

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2554 และ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติในการสนับสนุนงานวิจัยนี้

1. บทคัดย่อภาษาไทย

การตรวจวัดมลพิษของน้ำ นับปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินสถานภาพมลพิษของน้ำในแหล่งน้ำสำคัญต่างๆ เช่น คุณภาพน้ำทิ้งจากแหล่งชุมชน แหล่งอุตสาหกรรม และเกษตรกรรม การตรวจวัดคุณภาพของน้ำจะสามารถนำมาใช้ประเมินถึงสภาพของคุณภาพน้ำได้อย่างรวดเร็วและบ่อยครั้ง และสามารถช่วยแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ทันที่ แต่ในปัจจุบันยังไม่มีบุคลากรที่เพียงพอที่จะช่วยเฝ้าระวังการตรวจวัดคุณภาพน้ำที่เพียงพอ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะพัฒนาเรืออัตโนมัติที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion ให้สามารถปฏิบัติงานได้ทั้งในน้ำจืดและในทะเล โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเล พร้อมทั้งมีระบบตรวจวัดและวิเคราะห์คุณภาพน้ำในรูปแบบที่เป็นพลศาสตร์ ให้สามารถรายงานผลไปยังผู้ปฏิบัติการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G แบบ ณ เวลาจริง เพื่อลดความเสี่ยงและอำนวยความสะดวกต่อผู้ปฏิบัติการในการออกสำรวจพื้นที่จริง โดยในแผนงานนี้นั้นจะประกอบไปด้วยระบบหลักๆดังนี้

1. ระบบขับเคลื่อนแบบ podded propulsion ที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นให้สามารถทำงานได้ทั้งในน้ำจืดและน้ำทะเล ซึ่งจะให้แรงผลักดันสูงสุดถึง 356 นิวตัน ทำให้ด้านกระแสในทะเลได้ดี และ ได้สร้างชุดบังคับเลี้ยวแบบสายพานและบังคับความเร็วของใบพัดที่ติดตั้งไว้ทางท้ายเรือ ให้สามารถพับเก็บให้ขนานกับลำเรือได้ เพื่อสะดวกต่อการหลบหลีกสิ่งกีดขวางในน้ำและการขนย้าย ในการปฏิบัติงานจะสามารถควบคุมความเร็วใบพัดและทิศทางการหมุนของใบพัดผ่านคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปใช้ร่วมกับระบบควบคุมอัตโนมัติ
2. ระบบระบายความร้อนและป้องกันไอน้ำและไอเค็มจากทะเลสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับระบบควบคุมต่างๆ โดยออกแบบให้ห้องเก็บอุปกรณ์นั้นกันน้ำกระเด็นและมีพัดลมดูดอากาศเข้าออกจากห้องเก็บอุปกรณ์ พร้อมทั้งมีสารดูดความชื้นเพื่อป้องกันไอน้ำที่อาจเข้ามาได้ ซึ่งจากการทดสอบจะช่วยให้ระบบปฏิบัติการได้นานกว่า 2 ชั่วโมง
3. ระบบหุ่นยนต์ช่วยการทรงตัวและเพิ่มเสถียรภาพในการลอยตัวของเรือคายัคเมื่อเผชิญกับคลื่นลม โดยใช้หุ่นโพนทรงกระบอกติดกับแกนที่ยึดออกไปทางด้านข้างของเรือเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสน้ำทางด้านข้าง ซึ่งช่วยป้องกันการโคลงของเรือคายัคเมื่อลมโคลงน้อยกว่า 30 องศา เมื่อลงปฏิบัติการในพื้นที่ที่มีคลื่นต่ำกว่า 50 cm และลมแรงได้ เช่นใน ทะเล หรือ บริเวณรอบชายฝั่งทะเล นอกจากนั้นหุ่นลอยในรูปแบบที่สองจะสามารถพับเก็บแนบกับเรือได้อีกด้วยเมื่อต้องการหลบสิ่งกีดขวางและไม่ใช้งาน
4. ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือคายัคที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับตัวแปรสถานะและตัวสังเกตการณ์สถานะ โดยเริ่มต้นได้สร้างแบบจำลองของเรือคายัคที่ขับเคลื่อนด้วย podded propulsion และสร้างระบบควบคุม แล้วทดสอบปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ในโปรแกรมจนดีแล้ว จึงนำระบบควบคุมที่ได้มาประยุกต์ใช้กับเรือคายัคจริง ซึ่งจะช่วยเพิ่มเสถียรภาพและเพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด
5. ระบบนำร่องของเรือโดยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ที่ให้ค่าพิกัดตำแหน่ง เข้ากับ เซนเซอร์ Accelerometer และ Gyroscope ที่ให้ค่าความเร่งและค่าอัตราเร็วเชิงมุมใน 3 แกน ตามลำดับ โดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter (EKF) เพื่อให้ได้ค่าประมาณของตำแหน่งและองศาการหันเหของหัวเรือที่จะใช้สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัคแบบอัตโนมัติ ในขั้นแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของ GPS ที่มีความแม่นยำสูงแต่ราคาแพง กับ GPS หลายตัวที่ราคาประหยัดในพื้นที่

