ โวลต์}$$

$$V_i(\min) = 0 \text{ โวลต์} \quad V_o(\min) = 0 \text{ โวลต์}$$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์แรงดันอินพุตและเอาต์พุตของวงจร พบว่าค่าแรงดันเปลี่ยนแปลงตามกัน
ดังนั้นจึงต้องใช้ m (ค่าความชัน) เป็นบวก โดยขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

$$m = (3.3 - 0)/(33 - 0) = 0.1 \quad (5.40)$$

จากค่า m ที่ได้นี้ เราสามารถใช้สมการที่ 10 หาค่า R_f และ R_i ได้ โดยมีบรรทัดฐานในการเลือกดังนี้

ค่าความต้านทานของวงจรอินเวอร์ต มีค่าเท่ากับ R_i ดังนั้นจากวงจรค่า R_i ต้องมีค่ามากๆ

เราต้องการค่า R_f ต่ำๆ แต่ค่า R_i สูงๆ จะเห็นว่าค่า R_f และ R_i แปรผันตามกัน คือ ถ้าเลือกค่า R_f ต่ำ ก็จะทำให้
ค่า R_i ต่ำไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าเลือก R_i ค่าสูง ก็จะทำให้ค่า R_f สูงไปด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติเราต้อง
เลือกค่า R_f ที่ต่ำพอที่จะทำให้แรงดันออฟเซตมีค่าน้อยรับได้

จากบรรทัดฐานเหล่านี้ เราสามารถกำหนดค่า R_f ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่ากระแสออฟเซตของ
ออปแอมป์ที่ใช้ในที่นี้สมมุติว่า R_f มีค่าเท่ากับ 1 เมกกะโอห์ม ทำการคำนวณหาค่า R_i ตามสมการสมการจะได้

$$R_i = R_f/m$$

$$R_i = 1M/0.1$$

$$R_i = 10 \text{ เมกกะโอห์ม}$$

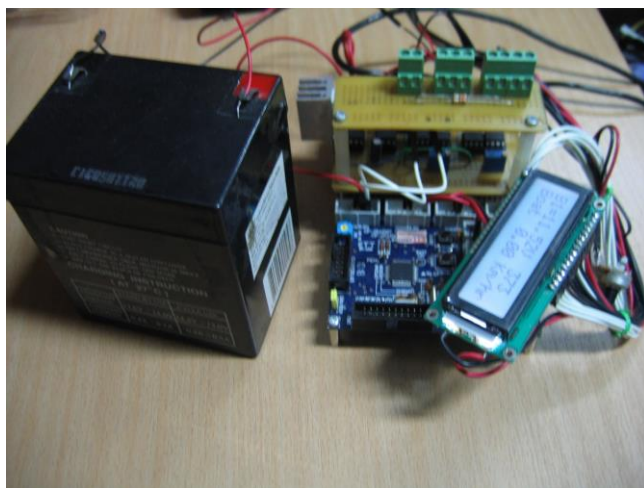
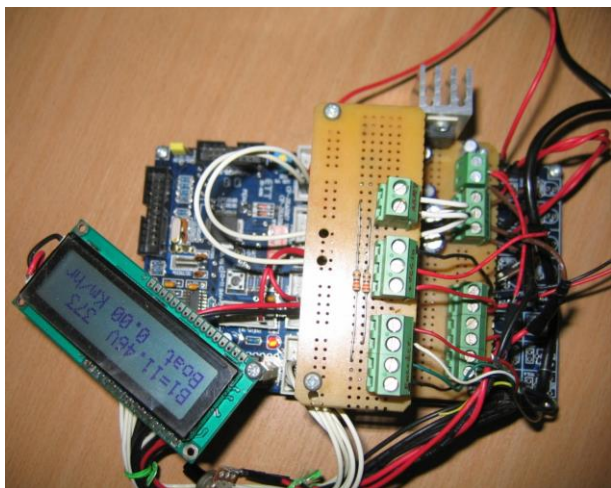
เมื่อได้ค่าความต้านทาน R_i และ R_f แล้ว ลองแทนค่าแรงดัน(V_i) เมื่อวัดกับแบตเตอรี่ สมมติแบตเตอรี่
วัดได้ $V_i = 12.5V$

$$V_o = -V_i \times (R_f/R_i)$$

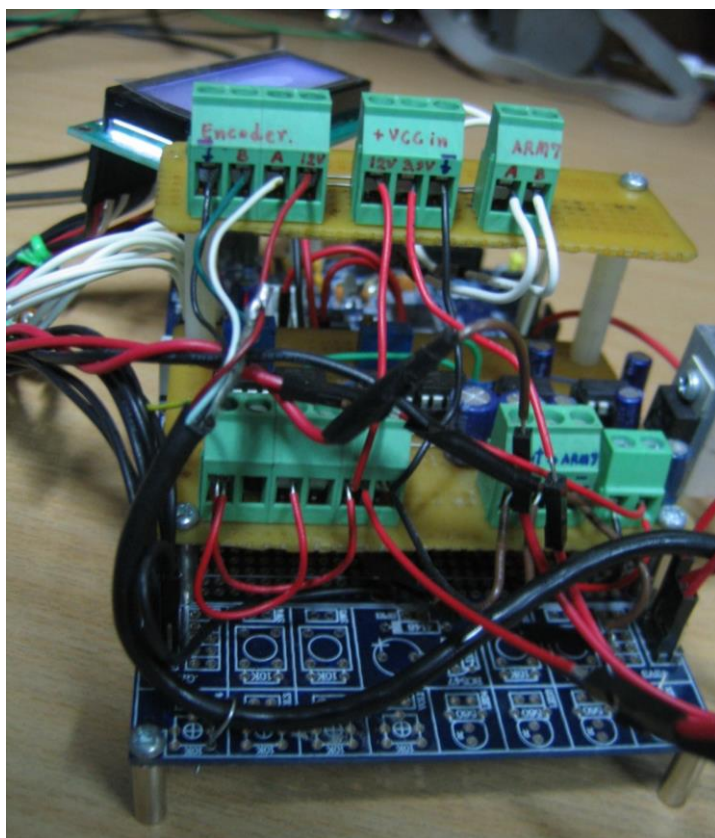
$$V_o = -12.5 \times (1M/10M)$$

$$V_o = -1.25V$$

จะเห็นว่าค่า Output ของวงจรอปแอมป์ที่ได้เป็นลบ นั่นก็เป็นเพราะวงจรที่ใช้เป็น วงจรแบบอินเวอร์ตติ้ง (Inverting) เราสามารถทำให้แรงดัน Output ของวงจรอปแอมป์เป็นบวกได้โดยการ นำวงจรอินเวอร์ตติ้งอีก วงจรที่มีอัตราขยายเท่ากับหนึ่ง เพิ่มเข้าไปโดยต่ออนุกรมด้าน Output กับวงจรเดิม แรงดันด้าน Output ที่ได้ จะกลับเฟสเป็นบวกและมีขนาดเท่าเดิมคือ 1.25V



รูปที่ 5.50 วงจรวัดแบตเตอรี่เมื่อต่อเสร็จแล้ว โดยมีการรายงานผลบนจอ LCD และ การทดสอบวัดแบตเตอรี่



