

1. บทคัดย่อภาษาไทย ของโครงการย่อยที่ 2

การตรวจวัดมลพิษของน้ำ นับปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินสถานภาพมลพิษของน้ำในแหล่งน้ำสำคัญต่างๆ เช่น คุณภาพน้ำที่จากแหล่งชุมชน แหล่งอุตสาหกรรม และแหล่งเกษตรกรรม ซึ่งวัตถุประสงค์ของการตรวจวัดคุณภาพของน้ำนี้ จะสามารถนำมาใช้ประเมินถึงสภาพของคุณภาพน้ำได้อย่างทันทีและสามารถปฏิบัติการได้บ่อยครั้ง และ ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ไขปัญหาล้างแฉะล้นได้ทันทีที่นอกจากนั้นแล้วข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ คณะผู้วิจัยจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่สามารถรายงานค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และ ความเค็มหรือปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ได้แบบ ณ เวลาจริง ผ่านระบบโทรมาตร นอกจากนั้นแล้วคณะผู้วิจัยยังได้มีแนวคิดในการลดต้นทุนของเซนเซอร์สำหรับระบบนำร่องที่ราคาสูง โดยการนำข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS และ IMU ที่ราคาไม่แพงหลายตัว มาบูรณาการเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ข้อมูลของตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือให้มีความแม่นยำใกล้เคียงกับเซนเซอร์ราคาแพง เพื่อที่จะได้ลดต้นทุนโดยรวมของเรืออัตโนมัติที่ใช้ในการวัดคุณภาพน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้องค์กรต่างๆทั้งในภาครัฐและเอกชนสามารถนำไปใช้งานได้จริงและแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น และ จะได้เทคโนโลยีของระบบนำร่องที่พัฒนาในประเทศและจะช่วยลดการนำเข้าของเซนเซอร์ราคาแพงจากต่างประเทศในอนาคตได้อีกด้วย ในโครงการวิจัยย่อยที่ 2 นี้จะประกอบไปด้วย

1. พัฒนาระบบนำร่องของเรือโดยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ที่ให้ค่าพิกัดตำแหน่ง เข้ากับ ข้อมูลจากเซนเซอร์ Accelerometer ที่ให้ค่าความเร่งใน 3 แกนและเซนเซอร์ Gyroscope ที่ให้ค่าอัตราเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ใน 3 แกน โดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter เพื่อให้ได้ค่าประมาณของตำแหน่งและองศาการหันเหของหัวเรือที่จะใช้สำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือค้ายัคแบบอัตโนมัติ โดยในขั้นแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าความแม่นยำของเซนเซอร์ Topcon GPS ที่มีความแม่นยำสูงแต่ราคาแพง เมื่อเทียบกับเซนเซอร์ GPS หลายตัวที่ราคาประหยัดในพื้นที่สี่เหลี่ยม จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของพิกัดจาก GPS ที่ราคาประหยัดหลายๆตัวจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าพิกัดของ GPS ที่มีความแม่นยำสูง โดยจะต้องตัดค่าพิกัดที่ไม่เกาะกลุ่มค่าพิกัดจาก GPS ตัวอื่นๆออกไป เพื่อให้ได้ความแม่นยำของค่าเฉลี่ยที่ดีขึ้น หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลจากเซนเซอร์ Accelerometer และ Gyroscope มาบูรณาการกับข้อมูลพิกัดของ GPS ด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter เพื่อให้ได้ค่าพิกัดตำแหน่ง องศาการหันเห ความเร็วในการเคลื่อนที่ สามมิติ พร้อมทั้งค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณต่างๆด้วย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความแม่นยำของระดับความสูงนั้นมีความผิดพลาดมากกว่าค่าความแม่นยำของพิกัดระนาบอย่างน้อยสิบเท่า
2. ออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ ที่สามารถวัดคุณภาพน้ำ คือ ค่าอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ค่าความเค็มหรือปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ โดยสามารถตรวจสอบค่าเหล่านี้ได้ที่ระดับความลึกต่างๆไม่เกิน 5 เมตร ตามคำสั่งของผู้ปฏิบัติการผ่านเราเตอร์อินเทอร์เน็ตแบบ 3G ที่ติดตั้งไว้ทั้งบนเรือและบนฝั่ง โดยข้อมูลคุณภาพน้ำที่ได้นี้จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G ไปยัง Web Server หรือ คอมพิวเตอร์ของผู้ปฏิบัติการ ได้แบบ ณ เวลาจริง (real time) ในพื้นที่ๆครอบคลุมด้วยระบบเครือข่ายมือถือแบบ 3G โดยจะมีค่า

ช่วงเวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 6 วินาที ในการรับข้อมูลจากเรือมายังผู้ปฏิบัติการ หรือ ในการส่งคำสั่งจากผู้ปฏิบัติการไปยังเรือในการปรับระดับความลึกของหัววัดคุณภาพน้ำ

โดยเรือที่ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติด้วย podded propulsion ที่พัฒนาขึ้นมาจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกรวดเร็ว และตรวจวัดคุณภาพน้ำได้ตามจุดที่ต้องการต้องการ ทำให้ประหยัดเวลาในการปฏิบัติงาน และ จะช่วยลดความเสี่ยงของผู้ปฏิบัติงาน เมื่อออกตรวจสอบในภาคสนาม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การพัฒนาและปรับปรุงระบบนำร่องให้มีประสิทธิภาพดีและช่วยลดต้นทุน และ จะเป็นการเพิ่มศักยภาพให้แก่ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำและระบบการรายงานข้อมูลและควบคุมการทำงานโดยผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะส่งไปยัง Web Server ทำให้หน่วยงานต่างสามารถเข้าถึงและนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้แพร่หลายยิ่งขึ้นอีกด้วย

1. บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ของโครงการย่อยที่ 2 (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. Moreover, this water quality information can be used as a database for water resource managements in several aspects. Thus, our research group proposes to develop an in situ water-quality measurement system that can collect dynamic water quality information (pH and temperature and salinity or dissolved oxygen) and transfer this data from sampling points to a user in real time through 3G internet network. Another concept of our team in this research is to reduce a high cost of navigation sensors by fusing signals from several low-cost GPS and IMU sensors together. Results from the sensor fusion provide boat's estimated position and orientation with similar accuracies as those of high-cost sensors. Therefore, overall cost of autonomous boat is reduced so that public and private organizations could afford to use this kayak boat for a wide range of real applications. This research also yields the navigation technology, developed within our country, and reduces imports of expensive sensors from abroad in near future. The second part of these research projects includes the following topics

1. Development of the navigation system for kayak boat by using the Extended Kalman Filter technique to fuse the following information: Latitude and Longitude coordinate from GPS and 3-axis acceleration from Accelerometer and

3-axis angular rotation from Gyroscope such that estimated position and orientation of kayak can be used to perform a kayak way-point tracking control. In the first step, a comparison between a high-accuracy expensive Topcon GPS and several low-accuracy inexpensive GPSs in terms of horizontal accuracy is performed within a rectangular surveying area. A mean horizontal position from several inexpensive GPSs is almost equivalent to the horizontal position from the high-accuracy GPS, when horizontal-position outliers from some GPS are excluded from the mean position calculation. In the second step, signals from both Accelerometer and Gyroscope sensors are integrated with GPS position using the Extended Kalman Filter such that three-dimensional positions, attitudes, velocities along with their standard deviations. Results show that the vertical-position accuracy is at least ten times smaller than the horizontal-position accuracy.

2. Design and construction of a water quality measurement system that can measure water quality (pH and temperature and salinity or dissolved oxygen) at various depths up to the maximum depth of 5 meter according to specified operator's command transmitted through 3G internet routers, which are installed on the boat as well as on the shore. Then the water quality information can be reported to the user in real time through Web Server using the 3G internet network with average delay of 6 second. The same 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 kayak boat driven by podded propulsion can be conveniently used in real applications 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 navigation systems to reduce a construction cost and to increase capabilities of the water quality measurement as well as the telemetry system and control through internet using 3G internet network. All measured information will be transmitted to Web Server, as a result other organizations can securely access these information and put them to good use more easily and broadly.

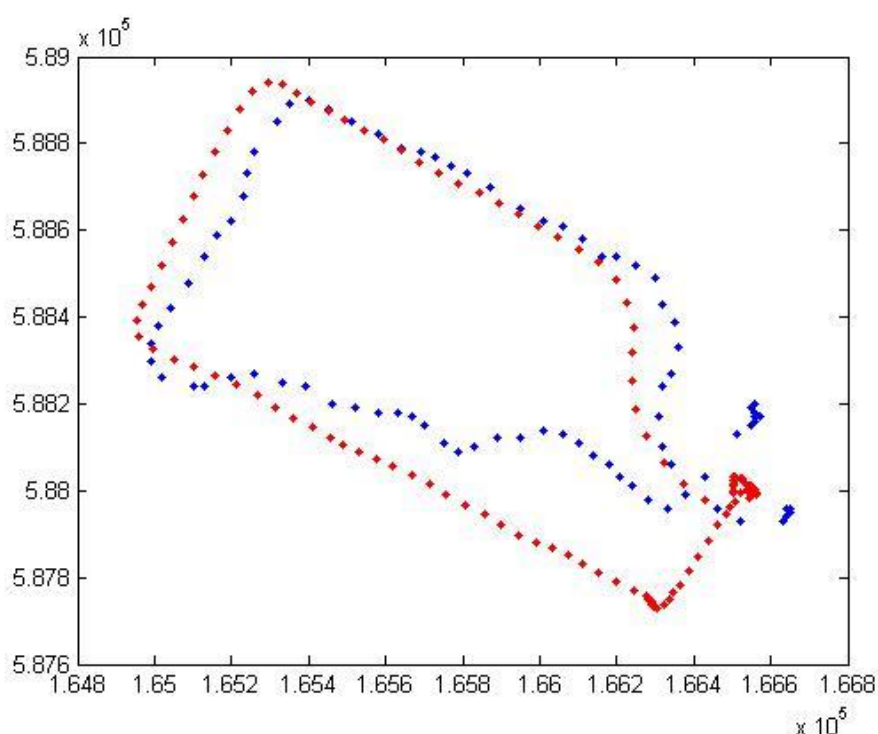
2. บทนำของโครงการย่อยที่ 2

จากโครงการเรืออัตโนมัติที่ขับเคลื่อนโดย podded propulsion ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อใช้เก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์คุณภาพน้ำ ที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2552 นั้นประสบกับปัญหาหลักในการพัฒนาระบบขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติของเรือ เพื่อเก็บตัวอย่างน้ำนี้คือ ราคาของเซนเซอร์ (GPS และ IMU) ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบนำร่องนั้นมีราคาสูงมาก เนื่องจากเป็นเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง แต่ทว่าในการพัฒนาไปใช้ในภาคสนามจริงนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาและปรับปรุงระบบนำร่องของเรือให้มีราคาถูกลง ซึ่งจะมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในภาคสนามจริงที่มีความเสี่ยงต่อการเสียหายของอุปกรณ์อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและอุบัติเหตุที่อาจไม่คาดการณล่วงหน้า เช่น ความร้อนที่สูงมากในขณะปฏิบัติการที่อาจทำให้มีการเสียหายของตัวเซนเซอร์ หรือ การปะทะเข้ากับคลื่นแรงที่อาจทำให้เรือพลิกคว่ำได้ โดยเซนเซอร์ที่มีราคาถูกลงที่จะนำมาใช้ใหม่นี้จะมีความแม่นยำและประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเซนเซอร์ที่ราคาแพงที่ใช้อยู่ในระบบนำร่องเดิม คณะผู้วิจัยเสนอแนวคิดที่จะใช้เทคนิคการบูรณาการของข้อมูล (sensor fusion) ที่ได้จากเซนเซอร์ GPS และ IMU ราคาถูกหลายๆตัวรวมกัน มาประมาณค่าของตำแหน่งและองศาการหันเหของเรือในระบบนำร่อง เพื่อให้ได้ความแม่นยำที่ใกล้เคียงกับเซนเซอร์ที่ราคาแพง

จากการทดลองเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบขีดความสามารถของเซนเซอร์ GPS 2 ชนิด คือ Topcon Hiper GA ที่มีราคาประมาณ 350,000 บาท ที่ใช้อยู่ในระบบนำร่องณ ขณะนี้ และ San Jose Navigation EB-85A ที่มีราคาประมาณ 3,000 กว่าบาท จะพบว่า Topcon Hiper GA จะมีความแม่นยำและมีความเสถียรมากกว่า EB-85A แต่จากการทดสอบและพล็อตจุดพิกัดเปรียบเทียบดังรูปที่ 1 จะเห็นว่าค่าพิกัดจาก EB-85A มีความคลาดเคลื่อนแต่ก็ได้ผิดพลาดมากนัก และ ค่าความละเอียดของข้อมูลนั้นลดน้อยลง ซึ่งถ้าประยุกต์ใช้ทฤษฎี Kalman Filtering เข้ามาช่วยก็มีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มขีดความสามารถของเซนเซอร์ที่ราคาถูกลงขึ้นในขั้นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับระบบนำร่องของเรือได้ในระดับความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 3 เมตร

การตรวจวัดมลพิษของน้ำ นับปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินสถานภาพมลพิษของน้ำในแหล่งน้ำสำคัญต่างๆ ทั้งน้ำผิวดินในแม่น้ำและมหาสมุทร น้ำใต้ดินเช่นน้ำบาดาล แต่แหล่งน้ำอีกแหล่งที่สำคัญมากเช่นเดียวกันก็คือ คุณภาพน้ำทั้งจากแหล่งชุมชน แหล่งอุตสาหกรรม และแหล่งเกษตรกรรม ซึ่งวัตถุประสงค์ของการตรวจวัดมลพิษของน้ำนี้ จะสามารถนำมาใช้ประเมินถึงสภาพของคุณภาพน้ำ และเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการจัดการทรัพยากรน้ำ โดยที่คุณภาพน้ำนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในน้ำ ได้แก่แร่ธาตุต่างๆ สารเคมีและจุลินทรีย์ในน้ำ ทำให้น้ำมีคุณภาพต่างกัน ในการบ่งบอกคุณภาพของน้ำ สามารถอาศัยการตรวจวิเคราะห์และทดสอบในห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ คุณภาพน้ำสามารถจำแนกน้ำออกเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) คุณภาพน้ำทางกายภาพ เป็นลักษณะของความสกปรกในน้ำที่ปรากฏให้เห็นได้ด้วยประสาทสัมผัสทั้งห้า ได้แก่ สี, อุณหภูมิ, ความขุ่น, โปร่งแสง, และ กลิ่น เป็นต้น 2) คุณภาพทางเคมี เกิดจากแร่ธาตุสารต่างๆ ที่

ละลายปะปนอยู่ในน้ำมักไม่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า ต้องใช้การตรวจสอบด้วยวิธีการทางห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ เช่น สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ตัวอย่าง ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง (pH), ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity), ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (Dissolved Oxygen, Do), ความกระด้าง, เหล็ก, แคลเซียม, ตะกั่ว เป็นต้น 3) คุณภาพน้ำทางชีววิทยา เกิดจากจุลินทรีย์ที่เจือปนในน้ำ ได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส รา โปรโตซัว สาหร่าย น้ำที่มีจุลินทรีย์มากมักจะเกิดมลพิษ ที่มีผลต่อสุขภาพโดยตรง อาจก่อให้เกิดโรคระบาดที่มีน้ำเป็นสื่อได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรค ระบบทางเดินอาหารที่สำคัญมักเกิดจากเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรค Pathogens บนปะปนอยู่ในอาหารและน้ำ แล้วทำให้เกิดโรคต่างๆ เช่น อหิวาตกโรค ไทฟอยด์ พาราไทฟอยด์ บิด ข้อมูลที่สำคัญในการบ่งบอกคุณภาพน้ำทางแบคทีเรีย คือ โคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Total bacteria) ฟีคัลโคลิฟอร์มแบคทีเรีย (Faecal coliformbacteria) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ผลการทดลองเก็บจุดพิกัด GPS บนตลาดฟ้าอาคารมาตริวิทยา กรมวิทยาศาสตร์บริการ ถนนพระรามที่ 6 จุดสีแดงคือข้อมูลพิกัดตำแหน่งจาก GPS : Topcon Hiper GA จุดสีน้ำเงินคือข้อมูลพิกัดตำแหน่งจาก GPS : San Jose Navigation EB-85A

ดังนั้นคณะผู้วิจัยต้องการพัฒนาและปรับปรุงระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่เน้นการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีของน้ำเพื่อให้ได้ข้อมูลของน้ำ ณ จุด (In-Situ) ด้วยเรืออัตโนมัติ โดยที่จะทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง, ค่าความเค็ม และ ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยที่จะออกแบบระบบการนำหัว probe วัดคุณภาพน้ำนี้ให้อยู่ในระดับความลึกที่ต้องการและตำแหน่งที่ต้องการด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ เข้ามาช่วย และ สามารถจัดเก็บหัว probe เข้ากับตัวเรือเมื่อไม่ต้องการใช้งาน นอกจากนั้นจะมีการนำ

เทคโนโลยีสารสนเทศเข้ามามีใช้ในการจัดการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมทางน้ำ ซึ่งในปัจจุบันระบบสื่อสารระยะไกลได้มีการนำไปอย่างแพร่หลาย เพื่อให้สามารถตรวจสอบข้อมูลได้ง่ายและรวดเร็วทันต่อสถานการณ์ เช่น การตรวจวัดสภาพของสายส่งไฟฟ้ากำลังผ่านสัญญาณไร้สาย [4] และ การตรวจวัดระดับมลพิษในดินแบบ real-time [3]

3. การทบทวนวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 2

Kim และ คณะ [8] ได้นำเซนเซอร์วัดมุมเอียงและความเร่ง (IMU) และ เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (GPS) ที่มีราคาถูกมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่และระบบนำร่องของเครื่องบินเล็กแบบอัตโนมัติที่สามารถบินตามจุดพิกัดที่กำหนด สำหรับเซนเซอร์ IMU และ GPS ที่มีราคาถูกจะประสบกับปัญหาความแม่นยำของเซนเซอร์ที่ต่ำและความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้ต่ำ ซึ่งจะส่งผลให้เสถียรภาพของระบบควบคุมและระบบนำร่องลดน้อยลงไปในอนาคตไม่เสถียรภาพได้ ดังนั้นจึงมีการนำข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ IMU และ GPS หลายๆตัว มาบูรณาการเข้าด้วยกันโดยใช้เทคนิค Kalman Filter เพื่อให้ได้ตำแหน่งและองศาการเอียงของเครื่องบินที่แม่นยำที่จะนำไปใช้ในระบบนำร่องแบบอัตโนมัติ