สี่เหลี่ยม ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยพิกัดจาก GPS ที่ราคาประหยัดหลายตัวเมื่อตัดค่าพิกัดที่ไม่เกาะกลุ่มกับตัวอื่นๆออกไป จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดของ GPS ที่มีความแม่นยำสูง หลังจากนั้นจึงทำการบูรณาการข้อมูลจาก GPS Accelerometer และ Gyroscope ด้วยเทคนิค EKF จะได้ค่าพิกัดตำแหน่ง องค์การเห็นเห ความเร็วในการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ พร้อมทั้งค่าเบี่ยงเบนของค่าต่างๆด้วย

6. ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ ที่สามารถวัดคุณภาพน้ำ (ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ค่าความเค็มหรือปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ) โดยสามารถตรวจสอบค่าเหล่านี้ได้ที่ระดับความลึกต่างๆไม่เกิน 5 เมตร ตามคำสั่งของผู้ปฏิบัติการผ่านเราเตอร์อินเทอร์เน็ตแบบ 3G ที่ติดตั้งไว้ทั้งบนเรือและบนฝั่ง โดยข้อมูลคุณภาพน้ำที่ได้นี้จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G ไปยัง Web Server และคอมพิวเตอร์ของผู้ปฏิบัติการ ได้แบบ ณ เวลาจริง ในพื้นที่ๆครอบคลุมด้วยระบบเครือข่าย 3G โดยจะมีค่าหน่วยเวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 6 วินาที ในการรับข้อมูลจากเรือมายังผู้ปฏิบัติการ หรือ ในการส่งคำสั่งจากผู้ปฏิบัติการไปยังเรือในการปรับระดับความลึกของหัววัดคุณภาพน้ำ

โดยเรือที่ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติด้วย podded propulsion ที่พัฒนาขึ้นมาจะ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ตรวจวัดคุณภาพน้ำตามจุดที่ต้องการ จะช่วยลดความเสี่ยงและประหยัดเวลาของผู้ปฏิบัติงานในภาคสนาม ในงานวิจัยนี้ได้เน้นไปที่การพัฒนาและปรับปรุงระบบต่างๆให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและช่วยลดต้นทุนในการนำเข้าอุปกรณ์ราคาแพง และ เพิ่มศักยภาพให้แก่วัดตรวจวัดคุณภาพน้ำและระบบการรายงานข้อมูลโดยผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นแล้วเรือกายัคนั้นถูกติดตั้งด้วยเซนเซอร์ echosounder และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในภาคสนามจริง เพื่อช่วยสำรวจความลึกของคลองต่างๆในจังหวัดกรุงเทพฯ และ ปทุมธานี โดยได้รับความร่วมมือจากสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการบริหารจัดการน้ำและเพื่อเป็นฐานข้อมูลของประเทศอีกด้วย

1. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ (Abstract)

Measurement of water pollution is one of the most significant factors in evaluating pollution condition in various important water resources, like drainage water from communities, from industrial and agricultural areas. The objective of water quality measurement is to quickly and frequently monitor water quality state and to quickly resolve environmental problem in time. However, one of the existing problems is insufficient knowledgeable personnel to help monitoring water quality. Thus, our research group proposes to develop a kayak boat driven by podded propulsion that can be operated in both fresh- and salt-water, especially along the costal lines. In additions, we developed an in situ water-quality measurement system that can collect dynamic water quality information and transfer this data from sampling points to a user in real time through 3G internet network. As a result, this system can help reducing the risk as well as increasing flexibility in field operations. This research project includes the following topics:

1. Developed podded propulsion system is capable to operate in both fresh- and salt-water. 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. Cooling and water-tight system can prevent electrical and electronics equipment for all control systems from over-heating in long and continuous operation and from fresh-water and sea-water corrosion. This 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. Buoy system helps increasing boat stabilizing when the boat encounters strong wind or wave in field operation. This buoy system, built from cylindrical foams, can extend outward along boat side to increase side-span water-contact area. As a result, rolling stability for roll angle $< 30^\circ$ and wave height < 50 cm can be achieved with this buoy system, thus the boat can operate in mild sea or along shore line. Moreover, the second buoy system can be folded along boat side for avoiding obstacle and for transporting.
4. Automatic way-point tracking system for the kayak driven by podded propulsion 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.
5. Navigation system for the kayak boat can fuse Latitude and Longitude coordinate from GPS with 3-axis acceleration and angular rotation from Accelerometer and Gyroscope, respectively, using the Extended Kalman Filter (EKF) technique. As a result, estimated position and orientation of kayak can be used for a kayak way-point tracking control. In the first step, a high-accuracy expensive GPS is compared against several low-accuracy inexpensive GPSs in terms of horizontal accuracy within a rectangular surveying area. A mean horizontal position from several inexpensive GPSs, excluding GPS outliers, is almost equivalent to the horizontal position from the high-accuracy GPS. In the second step, signals from both Accelerometer and Gyroscope sensors are integrated with GPS position using EKF such that 3-dimensional positions, attitudes, velocities along with their deviations are obtained.

6. Water-quality measurement system can measure water quality (temperature, pH, salinity and dissolved oxygen) at various depths upto the maximum depth of 5 meter according to operator's command. The command is transmitted through 3G internet routers, installed on the boat and on the shore. Then, the water-quality information can be reported to the operators in real time through Web Server using the 3G internet network with an average delay of 6 second. This delay time exists in both transmitting water-quality information from the measurement system to operator and transmitting depth command from operator to the measurement system.