รูปที่ 5.51 แสดงขั้ววงจรวัดแบตเตอรี่ ที่เชื่อมต่ออยู่กับวงจรอ่านสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ของมอเตอร์บังคับ ทิศทางของ thruster

6. อภิปรายและวิจารณ์ผลของโครงการย่อยที่ 1

สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆได้ดังนี้

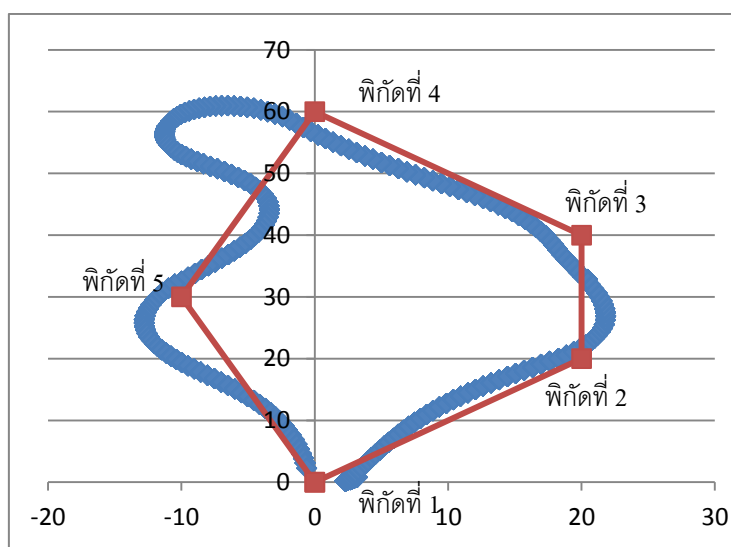
1. ผลการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสภาวะ ทุกตัวกับเรือคายัคในสระน้ำที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา
2. การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติในทะเล

6.1 ผลการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสภาวะ ทุกตัวกับเรือคายัคในสระน้ำที่ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

จากการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสภาวะทุกตัว ในหัวข้อที่ 5.1 และได้ทำการทดสอบระบบควบคุมนี้กับแบบจำลองทางพลศาสตร์ของเรือคายัคไปแล้ว ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติของเรือคายัคจริง กับจุดพิกัดที่กำหนดที่เคลื่อนที่แบบต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม และ เป็นแบบ Grid เพื่อจะได้เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้จากแบบจำลองในหัวข้อที่ 5.1.4 โดยการทดสอบจะกระทำในสระน้ำข้างอาคารวิทยบริการ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

6.1.1 แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม (Circular configuration)

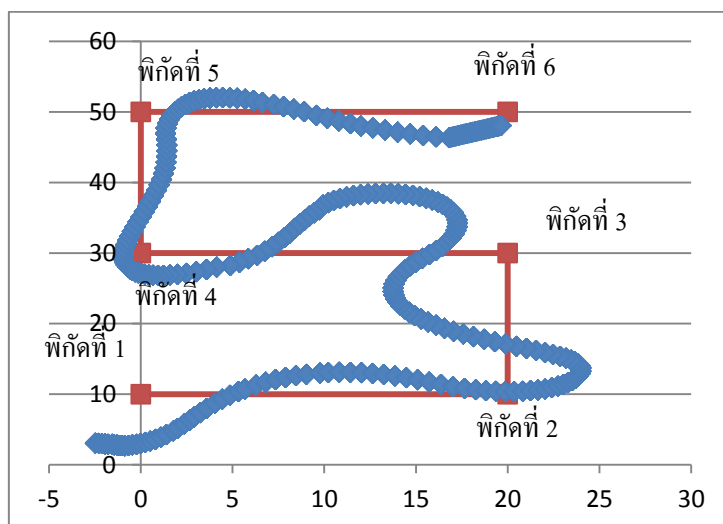
ในการทดสอบกับเรือคายัคจริงโดยทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม โดยควบคุมให้เคลื่อนที่จากจุดพิกัดที่ 1 ไปยังจุดพิกัดที่ 2, 3, 4, 5 และกลับมายังจุดพิกัดที่ 1 ตามลำดับ โดยจุดเริ่มต้นไม่ได้เริ่มจากจุดที่ 1 จริงๆ แต่เป็นจุดใกล้เคียงเท่านั้นเนื่องจากการที่จะให้เรือคายัคเริ่มเคลื่อนที่จากจุดที่ 1 นั้นทำได้ยากมากเพราะลมพัดแรงมากและมีเพียงเรือลำที่จะทดสอบลำเดียวเท่านั้นที่อยู่ในน้ำจึงไม่สามารถนำเรือไปยังจุดที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติกับเรือคายัคจริง ในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัด ที่เส้นทางเป็นแบบวงกลม

ผลการทดสอบจะเห็นว่าเรือคายัคสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องแต่ความแม่นยำในการเข้าถึงจุดพิกัดที่กำหนด อาจจะต้องได้รับการปรับปรุง นอกจากนี้ในการทดสอบยังพบว่าถ้าหากความเร็วของเรือยิ่งมาก ค่า Overshoot ในการเลี้ยวของเรือเมื่อเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ยิ่งมากตามไปด้วย

6.1.2 แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S หรือแบบ Grid



รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติกับเรือคายัค ในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่เส้นทางเป็นแบบ Grid

ในการทดสอบกับเรือคายัคจริงโดยทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบรูปตัว S พบปัญหาในการเข้าจุดเริ่มต้นเช่นเดียวกับการทดสอบแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม แต่ผลการทดสอบก็ยังแสดงให้เห็นว่าเรือคายัคสามารถเคลื่อนที่ไปตามจุดพิกัดที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง โดยมีปัญหาในเรื่องความแม่นยำในการเข้าสู่จุดพิกัดที่กำหนดเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เนื่องจากบั้งที่ทำการทดสอบนี้มีขนาดจำกัดไม่สามารถกำหนดระยะห่างระหว่างจุดสองจุดใดๆให้มากกว่านี้ได้ทำให้เรือมีระยะทางในการปรับตัวเข้าสู่เส้นทางน้อยเกินไป ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการปรับค่า r_d ให้มีขนาดมากขึ้น

6.2 การทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติในทะเล

เรานำเรือหุ่นยนต์ที่ทำการออกแบบให้สามารถใช้ในทะเลได้นั้นไปทดสอบ ณ อ่าวปะการัง เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง โดยใช้เรือหุ่นยนต์ในกิจกรรมการเก็บภาพใต้น้ำประกอบกับความลึกและพิกัด GPS ซึ่งเป็นวิธีการที่นักวิทยาศาสตร์ทางด้านสิ่งแวดล้อมทางทะเลนิยมปฏิบัติ เพื่อประโยชน์ในงานเก็บข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อมทางทะเลเพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์แก้ไขปัญหา Climate change ปกติแล้วการเก็บข้อมูล