Allerton และ คณะ [2] ได้พัฒนาเทคนิคในการบูรณาการข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียงและความเร่ง (IMU) หลายๆตัวที่กระจายการติดตั้งอยู่ในระบบ ซึ่งเทคนิคนี้หลักๆประกอบด้วยสองส่วนใหญ่อีกคือ 1) การนำค่ามุมเอียงและค่าความเร่งที่ได้จากเซนเซอร์ IMU หลายตัวในระบบที่ตำแหน่งต่างๆและองศาการหมุนที่ต่างกันมารวมกัน โดยใช้เทคนิค Kalman Filter 2) การนำค่าประมาณหลายๆค่ามาใช้ประมาณค่ามุมเอียงและความเร่ง เพื่อใช้ช่วยวิเคราะห์ความผิดพลาดของเซนเซอร์แต่ละตัวเนื่องจากการขาดหายของข้อมูลหรือการเลื่อนของข้อมูลและเพิ่มความแม่นยำให้กับระบบนำร่อง โดยที่เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับเครื่องบินซึ่งเป็นระบบที่มีความยืดหยุ่นหรือการสั่นสะเทือนสูง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการบูรณาการข้อมูลจาก IMU หลายๆตัวเข้าด้วยกัน

ในการบูรณาการข้อมูลจาก GPS และ IMU เซนเซอร์หลายๆตัวเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการป้อนกลับตำแหน่งของยานพาหนะบนผิวดินที่ขับเคลื่อนเองโดยอัตโนมัติ Caron และ คณะ [7] ได้ใช้เทคนิคของ Kalman Filter เพื่อใช้ประมาณค่าตำแหน่งในแต่ละขณะที่ได้จากทั้ง GPS และ IMU เซนเซอร์ โดยที่ใช้ร่วมกับค่าความน่าเชื่อถือหรือค่าความน่าจะเป็นของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว เพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหาการสูญหายและการวัดค่าผิดของข้อมูลตำแหน่งที่ได้จาก GPS ที่จะสามารถช่วยระบบการนำร่องให้ทำงานด้วยความแม่นยำที่สูงขึ้น

Bourgeois B. และ คณะ [4] จาก Naval Research Laboratory ได้สร้างและพัฒนาระบบสำรวจข้อมูลของมหาสมุทรแบบอัตโนมัติที่ไร้คนขับและไร้สาย ซึ่งสามารถติดตั้งเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ที่จะเก็บข้อมูลทางทะเลเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูล สำหรับการวางแผนทางทะเล ระบบเก็บข้อมูลนี้มีชื่อเรียกว่า ORCA ที่พัฒนาขึ้นคล้ายกับยานดำน้ำแต่มีเสายื่นขึ้นมาบนผิวน้ำเพื่อรับและส่งข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ โดยที่ ORCA จะถูกติดตั้งด้วยเซนเซอร์แบบ acoustic และ bathymetry เพื่อใช้ในการเก็บภาพถ่ายท้องน้ำแบบคลื่นเสียงได้ลึกถึง 300 เมตร และ กล้อง CCD เพื่อใช้ในการส่งภาพของผิวน้ำในขณะนั้นๆ นอกจากนั้นแล้วยังมีเซนเซอร์ที่ใช้วัดการตกตะกอนบนผิวดินที่ใช้คลื่นเสียง เพื่อใช้จำแนกส่วนประกอบของตะกอนใต้ท้องน้ำได้อีกด้วย ระบบนำร่องแบบอัตโนมัตินั้นจะใช้ข้อมูลจาก GPS และ Gyrocompass โดยที่ข้อมูลของเซนเซอร์จะถูกส่งจากยาน

ORCA มายังเรือเคลื่อนที่บนผิวน้ำผ่านสัญญาณคลื่นวิทยุความเร็วสูง ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 5 mile ด้วยความเร็วในการส่งผ่านข้อมูล 946 Kbit/sec

Ning A. และ คณะ [10] ได้พัฒนาระบบการตรวจสอบคุณภาพน้ำแบบเครือข่าย โดยที่ใช้วัดคุณภาพน้ำที่ออกจากโรงงานและออกจากท่อระบายน้ำของแต่ละเมืองแบบ real-time โดยข้อมูลจากเซนเซอร์จะบ่งบอกค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ค่าไนโตรเจนและฟอสเฟส และ ค่าคลอไรด์ของน้ำ แล้วส่งข้อมูลเหล่านั้นผ่านการสื่อสารแบบอินเทอร์เน็ตไร้สายจากคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งอยู่กับ station ทั้งแบบอยู่กับที่และแบบเคลื่อนที่ได้ กลับไปยังระบบ server ของระบบส่วนกลาง เพื่อตรวจสอบคุณภาพน้ำที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของโครงการย่อยที่ 2

3.1 เซนเซอร์ชนิดต่างๆที่ใช้ในระบบนำร่องของเรือ

ชนิดของเซนเซอร์ประเภทต่างๆที่จะใช้กับการบูรณาการข้อมูลของระบบนำร่องอัตโนมัติมีดังต่อไปนี้

- 1) เซนเซอร์วัดมุมเอียง (Gyroscope) : ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์แบบ 3 แกน ชนิดนี้จะเป็นความเร็วเชิงมุมในแต่ละแกนของการเคลื่อนที่ ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ซึ่งจะไม่ขึ้นกับความเร็วของเรือ ปัญหาหลักของเซนเซอร์ชนิดนี้คือ ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
- 2) เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) : ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์แบบ 3 แกนชนิดนี้จะเป็นความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ของค่าความโน้มถ่วงของโลกในแต่ละแนว สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่มีความถี่เป็นศูนย์ (zero-frequency หรือ DC) และส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำ และส่วนประกอบที่มีความถี่สูง ส่วนประกอบที่มีความถี่สูงเป็นสัญญาณรบกวนที่เราไม่ต้องการเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในระบบหรือเรือซึ่งเราจำเป็นต้องกรองสัญญาณความถี่สูงออกไป ในทางอุดมคติเราต้องการเพียงสัญญาณของส่วนประกอบที่มีความถี่ต่ำอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของเรือ ข้อดีของเซนเซอร์ชนิดนี้คือจะไม่มีคลาดเคลื่อนของสัญญาณเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
- 3) เซนเซอร์วัดตำแหน่งหรือ GPS (Global Positioning System) : ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิดนี้คือ พิกัดหรือตำแหน่ง (x, y, z) และขนาดของความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS จะอยู่ในรูปแบบ NMEA ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่แบ่งโดยลูกน้ำที่เขียนในรูปแบบ ASCII ข้อจำกัดของเซนเซอร์ชนิดนี้ คือ GPS จะต้องมีการเคลื่อนที่เพื่อให้ได้ข้อมูลของทิศทางการเคลื่อนที่และความเร็ว ระบบพิกัดที่จะใช้สำหรับ GPS ในงานวิจัยนี้จะรายงาน ละติจูด (latitude) ลองจิจูด (longitude) ความสูง (altitude) ความเร็วในระนาบพื้นดิน (velocity over ground) และทิศทางการหันเหในระนาบพื้นดิน (course over ground) หรือองศาที่วัดตามเข็มนาฬิกาเมื่อเทียบกับทิศเหนือ
- 4) เซนเซอร์เข็มทิศ (Digital Compass) : ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิดนี้คือองศาการหมุนในทั้งสามพิกัด คือ องศาการกลิ้ง (roll angle) องศาปักแล้วเียง (pitch angle) องศาการหันเห (yaw angle) ข้อดีของเซนเซอร์เข็มทิศคือจะได้มุมทั้งสามมุมที่เป็นองศาสมบูรณ์เมื่อเทียบกับพิกัดโลก ส่วนข้อเสียของ

เซนเซอร์ชนิดนี้คือสามารถถูกรบกวนโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆได้ง่าย จึงไม่ควรติดตั้งใกล้กับแหล่งจ่ายไฟหรือมอเตอร์ไฟฟ้า

3.1.1. เซนเซอร์รับสัญญาณ GPS เพื่อบอกตำแหน่ง

GPS (Global Positioning System) คือระบบกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลกผ่านดาวเทียม โดยพิกัดบนพื้นโลกที่ได้จะมาจากการคำนวณสัญญาณนาฬิกาที่ส่งมาจากดาวเทียม มาอยู่ที่เครื่องรับสัญญาณ GPS ดาวเทียม GPS ที่สามารถใช้ระบุตำแหน่งได้นั้น จะถูกออกแบบมาโดยเฉพาะให้โคจรรอบโลก เพื่อส่งข้อมูลที่จะนำไปใช้คำนวณพิกัดออกมาตลอดเวลา ระบบ GPS จะทำงานได้นั้นต้องประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. สถานีฐาน : มีหน้าที่ควบคุมการทำงาน รวมถึงวงโคจรของดาวเทียม และให้ค่าสัญญาณ นาฬิกาที่ถูกต้อง กับดาวเทียม GPS

2. ดาวเทียม GPS : ส่วนของดาวเทียม GPS ในปัจจุบันนั้น จะมาจาก 3 ชาติหลักๆคือ

- NAVSTAR : จากของประเทศอเมริกา มีทั้งหมด 24 ดวง โคจรรอบโลกที่ความเร็ว 12 ชั่วโมง

ต่อ 1 รอบ

- Galileo : ถูกพัฒนาโดยสหภาพยุโรป ร่วมกับประเทศจีน อิสราเอล อินเดีย โมร็อกโก

ซาอุดีอาระเบีย เกาหลีใต้ และยูเครน รวมจำนวน 27 ดวง

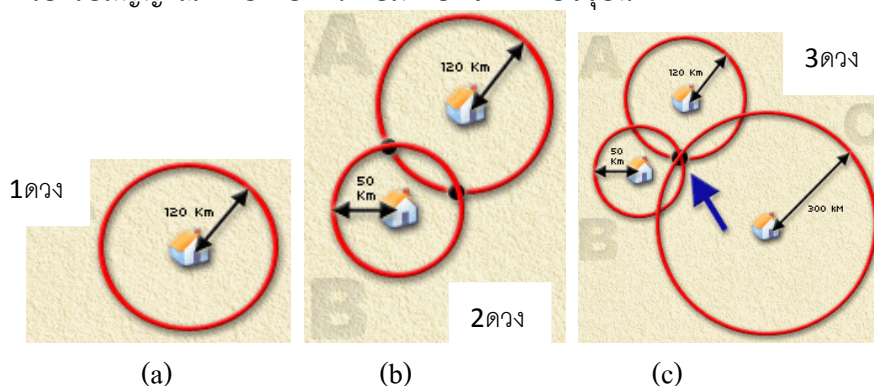
- GLONASS : (GLObal NAVigation Satellite System) ที่พัฒนาโดยรัสเซีย

- Beidou : เป็นดาวเทียม GPS ที่กำลังพัฒนาโดยประเทศจีน

3. เครื่องรับสัญญาณ GPS : ผู้ใช้งานสามารถรับสัญญาณ GPS ได้จากอุปกรณ์หลายๆอย่าง เช่น โทรศัพท์มือถือที่รับสัญญาณ GPS ได้, GPS Receiver (ต่อกับ computer, มือถือ) หรือ เครื่อง PNA (Personal Navigation Assistant) หรือเรียกง่ายๆว่า GPS Navigator, GPS ติดรถ

การทำงานและประโยชน์ของระบบ GPS แรกเริ่มนั้นการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อจุดประสงค์ทางการทหารเป็นหลัก แต่ต่อมาทางการสหรัฐอเมริกา ได้เปิดให้ประชาชนทั่วไปได้ใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ส่งออกมาจาก ดาวเทียมGPS ได้ฟรี บริษัทต่างๆจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้ระบุพิกัด จากการรับสัญญาณ GPS เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆทางเช่น ใช้ในการนำทางยานพาหนะ ติดตามยานพาหนะ หรือบุคคล หรือใช้ในการอ้างอิงสถานที่ในการเดินทาง และอื่นๆความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของ GPS

ตัวรับสัญญาณ GPS นั้นจะสามารถระบุตำแหน่งของเราได้แม่นยำแค่ไหน ขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมที่สามารถรับสัญญาณได้ในขณะนั้น การระบุพิกัดขั้นต่ำ ต้องการดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง เพื่อระบุตำแหน่งให้ได้ตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยตัวเครื่อง GPS จะนำสัญญาณนาฬิกา ที่ได้รับจากดาวเทียมทั้ง 3 ดวง มาคำนวณระยะห่างของเครื่องรับสัญญาณ GPS กับดาวเทียมเพื่อแจ้งพิกัดปัจจุบัน



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพการระบุตำแหน่งจากดาวเทียม 1ดวง 2ดวง และ3ดวง

จากรูปด้านบนจะเห็นได้ว่า หากรับสัญญาณ GPS จากดาวเทียมได้เพียงดวงเดียว เราจะได้พิกัดในลักษณะเป็นวงกว้าง ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้ แต่รูปที่ 3.1 (b) เมื่อรับสัญญาณ GPS จากดาวเทียมได้ 2 ดวง จะทำให้สามารถระบุพิกัดได้ แต่จะมีพิกัดจำนวน 2 จุดที่เกิดจากการตัดกันของสัญญาณ GPS จากดาวเทียม 2 ดวง ซึ่งก็ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ชัดเจนได้ และรูปที่ 3.1 (c) จะสามารถระบุพิกัดบนพื้นโลกได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเครื่องรับสัญญาณ GPS สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ 3 ดวง ทำให้ตัวเครื่องสามารถคำนวณหาพิกัด ซึ่งเกิดจากจุดตัดจากสัญญาณดาวเทียมทั้ง 3 ดวงได้ ดังนั้นการแสดงพิกัดที่ถูกต้อง ตัวเครื่องที่ใช้รับสัญญาณ GPS จะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ได้อย่างน้อย 3 ดวงขึ้นไป (ยิ่งมากยิ่งดี)

GPS Topcon [24] รุ่น Hiper G-Series ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็น GPS ที่มี 40 Channel และ ความแม่นยำสูงที่นิยมใช้ในการสำรวจและจัดทำแผนที่ ในโหมดปกติจะมีความแม่นยำน้อยกว่า 5 เมตร และ ในโหมด DGPSจะมีความแม่นยำน้อยกว่า 0.5 เมตร โดยที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ภายใน 60 วินาที หลังจากเริ่มเปิดเครื่องเมื่อไม่ได้ใช้งานนานๆ (Cold Start) และรับสัญญาณดาวเทียมได้ภายใน 1 วินาที หลังจากปิดและเปิดเครื่องใหม่โดยทันที (Hot Start) มีขนาดกว้างxสูงxยาว เป็น 159x173x113mm น้ำหนัก 1.65 kg ซึ่งคณะผู้วิจัยได้นำมาใช้ในระบบนำร่องของโครงการที่แล้ว GPS Topcon สามารถต่อได้ทั้ง พอร์ตอนุกรมและยูเอสบีซีได้

การแปลรหัสสัญญาณจาก GPS ในรูปแบบของ NMEA ที่ได้รับเข้ามาจะอยู่ในรูปแบบดังนี้

แบบที่ 1: \$GPGGA,hhmmss.ss,Latitude,N,Longitude,E,FS,NoSV,HDOP,msl,m,Altref,m,DiffAge,DiffStation,DiffStation*cs<CR><LF> หรือ

แบบที่ 2 : \$GPRMC, hhmmss.ss,VA,Latitude,N,Longitude,E,Speed,Course,Date,Mode,Checksum

ตารางที่ 3.1 แสดงการแปลรหัสสัญญาณของ GPS ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นแบบ NMEA แบบที่ 1

ชื่อ	ASCII String		คำอธิบาย
	รูปแบบ	ตัวอย่าง	
\$GPGGA	ตัวอักษร(String)	\$GPGGA	ค่าขึ้นต้นชนิดของ GPS
hhmmss.ss	hhmmss.ss	092725.00	เวลาปัจจุบัน (เวลาUTC)
Latitude	dddmm.mmmm	4717.11399	ละติจูด : องศา+ลิปดา
N	ตัวอักษร(String)	N,S	ระบุ: N=เหนือ ,S=ใต้
Longitude	dddmm.mmmm	10039.0000	ลองจิจูด : องศา+ลิปดา
E	ตัวอักษร(String)	E,W	ระบุ : E= ตะวันออก , W= ตะวันตก

ตารางที่ 3.2 แสดงการแปลรหัสสัญญาณของ GPS ที่มีรูปแบบข้อมูลเป็นแบบ NMEA แบบที่ 2

ชื่อ	ASCII String		คำอธิบาย
	รูปแบบ	ตัวอย่าง	
\$GPRMC	ตัวอักษร(String)	\$GPRMC	ค่าขึ้นต้นชนิดของ GPS
hhmmss.ss	hhmmss.ss	092725.00	เวลาปัจจุบัน (เวลาUTC)
Latitude	dddmm.mmmm	4717.11399	ละติจูด : องศา+ลิปดา
N	ตัวอักษร(String)	N,S	ระบุ: N=เหนือ ,S=ใต้
Longitude	dddmm.mmmm	10039.0000	ลองจิจูด : องศา+ลิปดา
E	ตัวอักษร(String)	E,W	ระบุ : E= ตะวันออก , W= ตะวันตก
Speed	เลขทศนิยม	0.10	ความเร็วในหน่วย knot
Course	เลขทศนิยม	11.88°	องศาการหันเหเมื่อเทียบกับทิศเหนือ



รูปที่ 3.2 GPS Topcon (ซ้าย) [24] และ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 (ขวา) [25]

3.1.2 เซนเซอร์วัดมุมเอียง Inertia Measurement Unit (IMU) เพื่อบอกองศาหันเห

IMU เป็นอุปกรณ์ประเภท เซนเซอร์วัดมุมเอียงซึ่งสามารถวัดมุมรอบแกน X (Roll), รอบแกน Y (Pitch) และรอบแกน Z (Yaw) และความเร่งเชิงมุมในทั้งสามแกน Micro-Strain IMU รุ่น 3DM-GX2 [25] จะมีความไว (Sensitivity) สูงสุด และ ความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต (response range) และ ความแม่นยำพลวัต (Dynamic Accuracy) สำหรับเซนเซอร์วัดความมุมเอียงเป็น 1200°/sec และ 16-bit และ

$\pm 2^\circ$ ตามลำดับ และ สำหรับเซนเซอร์วัดความเร่งเป็น $\pm 10g$ และ 16-bit และ $\pm 0.01g$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 แสดง ข้อมูลคุณสมบัติของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 [25]

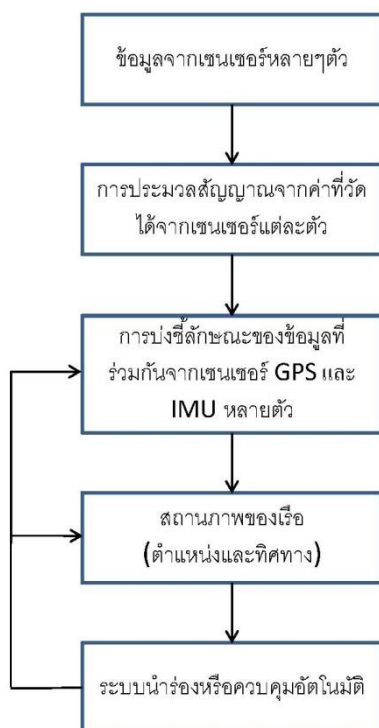
การวัดมุมเอียง	360° about all axes
(Roll, Pitch, Yaw)	
ช่วงการใช้งานการวัดความเร่ง (Accelerometer Range)	Accelerometers: $\pm 5\text{ g}$ มาตรฐาน, $\pm 18\text{ g}$
ความไม่เป็นเชิงเส้นของการวัด ความเร่ง(Accelerometer Nonlinearity)	0.20%
ช่วงการใช้งานการวัดมุมเอียง	$\pm 300^\circ/\text{sec}$ มาตรฐาน, $\pm 1200^\circ/\text{sec}$,
ความสามารถในการวัดซ้ำ	$<0.1^\circ$ minimum
	0.20°
ชนิดของผลลัพธ์	ความเร่ง, ความเร่งเชิงมุม, และมุม(Roll,Pitch,Yaw)