This developed kayak boat driven by podded propulsion can be conveniently used for water-quality measurement at desired points such that the operating time and users' risk to expose to contamination in the field can be reduced. This research emphasizes on developing and improving of all systems to increase efficiency and to lessen overall cost, particularly expensive sensors. At the same time, the performance of water-quality monitoring and measurement is enhanced with 3G internet network. Moreover, this kayak boat, equipped with an echo sounder, has been deployed to survey canals' depth in Bangkok and Pathumthani provinces by Hydro and Agro Informatics Institute cooperation. The canals' and rivers' depth information will be used in water management and updated Thailand water resource database as well.

คำสำคัญ (Keyword)

การขับเคลื่อนเรือด้วย podded propulsion (Kayak Driven by Podded Propulsion), การปฏิบัติงานในทะเล (Operation in Sea), การบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS และ IMU หลายๆตัว (Sensor Fusion of GPS and IMU), การเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนดแบบอัตโนมัติของเรือคายัค (Autonomous Way-Point Tracking of Kayak Boat), การวัดคุณภาพน้ำ (Water Quality Measurement), และ การส่งข้อมูลแบบในเวลาจริงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G (Real-Time Telemetry Through 3G Internet Network)

สารบัญเรื่อง (Table of Contents)

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
คำสำคัญ	ฉ
สารบัญเรื่อง	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทนำรวม	1
โครงการย่อยที่ 1	
บทคัดย่อโครงการย่อยที่ 1	12
บทนำโครงการย่อยที่ 1	15
การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 1	18
ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยของโครงการวิจัยที่ 1	34
ผลการวิจัยของโครงการย่อยที่ 1	36
อภิปรายและวิจารณ์ผลของโครงการย่อยที่ 1	77
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของโครงการย่อยที่ 1	85
บรรณานุกรมของโครงการย่อยที่ 1	90
โครงการย่อยที่ 2	
บทคัดย่อโครงการย่อยที่ 2	91
บทนำโครงการย่อยที่ 2	94
การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 2	97
ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยของโครงการวิจัยที่ 2	120

สารบัญเรื่อง (Table of Contents) (ต่อ)

	หน้า
ผลการวิจัยของโครงการย่อยที่ 2	122
อภิปรายและวิจารณ์ผลของโครงการย่อยที่ 2	136
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะของโครงการย่อยที่ 2	160
บรรณานุกรมของโครงการย่อยที่ 2	163
ประวัติคณะผู้วิจัย	165

สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่	หน้า
<u>โครงการย่อยที่ 1</u>	
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer จากระบบของเรือที่ใช้ในการวิจัยนี้	49
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบ Error (y_b) ของ Full- และ Reduced-Order Observer เมื่อมีสัญญาณรบกวน	51
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบ Error (y_b) ของ Full-Order Observer และ Reduced-Order Observer เมื่อพารามิเตอร์ของเรือเพิ่มจาก 0% ถึง 50%	52
ตารางที่ 5.4 แสดงแรงที่เกิดจากพอดพอร์เพสชัน เมื่อหันพอดพอร์เพสชันไปที่มุมต่างๆ	59
ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเซนเซอร์ที่ใช้และระบบต่างของเรือในโครงการย่อยที่ 1	86
<u>โครงการย่อยที่ 2</u>	
ตารางที่ 3.1 แสดงการแปลรหัสสัญญาณของ GPS ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นแบบ NMEA แบบที่ 1	100
ตารางที่ 3.2 แสดงการแปลรหัสสัญญาณของ GPS ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นแบบ NMEA แบบที่ 2	101
ตารางที่ 3.3 แสดง ข้อมูลคุณสมบัติของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 [25]	102
ตารางที่ 3.4 การประมาณค่าด้วย Extended Kalman Filter ที่บูรณาการสัญญาณ GPS และ IMU เข้าด้วยกัน	117
ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเซนเซอร์ที่ใช้และระบบต่างของเรือในโครงการย่อยที่ 2	160

สารบัญภาพ (List of Illustration)