ลักษณะดังกล่าวจะเป็นงานที่ปฏิบัติโดยคนนั่งเรือออกไปปฏิบัติขั้นตอนต่างๆด้วยตนเอง ต้องทำงานภายใต้แสงแดดจัดกลางทะเลเป็นระยะเวลานานทำให้ไม่สะดวก การใช้เรือหุ่นยนต์แบบไม่มีคนบังคับในการวิ่งปฏิบัติการแบบอัตโนมัติจึงน่าจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์ที่น่าสนใจในการช่วยปฏิบัติหน้าที่เก็บข้อมูลทางด้านสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 6.3 ภาพการทดสอบระบบหุ่นยนต์เรือในทะเล ณ อ่าวปะการัง เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง ด้านหน้าเรือติดตั้งหัวหยั่งความลึกของน้ำด้วยเสียงและกล้องถ่ายภาพใต้น้ำ

รูปแบบการใช้งานเรือหุ่นยนต์เป็นดังนี้คือเรือจะวิ่งไปตามจุดพิกัด GPS waypoints ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าตาม Algorithm แบบ double PD loop control รูปแบบการวิ่งมีสองแบบคือแบบที่ 1 ตามรูปที่ 5.7 และ แบบที่ 2 ตามรูปที่ 5.9 เราได้ติดตั้งกล้องถ่ายภาพใต้น้ำที่ส่วนหัวเรือเพื่อเก็บภาพแนวหินปะการัง และติดตั้งอุปกรณ์หยั่งความลึกของน้ำด้วยเสียง Echosounder ในการทดสอบครั้งนี้เรือหุ่นยนต์ใช้เวลาปฏิบัติการในทะเลรวมทั้งสิ้นประมาณ 5 ชั่วโมง (รวมระยะเวลาขณะวิ่งปฏิบัติการ และเวลาลอยลำอยู่นิ่งๆ) หุ่นยนต์เรือสามารถวิ่งในทะเลได้เป็นอย่างดีโดยที่มีบางครั้งที่มีคลื่นแรงปะทะด้านข้างของตัวเรือจากเรือที่วิ่งสัญจรไปมาแต่การโคลงตัวของเรือในแนวแกน Roll (ซึ่งเป็นจุดอ่อนที่สำคัญของเรือคายัค การโคลงตัวที่มากเกินไปจุดสมดุลสามารถทำให้เรือพลิกคว่ำได้ง่าย) ถูกจำกัดโดยทุ่นข้างลำตัวทั้งสองข้างช่วยป้องกันไม่ให้เรือคว่ำ ทุ่นทั้งสองข้างถูกติดตั้งให้อยู่เหนือน้ำในขณะที่เรือมีการโคลงตัวไม่มากหรือไม่มีการโคลงตัวเลยทั้งนี้เพื่อให้เรือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนตัวได้อย่างคล่องแคล่วโดยปราศจากแรงต้านจากทุ่น หากเมื่อใดก็ตามที่เรือมีการโคลงตัวมากเกินไปทุ่นข้างที่เรือโคลงลงจะแตะกับผิวน้ำเพื่อดันและผลักให้เรือกลับเข้าสู่จุดสมดุลอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 6.4 การขนย้ายเรือคายัคจากฝั่งเพื่อนำไปทดสอบที่เกาะเสม็ดโดยบรรทุกบนเรือขนส่งขนาดกลางของรีสอร์ทนิมมานรดี การขนส่งเป็นไปอย่างราบรื่นเนื่องจากเรือคายัคมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบาและกินพื้นที่ว่างสัมภาระไม่มากจนเกินไป

อีกประเด็นหนึ่งคือการเปลี่ยนกลไกการขับเคลื่อนของชุดเครื่องท้ายจากแบบขับเคลื่อนโดยตรงมาเป็นระบบขับเคลื่อนผ่านชุด pulley อัตราทดที่ 1:2 มีผลทำให้ความเร็วในการเลี้ยวของเรือลดลงครึ่งหนึ่งจากเดิม มีผลทำให้รัศมีในการเลี้ยวกว้างขึ้นและปฏิกิริยาตอบสนองต่อการเปลี่ยนจุด waypoints ในแบบ Scan grid ซึ่งจำเป็นต้องใช้ช่วงเลี้ยวที่แคบที่สุดในการเลี้ยวแบบหันหัวกลับที่ 180 องศาทำได้ช้าลงกว่าเดิมครึ่งหนึ่ง

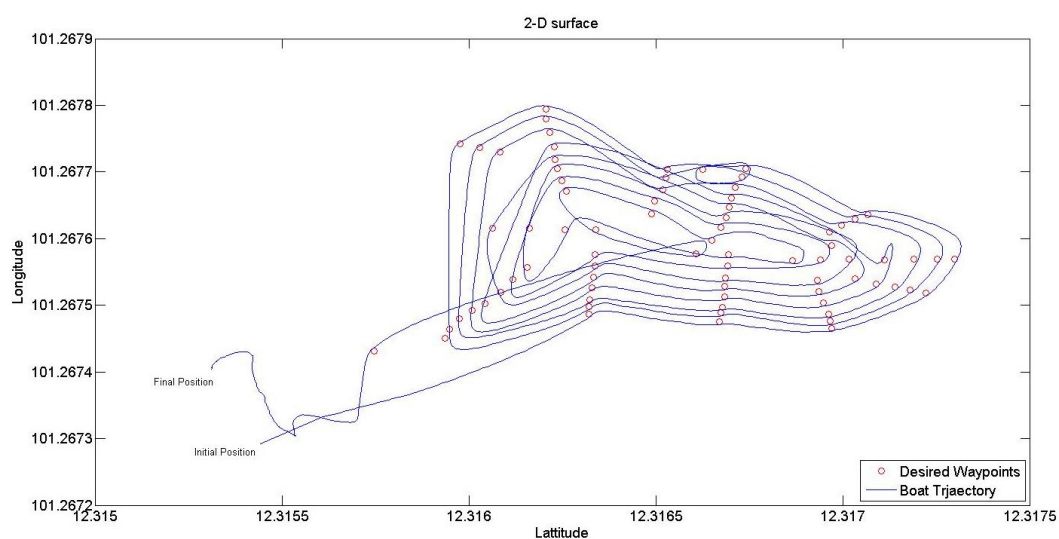
อุปกรณ์ภายในเรือรวมทั้งชิ้นส่วนเรือทุกชิ้นและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆถูกนำมาตรวจสอบอีกครั้ง ประมาณสองสัปดาห์หลังจากที่ปฏิบัติการในทะเลเพื่อหาจุดที่เกิดการกัดกร่อนจนเป็นสนิม แต่ไม่พบชิ้นส่วนใดที่เป็นสนิมเว้นแต่ส่วนที่เป็นน็อตเหล็กที่ไม่ได้เป็นแบบ Stainless steel บางจุดซึ่งเริ่มมีสนิมจับบ้างแล้ว เนื่องจากการสัมผัสกับน้ำทะเลแล้วไม่ได้ล้างทำความสะอาดให้ดี ดังนั้นระบบการระบายอากาศและระบบการ Seal กันน้ำของห้องเก็บอุปกรณ์ต่างๆสามารถทำได้ดีและป้องกันอุปกรณ์ และเครื่องมือได้อย่างมีประสิทธิภาพ