3.2 เทคนิคการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS และ IMU เพื่อใช้ในระบบนำร่อง

ในการประยุกต์ใช้เทคนิคการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์หลายๆตัว จะใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดจากเซนเซอร์ที่เป็นทั้งแบบมีการส่งสัญญาณจากตัวเองและแบบมีการเรียกสัญญาณจากอุปกรณ์อื่น เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อให้ข้อมูลได้ข้อมูลที่แม่นยำมากขึ้น หรือ ข้อมูลที่แสดงสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ดีขึ้น ถ้าการบูรณาการข้อมูลนั้นกระทำได้อย่างถูกต้องและสำเร็จจะช่วยเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัว และ ช่วยลดค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วชนิดของเซนเซอร์และการจัดเรียงตำแหน่งของเซนเซอร์ก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญ ถ้าจัดเรียงตำแหน่งของเซนเซอร์อย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มข้อมูลในการเคลื่อนที่ของวัตถุด้วย

ชนิดของเซนเซอร์ที่จะใช้ในการบูรณาการข้อมูล สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) เซนเซอร์แบบเสริมกัน หมายถึง ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวจะบ่งบอกสถานภาพแต่เพียงบางส่วน แต่เมื่อนำข้อมูลของเซนเซอร์ทุกตัวมารวมเข้าด้วยกันก็จะได้สถานภาพรวมทั้งหมด 2) เซนเซอร์แบบแข่งขัน หมายถึง ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์แต่ละตัวจะบ่งบอกถึงสถานภาพที่คล้ายกันหรือเหมือนกันหรือที่เวลาต่างๆกันไป ในการนำข้อมูลของเซนเซอร์ทุกตัวมารวมกันจะเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลเหล่านี้ และ ยังสามารถบ่งชี้ได้ว่าข้อมูลของเซนเซอร์ตัวใดมีความผิดพลาดเยอะ 3) เซนเซอร์แบบทำงานร่วมกัน หมายถึง ข้อมูลที่ได้จาก

เซนเซอร์แต่ละตัวจะให้ข้อมูลที่ไม่ขึ้นแก่กัน และ เมื่อนำข้อมูลของเซนเซอร์แต่ละตัวมารวมกันก็จะได้ข้อมูลประเภทใหม่ออกมาที่ไม่สามารถให้ได้จากเซนเซอร์ตัวเดียว



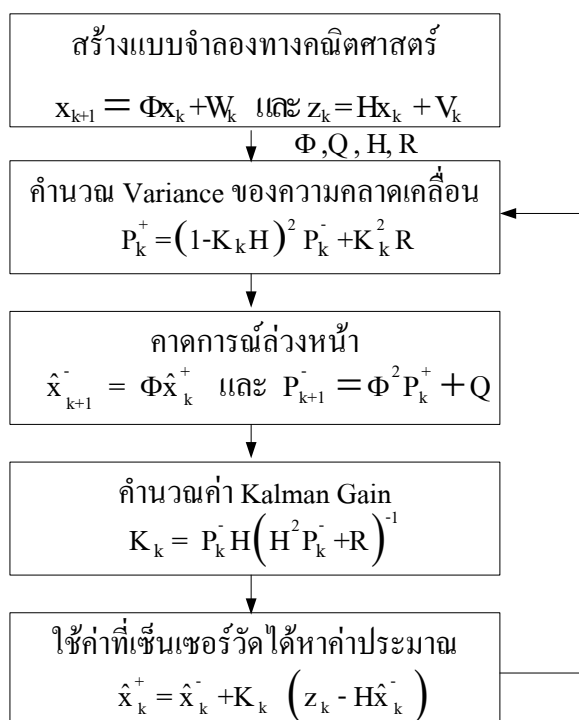
รูปที่ 3.3 การบูรณาการของข้อมูลโดยใช้เทคนิค Kalman Filter

ในส่วนของเทคนิคการบูรณาการของข้อมูลนั้นจะสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ 1) การใช้แบบจำลองทางสถิติหรือความน่าจะเป็น 2) การใช้เทคนิควัดระยะของข้อมูลแบบกำลังสอง (least-square) หรือ การใช้เทคนิคการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) [12] หรือ การใช้เทคนิค Kalman filter [2,7,8] 3) การใช้เทคนิคแบบไม่มีแบบแผนที่แน่นอน เช่น โครงข่ายประสาทเทียม (neural network) หรือ fuzzy logic [11]

ในงานวิจัยนี้จะเน้นการบูรณาการของเซนเซอร์ชนิดที่ 2 และ 3 โดยจะใช้เทคนิค Kalman filter ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) ขั้นตอนการพยากรณ์ค่าของเซนเซอร์จากข้อมูลที่วัดได้ โดยใช้โมเดลแบบเชิงเส้นรวมกับการประมาณค่า covariance ของค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ทุกตัว 2) ขั้นตอนการปรับค่าให้ถูกต้อง โดยจะทำการประมาณค่าข้อมูลของเซนเซอร์จากค่าที่วัดได้และจากค่าที่พยากรณ์ในขั้นที่ 1 พร้อมทั้งหาค่า gain ของ Kalman filter ที่จะนำมาปรับค่าประมาณด้วย โดยทั้ง 2 ขั้นตอนก็จะทำซ้ำหลายๆครั้ง และจะสมมุติว่าสัญญาณรบกวนจะมีการแจกแจงเป็นแบบ Gaussian โดยกรอบแนวคิดในการนำการบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS และ IMU ไปใช้ในการควบคุมเรือหรือประยุกต์ใช้กับระบบนำร่องอัตโนมัติสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพดังในรูปที่ 3.3

3.2.1 เทคนิค Kalman Filter

ตัวกรองคาลมานเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกตั้งชื่อตาม รูดอล์ฟ อี คาลมาน (Rudolf E. Kalman) มีจุดประสงค์เพื่อใช้ในการประมาณค่าจากการวัดที่ถูกสังเกตในการประมาณค่าจากช่วงระยะเวลาที่มีสัญญาณรบกวนในรูปแบบสุ่ม และมีค่าความไม่แม่นยำต่างๆ และค่าที่ผลิตได้จากการกรองแบบคาลมานจะมีความใกล้เคียงค่าที่แท้จริงมากกว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าคำนวณที่เกี่ยวข้องต่างๆของการวัด ตัวกรองคาลมานมีการนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น การลดสัญญาณรบกวน และอื่นๆ เทคนิคการกรองสัญญาณแบบคาลมานสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพเชื่อมโยงดังในรูปที่ 3.4 เทคนิค Kalman Filter จะประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ การคาดการณ์ และการแก้ไขค่า



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman filter ที่เวลา t ใดๆ

3.2.1.1 การคาดการณ์ (Prediction)

การคาดการณ์นั้นเป็นขั้นตอนแรกของเทคนิค Kalman Filter ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ (predicted state) หรือ ที่เรียกว่า ตัวแปรสถานะเบื้องต้น (priori state) ถูกคำนวณโดยไม่ได้สนใจสัญญาณรบกวนทางพลศาสตร์ และ แก๊สมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบ

$$\dot{\underline{x}}^-(t) = F \cdot \underline{x}^-(t) \quad (3.1)$$

เวกเตอร์ตัวแปรสถานะที่เวลา t สามารถถูกแสดงโดยอนุกรม Taylor เมื่อเทียบกับตัวแปรสถานะ $\dot{\underline{x}}^-(t_0)$

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

โดยใช้สมการ (3.1) นี้ ดังนั้นสมการด้านบนสามารถเขียนได้เป็น

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

ดังนั้นผลลัพธ์ $\underline{x}^-(t)$ ของสมการเชิงอนุพันธ์ หรืออีกนัยหนึ่ง ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ที่แท้จริงเป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของตัวแปรสถานะเริ่มต้นที่ $\underline{x}^-(t_0)$

$$\underline{x}^-(t) = \Phi_0^t \cdot \underline{x}^-(t_0) \quad (3.2)$$

Φ_0^t ถูกเรียกว่า เมตริกซ์การถ่ายโอนตัวแปรสถานะ ซึ่งแปลงตัวแปรสถานะเริ่มต้นใดๆ $\underline{x}(t_0)$ ไปเป็นตัวแปรสถานะที่สอดคล้องกัน $\underline{x}(t)$ ที่เวลา t

จากสมการ (3.1) และ (3.2)

$$\dot{\underline{x}}^-(t) = F \cdot \underline{x}^-(t) = F \cdot \Phi_0^t \cdot \underline{x}^-(t_0) \quad (3.3)$$

และโดยการใช้สมการ (3.2) อีกครั้ง ก็จะได้

$$\dot{\underline{x}}^-(t) = \frac{d}{dt} \underline{x}^-(t) = \frac{d}{dt} [\Phi_0^t \cdot \underline{x}^-(t_0)] = \left[\frac{d}{dt} \Phi_0^t \right] \cdot \underline{x}^-(t_0) \quad (3.4)$$

โดยเปรียบเทียบ (3.3) และ (3.4) จะได้

$$\frac{d}{dt} \Phi_0^t = F \cdot \Phi_0^t \neq 0 \quad (3.5)$$

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

และเมตริกซ์ความแปรปรวน (covariance matrix) $P^-(t_i)$ ของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์จะได้ตามกฎของค่าการแพร่กระจายของค่าความผิดพลาด

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

ในรูปแบบทั่วไปแล้ว เมตริกซ์ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน Q เป็นฟังก์ชันของเวลา ดังนั้นเมตริกซ์ความแปรปรวนจะเป็นดังนี้

$$P^-(t_i) = \Phi_{t_{i-1}}^{t_i} \cdot P(t_{i-1}) \left(\Phi_{t_{i-1}}^{t_i} \right)^T + \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q(t) dt \quad (3.6)$$

3.2.1.2 การแก้ไขค่า (Correction)

ในขั้นตอนการแก้ไขค่า เวกเตอร์ตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์ $\underline{x}^-(t_i)$ ถูกปรับปรุงด้วยค่าสังเกตการณ์ ที่วัดได้ในช่วงเวลา t_i ดังนั้นตัวแปรสถานะหลังการแก้ไข (posteriori state) มีรูปแบบเป็น

$$\underline{x}^+(t_i) = \underline{x}^-(t_i)$$

โดยใช้เมตริกซ์ความแปรปรวน

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

เหมือนที่กล่าวไปแล้ว Kalman filter เป็นตัวกรองสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด นี่หมายความว่าความแปรปรวนของตัวแปรสถานะในเมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสถานะ P^+ จะมีค่าน้อยที่สุด ขณะที่ P^- ได้คำนวณมาจากขั้นตอนจากการคาดการณ์ จะได้ ΔP ที่เป็นค่าน้อยที่สุด

$$\Delta P(t_i) = E \left[\Delta \underline{x}(t_i) \Delta(t_i)^T \right]$$

ซึ่งเงื่อนไขนี้จะสอดคล้องกับ

$$\begin{aligned} \Delta \underline{x}(t_i) &= P^- H^T \left(H P^- H^T + R(t_i) \right)^{-1} \cdot \left(\underline{l}(t_i) - H \underline{x}^-(t_i) \right) \\ \Rightarrow \quad \Delta \underline{x}(t_i) &= K(t_i) \cdot \left(\underline{l}(t_i) - \underline{l}^-(t_i) \right) \end{aligned}$$

และ

$$K(t) = P^- H^T \left(H P^- H^T + R(t_i) \right)^{-1} \quad (3.7)$$

K ถูกเรียกเป็นเมตริกซ์อัตราขยาย (Gain matrix) ค่าความแตกต่างของ $\underline{l}(t_i) - \underline{l}^-(t_i)$ นั้นถูกเรียกว่าค่าที่เหลือจากการวัด (measurement residual) ซึ่งมันแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการวัดที่ได้จากการคาดการณ์ $\underline{l}^-(t_i) = H \underline{x}^-(t_i)$ และการวัดที่ได้จริง $\underline{l}(t_i)$

สุดท้ายตัวแปรสถานะที่ถูกแก้ไข จะได้จากการคำนวณดังนี้

$$\underline{x}^+(t_i) = \underline{x}^-(t_i) + K(t_i) \cdot \left(\underline{l}(t_i) - \underline{l}^-(t_i) \right) \quad (3.8)$$

ในสมการนี้ตัวแปรสถานะที่ถูกประมาณค่าและค่าที่วัดได้นั้นจะถูกแบ่งความสำคัญตามน้ำหนักแล้วนำมารวมกันเพื่อคำนวณตัวแปรสถานะที่ถูกแก้ไขค่า ซึ่งหมายความว่า ถ้าค่าความแปรปรวนจากการวัดนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความแปรปรวนของตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์ น้ำหนักของการวัดจะสูงกว่าและตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์จะต่ำ และดังนั้นความไม่แน่นอนจะสามารถลดลงได้

เมตริกซ์ความแปรปรวนของตัวแปรสถานะหลังการแก้ไข (posteriori) จะได้จากกฎของค่าแพร่กระจายของค่าความผิดพลาดดังนี้

$$\begin{aligned} P^+(t_i) &= P^-(t_i) - K(t_i) H P^-(t_i) \\ &= (I - K(t_i) H) P^-(t_i) \end{aligned} \quad (3.9)$$

3.2.2 เทคนิค Extended Kalman Filter

ในหัวข้อที่แล้วเทคนิค Kalman Filter นั้นจะใช้กับระบบเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแบบจำลองทางพลศาสตร์หรือการสังเกตการณ์จะเป็นแบบไม่เชิงเส้น

หนึ่งในเทคนิคของ kalman filter สำหรับปัญหาที่ไม่เชิงเส้น นั้นจะถูกเรียกว่า Extended Kalman Filter ซึ่งถูกค้นพบโดย Stanley F. Schmidt หลังจากที่ Kalman ได้นำเสนอผลลัพธ์ของเขาที่ได้จาก Kalman filtering หลังจากนั้น Schmidt ได้เริ่มนำเทคนิคนี้ไปประยุกต์ใช้สำหรับปัญหาการนำทางอวกาศในทันที สำหรับโครงการ Apollo เพื่อส่งมนุษย์ไปทำการสำรวจโลกพระจันทร์ และ เขาได้คิดค้น Extended Kalman Filter ในเทคนิค Extended Kalman filter นี้จะประมาณค่าแบบเชิงเส้นรอบๆตัวแปรสถานะปัจจุบัน ดังนั้นระบบจะจำเป็นต้องสามารถถูกแสดงด้วยฟังก์ชันเชิงอนุพันธ์แบบต่อเนื่องได้

ข้อเสียหนึ่งของเทคนิคนี้ของ Kalman filter สำหรับระบบไม่เชิงเส้น มันต้องใช้การคำนวณที่ใช้เวลานาน การดำเนินการสำหรับระบบเชิงเส้น จะสามารถทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยการคำนวณเมตริกซ์ทางพลศาสตร์ (F) ไว้ล่วงหน้า เมตริกซ์การถ่ายโอนตัวแปรสถานะ (Φ) และเมตริกซ์การสังเกตการณ์ (H) แต่สำหรับระบบไม่เชิงเส้น เมตริกซ์เหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะและจะมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆช่วงเวลาและจะไม่สามารถคำนวณไว้ล่วงหน้าก่อนได้

3.2.2.1 การคาดการณ์ (Prediction)

ในกรณีที่ระบบไม่เชิงเส้น เมตริกซ์ทางพลศาสตร์ (F) จะเป็นฟังก์ชันของตัวแปรสถานะซึ่งจะถูกประมาณค่า ดังนั้นตัวแปรสถานะจากการคาดการณ์จะถูกคำนวณโดยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้านล่างนี้

$$\dot{\underline{x}}^-(t) = f(\underline{x}^-(t)) \quad (3.10)$$

โดยแทนสมการนี้ด้วยอนุกรม Taylor เมื่อเทียบกับ $\underline{x}$ แล้วแทนค่าตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์ $\underline{\dot{x}}^-(t_i)$ และสมมติว่าพจน์ที่มีอันดับสูงนั้นสามารถตัดทิ้งได้ เมตริกซ์ทางพลศาสตร์ที่เวลา t_i หรือ $F(t_i)$ จะสามารถถูกคำนวณโดย

$$F(t_i) = \frac{\partial f(x)}{\partial \underline{x}} \Big|_{\underline{x} = \underline{x}^-(t_i)} \quad (3.11)$$

และขั้นตอนอื่นๆของการคาดการณ์จะสามารถถูกคำนวณได้ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2.1.1 สมการที่ (3.5) และ (3.6) แต่ควรจะสังเกตว่า เมตริกซ์ที่ถูกใช้ไม่เป็นค่าคงที่เหมือนในกรณีระบบแบบเชิงเส้น แต่จะขึ้นอยู่กับช่วงเวลา

$$\frac{d}{dt} \Phi_{ti-1}^{ti} = F(t_i) \cdot \Phi_{ti-1}^{ti}$$

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

3.2.2.2 การแก้ไขค่า (Correction)

เหมือนกับสมการเชิงอนุพันธ์ในขั้นตอนจากการคาดการณ์ สมการการสังเกตการณ์ที่ไม่เชิงเส้นที่สอดคล้องกัน จะถูกทำให้เป็นเชิงเส้นโดยใช้อนุกรม Taylor รอบๆตัวแปรสถานะที่ได้จากการคาดการณ์ $\underline{\dot{x}}^-(t_i)$ และพจน์อันดับสูงจะถูกตัดทิ้งไป

ดังนั้น เมตริกซ์การสังเกตการณ์ที่ถูกประมาณ จะได้เป็น

$$H(t_i) = \frac{\partial h(x)}{\partial \underline{x}} \Big|_{\underline{x} = \underline{x}^-(t_i)} \quad (3.12)$$

ในกรณีนี้การวัดจากการคาดการณ์ $\underline{L}^-(t_i)$ สำหรับการคำนวณค่าที่เหลือจากการวัด $(\underline{L}(t_i) - \underline{L}^-(t_i))$ เป็น

$$\underline{L}^-(t_i) = h(\underline{x}^-(t_i))$$

นอกจากนี้ เราสามารถใช้สูตรเดียวกันอีกครั้งในการคำนวณตัวแปรสถานะจากการแก้ไขค่าและเมตริกซ์ความแปรปรวนได้เหมือนในกรณีแบบเชิงเส้น แต่เมตริกซ์เหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของเวลา

$$\underline{x}^+(t_i) = \underline{x}^-(t_i) + K(\underline{L}(t_i) - \underline{L}^-(t_i)) \quad (3.13)$$