รูปที่	หน้า
บทนำรวม	
รูปที่ 1.1 การติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพน้ำแบบอัตโนมัติ และ การปรับใช้เซนเซอร์เป็นหุ่นในปากของเพรเซอร์เวอร์	4
รูปที่ 1.2 หุ่นลอยน้ำเพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำ ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัทไอบีเอ็ม [http://erc-th.blogspot.com/2010/04/blog-post_1912.html]	5
รูปที่ 1.3 ภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ได้ติดตั้งกับเรือคายัค	8
โครงการย่อยที่ 1	
รูปที่ 2.1 เรืออัตโนมัติบนพื้นฐานเรือคายัคพร้อมอุปกรณ์สำหรับนำร่องเพื่อเคลื่อนที่ไปในจุดที่กำหนด	15
รูปที่ 2.2 การทดลองวิ่งตามจุดสี่จุดในบ่อน้ำจริงโดยเริ่มจากด้านบนวิ่งลงมาที่จุดล่างซ้ายและจบที่จุดล่างซ้าย เรือใช้ระบบควบคุมแบบ Double loop PD control	16
รูปที่ 2.3 การประยุกต์ใช้เรือควบคุมกับอุปกรณ์โซนาร์แนวตั้งในการวัดความลึกของพื้นที่ใต้น้ำ ภาพซ้ายแสดงพื้นที่ใต้น้ำจากข้อมูลที่ได้รับจากโซนาร์ (Echo Sounder) ภาพขวาแสดงรูปแบบการวิ่งใน 2 มิติขณะสแกนบ่อน้ำ	16
รูปที่ 3.1: เสถียรภาพของการลอยตัวเมื่อหุ่นยนต์ลอยอยู่ที่ผิวน้ำ (1) แสดงโมเมนต์กลับคืน (2) แสดงโมเมนต์พลิกค่า [8]	20
รูปที่ 3.2: การเสริมหุ่นสองข้างเรือคายัค เพื่อเพิ่มสมรรถนะการต้านทานคลื่นลมในขณะปฏิบัติการ [12]	20
รูปที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของตัวแปรต่างๆที่ปรากฏในสมการทางพลศาสตร์ การเคลื่อนที่ของเรือด้วยพอดพรอเพาส์ชั้น	21
รูปที่ 3.4 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือระหว่างจุดสองจุดใดๆ	23
รูปที่ 3.5 กลไกชนิดต่อโยง 4 ชั้น [2]	24
รูปที่ 3.6 มุมส่งผ่าน (Transmission) [2]	25
รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่มุมการส่งผ่าน (Transmission) มีค่ามากที่สุด [2]	26
รูปที่ 3.8 ชนิดกลไก 4 ก้านต่อ [2]	27
รูปที่ 3.9 ชนิดของชิ้นส่วน (Link types) [2]	28
รูปที่ 3.10 การกระจายของความเค้นเฉือนในเพลาดันและกลาง [3]	29
รูปที่ 3.11 แรงเฉือนด้านบนหน้าตัดของเพลาส่วนที่อยู่ด้านซ้ายของระบาคัด $a - a$ [3]	29
รูปที่ 3.12 มุมบิด θ ของเพลากลมตันภายใต้ทอร์ก $\vec{T}$ [3]	31
รูปที่ 3.13 เรือคายัคแบบ Sit-inside [13]	32
รูปที่ 3.14 เรือคายัคแบบ Sit-on-top [13]	32
รูปที่ 3.15 พอดพรอเพาส์ชั้นรุ่น Riptide Transom จาก Minn Kota [14]	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.1 Full-State Feedback Block Diagram	37
รูปที่ 5.2 แผนภาพขณะเรือเคลื่อนที่อยู่นอกเส้นทาง	37
รูปที่ 5.3 Close-Loop Pole-Zero ของ $d=1$ ถึง 15	38
รูปที่ 5.4 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$, $k_i=[0-0.15]$ และ $k_d=[0-0.3]$	39
รูปที่ 5.5 Close-Loop Pole-Zero เมื่อ $d=4$, $k_i=[0-0.15]$, $k_d=[0-0.3]$ และ $K_H=[0-0.004]$	39
รูปที่ 5.6 Block Diagram ของ Full Order Observer	40
รูปที่ 5.7 Block Diagram ของ Reduced Order Observer	42
รูปที่ 5.8 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Full-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink	43
รูปที่ 5.9 Block Diagram ของระบบการควบคุมแบบ Full-State Feedback พร้อมกับ Reduced-Order Observer ที่สร้างในโปรแกรม MATLAB/ Simulink	43
รูปที่ 5.10 การเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ จากแนวเส้นตรงแรกไปยังแนวเส้นตรงที่สอง	44
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของมุมของเรือกระทำกับพิกัดอ้างอิงแบบเฉลิย (φ) ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น ที่ $\varphi_0 = -45^\circ$ เมื่อใช้ Pole ชุดที่(1) และ Pole ชุดที่(2)	45
รูปที่ 5.12 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่1 เป็นรูปวงกลม	45
รูปที่ 5.13 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ แบบที่ 2 เป็นแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นแบบ S หรือแบบ Grid	46
รูปที่ 5.14 การเคลื่อนที่แบบเคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นรูปวงกลม ในช่วงที่ 1	46
รูปที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงของ ตัวแปรสถานะ: φ, x_b, y_b	47
รูปที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงของ φ เทียบกับ $\hat{\varphi}$ (ซ้าย) และ y_b เทียบกับ $\hat{y}_b$ (ขวา)	47