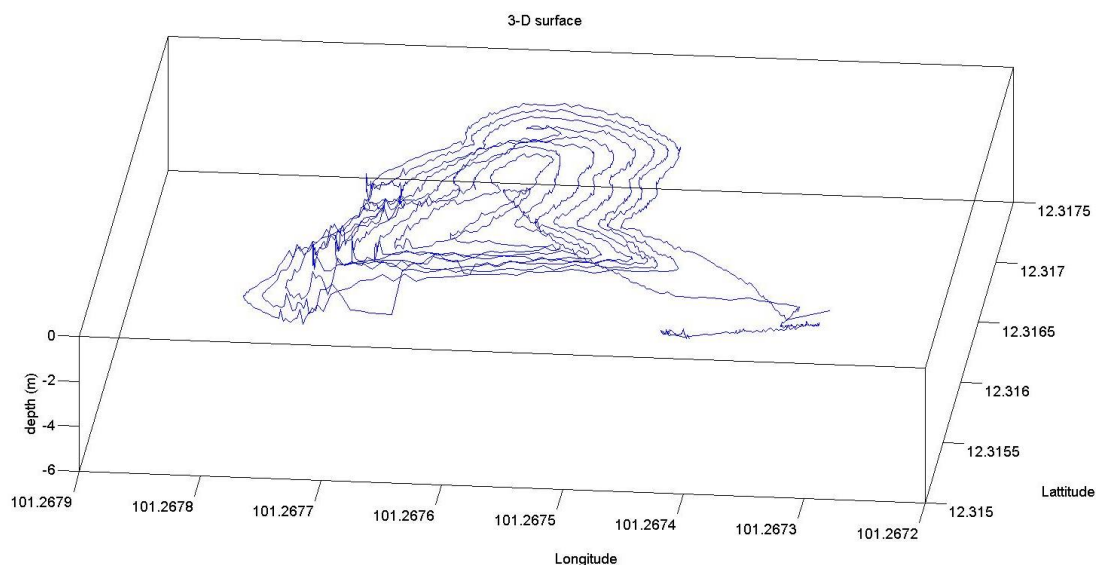
รูปที่ 6.5 การประกอบกลไกชุดขับเคลื่อนสำหรับลงทะเลทางท้ายเรือและทูลอยช่วยการทรงตัวเข้ากับเรือคายัค (ซ้าย) และ การติดตั้งระบบนำร่องและตรวจสอบความพร้อมก่อนทำการทดสอบจริง (ขวา)



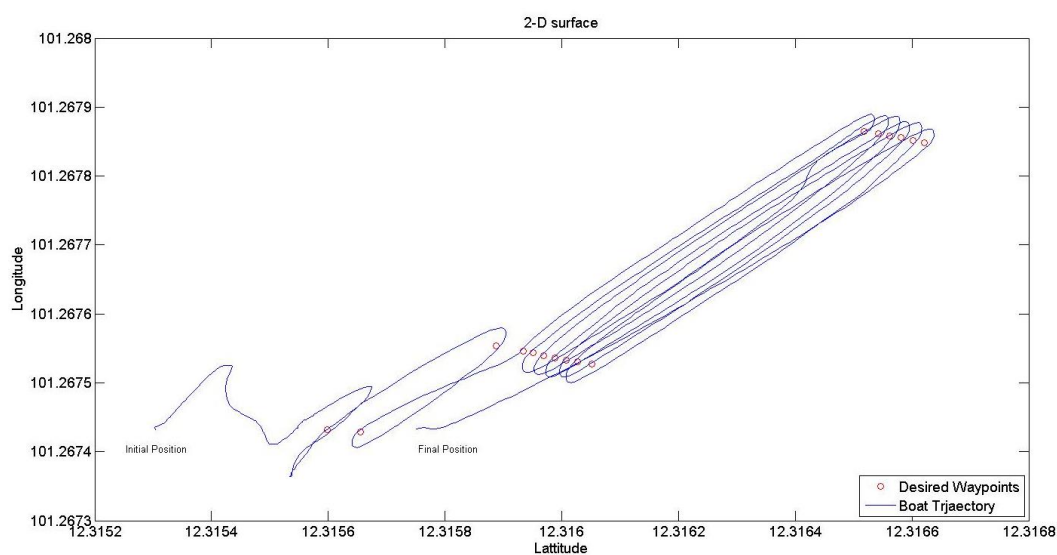
รูปที่ 6.6 การทดสอบเรือเพื่อเก็บค่าความลึกของอ่าวปะการัง ที่เกาะเสม็ด โดยการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติตามจุดพิกัด GPS ที่กำหนด (ซ้าย) และ เรือพี่เลี้ยงที่ช่วยแก้ไขระบบอยู่ในทะเล (ขวา)



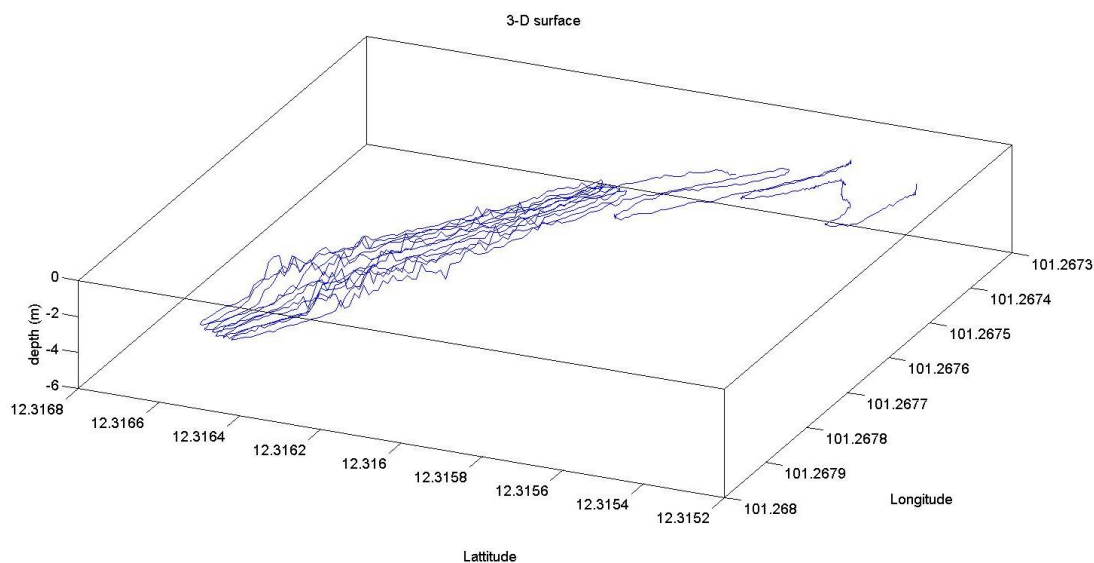
รูปที่ 6.7 แผนภาพแสดงเส้นทางวิ่งของเรือหุ่นยนต์ตามแผนการวิ่งแบบที่ 1 โดยมีลักษณะการวิ่งวนด้วยรัศมีการเลี้ยวในแต่ละจุดไม่แคบเกินไปเพื่อเก็บข้อมูลการวิ่งเป็นบริเวณกว้าง จุดสีแดงแสดง Goal waypoints ที่เรือหุ่นยนต์จะต้องผ่านทั้งหมด เส้นสีฟ้าแสดงเส้นทางการวิ่งจริงของหุ่นยนต์ แผนภาพที่แสดงพล็อตโดยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 6.8 แผนภาพในรูปแบบ 3 มิติที่วัดได้จาก Echosounder แสดงระดับความลึก ณ จุดต่างๆตามแผนการวิ่งแบบที่ 1 พล็อตโดยโปรแกรม MATLAB