และ

$$P^+(t_i) = (I - K(t_i)H(t_i))P^-(t_i) \quad (3.14)$$

กับ
$$K(t_i) = P^- H(t_i)^T \left(H(t_i) P^- H(t_i)^T + R(t_i) \right)^{-1} \quad (3.15)$$

3.3 การประยุกต์ใช้งาน Extended Kalman Filter ในการบูรณาการข้อมูลจาก GPS และ IMU

ในส่วนนี้แสดงการนำ EKF ไปประยุกต์ใช้กับระบบนำร่องที่ใช้ค่าความเฉื่อยมาช่วย โดยใช้สัญญาณจาก GPS กับข้อมูลจาก IMU แบบจำลองการวัดจาก Gyro จะสามารถอธิบายได้ด้วย

$$\tilde{\omega}_{B/I}^B = (I_{3 \times 3} + K_g) \omega_{B/I}^B + \beta_g + \eta_{gv} \quad (3.16)$$

$$\dot{\beta}_g = \eta_{gu} \quad (3.17)$$

โดยที่ β_g เป็นค่า gyro bias และ K_g เป็นเมตริกซ์ทแยงมุมของตัวประกอบอัตราส่วนขยายของ gyro และ η_{gv} และ η_{gu} เป็นกระบวนการของสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian white-noise ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ที่มีค่าความหนาแน่นทาง spectral เป็น $\sigma_{gv}^2 I_{3 \times 3}$ และ $\sigma_{gu}^2 I_{3 \times 3}$ ตามลำดับ แบบจำลองการวัดความเร่งจะแสดงได้เป็น

$$\tilde{a}^B = (I_{3 \times 3} + K_a) a^B + \beta_a + \eta_{av} \quad (3.18)$$

$$\dot{\beta}_a = \eta_{au} \quad (3.19)$$

ซึ่ง β_a เป็นค่า accelerometer bias และ K_a เป็นเมตริกซ์ทแยงมุมของตัวประกอบอัตราส่วนขยายของความเร่ง และ η_{av} และ η_{au} เป็นกระบวนการของสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian white-noise ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ที่มีความหนาแน่นทาง spectral เป็น $\sigma_{av}^2 I_{3 \times 3}$ และ $\sigma_{au}^2 I_{3 \times 3}$ ตามลำดับ ตัวประกอบอัตราส่วนขยายนั้นถือว่ามีความเล็กพอสำหรับการประมาณค่า $(I + K)^{-1} \approx (I - K)$ ที่จะถูกต้องและใช้ได้กับทั้งสมการของ gyros และ accelerometers และ การจำลองที่ไม่ต่อเนื่องสำหรับการวัดค่าจาก gyro สามารถใช้แบบจำลองเดียวกันกับสำหรับการวัดค่าความเร่งจาก accelerometers ค่าที่ประมาณนั้นสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.20a)-(3.20n) โดยที่สมมุติให้ค่า ω_e เป็นค่าคงที่

$$\dot{\hat{q}} = \frac{1}{2} \Xi(\hat{q}) \hat{\omega}_{B/N}^B \quad (3.20a)$$

$$\hat{\omega}_{B/N}^B = (I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) \left(\tilde{\omega}_{B/I}^B - \hat{\beta}_g \right) - A_N^B(\hat{q}) \hat{\omega}_{N/I}^N \quad (3.20b)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = \frac{\hat{v}_n}{\hat{R}_{\hat{\phi}} + \hat{h}} \quad (3.20c)$$

$$\hat{\lambda} \frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}\hat{\lambda} + \hat{h}) \cos \hat{\phi}} \quad (3.20d)$$

$$\dot{\hat{h}} = \hat{v}_D \quad (3.20e)$$

$$\dot{\hat{v}}_N = \left[\frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}\hat{\lambda} + \hat{h}) \cos \hat{\phi}} + 2\omega_e \right] \hat{v}_E \sin \hat{\phi} + \frac{\hat{v}_N \hat{v}_D}{\hat{R}\hat{\phi} + \hat{h}} + \hat{a}_N \quad (3.20f)$$

$$\dot{\hat{v}}_E = \left[\frac{\hat{v}_E}{(\hat{R}\hat{\lambda} + \hat{h}) \cos \hat{\phi}} + 2\omega_e \right] \hat{v}_N \sin \hat{\phi} + \frac{\hat{v}_E \hat{v}_D}{\hat{R}\hat{\lambda} + \hat{h}} + 2\omega_e \hat{v}_D \cos \hat{\phi} + \hat{a}_E \quad (3.20g)$$

$$\dot{\hat{v}}_D = -\frac{\hat{v}_E^2}{\hat{R}\hat{\lambda} + \hat{h}} - \frac{\hat{v}_N^2}{\hat{R}\hat{\phi} + \hat{h}} - 2\omega_e \hat{v}_E \cos \hat{\phi} + \hat{a}_E \quad (3.20h)$$

$$\hat{a}^N = \begin{bmatrix} \hat{a}_N \\ \hat{a}_E \\ \hat{a}_D \end{bmatrix} = A_B^N(\hat{q}) \hat{a}^B \quad (3.20i)$$

$$\hat{a}^B = (I_{3 \times 3} - \hat{K}_a) (\tilde{a}^B - \hat{\beta}_a) \quad (3.20j)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_g = 0 \quad (3.20k)$$

$$\dot{\hat{\beta}}_a = 0 \quad (3.20l)$$

$$\dot{\hat{k}}_g = 0 \quad (3.20m)$$

$$\dot{\hat{k}}_a = 0 \quad (3.20n)$$

โดยที่ $\hat{k}_g$ และ $\hat{k}_a$ เป็นสมาชิกของเมตริกซ์แยงมม $\hat{K}_g$ และ $\hat{K}_a$ ตามลำดับ ดังนั้น $\hat{\omega}_{N/I, \hat{R}\hat{\phi}, \hat{R}\hat{\lambda}}^N$ และ $\hat{g}$ จะถูกประมาณค่าที่ค่าปัจจุบันโดยใช้ค่าเหล่านี้ในการช่วยคำนวณ

$$\hat{R}\hat{\phi} = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \hat{\phi})^{3/2}} \quad (3.21a)$$

$$\hat{R}_\lambda = \frac{a}{\left(1 - e^2 \sin^2 \hat{\phi}\right)^{1/2}} \quad (3.21b)$$

$$\begin{aligned} \hat{g} = & 9.780327 \left(1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 \hat{\phi} - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2 2\hat{\phi} \right) \\ & - \left(3.0877 \times 10^{-6} - 4.4 \times 10^{-9} \sin^2 \hat{\phi} \right) \hat{h} + 7.2 \times 10^{-14} \hat{h}^2 m/sec^2 \end{aligned} \quad (3.21c)$$

และ

$$\hat{\omega}_{N/I}^N = \omega_e \begin{bmatrix} \cos \hat{\phi} \\ 0 \\ -\sin \hat{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\hat{v}_E}{\hat{R}_\lambda + h} \\ -\frac{\hat{v}_N}{\hat{R}_\phi + \hat{h}} \\ -\frac{\hat{v}_E \tan \hat{\phi}}{\hat{R}_\lambda + \hat{h}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

เมตริกซ์การหันเห (Attitude Matrix) หรือ $A_B^N(\hat{q})$ จะถูกคำนวณโดยใช้สมการ (A173) สังเกตว่าเมตริกซ์การหันเห Attitude นั้นจะเชื่อมโยงเข้ากับตำแหน่งดังแสดงในสมการ (3.20i) ซึ่งจะช่วยให้ช่วยในการประมาณค่าองค์การหันเหจำตำแหน่งที่วัดได้ ถ้ามาพิจารณาสมการของค่าความผิดพลาดของการหันเห ซึ่งใช้ในการคำนวณ EKF covariance propagation ค่าจลนศาสตร์ของความผิดพลาดในแบบจำลองเชิงเส้นนั้นคำนวณได้จาก (3.23a)

$$\delta \dot{\alpha} = - \left[\hat{\omega}_{B/I}^B \times \right] \delta \alpha + \delta \omega_{B/I}^B - A_N^B(\hat{q}) \delta \omega_{N/I}^N \quad (3.23a)$$

$$\delta \dot{q}_4 = 0 \quad (3.23b)$$

โดยที่ $\delta \omega_{B/I}^B = \omega_{B/I}^B - \hat{\omega}_{B/I}^B$ และ $\delta \omega_{N/I}^N = \omega_{N/I}^N - \hat{\omega}_{N/I}^N$ ค่าความผิดพลาด $\delta \omega_{B/I}^B$ ที่ประมาณโดยอันดับที่หนึ่ง สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\delta \omega_{B/I}^B = - \left[(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) \Delta \beta_g + (\tilde{\Omega}_{B/I}^B - \hat{B}_g) \Delta k_g + (I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) \eta_{gv} \right] \quad (3.24)$$

ซึ่ง $\Delta \beta_g = \beta_g - \hat{\beta}_g, \Delta k_g = k_g - \hat{k}_g, \tilde{\Omega}_{B/I}^B$ เป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุมขององค์ประกอบ $\tilde{\omega}_{B/I}^B$ และ $\hat{B}_g$ เป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุมขององค์ประกอบ $\hat{\beta}_g$ ค่าความผิดพลาดของ $\delta \omega_{B/I}^B$ สามารถถูกคำนวณได้โดยใช้การกระจายอนุกรม Taylor อันดับที่หนึ่ง ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
\delta\dot{\alpha} = & - \left[(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) (\tilde{\omega}_{B/I}^B - \hat{\beta}_g) \times \right] \delta\alpha - (I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) \Delta\beta_g - (\tilde{\Omega}_{B/I}^B - \hat{B}_g) \Delta k_g \\
& - \left(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g \right) \eta_{gv} - A_N^B(\hat{q}) \frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial p} \bigg|_{\hat{p}, \hat{v}^N} \Delta p - A_N^B(\hat{q}) \frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial v^N} \bigg|_{\hat{p}} \Delta v^N
\end{aligned} \quad (3.25)$$

โดยที่ $p \equiv [\phi \quad \lambda \quad h]^T$, $\Delta p = p - \hat{p}$ และ $\Delta v^N = v^N - \hat{v}^N$ เมื่อ $v^N \equiv [v_N \quad v_E \quad v_D]^T$ และ $\hat{p}$ และ $\hat{v}^N$ แสดงถึงค่าที่ถูกต้องประมาณได้ โดยที่ค่าอนุพันธ์ในสมการด้านบนแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial p} = \begin{bmatrix} -\omega_e \sin \phi - \frac{v_E}{(R\lambda + h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} & 0 & -\frac{v_E}{(R\lambda + h)^2} \\ \frac{v_N}{(R\phi + h)^2} \frac{\partial R\phi}{\partial \phi} & 0 & \frac{v_N}{(R\lambda + h)^2} \\ -\omega_e \cos \phi - \frac{v_E \sec^2 \phi}{R\lambda + h} + \frac{v_E \tan \phi}{(R\lambda + h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} & 0 & \frac{v_E \tan \phi}{(R\lambda + h)^2} \end{bmatrix} \quad (3.26a)$$

$$\frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial v^N} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R\lambda + h} & 0 \\ -\frac{1}{R\lambda + h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{\tan \phi}{R\lambda + h} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.26b)$$

เมื่อ

$$\frac{\partial R}{\partial \phi} = \frac{ae^2 \sin \phi \cos \phi}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \quad (3.27a)$$

$$\frac{\partial R}{\partial \phi} = \frac{3a(1 - e^2)e^2 \sin^2 \phi \cos \phi}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{5/2}} \quad (3.28b)$$

สมการค่าความผิดพลาดสำหรับตัวแปรสถานะที่เลื้อยสามารถหาได้จากการใช้วิธีที่คล้ายกันกับเทคนิคที่ใช้เพื่อ
สมการค่าความผิดพลาดขององศาการหันเห (Attitude)

ตัวแปรสถานะ, เวกเตอร์ความผิดพลาดของตัวแปรสถานะ, เวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนในกระบวนการ และ ความแปรปรวน (covariance) ที่ใช้ใน EKF ถูกให้นิยามเป็นดังนี้

$$x \equiv \begin{bmatrix} q \\ p \\ v^N \\ \beta_g \\ \beta_a \\ k_g \\ k_a \end{bmatrix}, \quad \Delta x \equiv \begin{bmatrix} \delta\alpha \\ \Delta p \\ \Delta v^N \\ \Delta\beta_g \\ \Delta\beta_a \\ \Delta k_g \\ \Delta k_a \end{bmatrix}, \quad w \equiv \begin{bmatrix} \eta_{gv} \\ \eta_{gu} \\ \eta_{av} \\ \eta_{au} \end{bmatrix} \quad (3.29a)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_{gv}^2 I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \sigma_{gu}^2 I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \sigma_{av}^2 I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & \sigma_{au}^2 I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.29b)$$

พลศาสตร์ของค่าความผิดพลาดที่ถูกใช้ใน สมการการแพร่กระจาย (propagation) ในเทคนิค EKF จะได้

$$\Delta \dot{x} = F \Delta x + G w \quad (3.30)$$

[illegible]

และ $G \equiv \begin{bmatrix} -(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -A_B^N(\hat{q})(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3.31b)$

เมื่อ $F_{11} = -\left[(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g) (\tilde{\omega}_{B/I}^B - \hat{\beta}_g) \times \right], \quad F_{12} = -A_N^B(\hat{q}) \frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial p} \bigg|_{\hat{p}, \hat{v}^N} \quad (3.32a)$

$F_{13} = -A_N^B(\hat{q}) \frac{\partial \omega_{N/I}^N}{\partial v^N} \bigg|_{\hat{p}}, \quad F_{14} = -(I_{3 \times 3} - \hat{K}_g), \quad F_{16} = -(\tilde{\Omega}_{B/I}^B - \hat{B}_g) \quad (3.32b)$

$F_{22} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial \dot{p}} \bigg|_{\hat{p}, \hat{v}^N}, \quad F_{23} = \frac{\partial \dot{p}}{\partial v^N} \bigg|_{\hat{p}} \quad (3.32c)$

$F_{31} = -A_B^N(\hat{q}) [\hat{a}^B \times], \quad F_{32} = \frac{\partial \dot{v}^N}{\partial p} \bigg|_{\hat{p}, \hat{v}^N} \quad (3.32d)$

$F_{35} = -A_B^N(\hat{q})(I_{3 \times 3} - \hat{K}_a), F_{37} = -A_B^N(\hat{q})(\tilde{A}^B - \hat{B}_a) \quad (3.32e)$

ซึ่ง $\tilde{A}^B$ เป็นเมตริกซ์ในแนวทแยงมุมขององค์ประกอบจาก $\tilde{a}^B$ และ $\hat{B}_a$ เป็นเมตริกซ์ทแยงมุมขององค์ประกอบจาก $\hat{\beta}_a$ อนุพันธ์ของตำแหน่งนั้นสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial \dot{p}}{\partial p} = \begin{bmatrix} -\frac{v_N}{(R\phi+h)^2} \frac{\partial R\phi}{\partial \phi} & 0 & -\frac{v_N}{(R\phi+h)^2} \\ -\frac{v_E \sec \phi}{(R\lambda+h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} + \frac{v_E \sec \phi \tan \phi}{R\lambda+h} & 0 & -\frac{v_E \sec \phi}{(R\lambda+h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33a)$$

$$\frac{\partial \dot{p}}{\partial v^N} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R\phi+h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sec \phi}{R\lambda+h} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.33b)$$

และอนุพันธ์ของความเร็วจะได้ดังนี้

$$\frac{\partial \dot{v}^N}{\partial p} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ Y_{21} & 0 & Y_{23} \\ Y_{31} & 0 & Y_{33} \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \dot{v}^N}{\partial v^N} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1\partial} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

โดย $Y_{11} = -\frac{v_E^2 \sec^2 \phi}{R\lambda+h} + \frac{v_E^2 \tan \phi}{(R\lambda+h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} - 2\omega^{v_E \cos \phi} - \frac{v_N v_D}{(R\phi+h)\partial} \frac{\partial R\phi}{\partial \phi}$ (3.35a)

$$Y_{13} = \frac{v_E^2 \tan \phi}{(R\lambda+h)^2} - \frac{v_N v_D}{(R\phi+h)^2} \quad (3.35b)$$

$$Y_{21} = \frac{v_E v_N \sec^2 \phi}{R\lambda+h} - \frac{v_E v_N \tan \phi}{(R\lambda+h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} - 2\omega_{e^{v_E \cos \phi}} - \frac{v_E v_N}{(R\lambda+h)^2} \frac{\partial R\lambda}{\partial \phi} - 2\omega_{e^v \partial \sin \phi} \quad (3.35c)$$

$$Y_{23} = -v_E \left[\frac{v_N \tan \phi + v_D}{(R_\lambda + h)^2} \right] \quad (3.35d)$$

$$Y_{31} = \frac{v_E^2}{(R_\lambda + h)^2} \frac{\partial R_\lambda}{\partial \phi} + \frac{v_N^2}{(R_\lambda + h)^2} \frac{\partial R_\phi}{\partial \phi} - 2\omega_e v_D \sin \phi + \frac{\partial g}{\partial h} \quad (3.35e)$$

$$Y_{33} = \frac{v_E^2}{(R_\lambda + h)^2} + \frac{v_N^2}{(R_\lambda + h)^2} + \frac{\partial g}{\partial h} \quad (3.35f)$$

$$\text{และ} \quad Z_{11} = \frac{v_D}{R_\phi + h}, \quad Z_{12} = -\frac{2v_E \tan \phi}{R_\lambda + h} + 2\omega_e \sin \phi, \quad Z_{13} = \frac{v_N}{R_\phi + h} \quad (3.36a)$$

$$Z_{21} = \frac{v_E \tan \phi}{R_\lambda + h} + 2\omega_e \sin \phi, \quad Z_{22} = \frac{v_D + v_N \tan \phi}{R_\lambda + h}, \quad Z_{23} = \frac{v_E}{R_\lambda + h} + 2\omega_e \cos \phi \quad (3.36b)$$

$$Z_{31} = \frac{2v_N}{R_\phi + h}, \quad Z_{32} = -\frac{2v_E}{R_\lambda + h} - 2\omega_e \cos \phi \quad (3.36c)$$

$$\text{และ} \quad \frac{\partial g}{\partial \phi} = 9.780327 \left[1.06048 \times 10^{-2} - 4.64 \times 10^{-5} (\sin \phi \cos^3 \phi - \sin^3 \phi \cos \phi) \right] + 8.8 \times 10^{-9} h \sin \phi \cos \phi \quad (3.37a)$$

$$\frac{\partial g}{\partial h} = -3.0877 \times 10^{-6} + 4.4 \times 10^{-9} \sin^2 \phi + 1.44 \times 10^{-13} h \quad (3.37b)$$