รูปที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงของ x_b เทียบกับ $\hat{x}_b$	48
รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงของ F_y เทียบกับ F_{ycmd}	48
รูปที่ 5.19 แสดงการเคลื่อนที่ของเรือจากจุดพิกัดที่ 1 ไป 2 โดยจำลองให้มี สัญญาณรบกวน IMU (φ, r) = ± 0.1 rad และสัญญาณรบกวน GPS (x_b, y_b) = ± 1 m	50
รูปที่ 5.20 แสดงผลการตอบสนองของ u, v, r, φ โดยจำลองให้มีสัญญาณรบกวน IMU (φ, r) = ± 0.1 rad และสัญญาณรบกวน GPS (x_b, y_b) = ± 1 m	50
รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบผลการตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนระหว่าง Full- และ Reduced-Order Observer	51
รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่เมื่อ พารามิเตอร์ของเรือคายคมีค่า เพิ่มขึ้น50%	52
รูปที่ 5.23 แสดง การทำงานร่วมกันของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น	53
รูปที่ 5.24 แสดง Block-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ของโปรแกรมรับค่าจาก GPS จาก Topcon รุ่น Hiper GA-Series	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.25 แสดง Block-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ของโปรแกรมรับค่าจาก เซนเซอร์วัดมุมเอียงIMU ของ Micro- Strain รุ่น 3DM-GX2	55
รูปที่ 5.26 แสดง Block-Diagram ในส่วนการประมาณค่าโดยใช้ Reduced-Order Observer	56
รูปที่ 5.27 แสดงBlock-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ในส่วนควบคุมหลัก	57
รูปที่ 5.28 แสดง Block-Diagram (ซ้าย) และ Front Panel (ขวา) ในส่วนควบคุมพอดพรวดพราด	58
รูปที่ 5.29 แสดงการกำหนดมุมต่างๆที่ทำการวัดแรง	59
รูปที่ 5.30 แสดงพิกัดจาก GPS และพิกัดบนแนวการเคลื่อนที่ของเรือ	60
รูปที่ 5.31 แสดงการใช้ โปรแกรม GPS เพื่อหาระยะทางจากแผนที่ (GPS Distance Map) จาก http://www.gpsvisualizer.com/calculators	60
รูปที่ 5.32: การดัดแปลงมอเตอร์ขับเคลื่อน (thruster motor) แบบเดิมเพื่อติดตั้ง DC servo motor สำหรับเป็นมอเตอร์บังคับเลี้ยว (heading motor) สำหรับหมุนมอเตอร์ขับเคลื่อน (รูปซ้าย) รูปมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบดั้งเดิมที่มาพร้อมกับชุดบังคับติดตั้งด้านบนซึ่งถูกตัดออกไป (รูปขวา)	62
รูปที่ 5.33: การออกแบบทางกลของชุดบังคับเลี้ยวเรือแบบใหม่โดยมอเตอร์บังคับเลี้ยวแยกออกจากแกน มอเตอร์ขับเคลื่อนเพื่อแก้ปัญหการตัดทำลายแกนเดิม	63
รูปที่ 5.34: กลไกขับเคลื่อนทางกลสำหรับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือที่สร้างเสร็จแล้ว (ภาพซ้าย) ติดตั้งพร้อมใช้งานที่ท้ายเรือคายัคโดยติดแผงปิดชุดเฟืองพร้อมยาซิลิโคนป้องกันน้ำ เข้าสู่กลไก (ภาพขวา)	63
รูปที่ 5.35: การออกแบบกลไกการพับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือให้พ้นเหนือน้ำ	64
รูปที่ 5.36: การทดสอบกลไกขับเคลื่อนทางกลสำหรับชุดขับเคลื่อนท้ายเรือที่จะใช้ลงทะเลในสระว่ายน้ำ	64
รูปที่ 5.37 เรือหุ่นยนต์พร้อมหุ่นลอยช่วยการทรงตัว	65
รูปที่ 5.38 การเพิ่มพื้นที่ Polygon เมื่อใช้หุ่นลอยช่วยการทรงตัว	66
รูปที่ 5.39 การคำนวณหา Coupling Torque ที่จะทำให้เกิดการพลิกคว่ำ เมื่อยังไม่ใช้หุ่นลอยช่วยการทรงตัว	66
รูปที่ 5.40 การคำนวณหา Coupling Torque ที่จะทำให้เกิดการพลิกคว่ำ เมื่อใช้หุ่นลอยช่วยการทรงตัว	67
รูปที่ 5.41 หุ่นลอยเชื่อมต่อกับเรือหุ่นยนต์ที่แทนปรับมุมซึ่งสามารถปรับระดับความเอียงได้ 3 ระดับ	68
รูปที่ 5.42 หุ่นลอยช่วยการทรงตัวที่สามารถพับเก็บได้	68
รูปที่ 5.43 กลไกที่ใช้ในการล็อกหุ่นลอยช่วยการทรงตัวให้อยู่หนึ่งในขณะปฏิบัติการหรือในขณะอยู่นิ่ง	69
รูปที่ 5.44 การลงสำรวจคลองรังสิตประยูรศักดิ์ ที่ต้องมีการหลบหลีกอุปสรรค เช่น สะพานและกอผักตบชวา โดยใช้วิทยุบังคับในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือคายัค	69
รูปที่ 5.45 ระบายระบายความร้อนด้วยน้ำ	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 5.46 ระบบระบายความร้อนด้วยอากาศภายในห้องคอมพิวเตอร์ประจำเรือ	71
รูปที่ 5.47 การจัดวางอุปกรณ์คอมพิวเตอร์และแบตเตอรี่ในเรือและการติดตั้งฝาปิด (Hatch) พร้อมระบบระบายอากาศ	72
รูปที่ 5.48 การนำเรือเข้าเทียบท่าหน้าเพื่อทำการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ในคลองรังสิตประยูรศักดิ์	73