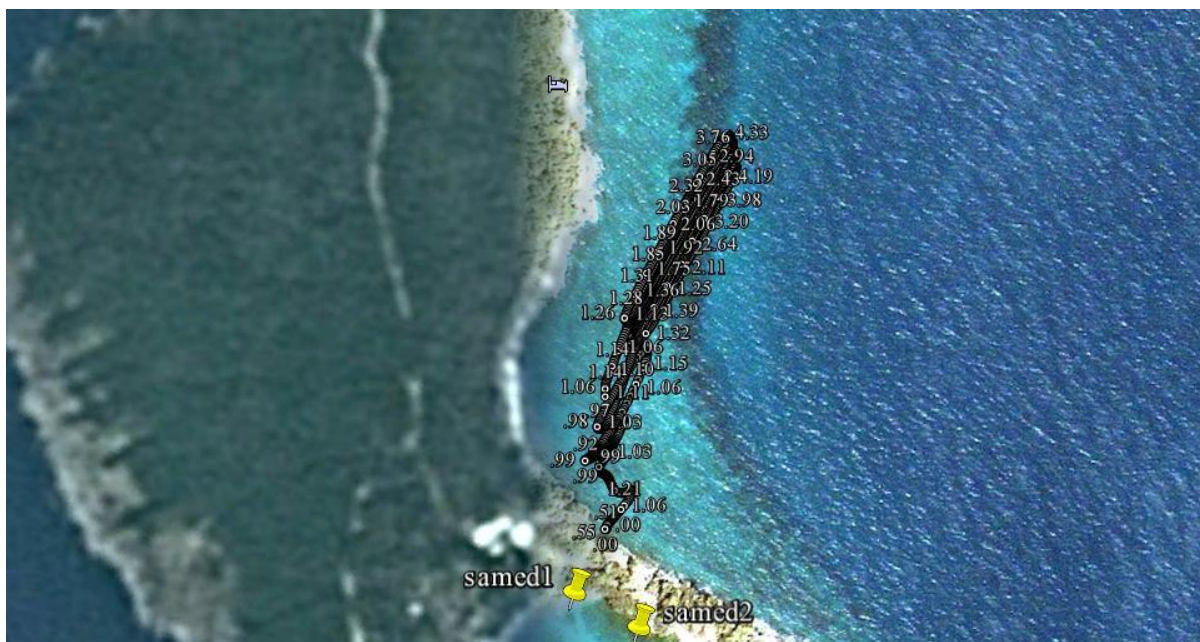
รูปที่ 6.9 แผนภาพแสดงเส้นทางวิ่งของเรือหุ่นยนต์ตามแผนการวิ่งแบบที่ 2 โดยมีลักษณะการวิ่งวนด้วยรัศมีการเลี้ยวในแต่ละจุดแบบหักมุมเพื่อเก็บข้อมูลการวิ่งเป็นแบบ Scan grid โดย grid size ห่างกันประมาณ 3 เมตรและระยะทางแนวยาวประมาณ 110 เมตรจุดสีแดงแสดง Goal waypoints ที่ เรือหุ่นยนต์จะต้องผ่านทั้งหมด เส้นสีฟ้าแสดงเส้นทางการวิ่งจริงของหุ่นยนต์ พล็อตโดยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 6.10 แผนภาพในรูปแบบ 3 มิติที่วัดได้จาก Echosounder แสดงระดับความลึก ณ จุดต่างๆตามแผนการวิ่งแบบที่ 2 จะเห็นได้ถึงระดับความลึกที่แตกต่างกันในพื้นที่ใกล้ชายฝั่ง (ความลึกประมาณ 2 เมตร) และพื้นที่ใกล้ชายฝั่งตามขอบแนวหินปะการัง (ความลึกประมาณ 6 เมตร) แผนภาพที่แสดงพล็อตโดยโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 6.11 ส่วนหนึ่งของภาพใต้น้ำที่ capture ได้จาก HD video 1080p ด้วยกล้อง GoPRO HD แสดงสภาพแนวหินปะการังใต้ทะเลที่ระดับความลึกประมาณ 2-6 เมตร เนื่องจากเรือหุ่นยนต์ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้การขับเคลื่อนเงียบและไม่รบกวนสัตว์น้ำตามแนวปะการังทำให้สามารถจับภาพปลาและสัตว์น้ำอื่นๆได้เป็นจำนวนมากเป็นผลดีต่อนักวิทยาศาสตร์ที่สนใจการดำรงชีวิตของสัตว์เหล่านี้



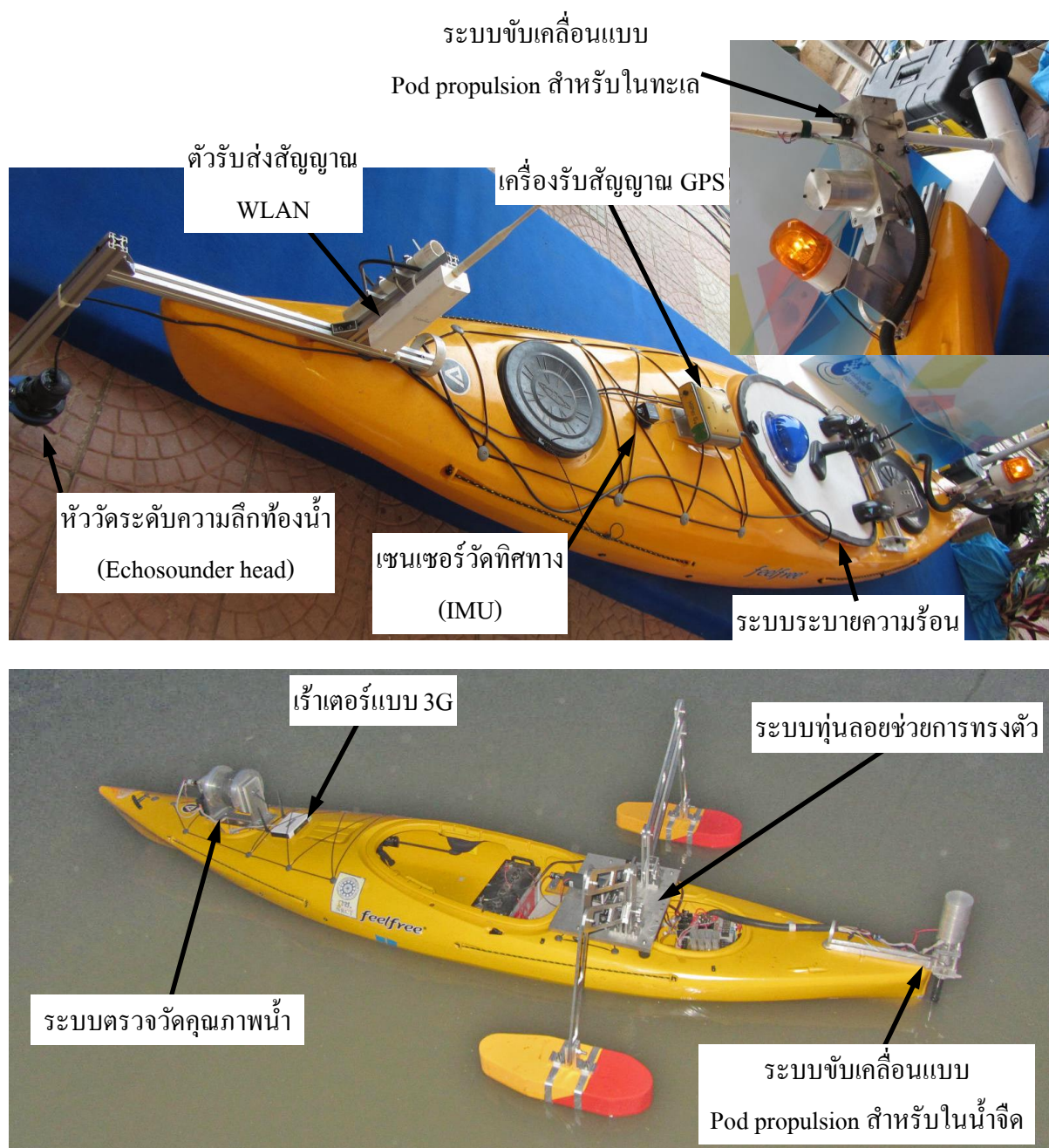
รูปที่ 6.12 สรุปเส้นทางการปฏิบัติการทดสอบในแบบที่ 2 โดยพล็อตเส้นทางการเคลื่อนที่พร้อมความลึกที่พิกัดทั้งหมดบนโปรแกรมแผนที่เช่น Google Earth