ขั้นตอนวิธีการประมาณค่าด้วย GPS/IMU ได้ถูกสรุปไว้ในตาราง 3.4 โดยมีข้อสังเกตว่า $f_p(\hat{p}, \hat{v}^N)$ จะอธิบายด้วยสมการ (3.20c)-(3.20e) และ $f_v(\hat{p}, \hat{v}^N)$ จะอธิบายด้วยสมการ (3.20f)-(3.20h) และ ค่าตำแหน่งที่วัดได้นั้นจะเป็นกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนดังสมการด้านล่างนี้

$$\tilde{p}_k = p_k + v_k \quad (3.38)$$

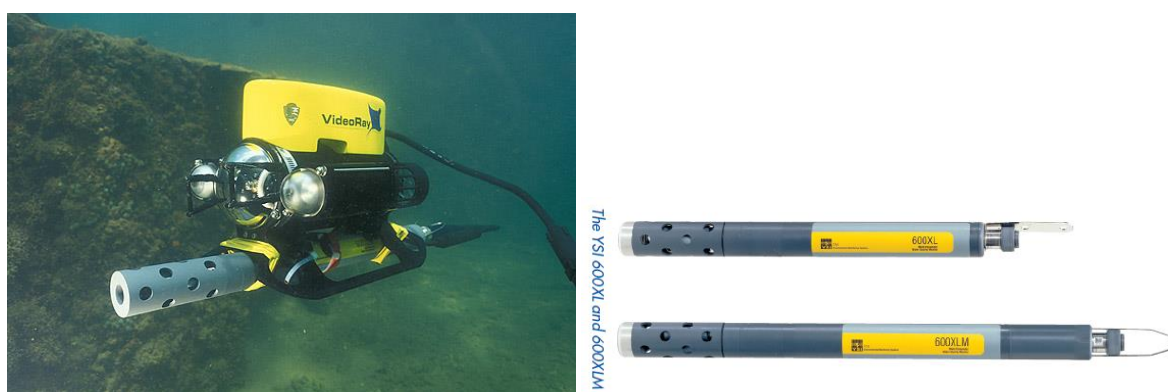
โดยที่ v_k เป็นกระบวนการของสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian white-noise ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ที่มีความแปรปรวน (covariance) ในรูปเมตริกซ์ R_k

ตารางที่ 3.4 การประมาณค่าด้วย Extended Kalman Filter ที่บูรณาการสัญญาณ GPS และ IMU เข้าด้วยกัน

Initialize	$\hat{x}(t_0) = \hat{x}_0$ $P(t_0) = P_0$
Gain	$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1}$ $H_k = [0_{3 \times 3} \quad I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}]$
Update	$P_k^+ = [I - K_k H_k] P_k^-$ $\Delta \hat{x}_k^+ = K_k [\tilde{p}_k - \tilde{p}_k^-]$ $\hat{q}_k^+ = \hat{q}_k^- + \frac{1}{2} \Xi(\hat{q}_k^-) \delta \hat{\alpha}_k^+$ $\hat{p}_k^+ = \hat{p}_k^- + \Delta \hat{p}_k^+$ $\hat{v}_k^{N+} = \hat{v}_k^{N-} + \Delta \hat{v}_k^{N+}$ $\hat{\beta}_{gk}^+ = \hat{\beta}_{gk}^- + \Delta \hat{\beta}_{gk}^+$ $\hat{\beta}_{ak}^+ = \hat{\beta}_{ak}^- + \Delta \hat{\beta}_{ak}^+$ $\hat{k}_{gk}^+ = \hat{k}_{gk}^- + \Delta \hat{k}_{gk}^+$ $\hat{k}_{ak}^+ = \hat{k}_{ak}^- + \Delta \hat{k}_{ak}^+$
Propagation	$\hat{\omega}_{B/N}^B = (I_{3 \times 3} - K_g) (\hat{\omega}_{B/I}^B - \hat{\beta}_g) - A_N^B(\hat{q}) \omega_{N/I}^N$ $\hat{q} = \frac{1}{2} \Xi(\hat{q}) \hat{\omega}_{B/N}^B$ $\hat{a}^B = (I_{3 \times 3} - \hat{K}_a) (\tilde{a}^B - \hat{\beta}_a)$ $\dot{\hat{p}} = f_p(\hat{p}, \hat{v}^N)$ $\dot{\hat{v}}^N = f_v(\hat{p}, \hat{v}^N) + \hat{a}^N$ $\dot{P} = FP + PF^T + GQG^T$

3.4) การประยุกต์ใช้เครื่องมือวัดคุณภาพน้ำกับหุ่นยนต์ประเภทต่างๆ

บริษัท YSI มีเทคโนโลยีการวัดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำได้โดยไม่ต้องขึ้นอยู่กับการไหล หัววัดของ YSI สามารถวัดค่าพารามิเตอร์ DO ได้แม้ว่าผู้ใช้อาจจะไม่ได้แกว่งหัววัด อย่างไรก็ตามบริษัท YSI แนะนำว่าการแกว่งหัววัดก่อนอ่านค่าจะช่วยให้หัววัดสามารถตอบสนองต่อค่าพารามิเตอร์ในสิ่งแวดล้อมได้เร็วขึ้นส่งผลถึงความแม่นยำในการวัดค่า DO เทคโนโลยีหัววัดของ YSI มีความเหมาะสมกับการติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์เรือหรือหุ่นยนต์ดำน้ำเนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องแกว่งหัววัดก่อนวัดค่า เหตุผลอีกประการหนึ่งที่สนับสนุนการติดตั้งหัววัด DO บนตัวหุ่นยนต์คือในการวัดค่าในแต่ละจุดนั้นหุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่จากจุดปัจจุบันไปสู่จุดเป้าหมายซึ่งทำให้หัววัดผ่านการไหลของน้ำอยู่แล้วในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ทำให้ค่าที่วัดมีความเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การติดตั้งหัววัดคุณภาพน้ำของ YSI ที่ติดตั้งไปกับหุ่นยนต์ใต้น้ำ (ซ่าย) และ หัววัดคุณภาพน้ำของ YSI สองรุ่น(ขวา) [<http://www.ysi.com/parametersdetail.php?Dissolved-Oxygen-1>

]

การใช้หัวตรวจวัดคุณภาพน้ำร่วมกับหุ่นยนต์ใต้น้ำมีข้อดีใหม่และสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถเห็นได้จากสองตัวอย่างนี้ ในตัวอย่างแรก นักวิทยาศาสตร์ของ National Park Service, Department of Interior (NPS) ประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้หัววัดคุณภาพน้ำชนิดหลายหัวรุ่น YSI 600XLM Multiparameter head ในการวัดค่าพารามิเตอร์สิ่งแวดล้อมภายในตัวเรือรบ USS Arizona โดยติดหัววัดไว้กับหุ่นยนต์ดำน้ำขนาดเล็กหรือ ROV พารามิเตอร์ที่วัดได้มีดังนี้คือ ค่า pH อุณหภูมิ ค่าความเค็ม ค่าการละลายของออกซิเจน (DO) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ค่า Oxygen reduction potential เป็นต้น และอีกตัวอย่างหนึ่งของการใช้หุ่นยนต์ควบคู่กับหัวอ่านแบบหลายพารามิเตอร์คือหุ่นยนต์ของบริษัท Bluefin Robotics ดังแสดงในรูปที่ 4 มีสมรรถนะสูงสามารถขับเคลื่อนที่ผิวน้ำหรือสามารถดำน้ำได้ลึก 200 เมตรและสามารถขับเคลื่อนสู่จุดหมายได้ด้วยตัวเองโดยไม่ต้องใช้คนบังคับ เมื่อติดตั้งหัววัดพารามิเตอร์สิ่งแวดล้อมเช่น YSI 6560 CT Probe หรือ YSI 6136D Turbidity Probe จะช่วยให้นักวิจัยสามารถทราบถึงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้



รูปที่ 3.6 หุ่นยนต์ใต้น้ำจากบริษัท ที่ได้ติดตั้งหัววัดพารามิเตอร์ทางสิ่งแวดล้อมของ YSI

[<http://www.bluefinrobotics.com/products/bluefin-9/>]

4. ระเบียบวิธีการดำเนินงานวิจัยของโครงการวิจัยที่ 2

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น สาม ส่วนหลักด้วยกัน ดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ GPS และ IMU และ การทดสอบการบูรณาการของข้อมูลโดยใช้เทคนิค Kalman filter เพื่อนำมาใช้ควบคุมระบบนำร่อง
2. การออกแบบและสร้างระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่สามารถปล่อยลงจากเรือ ณ ตำแหน่งหรือพิกัดที่ต้องการ และ ที่ระดับความลึกที่ต้องการ
3. การพัฒนาระบบโทรมาตรเพื่อส่งผ่านข้อมูลคุณภาพน้ำจากเรือมายังคอมพิวเตอร์บนชายฝั่งแบบไร้สาย

โดยในระยะ 3 เดือน แรก จะเป็นช่วงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ GPS และ IMU และ ประยุกต์ใช้เทคนิค Kalman filter เพื่อทำการบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์หลายๆตัวเข้าด้วยกัน และ ในขณะเดียวกัน ก็จะพัฒนาและสร้างระบบที่ 2 และ 3 ไปพร้อมกัน โดยจะทำการออกแบบระบบวัดคุณภาพน้ำที่สามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำเข้าไปในหัว probe วัดคุณภาพน้ำ เมื่อปล่อยลงในน้ำที่ระดับความลึกมากกว่า 1 เมตร นอกจากนั้นก็จะจัดหาและซื้ออุปกรณ์ที่จะใช้กับระบบโทรมาตรไปด้วยในช่วง 6 เดือนต่อมา ในระบบแต่ละส่วนสามารถแยกพัฒนาและทดสอบไปพร้อมๆกันได้ ส่วนในช่วง 3 เดือนสุดท้ายจะนำทั้งสามระบบมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อทดสอบสมรรถนะและประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของเรือไปยังพิกัดที่ระบุและสามารถปล่อยหัว probe วัดคุณภาพน้ำ และ การส่งข้อมูลคุณภาพน้ำกลับมายังคอมพิวเตอร์บนชายฝั่ง โดยระบบรวมทั้งหมดจะต้องมีเสถียรภาพและมีความผิดพลาดน้อย

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัยย่อยที่ 2 ของการศึกษาและพัฒนาเรืออัตโนมัติเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำสามารถแบ่งได้เป็น 4 ระยะใหญ่ๆด้วยกันดังนี้

- **ระยะที่ 1:** 1-3 เดือน :
 - a. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซนเซอร์ GPS และ IMU และ ประยุกต์ใช้เทคนิค Kalman filter เพื่อทำการบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์หลายๆตัวเข้าด้วยกัน
 - b. ออกแบบโครงสร้างและระบบวัดคุณภาพน้ำที่ติดกับเรือ
 - c. สอบถามราคาวัสดุอุปกรณ์ของระบบโทรมาตรและเซนเซอร์
- **ระยะที่ 2:** 3-6 เดือน :
 - a. จัดซื้อวัสดุอุปกรณ์เพื่อนำมาสร้างระบบวัดคุณภาพน้ำ
 - b. เขียนโปรแกรมการบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์หลายๆตัว ด้วยเทคนิค Kalman filter
 - c. ออกแบบติดตั้งระบบการสื่อสารแบบไร้สายและทดสอบและเขียนโปรแกรมการรับส่งข้อมูล
 - d. สร้างระบบจัดเก็บระบบวัดคุณภาพน้ำเข้ากับเรือ
 - e. เขียนรายงานความก้าวหน้า

- **ระยะที่ 3:** 6-9 เดือน :
 - a. นำโปรแกรมการบูรณาการของข้อมูลมาประยุกต์ใช้กับการนำร่องแบบอัตโนมัติและทดสอบประสิทธิภาพ
 - b. นำระบบการสื่อสารแบบไร้สายมาประยุกต์ใช้จริง เพื่อส่งข้อมูลคุณภาพน้ำแบบ real-time
- **ระยะที่ 4:** 10-12 เดือน :
 - a. ทำการทดสอบระบบต่างๆเข้าด้วยกัน และทำการปรับปรุงแก้ไข
 - b. สรุปผลการดำเนินงาน
 - c. เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

5. ผลการวิจัยของโครงการย่อยที่ 2

ผลการวิจัยจะสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆได้ดังนี้

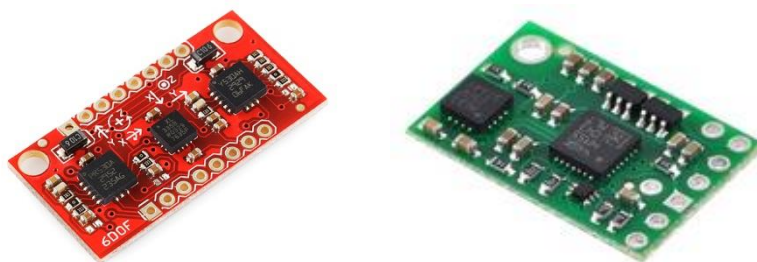
1. เพื่อพัฒนาระบบนำร่องอัตโนมัติของเรืออัตโนมัติ โดยใช้การบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS และ IMU ที่ราคาไม่แพงหลายๆตัวเข้าด้วยกัน
2. เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่ราคาไม่แพงโดยใช้เซนเซอร์ชนิด ISFET เพื่อทดสอบความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำ
3. การพัฒนาระบบตรวจวัดความลึกแหล่งน้ำโดยใช้เซนเซอร์ชนิด Echo Sounder ของ Garmin
4. การพัฒนาระบบส่งถ่ายข้อมูลผ่าน Internet โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Netduino Plus หรือบอร์ด Arduino Ethernet Shield

5.1 เพื่อพัฒนาระบบนำร่องอัตโนมัติของเรืออัตโนมัติ โดยใช้การบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS และ IMU ที่ราคาไม่แพงหลายๆตัวเข้าด้วยกัน

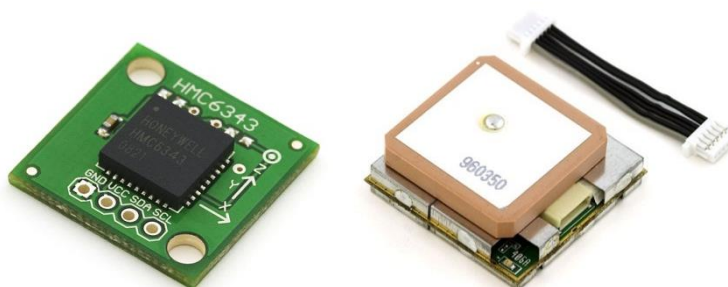
จุดประสงค์ของระบบนำร่องคือการประมาณตำแหน่งที่ดีที่สุดของเรือในทุกช่วงเวลา ดังนั้นเราจึงต้องการข้อมูลของการเคลื่อนที่ของเรือ ณ เวลาต่าง ๆ กัน เช่น ความเร็ว, ทิศทางของหัวเรือ, ความเร่ง และ ตำแหน่งในระนาบบนพื้นผิวโลก

5.1.1 เซนเซอร์ที่ราคาไม่แพงชนิดต่างๆและคุณสมบัติที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งในงานวิจัยนี้ จะมาจากบอร์ด IMU 6DOF Razor โดยที่มีความไว (Sensitivity) และช่วงการตอบสนอง (response range) ของเซนเซอร์วัดความเร่งเป็น 300 mV/g และ $\pm 3g$ ตามลำดับ โดยความถี่ของค่าที่วัดได้จาก IMU 6 DOF Razor [19] จะเป็น 100 Hz หรือ จะมาจากบอร์ด Pololu - MiniIMU-9 DOF Gyro, Accelerometer, and Compass โดยที่มีความไว (Sensitivity) และ ความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต (response range) สำหรับเซนเซอร์วัดความมุมเอียงเป็น $500^\circ/g$ และ 16-bit ตามลำดับ และ สำหรับเซนเซอร์วัดความเร่งเป็น $\pm 8g$ และ 12-bit ตามลำดับ โดยความถี่ของค่าที่วัดได้จาก Pololu - MiniIMU-9 DOF Gyro, Accelerometer, and Compass [20] จะเป็น 100 Hz ส่วนข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ GPS จะมาจากบอร์ด 20 Channel EM-406 A SiRF III Receiver with Antenna [22] โดยที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ภายใน 42 วินาที หลังจากเริ่มเปิดเครื่องเมื่อไม่ได้ใช้งานนานๆ (Cold Start) และรับสัญญาณดาวเทียมได้ภายใน 1 วินาที หลังจากปิดและเปิดเครื่องใหม่โดยทันที (Hot Start) โดยที่มีความแม่นยำในการวัดค่าตำแหน่งหรือพิกัดในระนาบเป็นระยะ 10 เมตร ส่วนข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ จะมาจากบอร์ด Compass Module with Tilt Compensation HMC6343 [21] ซึ่งจะให้ความแม่นยำในการวัดองศาในแต่ละแกนเป็น 2 องศา โดยจะมีค่าแก้ไของศาการเอียงในแนวราบ



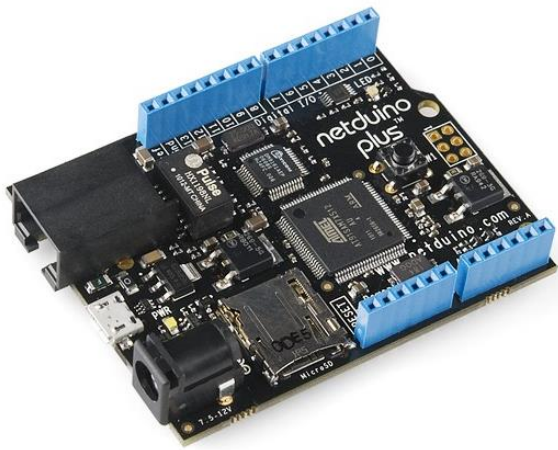
รูปที่ 5.1 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่ง (IMU 6DOF Razor) [19] (ซ้ายมือ), เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งและเข็มทิศ (Pololu - MiniIMU-9 DOF Gyro, Accelerometer, and Compass) [20] (ขวามือ)



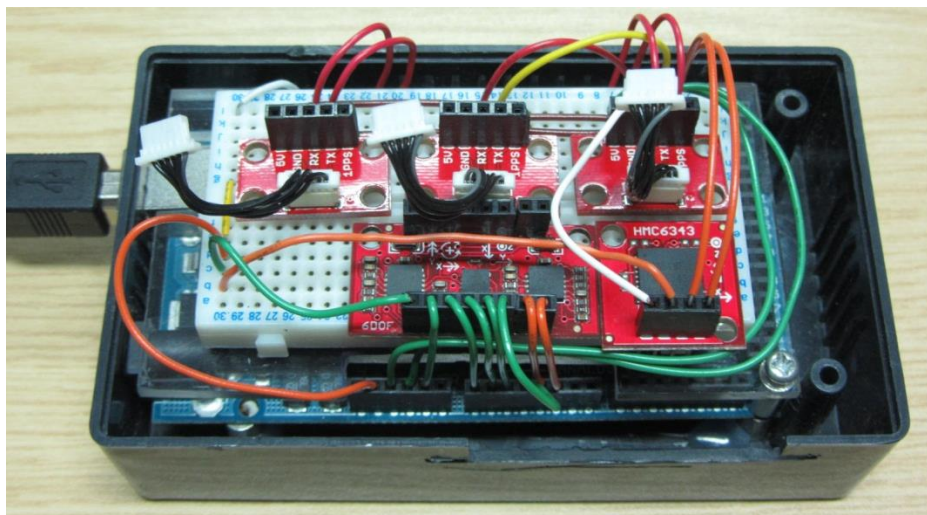
รูปที่ 5.2 เซนเซอร์เข็มทิศ (Digital Compass HMC6343) [21] (ซ้ายมือ), เซนเซอร์ GPS (EM-406 A SiRF III Receiver) [22] (ขวามือ)