รูปที่ 5.49 แสดงวงจรอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ (วงจร Inverting)	74
รูปที่ 5.50 วงจรวัดแบตเตอรี่เมื่อต่อเสร็จแล้ว โดยมีการรายงานผลบนจอ LCD และ การทดสอบวัดแบตเตอรี่	76
รูปที่ 5.51 แสดงขั้ววงจรวัดแบตเตอรี่ ที่เชื่อมต่ออยู่กับวงจรอ่านสัญญาณเอนโค้ดเตอร์ของมอเตอร์บังคับทิศทางของ thruster	76
รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติกับเรือคายัคจริง ในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่เส้นทางเป็นแบบวงกลม	77
รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติกับเรือคายัค ในการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่เส้นทางเป็นแบบ Grid	78
รูปที่ 6.3 ภาพการทดสอบระบบหุ่นยนต์เรือในทะเล ณ อ่าวปะการัง เกาะเสม็ด จังหวัดระยอง ด้านหน้าเรือติดตั้งหัวหยั่งความลึกของน้ำด้วยเสียงและกล้องถ่ายภาพใต้น้ำ	79
รูปที่ 6.4 การขนย้ายเรือคายัคจากฝั่งเพื่อนำไปทดสอบที่เกาะเสม็ดโดยบรรทุกบนเรือขนส่งขนาดกลางของเรือสอร์ทนิมมานรดี การขนส่งเป็นไปอย่างราบรื่นเนื่องจากเรือคายัคมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบาและกินพื้นที่วางสัมภาระไม่มากจนเกินไป	80
รูปที่ 6.5 การประกอบกลไกชุดขับเคลื่อนสำหรับลงทะเลทางท้ายเรือและหุ่นลอยช่วยการทรงตัวเข้ากับเรือคายัค (ซ้าย) และ การติดตั้งระบบนำร่องและตรวจสอบความพร้อมก่อนทำการทดสอบจริง (ขวา)	80
รูปที่ 6.6 การทดสอบเรือเพื่อเก็บค่าความลึกของอ่าวปะการัง ที่เกาะเสม็ด โดยการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติตามจุดพิกัด GPS ที่กำหนด (ซ้าย) และ เรือพี่เลี้ยงที่ช่วยแก้ไขระบบอยู่ในทะเล (ขวา)	81
รูปที่ 6.7 แผนภาพแสดงเส้นทางวิ่งของเรือหุ่นยนต์ตามแผนการวิ่งแบบที่ 1 โดยมีลักษณะการวิ่งวนด้วยรัศมีการเลี้ยวในแต่ละจุดไม่แคบเกินไปเพื่อเก็บข้อมูลการวิ่งเป็นบริเวณกว้าง จุดสีแดงแสดง Goal waypoints ที่ เรือหุ่นยนต์จะต้องผ่านทั้งหมด เส้นสีฟ้าแสดงเส้นทางการวิ่งจริงของหุ่นยนต์ แผนภาพที่แสดงพล็อตโดยโปรแกรม MATLAB	81
รูปที่ 6.8 แผนภาพในรูปแบบ 3 มิติที่วัดได้จาก Echosounder แสดงระดับความลึก ณ จุดต่างๆตามแผนการวิ่งแบบที่ 1 พล็อตโดยโปรแกรม MATLAB	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.9 แผนภาพแสดงเส้นทางวิ่งของเรือหุ่นยนต์ตามแผนการวิ่งแบบที่ 2 โดยมีลักษณะการวิ่งวนด้วยรัศมีการเลี้ยวในแต่ละจุดแบบหักมุมเพื่อเก็บข้อมูลการวิ่งเป็นแบบ Scan grid โดย grid size ห่างกันประมาณ 3 เมตรและระยะทางแนวยาวประมาณ 110 เมตรจุดสีแดงแสดง Goal waypoints ที่ เรือหุ่นยนต์จะต้องผ่านทั้งหมด เส้นสีฟ้าแสดงเส้นทางการวิ่งจริงของหุ่นยนต์ พล็อตโดยโปรแกรม MATLAB	82
รูปที่ 6.10 แผนภาพในรูปแบบ 3 มิติที่วัดได้จาก Echosounder แสดงระดับความลึก ณ จุดต่างๆตามแผนการวิ่งแบบที่ 2 จะเห็นได้ถึงระดับความลึกที่แตกต่างกันในพื้นที่ใกล้เคียงฝั่ง (ความลึกประมาณ 2 เมตร) และพื้นที่ไกลชายฝั่งตามขอบแนวหินปะการัง (ความลึกประมาณ 6 เมตร) แผนภาพที่แสดงพล็อตโดยโปรแกรม MATLAB	83
รูปที่ 6.11 ส่วนหนึ่งของภาพใต้น้ำที่ capture ได้จาก HD video 1080p ด้วยกล้อง GoPRO HD แสดงสภาพแนวหินปะการังใต้ทะเลที่ระดับความลึกประมาณ 2-6 เมตร เนื่องจากเรือหุ่นยนต์ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์ไฟฟ้าทำให้การขับเคลื่อนเงียบและไม่รบกวนสัตว์น้ำตามแนวปะการัง ทำให้สามารถจับภาพปลาและสัตว์น้ำอื่นๆได้เป็นจำนวนมากเป็นผลดีต่อนักวิทยาศาสตร์ที่สนใจการ ดำรงชีวิตของสัตว์เหล่านี้	83
รูปที่ 6.12 สรุปเส้นทางการปฏิบัติการทดสอบในแบบที่ 2 โดยพล็อตเส้นทางการเคลื่อนที่พร้อมความลึกที่พิกัดทั้งหมดบนโปรแกรมแผนที่เช่น Google Earth	84
รูปที่ 7.1 ภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ได้ติดตั้งกับเรือคายัค	85
รูปที่ 7.2 แผนภาพรวมของระบบต่างๆทั้งหมดของเรือคายัคสำหรับโครงการย่อยที่ 1 (เฉพาะที่มีสี)	87
รูปที่ 7.3 Powerpoint และ การนำเสนอผลงาน ในงาน Thailand Research Expo 2011	89
รูปที่ 7.4 Powerpoint และ การนำเสนอผลงาน ในงาน โครงการสัมมนาแลกเปลี่ยนเรียนรู้ ผลงานวิชาการ/ผลงานวิจัย ด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ครั้งที่ 2	89
รูปที่ 7.5 โปสเตอร์และวีดิทัศน์ ที่ใช้ในการนำเสนอผลงานในงานวันนักประดิษฐ์	89