6.2.1 ปัญหาที่พบจากการสำรวจมีดังนี้

- ผลจากคลื่นลมและกระแสน้ำในทะเลทำให้ต้องมีการปรับตั้งค่า Gain ของระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติใหม่ให้มีขนาด Gain มากขึ้นทั้ง Kp (thruster) และ Kd (thruster) และ Kp (heading) และ Kd (heading) ซึ่งการเคลื่อนที่ในทะเลมีความแตกต่างจากการเคลื่อนที่ในอ่างเก็บน้ำอย่างมาก
- การโคลงตัวอันเนื่องมาจากคลื่นที่ซัดเข้าทางด้านข้างเรือมีผลต่อค่าความลึกที่เก็บได้ การโคลงตัวในมุม role angle ที่ห่างจากจุดสมดุลมากๆส่งผลให้ค่าความลึกที่วัดได้มีค่าความลึกมากกว่าความเป็นจริง ถ้าต้องการความละเอียดในข้อมูลความลึกมากๆจำเป็นต้องมีมาตรการปรับแก้โดยสามารถใช้ IMU เป็นตัวเก็บค่า role angle ไว้เพื่อปรับแก้กับข้อมูลความลึกที่วัดได้ในภายหลัง หรือสร้างระบบ active control สำหรับหัว echosounder ให้สามารถรักษาระดับแนวตั้งได้อยู่เสมอ
- ปัญหาการสื่อสารที่ช้ามากในการรับส่งข้อมูลระหว่างเรือและ base station ในการทดสอบครั้งก่อนหน้านี้นี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าเกิดจากการที่คลื่นวิทยุถูกกั้นโดยตัวกลางที่เป็นน้ำซึ่งล้อมรอบเรือ หากแต่จากการทดสอบครั้งนี้ทำให้ทราบว่าเหตุที่แท้จริงคือคลื่นวิทยุที่ใช้ควบคุมเรือใน manual mode จะรบกวนคลื่นวิทยุที่ใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลระหว่าง base station และคอมพิวเตอร์ประจำเรือเนื่องจากมีค่าความถี่เหมือนกันที่ 2.4 GHz. วิธีแก้ปัญหาย่างง่ายที่ทำอยู่คือต้องปิดระบบอย่างใดอย่างหนึ่งก่อนเพื่อไม่ให้กวนกับอีกระบบหนึ่งที่เป็นต้องใช้งาน

7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของโครงการย่อยที่ 1

ในโครงการย่อยที่ 1 นี้จะเน้นการพัฒนาควบคุมแบบอัตโนมัติของเรือคายัคให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น และ ปรับปรุงระบบขับเคลื่อนที่สามารถปฏิบัติการได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำเค็ม และ ระบบหุ่นลอยเพื่อช่วยการทรงตัวและเพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัวเมื่อปะทะกับคลื่นลมแรง เพื่อให้สามารถนำเรือไปประยุกต์ใช้งานในน้ำทะเลได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แล้วยังได้พัฒนาระบบระบายความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อป้องกันไอน้ำหือไอเกลือที่อาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้นเมื่อใช้งานนานๆ ซึ่งต้องใช้การบูรณาการของเทคโนโลยีในหลายๆด้านเข้าด้วยกัน ภาพรวมของเรืออัตโนมัติที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้แสดงในรูปที่ 7.1



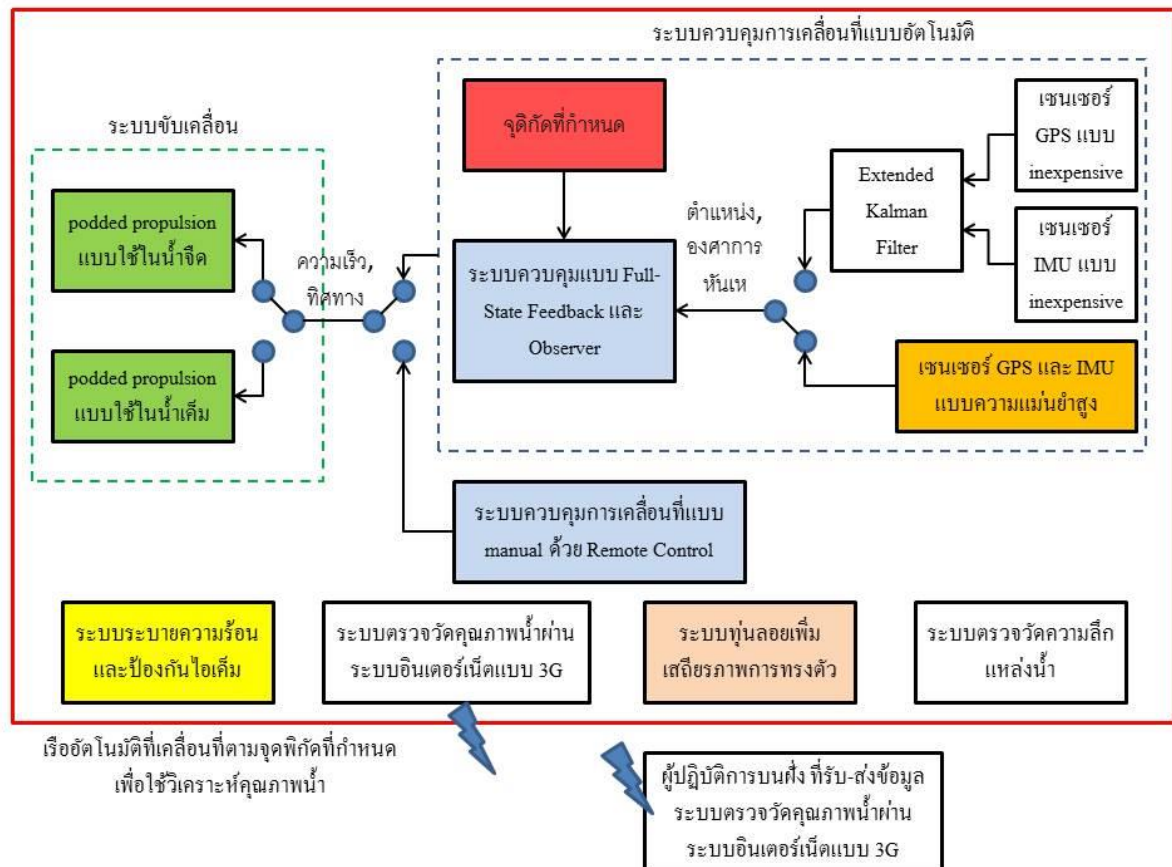
รูปที่ 7.1 ภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ได้ติดตั้งกับเรือคายัค