5.1.2 การเชื่อมโยงข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดต่างๆ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

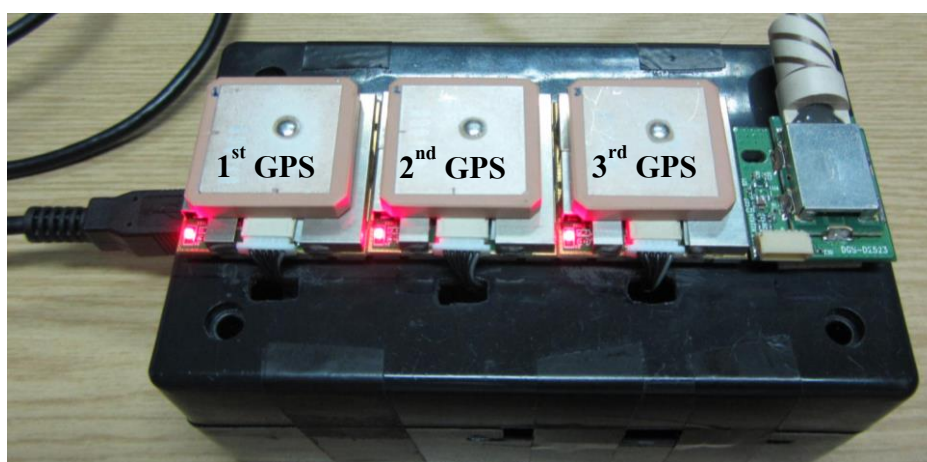
ในการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ทั้งหมดจะเชื่อมต่อเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น MEGA 2560 [16] ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งมีช่องรับสัญญาณแบบทั้ง analog และ digital จำนวนหลาย pin มาก และมีช่องรับสัญญาณ Serial (Tx,Rx) ทั้งหมด 4 ช่อง โดยที่สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งจะต่อเข้าช่องแบบ analog จำนวน 6 ช่อง ส่วนสัญญาณที่ได้รับจากเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอลจะต่อเข้าช่องแบบ I²C และ สัญญาณที่ได้รับจากเซนเซอร์ GPS EM-406 จะต่อเข้าช่อง Serial จำนวน 3 ช่อง

 รูปที่ 5.3 บอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 [16]	 รูปที่ 5.4 บอร์ด Netduino Plus [17]
คุณสมบัติของบอร์ด Arduino รุ่น MEGA 2560 ● ใช้ ATMEGA2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ประจำบอร์ด ● แรงดันไฟฟ้า 5 V แรงดันไฟฟ้า Input ที่ควรใช้ 7-12 V ● แรงดันไฟฟ้า Input จำกัดที่ 6-20 V ● Pins ดิจิตอล I/O Input 54 ● Pins อนาล็อก Input 16 ● ไฟฟ้ากระแสตรงต่อ I/O Pin 40 mA ● ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับ Pin 3.3 V 50 mA ● หน่วยความจำแฟลช 256 กิโลไบต์ (ที่ 8 KB ที่ใช้โดย Bootloader) SRAM 8 KB และ EEPROM 4 KB ● ความเร็วสัญญาณนาฬิกา (Clock Speed) 16 MHz	คุณสมบัติของบอร์ด Netduino Plus ● เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต ● ความเร็ว 48 MHz, ARM7. Code Storage: 128KB. RAM: 60KB. ● รองรับ Micro SD card มากกว่า 2 GB (SD via SPI, FAT16/FAT32) ● Netduino Plus is 100% open source - networking is lwIP (BSD license) and file system/sd card support is from Microsoft (Apache 2.0). ● USB Cable Included ● 14 Digital I/O Pins ● 6 Analog Inputs ● 100mbps ethernet ● Power specifications: Input: 7.5 - 12.0 VDC or USB powered. Output: 5 VDC and 3.3 VDC regulated.

รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงการเชื่อมต่อของเซนเซอร์ทุกตัวเข้ากับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA ที่อยู่ทางด้านล่าง โดยมีเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่ง และ เซนเซอร์เข็มทิศ ติดตั้งอยู่บนในกล่อง และมีเซนเซอร์ GPS ติดอยู่ทางด้านบนของกล่องระบบนำร่อง



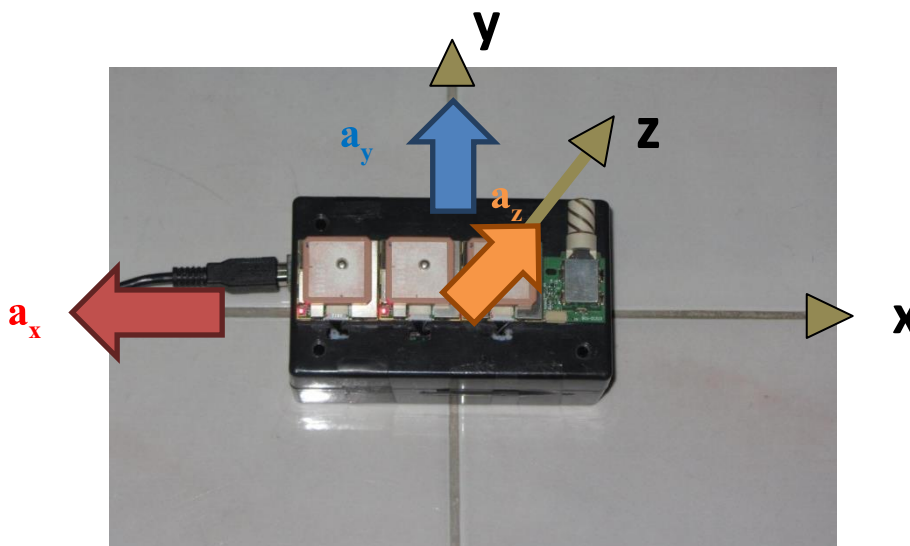
รูปที่ 5.5 เซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งและเข็มทิศ ที่ติดตั้งภายในกล่องระบบนำร่อง



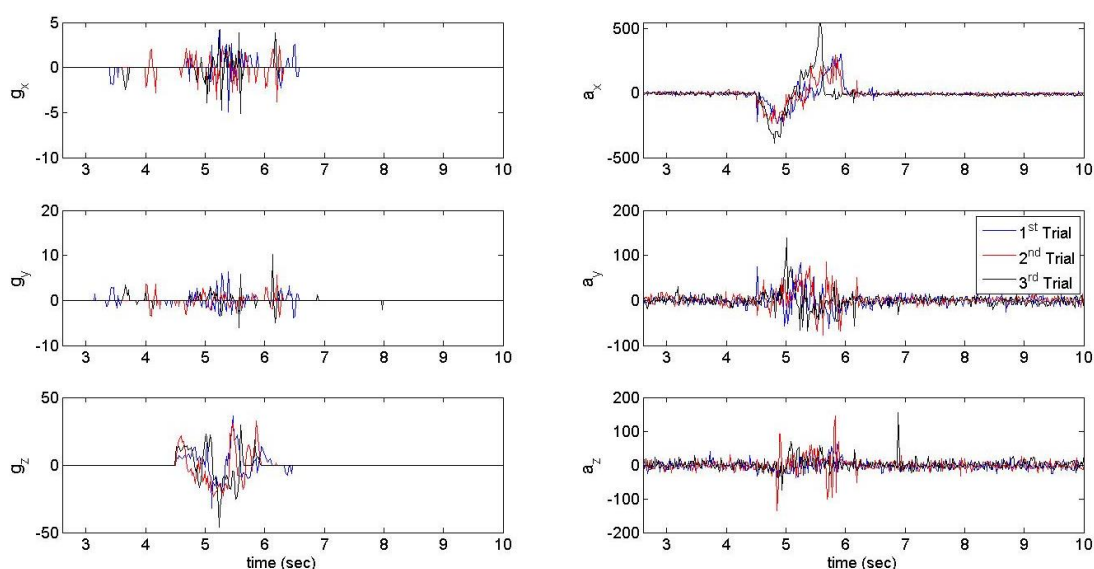
รูปที่ 5.6 เซนเซอร์ GPS EM-406 A สามตัว ที่ติดตั้งภายนอกกล่องระบบนำร่อง

5.1.3 การ calibrate ข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) และวัดความเร็วเชิงมุม (gyroscope) เพื่อให้ได้อัตราขยายที่ถูกต้อง

เพื่อทดสอบความแม่นยำของเซนเซอร์วัดมุมเอียงและวัดค่าความเร่ง ว่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใดได้ทำการทดสอบเพื่อ calibrate ค่าความเร็วเชิงมุม และ ค่าความเร่งในแต่ละแกนจากเซนเซอร์ Pololu MiniIMU ในการ calibrate ค่าความเร่งในแนวแกน x, y และ z ดังแสดงในรูปที่ 5.7 จะทำการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเป็นระยะ 70 cm โดยเริ่มออกตัวจากจุดศูนย์แล้วหยุดที่ระยะ 70 cm ผลที่ได้จากการ calibrate ความเร่งในแกน x (a_x) แสดงในรูป 5.8 มีค่าเป็นลบในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าเป็นบวกเนื่องจากความหน่วงในตอนหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ a_x ติดลบ จะได้เป็นความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ แล้วจึงนำมาหารกับความเร่งเฉลี่ยจากการหารด้วยเวลาที่เฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 0.495, 0.442 และ 0.359 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน x ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 0.432 จึงจะได้ค่าความเร่งในแกน x ที่ถูกต้อง

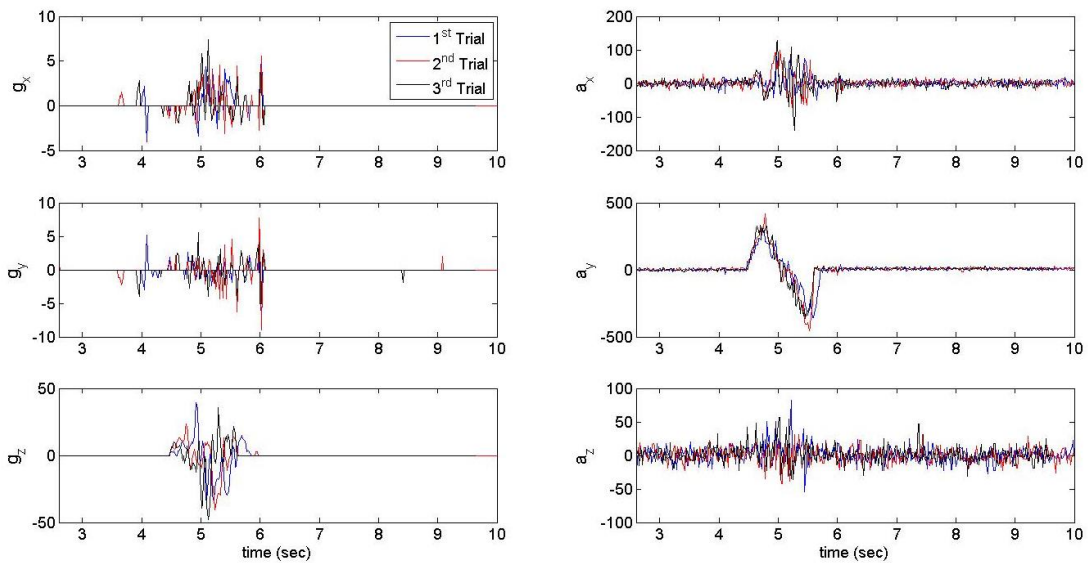


รูปที่ 5.7 การทดสอบการ calibration ค่าความเร่งในแนวแกน x, y, z เป็นจำนวน 3 ครั้ง/แกน

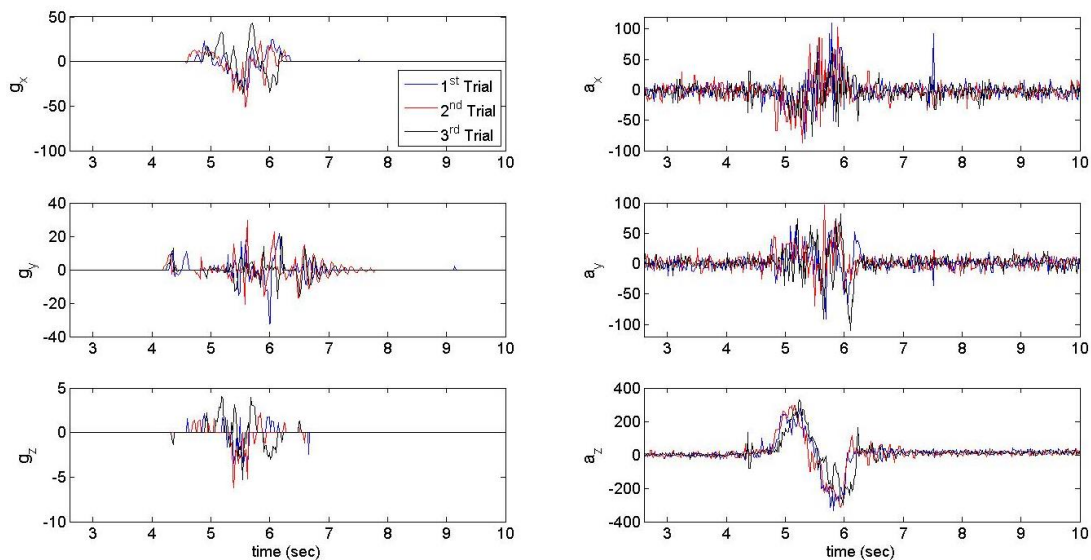


รูปที่ 5.8 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน x ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง

ผลที่ได้จากการ calibrate ความเร่งในแกน y (a_y) แสดงในรูป 5.9 มีค่าเป็นบวกในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าเป็นลบเนื่องจากความหน่วงในตอนหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ a_y เป็นบวก จะได้เป็นความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ แล้วจึงนำมารหกับความเร็วเฉลี่ยจากการหารด้วยเวลาที่เฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 0.418, 0.379 และ 0.359 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน y ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 0.386 จึงจะได้ค่าความเร่งในแกน y ที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.9 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน y ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง

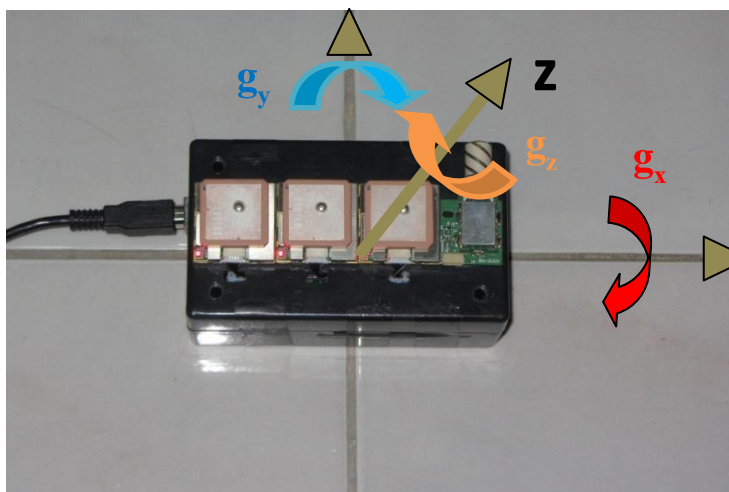


รูปที่ 5.10 : การ Calibrate ค่าความเร่งในแกน z ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง

ในทำนองเดียวกัน ผลที่ได้จากการ calibrate ความเร่งในแกน z (a_z) แสดงในรูป 5.10 มีค่าเป็นบวกในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าเป็นลบเนื่องจากความหน่วงในตอนหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ a_z เป็นบวก จะได้เป็นความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ แล้วจึงนำมารวมกับความเร็วเฉลี่ยจากการหารด้วยเวลาที่เฉลี่ยจากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 0.336, 0.330 และ 0.340 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน z ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 0.335 จึงจะได้ค่าความเร่งในแกน z ที่ถูกต้อง

เพื่อทำการ calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y และ z ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จะทำการหมุนรอบแต่ละแกนเป็นมุม 90° โดยเริ่มจากหยุดนิ่งและทำการหมุนรอบแต่ละแกนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ ในการทดสอบค่าความเร็วเชิงมุมในแกน x (g_x) ดังแสดงในรูป 5.0 มีค่าเป็นบวกในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ในตอนท้ายเมื่อหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ g_x เป็นบวก จะได้เป็นองศาการหมุนเฉลี่ย แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหารกับองศาการหมุน $= 90^\circ$ จากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 1.287,

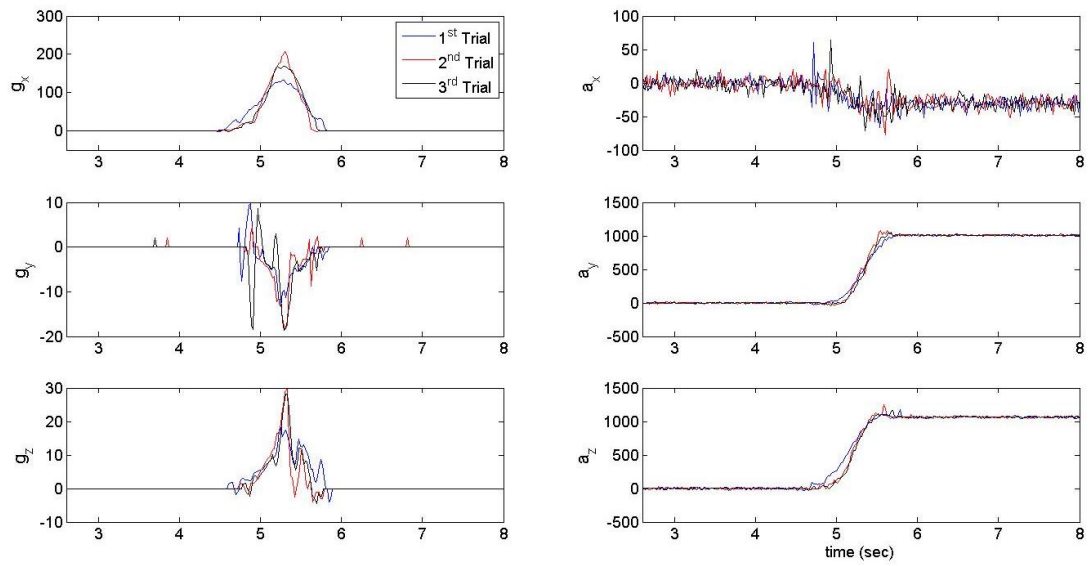
1.194 และ 1.235 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน z ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 1.239 จึงจะได้ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ที่ถูกต้อง