โครงการย่อยที่ 2

รูปที่ 2.1 ผลการทดลองเก็บจุดพิกัด GPS บนดาตฟ้าอาคารมาตรวิทยา กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระรามที่ 6 จุดสีแดงคือข้อมูลพิกัดตำแหน่งจาก GPS : Topcon Hiper GA จุดสีน้ำเงินคือข้อมูลพิกัดตำแหน่งจาก GPS : San Jose Navigation EB-85A	95
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1ดวง 2ดวง และ3ดวง	99
รูปที่ 3.2 GPS Topcon (ซ้าย) [24] และ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 (ขวา) [25]	101
รูปที่ 3.3 การบูรณาการของข้อมูลโดยใช้เทคนิค Kalman Filter	103
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman filter ที่เวลา t ใดๆ	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.5 การติดตั้งหัววัดคุณภาพน้ำของ YSI ที่ติดตั้งไปกับหุ่นยนต์ใต้น้ำ (ซ้าย) และ หัววัดคุณภาพน้ำของ YSI สองรุ่น(ขวา) [http://www.ysi.com/parametersdetail.php?Dissolved-Oxygen-1]	118
รูปที่ 3.6 หุ่นยนต์ใต้น้ำจากบริษัท ที่ได้ติดตั้งหัววัดพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมของ YSI [http://www.bluefinrobotics.com/products/bluefin-9/]	119
รูปที่ 5.1 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่ง (IMU 6DOF Razor) [19] (ซ้ายมือ), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งและเข็มทิศ (Pololu - MiniIMU-9 DOF Gyro, Accelerometer, and Compass) [20] (ขวามือ)	123
รูปที่ 5.2 เซนเซอร์เข็มทิศ (Digital Compass HMC6343) [21] (ซ้ายมือ),เซนเซอร์ GPS (EM-406 A SiRF III Receiver) [22] (ขวามือ)	123
รูปที่ 5.3 บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 [16]	124
รูปที่ 5.4 บอร์ด Netduino Plus [17]	124
รูปที่ 5.5 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งและเข็มทิศ ที่ติดตั้งภายในกล่องระบบนำร่อง	125
รูปที่ 5.6 เซนเซอร์ GPS EM-406 A สามตัว ที่ติดตั้งภายนอกกล่องระบบนำร่อง	125
รูปที่ 5.7 การทดสอบการ calibration ค่าความเร่งในแนวแกน x, y, z เป็นจำนวน 3 ครั้ง/แกน	126
รูปที่ 5.8 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน x ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	126
รูปที่ 5.9 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน y ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	127
รูปที่ 5.10 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน z ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	127
รูปที่ 5.11 การทดสอบการ calibration ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y, z เป็นจำนวน 3 ครั้ง/แกน	128
รูปที่ 5.12 : การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	129
รูปที่ 5.13: การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	129
รูปที่ 5.14 : การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง	130
รูปที่ 5.15 : หัววัดค่า pH (ด้านซ้าย) เชื่อมต่อเข้ากับวงจรอ่านค่าในกล่องสี่เหลี่ยมซึ่งเชื่อมไปยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (ด้านขวา)	130
รูปที่ 5.16 : โปรแกรมที่ใช้ในการบ่งบอกค่าพีเอชของน้ำที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Processing ที่เชื่อมต่อข้อมูลมาจาก Arduino microcontroller	131
รูปที่ 5.17 ระบบ servo winch ที่จะใช้ในการหมุนเก็บสายของหัววัดคุณภาพน้ำที่ยาว 6 เมตร	131
รูปที่ 5.18 หัววัดความลึกท้องน้ำและการติดตั้งทางด้านหัวเรือคายัคเมื่อนำเรือออกปฏิบัติการ (ซ้าย) และ เมื่อนำเรือเข้าเทียบท่า (ขวา)	132
รูปที่ 5.19 : ตัวอย่างการเชื่อมต่อของบอร์ด Netduino เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Pachube Web Server และ คอมพิวเตอร์สามารถเรียกดูข้อมูลได้แบบ Real time ผ่านอินเทอร์เน็ต	133
รูปที่ 5.20 บอร์ด Arduino Ethernet Shield [18] (ซ้าย) และ การเชื่อมต่อบอร์ด Arduino Ethernet Shield เข้ากับ 3G wireless router เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต	134
รูปที่ 5.21เว็บไซต์ของ Pachube [23]	135
รูปที่ 5.22 เว็บไซต์ของ Cosm [23]	135

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.1 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์และชั้นดาดฟ้าที่ใช้ทดสอบพื้นที่ประเภทที่ 1 และ 2	136
รูปที่ 6.2 พื้นที่ประเภทที่ 1 (ด้านซ้าย) พื้นที่ประเภทที่ 2 (ด้านขวา)	137
รูปที่ 6.3 การทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในพื้นที่ประเภทที่ 1 (ด้านซ้าย) พื้นที่ประเภทที่ 2 (ด้านขวา)	137
รูปที่ 6.4 พื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณรอบสระน้ำข้างอาคารวิทยบริการ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี	137
รูปที่ 6.5 การทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในพื้นที่ประเภทที่ 4 ในคลองพระยาสุเรนทร์	138
รูปที่ 6.6 สภาพสิ่งกีดขวางในระหว่างการทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในคลองพระยาสุเรนทร์	138
รูปที่ 6.7 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงจำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topton ในพื้นที่ประเภทที่ 1	139
รูปที่ 6.8 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงจำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topton ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับ การทดลองครั้งที่ 1	140
รูปที่ 6.9 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงจำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topton ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับการ ทดลองครั้งที่ 2	141
รูปที่ 6.10 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงจำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topton ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับการ ทดลองครั้งที่ 3	141
รูปที่ 6.11 ความเร็วในการเคลื่อนที่ ที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทั้ง 3 ตัว	142
รูปที่ 6.12 มุมหันเหเทียบกับทิศเหนือ ที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทั้ง 3 ตัว	142
รูปที่ 6.13 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณรอบสระน้ำ ข้างอาคารวิทยบริการ	143
รูปที่ 6.14 พิกัดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณที่ใกล้กับตึกอาคารวิทยบริการ (ด้านซ้าย) และ บริเวณโค้ง แจ้งริมขวาสุดของสระน้ำ (ด้านขวา)	143
รูปที่ 6.15 พิกัดที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 4 คลองพระยาสุเรนทร์เป็นระยะทาง 7 กิโลเมตร (ด้านซ้าย) และ ภาพขยายในบริเวณใต้สะพานทางด่วน (ด้านขวา)	144
รูปที่ 6.16 แกนพิกัดการหมุนของเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ ภายในกล่องระบบนำร่อง	144
รูปที่ 6.17 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน x เป็นมุม -90 องศา (ด้านซ้าย) แล้วหมุนรอบแกน x เป็นมุม 90 องศา (ด้านขวา)	145