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเซนเซอร์ที่ใช้และระบบต่างของเรือในโครงการย่อยที่ 1

ขนาด : กว้าง x ยาว	0.68 x 3.85 เมตร
กินน้ำลึก	0.60 เมตร
น้ำหนักเรือเปล่า	18.5 กิโลกรัม
น้ำหนักบรรทุก	100 กิโลกรัม
ความเร็วเฉลี่ย	7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
เซนเซอร์นำร่อง	Topcon GPS และ Micro-strain IMU
เซนเซอร์วัดความลึกแหล่งน้ำ	Echo Sounder จาก Garmin 421s วัดความสูงสุด 457 เมตร
ระบบขับเคลื่อน	Podded Propulsion ที่ใช้งานได้ในน้ำจืดและน้ำเค็ม
ระบบควบคุมการเคลื่อนที่	รีโมตบังคับวิทยุ 2.4 GHz หรือ แบบอัตโนมัติตามจุดพิกัด GPS
ระบบระบายความร้อน	พัฒนาระบายความร้อนและสารดูดความชื้น
ระบบหุ่นช่วยการทรงตัว	เพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัวให้โคลงน้อยกว่า ± 20 องศา
ระบบจ่ายพลังงาน	แบตเตอรี่ deep-cycle 12 โวลต์

1. ในการสร้างและพัฒนาปรับปรุงระบบโดยรวมของเรืออัตโนมัติในโครงการย่อยที่ 1 จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ คือ
 - i. ระบบกลไกการควบคุมการบังคับเลี้ยวของ podded propulsion ที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน (thruster) ที่ทนการกัดกร่อนของน้ำทะเล และ มอเตอร์บังคับเลี้ยว (heading motor) ที่หุ้มอยู่ในโครงสร้างที่กันน้ำและสามารถยกพับเก็บให้ขนานกับท้ายเรือได้ เพื่อให้เรือคายัคนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในทะเลได้
 - ii. ระบบระบายความร้อนอากาศสำหรับห้องเก็บอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์ภายในเรือ โดยการใช้พัดลมช่วยในการดูดอากาศที่ร้อนออก และ มีช่องนำอากาศที่มีสารดูดความชื้นติดตั้งอยู่เพื่อช่วยนำอากาศจากภายนอกเข้ามาหมุนเวียน
 - iii. ระบบหุ่นช่วยการทรงตัว เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการทรงตัวหรือกันการโคลงของเรือหรือพลิกคว่ำของเรือ เมื่อนำไปปฏิบัติการในทะเลที่คลื่นลมมาประทะ และ จะไม่เพิ่มแรงต้านในการเคลื่อนที่จากน้ำเมื่อไม่ใช้งาน
 - iv. ระบบตรวจวัดความลึกของแหล่งน้ำโดยใช้เซนเซอร์คลื่นเสียง (Echo Sounder) เพื่อช่วยบ่งบอกถึงความลึกในแหล่งน้ำที่ปฏิบัติการ
2. ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือคายัค (kayak) ที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion ถูกพัฒนาและปรับปรุงโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะ (Full-State Feedback) ร่วมกับตัวสังเกตการณ์สถานะ (Observer) และ ทำการเปรียบเทียบการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้สมการพลศาสตร์ (ทางคณิตศาสตร์) เพื่อศึกษาสมรรถนะและประสิทธิภาพของเรือก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

เรือคายัคที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถควบคุมได้ 2 ระบบ คือ ใช้การควบคุมระยะไกลผ่านคลื่นวิทยุ โดยผู้ปฏิบัติการ และใช้การควบคุมแบบอัตโนมัติ ในโหมดอัตโนมัติ จุดพิกัดในการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยผู้ปฏิบัติการในโปรแกรมของคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนเรือ จากนั้นระบบควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะที่ได้พัฒนาขึ้น ก็จะพยายามรักษาเส้นทางการเคลื่อนที่ของเรือให้อยู่ในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดพิกัดสองจุด โดยการปรับหัวเรือให้เข้าสู่เส้นตรงนี้เสมอ



รูปที่ 7.2 แผนภาพรวมของระบบต่างๆทั้งหมดของเรือคายัคสำหรับโครงการย่อยที่ 1 (เฉพาะที่มีสี)

แต่ในการนำเรือคายัคที่ควบคุมแบบอัตโนมัตินี้ไปใช้งานได้ในคลองหรือแม่น้ำจริงนั้นจะกระทำได้อย่าง เนื่องจากมีอุปสรรคสิ่งกีดขวางมากมาย เช่น อวน ยอ กอผักตบชวา และ สะพานไม้ที่เตี้ย ซึ่งอุปสรรคเหล่านี้ ไม่ได้ถูกกำหนดไว้หรือที่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า จากประสบการณ์ในการลงพื้นที่เพื่อการสำรวจคลอง จริงนั้นยังจำเป็นต้องพึ่งการควบคุมผ่านคลื่นวิทยุโดยผู้ปฏิบัติการ แต่ถ้าเป็นการสำรวจรอบชายฝั่งทะเลที่มี อุปสรรคสิ่งกีดขวางที่น้อย นั้นการใช้งานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินั้นจะมีความเหมาะสมมากกว่า ซึ่งก็ ยังจำเป็นที่จะต้องพัฒนาระบบหลักสิ่งกีดขวางเพิ่มเติมเพื่อช่วยให้ระบบการควบคุมสามารถหลบอุปสรรค หรือสิ่งกีดขวาง เช่น เรือ หรือ หุ่นในทะเล ได้ ซึ่งควรที่จะใช้ Sonar หรือ Laser Range Finder ในการ ตรวจจับวัตถุในเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อที่จะวางแผนปรับเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ล่วงหน้า ก่อนที่จะเข้า ใกล้สิ่งกีดขวางต่างๆ