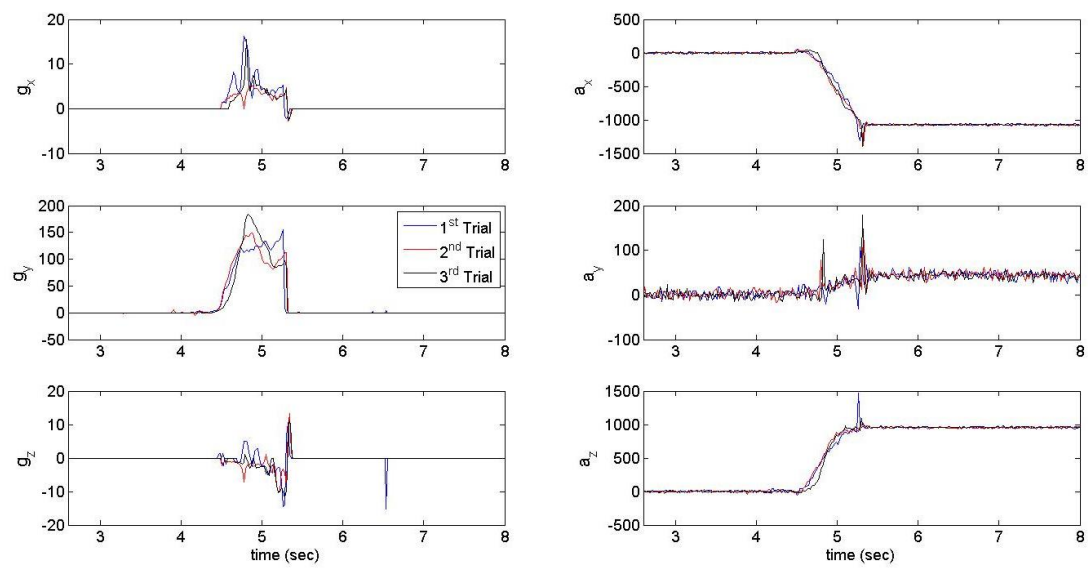
รูปที่ 5.11 การทดสอบการ calibration ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x, y, z เป็นจำนวน 3 ครั้ง/แกน

เพื่อทดสอบหาอัตราขยายของค่าความเร็วเชิงมุมในแกน y (g_y) ดังแสดงในรูป 4.44 มีค่าเป็นบวก ในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ในตอนท้ายเมื่อหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ g_y เป็นบวก จะได้เป็นองศาการหมุนเฉลี่ย แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหารกับองศาการหมุน=90° จากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 0.952, 0.952 และ 0.992 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน y ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 0.965 จึงจะได้ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ที่ถูกต้อง

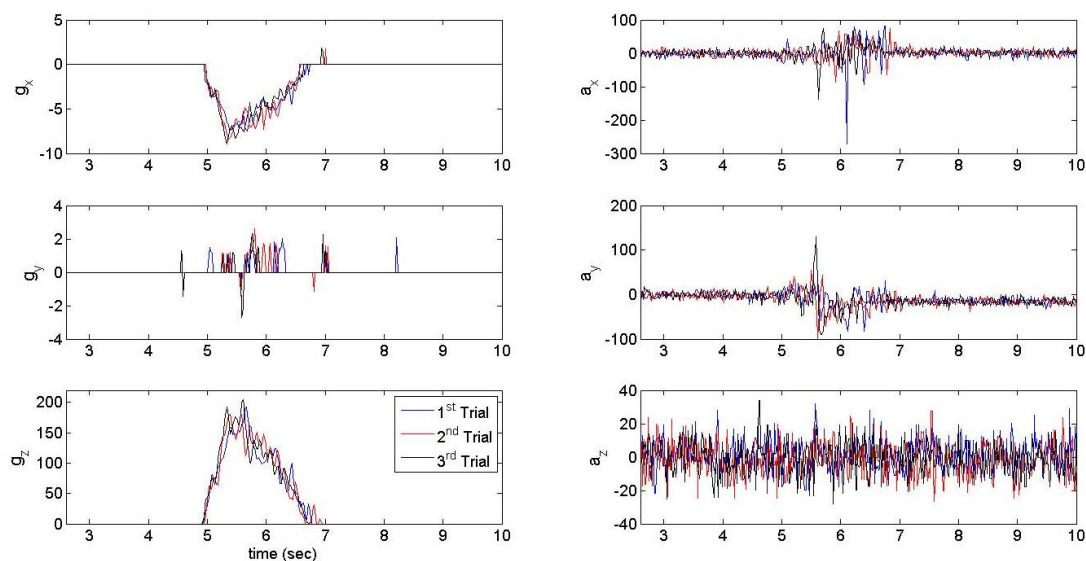
เพื่อทดสอบหาอัตราขยายของค่าความเร็วเชิงมุมในแกน z (g_z) ดังแสดงในรูป 4.45 มีค่าเป็นบวก ในช่วงเริ่มออกตัว แล้วจึงมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ในตอนท้ายเมื่อหยุด เมื่อทำการหาปริพันธ์ในช่วงเวลาที่ g_z เป็นบวก จะได้เป็นองศาการหมุนเฉลี่ย แล้วจึงนำค่าที่ได้มาหารกับองศาการหมุน=90° จากการทดลอง 3 ครั้ง จะได้อัตราส่วนเป็น 1.786, 1.893 และ 1.690 เพราะฉะนั้นค่าความเร่งในแนวแกน z ที่วัดได้ ควรจะต้องคูณด้วยค่าอัตราขยาย 1.789 จึงจะได้ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ที่ถูกต้อง



รูปที่ 5.12 : การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง



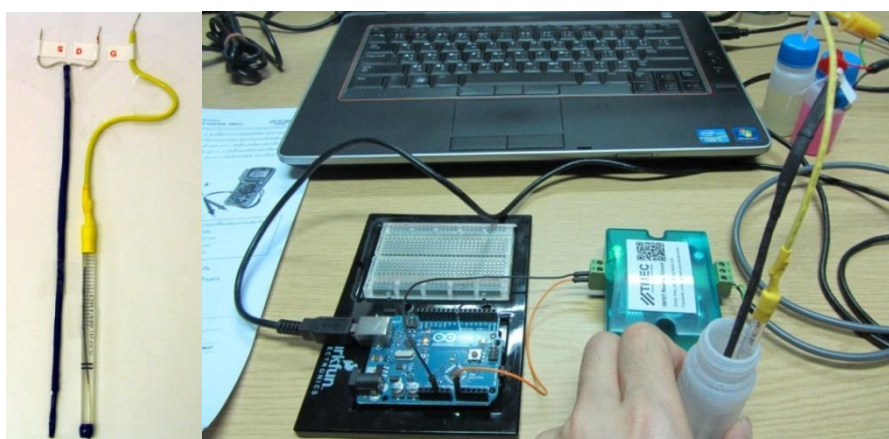
รูปที่ 5.13: การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง



รูปที่ 5.14 : การ Calibrate ค่าความเร็วเชิงมุมรอบแกน z ของ Polulu IMU จากการทดลอง 3 ครั้ง

5.2. การพัฒนาระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่ราคาไม่แพงโดยใช้เซนเซอร์ชนิด ISFET เพื่อทดสอบความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำ

เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำรุ่น ISFET ฟีเอช เซนเซอร์ [15] ซึ่งผลิตในประเทศไทย ทางคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุพรรณบุรีได้รับการบริจาคจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) เพื่อนำมาใช้วัดคุณภาพน้ำ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดต้นทุนในการซื้อเครื่องมือวัดคุณภาพน้ำจากต่างประเทศ ความไว (Sensitivity) ในการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง จะเป็น $\text{Si}_3\text{N}_4 > 45 \text{ mV/pH}$, ช่วงของค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่สามารถวัดได้ (Linear range) 1 – 14, ช่วงอุณหภูมิที่สามารถทำงานได้ (Operating Temp) 5°C ถึง 100°C , ค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ (Temperature coefficient) -1.76 mV/oC (เมื่อ $\text{pH} = 7$) ค่าพีเอชสามารถอ่านได้โดยการเชื่อมต่อหัววัดผ่านวงจรอ่านค่าและส่งข้อมูลผ่านไปยังช่องสัญญาณแบบ analog ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ดังแสดงในรูปที่ 4.66 นอกจากนั้นได้พัฒนาโปรแกรมการแสดงผลค่าพีเอชที่อ่านได้บนหน้าจocomพิวเตอร์แบบ real time อีกด้วย

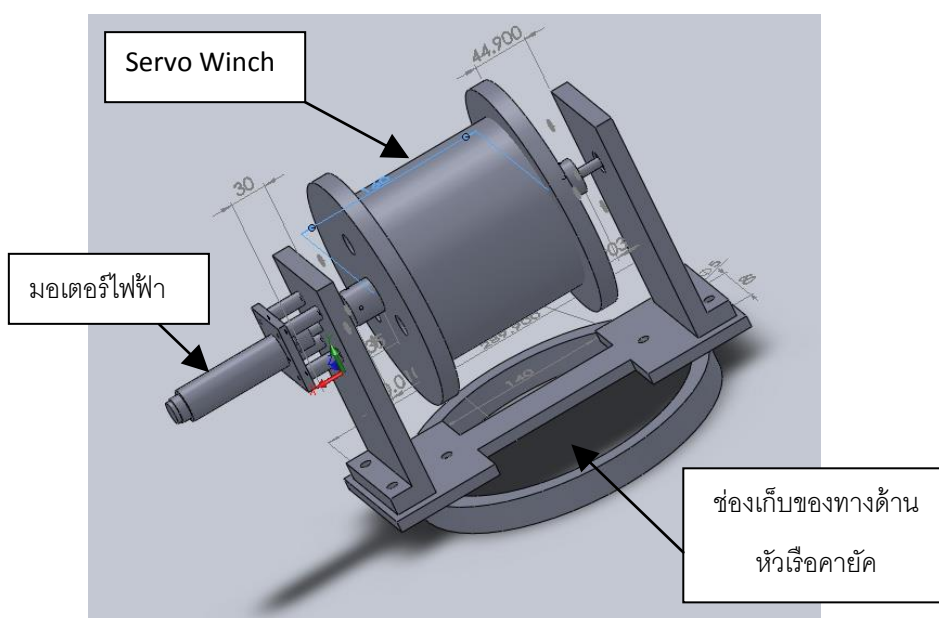


รูปที่ 5.15 : หัววัดค่า pH (ด้านซ้าย) เชื่อมต่อเข้ากับวงจรอ่านค่าในกล่องสี่เหลี่ยมซึ่งเชื่อมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (ด้านขวา)



รูปที่ 5.16 : โปรแกรมที่ใช้ในการบ่งบอกค่าพีเอชของน้ำที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Processing ที่เชื่อมต่อข้อมูลมาจาก Arduino microcontroller

เพื่อที่หย่อนหัววัดคุณภาพน้ำลงไปยังระดับความลึกที่ต้องการนั้น ได้ทำการออกแบบระบบ servo winch ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่จะนำมาติดตั้งกับช่องที่เก็บของด้านหัวเรือคายัคซึ่งจะไว้ใช้เก็บอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้อีกด้วย โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของตัว winch = 15 cm ฉะนั้นในการเก็บสายหัววัดคุณภาพน้ำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ที่ยาว 6 เมตร จะต้องม้วนสายรอบ winch ประมาณ 13 รอบ



รูปที่ 5.17 ระบบ servo winch ที่จะใช้ในการหมุนเก็บสายของหัววัดคุณภาพน้ำที่ยาว 6 เมตร

5.3 การพัฒนาระบบตรวจวัดความลึกแหล่งน้ำโดยใช้เซนเซอร์ชนิด Echo Sounder ของ Garmin

นอกจากนั้นเรือคายัคยังสามารถติดอุปกรณ์เสริมที่สามารถติดตั้งได้อีกชนิด คือ หัววัดความลึกท้องน้ำ (echo sounder) รุ่น Garmin 421s [14] Garmin 421s เป็นเครื่องจีพีเอสที่มาพร้อมกับ หัวขานเดอร์ของ Airmar จากสหรัฐอเมริกาแบบสองความถี่สามารถแสดงลักษณะพื้นทะเลและปลาได้ชัดเจน ไม่ว่าจะใช้ในทะเลหรือน้ำจืด โดยวัดความลึกได้ถึง 1500 ฟุต/457 เมตร (สำหรับรุ่นสองความถี่) สำหรับเรือที่ออกแบบมาให้ใช้ได้สะดวก มีขนาดกะทัดรัด ประหยัดพื้นที่ที่มีจำกัดบนเรือ มีเมนูแบบใหม่ใช้งานง่าย นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นเรื่อง การแสดงแผนที่แบบ 3-มิติ หากมีเกาะหรือแผ่นดินอยู่ใกล้แผนที่จะแสดงภาพเกาะหรือแผ่นดินส่วนนั้นเสมือนจริง มีการแสดงระดับความลึกและร่องน้ำที่ดูได้ชัดและง่ายดาย มี หน้าจอสีขนาด 4 นิ้ว แบบ QVGA ที่เห็นได้ชัดแม้ดูกลางแดด

ในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งหัววัดความลึกท้องน้ำไว้ทางด้านหัวเรือคายัค โดยออกแบบให้สามารถปรับระดับได้อย่างโดยใช้ลูมิเนียมโปรไฟล์ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 หัววัดความลึกท้องน้ำสามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์ประจำเรือเพื่อการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย WLAN (wireless local area network) หรือเครือข่ายการสื่อสารแบบ 3G ได้อีกด้วย โดยผู้ใช้งานจะต้องคำนึงถึงน้ำหนักบรรทุกรวมของเรือที่ติดตั้งอุปกรณ์เสริมทั้งหมดไม่ควรเกิน 100 กิโลกรัม



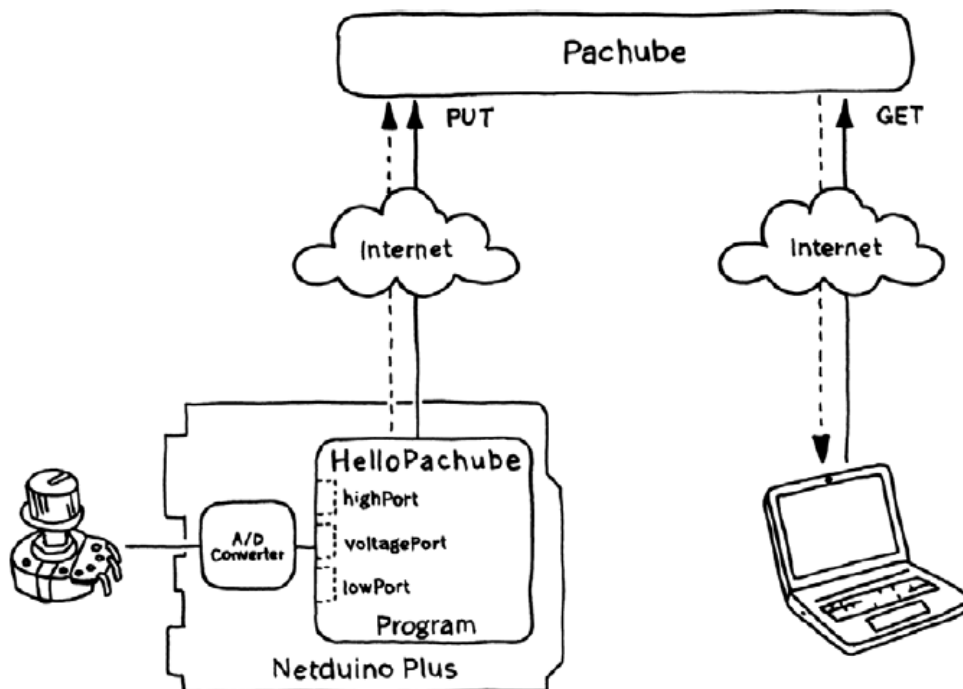
รูปที่ 5.18 หัววัดความลึกท้องน้ำและการติดตั้งทางด้านหัวเรือคายัคเมื่อนำเรือออกปฏิบัติการ (ซ้าย) และ เมื่อนำเรือเข้าเทียบท่า (ขวา)

5.4 การพัฒนาระบบส่งถ่ายข้อมูลผ่าน Internet โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Netduino Plus หรือบอร์ด Arduino Ethernet Shield

Netduino Plus เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปแบบการใช้งานคล้ายกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แต่มีความสามารถพิเศษในการส่งข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตแบบ Real-time โดยจะใช้โปรแกรม .NET Micro Framework ที่ใช้งานร่วมกับโปรแกรม Visual Studio 2010 และ การทำงานเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต

การทำงานของบอร์ด Netduino Plus กับโปรแกรม Visual Studio 2010 ร่วมกับ Website Pachube [23] ซึ่งเป็น Web Server แบบ Real-time Feed โดย Website ของ Pachube นั้นเราจะต้องมีการตั้งค่า ID เพื่อที่จะให้สามารถส่งข้อมูลจาก บอร์ด Netduino Plus ไปยังเว็บ Pachube และสามารถเรียก

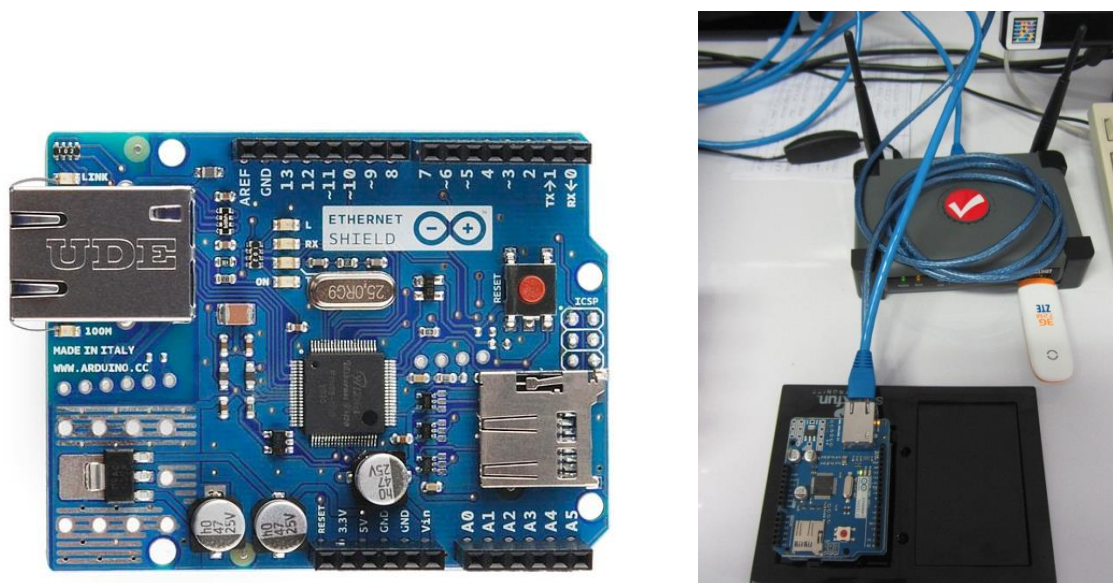
ข้อมูลเหล่านี้ไปยังคอมพิวเตอร์ หรือ บอร์ด Netduino Plus ตัวอื่นที่เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.19 จากรูป จะเห็นการทำงานของ HTTP Client , Netduino ด้วยโปรแกรม HelloPachube ที่จะส่งข้อมูลไปยังเว็บ Pachube