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.18 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบ แกน x เป็นมุม -90 องศา แล้วเป็นมุม 90 องศา	146
รูปที่ 6.19 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน y เป็นมุม 90 องศา (ด้านซ้าย) แล้วหมุนรอบแกน -90 องศา (ด้านขวา)	147
รูปที่ 6.20 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบแกน y เป็นมุม 90 องศา แล้วเป็นมุม -90 องศา	147
รูปที่ 6.21 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน z เป็นมุม -90 องศา (ด้านขวา) และ 90 องศา (ด้านซ้าย)	148
รูปที่ 6.22 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบแกน z เป็นมุม -90 องศา แล้วเป็นมุม 90 องศา	148
รูปที่ 6.23 ค่าพิกัด GPS ในระบบพิกัด ECEF ที่วัดได้ (หลักด้านซ้าย) และ ค่าความเร่งในแกน x,y,z ที่วัดได้จาก Accelerometer ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักกลาง) และ ค่าอัตราเร็วเชิงมุมใน แกน x,y,z ที่วัดได้จาก Gyroscope ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักด้านขวา)	150
รูปที่ 6.24 ค่าพิกัด GPS ในระบบ NED (หลักด้านซ้าย) และ ค่าความเร่งในแกน x,y,z จาก Accelerometer ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักกลาง) และ ค่าอัตราเร็วเชิงมุมในแกน x,y,z จาก Gyroscope ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักด้านขวา) โดย ค่าจริงแสดงด้วยสีน้ำเงิน และ ค่าประมาณจาก Extended Kalman Filter แสดงด้วยสีแดง	151
รูปที่ 6.25 ค่าความผิดพลาดขององศาการหันเห (q) Roll, Pitch, Yaw เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้ จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	151
รูปที่ 6.26 ค่าความผิดพลาดของพิกัดตำแหน่ง (p) Latitude, Longitude, Height เมื่อเทียบค่า จริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	152
รูปที่ 6.27 ค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่ (V^N) ในทิศ North, East, Down เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	152

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 6.28 ค่าความผิดพลาดของ gyro bias ในสมการที่ (2.37) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	153
รูปที่ 6.29 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนขยายของ gyro ในสมการที่ (2.37) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	153
รูปที่ 6.30 ค่าความผิดพลาดของ accelerometer bias ในสมการที่ (2.39) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	154
รูปที่ 6.31 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนขยายของความเร่ง ในสมการที่ (2.39) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter	154
รูปที่ 6.32 การเชื่อมโยง 3G wireless router กับบอร์ด Arduino Ethernet Shield ที่ใช้ร่วมกับ Pachube Web Server เพื่อใช้ส่งข้อมูลจากการวัด ไปรายงานผลยังคอมพิวเตอร์ที่อยู่ระยะไกล (Remote Site)	155
รูปที่ 6.33 การทดสอบเซนเซอร์ชนิด ISFET เพื่อใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ผ่านบอร์ด Arduino	156
รูปที่ 6.34 การวัดค่า pH ด้วยเซนเซอร์ชนิด ISFET ของสารละลายสามชนิดที่มีค่า pH = 4, 7, 10	156
รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิด ISFET กับค่า pH	157
รูปที่ 6.36 การส่งข้อมูลคุณภาพน้ำจากเซนเซอร์ชนิด ISFET ผ่าน Pachube Web Server โดยใช้ 3G Router และ Arduino Ethernet Shield	157
รูปที่ 6.37 การรายงานผลข้อมูลคุณภาพน้ำและการควบคุมระยะไกลเครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำระยะไกลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G	158
รูปที่ 6.38 การติดตั้งเครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำและ 3G wireless router เข้ากับเรือคายัค	159
รูปที่ 6.39 การทดสอบการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำจากที่ผิวน้ำไปยังความลึกที่ต้องการ	159
รูปที่ 6.40 แสดงการควบคุมการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำจากคอมพิวเตอร์ที่ชายฝั่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G	159
รูปที่ 7.1 ภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ได้ติดตั้งกับเรือคายัค	160
รูปที่ 7.2 แผนภาพรวมของระบบต่างๆทั้งหมดของเรือคายัคสำหรับโครงการย่อยที่ 2 (เฉพาะที่มีสี)	162