ปัญหาสำคัญอีกประเด็นหนึ่งที่ประสบในการนำเรือคายัคนี้ไปประยุกต์ใช้งานในภาคสนามจริงคือ แหล่งพลังงานที่จะใช้กับระบบขับเคลื่อนแบบ podded propulsion นั้นเป็นระบบไฟฟ้าซึ่งจะจ่ายจาก แบตเตอรี่แบบ deep-cycle ที่สามารถให้พลังงานได้อย่างต่อเนื่องนานเฉลี่ยได้น้อยประมาณ 2-3 ชั่วโมง แล้วจะต้องนำเรือคายัคเข้าเทียบท่าเพื่อทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ดังนั้นถ้าสามารถนำแหล่งพลังงานอื่นที่มี อัตราการเก็บพลังงานต่อหน่วยได้มากกว่าแบตเตอรี่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน หรือ เป็นแหล่งพลังงานอื่นที่สามารถ นำมาแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับระบบไฮบริดที่มีการใช้พลังงานน้ำมันควบคู่ไปกับมอเตอร์ไฟฟ้าจะ ทำให้สามารถปฏิบัติงานได้เป็นระยะทางที่ไกลหรือทำงานได้เป็นระยะเวลานานขึ้นก็จะสามารถช่วยลดเวลาใน การทำงานจริงโดยลดจำนวนครั้งที่นำเรือเข้าเทียบท่าลง

เมื่อต้องการวัดความลึกของแหล่งน้ำโดยใช้ echosounder ให้ได้อย่างแม่นยำของข้อมูลความลึกมาก ยิ่งขึ้น นั้นควรจะต้องมีมาตรการปรับแก้การโคลงของตัวเรือหรือเซนเซอร์ echosounder โดยสามารถใช้ IMU เป็นตัวเก็บค่าองศาการโคลง (roll angle) เพื่อนำมาปรับแก้กับข้อมูลความลึกที่วัดได้ในภายหลัง หรือ สร้างระบบ active control สำหรับหัว echosounder ให้สามารถรักษาระดับแนวตั้งได้อยู่เสมอ ในส่วนของ ตำแหน่งการติดตั้งหัว echosounder นั้นสามารถย้ายมาติดตั้งทางด้านท้ายเรือได้ เพื่อป้องกันการไปชนหรือ กระแทกเมื่อเรือวิ่งเข้าใกล้ฝั่งหรือตลิ่งได้ โดยตำแหน่งที่ติดตั้งทางท้ายเรื่อนั้นจะต้องอยู่ทางด้านข้างชิดกับเรือ เพื่อหลีกเลี่ยงฟองอากาศที่เกิดจากระบบขับเคลื่อนแบบ podded propulsion

6.1 บทความทางวิชาการ

1. P. Prempraneerach, K. Thamchaitas, P. Kulvanit, “Autonomous Waypoint Tracking of Kayak Boat using State-Variable Feedback Control”, OCEANS 2012 MTS/IEEE YEOSU, May 21-24, 2012.
2. **ปาชาณ กุลวานิช**, สุรเดช สุรัตติศักดิ์, ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, “เรือหุ่นยนต์สำหรับเก็บข้อมูล สิ่งแวดล้อมทางน้ำ”, วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, เมษายน 2555

6.2 การนำเสนอผลงานวิจัยและนิทรรศการ

- 1) ในงาน “Thailand Research Expo 2011” จัดโดย วช. ระหว่างวันที่ 26-30 สิงหาคม 2554 ณ ศูนย์ประชุมบางกอกคอนเวนชันเซ็นเตอร์ ชั้น 22 เซ็นทรัลเวิลด์ ราชประสงค์ กรุงเทพฯ โดยการ บรรยายในหัวข้อเรื่อง : “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์แบบเคลื่อนที่ได้ภาคสนามสำหรับงานเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อม” และโปสเตอร์เรื่อง “เรืออัตโนมัติควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย GPS สำหรับงานทางด้านสิ่งแวดล้อม”



รูปที่ 7.3 Powerpoint และ การนำเสนอผลงาน ในงาน Thailand Research Expo 2011

- 2) ในงาน “โครงการสัมมนาแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ผลงานวิชาการ/ผลงานวิจัย ด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ครั้งที่ 2” จัดโดยกรมทรัพยากรน้ำ ระหว่างวันที่ 26-27 กรกฎาคม 2555 ณ โรงแรมรอยัลริเวอร์ กรุงเทพฯ โดยการบรรยายในหัวข้อเรื่อง “เรืออัตโนมัติที่ขับเคลื่อนโดย Podded propulsion ตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อใช้เก็บตัวอย่างน้ำ”



รูปที่ 7.4 Powerpoint และ การนำเสนอผลงาน ในงาน โครงการสัมมนาแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ผลงานวิชาการ/ผลงานวิจัย ด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ครั้งที่ 2

- 3) ในงานนิทรรศการ “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี 2555 ระหว่างวันที่ 2-5 กุมภาพันธ์ 2555 ณ อิมแพคเมืองทองธานี โพสต์เตอร์เรื่อง : หุ่นยนต์ดำน้ำเพื่องานทางสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 7.5 โพสต์เตอร์และวิดิทัศน์ ที่ใช้ในการนำเสนอผลงานในงานวันนักประดิษฐ์

8. บรรณานุกรมของโครงการย่อยที่ 1

1. จันทรพีญ วุฒิวงษ์, ผลของการเคลื่อนที่ของตะกอนต่อการจมตัวของปะการังเทียม, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชา-วิทยาศาสตร์ (วิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2544.
2. วุฒิชัย กปิลกาญจน์ (2533) กลไกและพลศาสตร์ของเครื่องจักรกล. กรุงเทพมหานคร : บริษัท ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
3. มนตรี พิรุณเกษตร (2550) กลศาสตร์ของวัสดุ. กรุงเทพมหานคร : บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด.
4. สุจินต์ ดีแท้ มณฑล อนงค์พรยกุล และ อนุกรณ บุตรสันต์, “การศึกษากระแสน้ำชั้นลง บริเวณชายฝั่งแหลมผักเบี้ย อำเภอบ้านแหลม จังหวัดเพชรบุรี” การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาประมงและสาขาวิทยาศาสตร์ 1-4 กุมภาพันธ์ 2543. กรุงเทพฯ, 2543, หน้า 80-85.
5. Bemporad A., Di Marco M., and Tesi A., “Sonar-Based Wall-Following Control of Mobile Robots”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Volume 122, Issue 1, 226 (4 pages), 2000
6. Carlson, J. and Murphy, R.R., “How UGVs physically fail in the field”, *IEEE Transactions on Robotics*, Volume 21, Issue 3, PP.423-437, 2005.
7. Dorf R.C. and Bishop R.H., *Modern Control Systems*, Eleventh edition, Prentice-Hall, 2008.
8. Frank W. M. (1999). *Fluid Mechanics*. 4th ed. Singapore : McGraw – Hill.
9. Greytak M.B., “High Performance Path Following for Marine Vehicles Using Azimuthing Podded Propulsion”, *Master Thesis*, Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2006.
10. Tesheng Hsiao, Tomizuka, M., “Observer-based sensor fault detection and identification with application to vehicle lateral control”, *American Control Conference*, 2004.
11. Stettler J.W., “Steady and Unsteady Dynamics of an Azimuthing Podded Propulsor Related to Vehicle Maneuvering”, *Ph.D. Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
12. “หุ่นลอยน้ำที่ติดกับเรือคายัคเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัว”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : www.austinkayak.com , www.kayakfishingstuff.com , www.yak.gear.com
13. “Feel Free Kayak” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : <http://www.feelfreekayak.com/home/>
14. “Minn Kota Riptide Transom [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : http://www.minnkotamotors.com/products/trolling_motors/saltwater_transom_mount/riptide_transom.aspx