รูปที่ 5.19 : ตัวอย่างการเชื่อมต่อของบอร์ด Netduino เพื่อส่งข้อมูลไปยัง Pachube Web Server และ คอมพิวเตอร์สามารถเรียกดูข้อมูลได้แบบ Real time ผ่านอินเทอร์เน็ต

อีกวิธีหนึ่งในการส่งข้อมูลผ่านทางอินเทอร์เน็ตที่ทำงานคล้ายกับบอร์ด Netduino คือการใช้ Arduino Ethernet Shield [18] ดังแสดงในรูปที่ 5.20 ที่เชื่อมต่อเข้ากับบอร์ด Arduino โดยที่การทำงานของ Ethernet Shield จะอาศัยไอซีอินเทอร์เน็ตของ Wiznet W5100 จะให้ความสามารถในการระบุ network (IP) ทั้งในรูปแบบการเชื่อมต่อแบบ TCP และ UDP นอกจากนี้ Arduino Ethernet Shield จะรองรับการเชื่อมต่อการทำงานได้มากถึงสี่ช่องพร้อมๆกัน โดยจะต้องใช้หัวต่ออินเทอร์เน็ตมาตรฐานแบบ RJ45 เพื่อต่อสายอินเทอร์เน็ตเข้ากับ Ethernet Shield นอกจากนั้นแล้วหัวต่ออินเทอร์เน็ตยังสามารถที่ใช้ในการส่งผ่านกำลังไฟฟ้า (Power over Ethernet or PoE) ได้มากที่สุดถึง 15 W ผ่านสายเคเบิลแบบ Cat5 ที่ใช้มาตรฐานของ IEEE 802.3af ได้อีกด้วย

ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของ Arduino Ethernet Shield คือจะมีช่องเก็บข้อมูลด้วยแผ่น SD card และสามารถใส่คำสั่งของ Arduino นำมาเรียกได้เลยอีกด้วย และ จะมีตัวควบคุมการเรียกกับสภาพเดิม (reset controller) ที่จะช่วยให้ง่ายกว่าชุดหน่วย W5100 Ethernet นั้นจะถูกรีเซ็ตอย่างถูกต้องเมื่อเริ่มใช้งาน และ ปุ่มรีเซ็ตบน Ethernet Shield จะทำหน้าที่รีเซ็ตทั้ง W5100 และ บอร์ด Arduino การเชื่อมต่อฟังก์ชันของ W5100 และ แผ่น SD card นั้นจะผ่าน SPI bus



รูปที่ 5.20 บอร์ด Arduino Ethernet Shield [18] (ซ้าย) และ การเชื่อมต่อบอร์ด Arduino Ethernet Shield เข้ากับ 3G wireless router เพื่อส่งสัญญาณข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ต

5.4.1 การกำหนดการตั้งค่า Network โดยทำงานผ่าน Pachube Web Server [23]

ก่อนที่โปรแกรมของ Netduino หรือ Ethernet Shield จะสามารถทำงานได้ คุณจะต้องแน่ใจเสียก่อนว่าบอร์ด Netduino Plus หรือ Ethernet Shield สามารถเชื่อมต่อหรือเข้าถึงอินเทอร์เน็ตได้ เช่น มันจะส่งข้อความไปยัง server ที่สามารถเห็นได้บนอินเทอร์เน็ต สมมุติว่า Netduino Plus หรือ Ethernet Shield ถูกเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ตผ่าน router และ cable หรือ DSL Modem นั้นหมายความว่าต้องมี address ที่อยู่ของ network เพื่อที่จะเชื่อมต่อเข้ากับ board และคอมพิวเตอร์ PC โดยสามารถเชื่อมต่อ Netduino Plus หรือ Ethernet Shield ผ่านสาย USB เข้ากับคอมพิวเตอร์ได้เลย

สำหรับการทำงานของเว็บ Pachube หรือ Cosm ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ตอนเริ่มต้นของดโปรแกรมของ Netduino Plus จะต้องมีการป้อนสองค่าหลักๆของ Pachube หรือ Cosm คือ API key (apiKey) และ ID Feed (feedID) ซึ่งสองค่านี้เราจะได้จาก www.pachube.com [23] ที่เราทำการสมัครไว้และจะต้องนำมาใส่ในโปรแกรม Visual Studio 2010 สำหรับ Netduino และ โปรแกรม Arduino สำหรับ Ethernet Shield เพื่อให้ค่านี้ตรงกับในเว็บ Pachube ก่อนที่เราจะสามารถทำงานของโปรแกรมได้ จะต้องแน่ใจเสียก่อนว่าบอร์ด Netduino Plus หรือ Ethernet Shield ของคุณเข้าถึงอินเทอร์เน็ต เช่นมันจะส่งข้อความไปยัง server ที่สามารถเห็นได้บนอินเทอร์เน็ต

รูปที่ 5.21 เว็บไซต์ของ Pachube [23]

รูปที่ 5.22 เว็บไซต์ของ Cosm [23]

6. อภิปรายและวิจารณ์ผลของโครงการย่อยที่ 2

สามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆได้ดังนี้

1. การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ GPS EM-406A ที่ราคาไม่แพงหลายๆตัว
2. การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดมุมเอียงและความเร่งและเข็มทิศแบบดิจิตอล
3. การจำลองการบูรณาการข้อมูลจาก GPS และ IMU โดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter โดยโปรแกรม Matlab
4. การส่งข้อมูลของคุณภาพน้ำที่วัดได้ผ่าน Pachube Web Server แบบ real time โดยใช้ Ethernet Shield

6.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ GPS EM-406A ที่ราคาไม่แพงหลายๆตัว

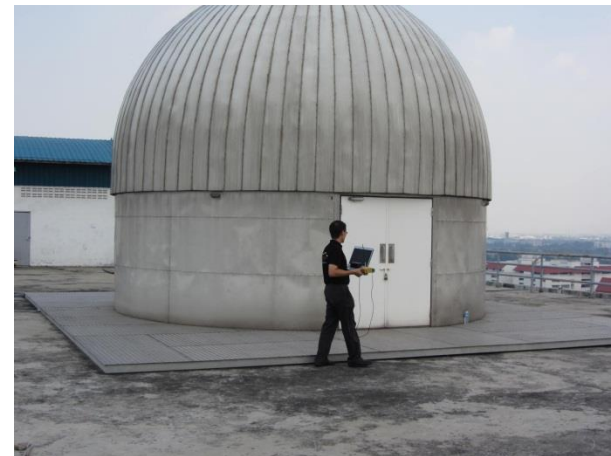
ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์แต่ละชนิดก่อนที่นำข้อมูลเหล่านี้มารวมกัน อันดับแรกได้ทดสอบความแม่นยำในการวัดพิกัดหรือตำแหน่งในระนาบแนวนอนของเซนเซอร์ Topcon GPS เมื่อเทียบกับ GPS EM-406 A โดยได้ทำการทดสอบในพื้นที่แบบต่างๆกัน คือ พื้นที่ประเภท 1) ในพื้นที่โล่งแจ้งที่บางส่วนและมีหลังคาบางส่วน, พื้นที่ประเภท 2) ในพื้นที่อยู่ใกล้สิ่งก่อสร้างขนาดสูงหรือทำด้วยโลหะ ซึ่งสิ่งก่อสร้างในที่นี้คือหอดูดาวที่มีโครงเป็นโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 6.1, พื้นที่ประเภท 3) ในพื้นที่โล่งแจ้งที่ไม่มีอะไรกำบัง ในบริเวณรอบสระน้ำข้างอาคารวิทยบริการ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดังแสดงในรูปที่ 6.4, พื้นที่ประเภท 4) ในคลองพระยาสุเรนทร์เป็นระยะทาง 7 กิโลเมตร โดยในสองพื้นที่แรกได้ทดสอบบนดาดฟ้าของตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดังแสดงในรูปที่ 6.1



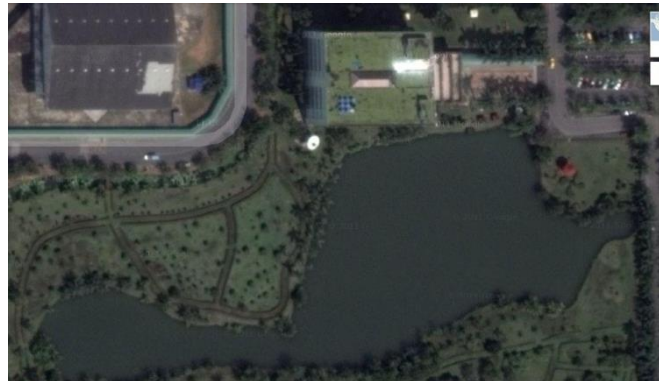
รูปที่ 6.1 ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์และชั้นดาดฟ้าที่ใช้ทดสอบพื้นที่ประเภทที่ 1 และ 2



รูปที่ 6.2 พื้นที่ประเภทที่ 1 (ด้านซ้าย) พื้นที่ประเภทที่ 2 (ด้านขวา)



รูปที่ 6.3 การทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในพื้นที่ประเภทที่ 1 (ด้านซ้าย) พื้นที่ประเภทที่ 2 (ด้านขวา)



รูปที่ 6.4 พื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณรอบสระน้ำข้างอาคารวิทยบริการ ในมหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

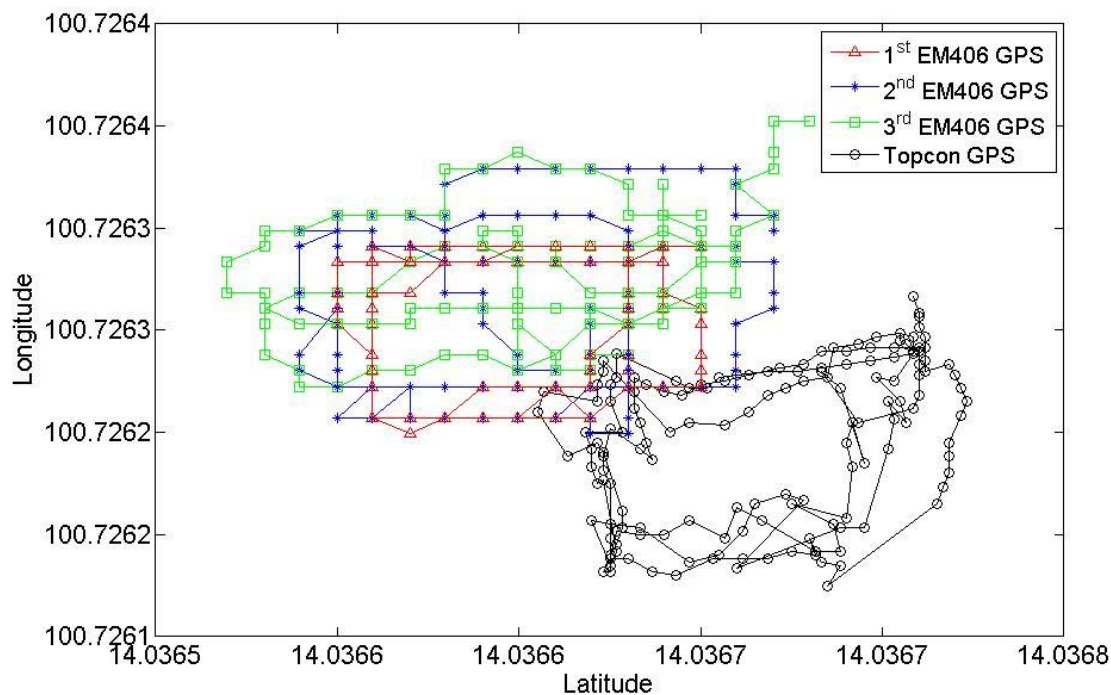


รูปที่ 6.5 การทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในพื้นที่ประเภทที่ 4 ในคลองพระยาสุเรนทร์



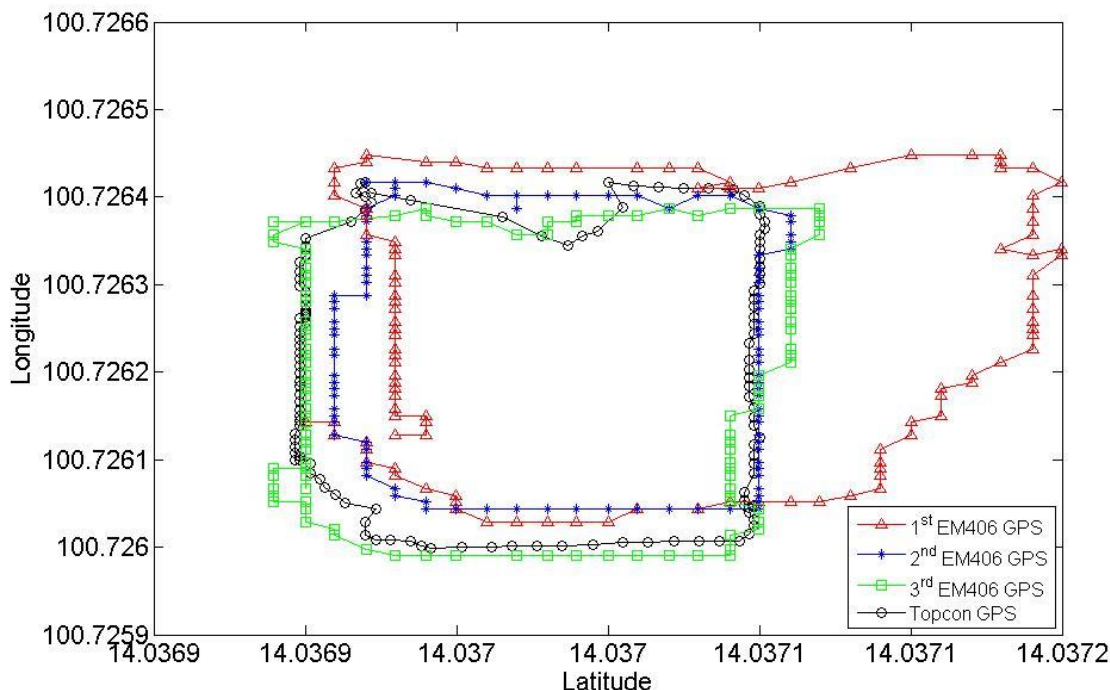
รูปที่ 6.6 สภาพสิ่งกีดขวางในระหว่างการทดสอบเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ในคลองพระยาสุเรนทร์

ผลการทดสอบตำแหน่งที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงจะนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่วัดได้จาก GPS Topcon เพื่อหาความผิดพลาดในระนาบแนวนอน ผลการทดลองในพื้นที่ประเภทที่ 1 แสดงในรูป 6.5 แสดงให้เห็นว่าผนังโลหะที่สูงของหอดูดาวจะทำให้เกิดการสะท้อนของสัญญาณดาวเทียมบริเวณรอบๆ ทำให้ตำแหน่งที่วัดได้จาก GPS ทั้งสองแบบ มีค่าผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนที่เยอะมาก ดังนั้นผลที่ได้นี้จะแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของ GPS ที่ไม่สามารถใช้ได้ในพื้นที่ที่มีตึกสูงๆหรือมีโลหะที่จะสะท้อนสัญญาณดาวเทียม



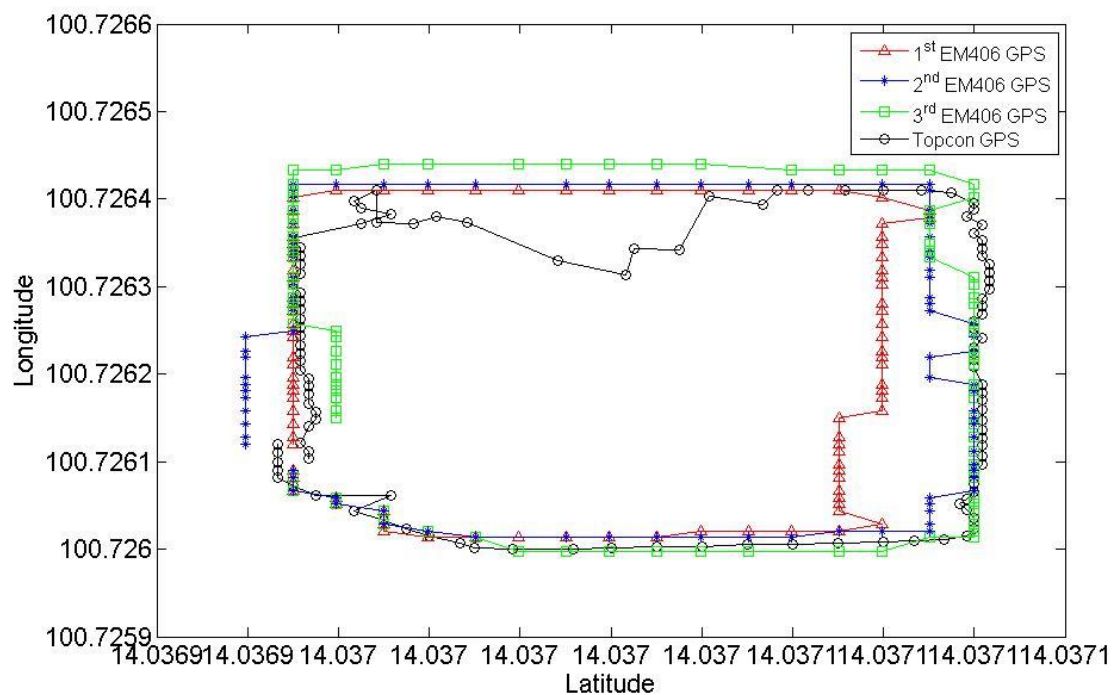
รูปที่ 6.7 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพง จำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topcon ในพื้นที่ประเภทที่ 1

ผลการทดลองที่วัดได้ในพื้นที่ประเภทที่ 2 ที่เดินเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังแสดงในรูปที่ 6.2 – 6.3 จาก GPS ทั้งสองประเภท โดยจะทำการทดสอบในพื้นที่ประเภทที่ 2 จำนวนสามครั้ง ผลการทดลองในครั้งที่ 1 ในรูปที่ 6.7 แสดงให้เห็นว่า GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงตัวที่หนึ่งให้ค่าพิกัดที่คาดเคลื่อนค่อนข้างมาก แต่ยังคงอยู่ในระยะความคาดเคลื่อนที่ระบุไว้ในคุณสมบัติของเซนเซอร์ GPS EM-406 A ที่มีค่าเท่ากับ ± 10 เมตร ส่วนพิกัดของ GPS EM-406 A ตัวที่สองและสามมีค่าใกล้เคียงกับพิกัดของ GPS Topcon แต่ทว่าบริเวณพื้นที่ทางด้านบนของรูปจะมีหลังกาบ ซึ่งจะมีสัญญาณดาวเทียม จึงทำให้ค่า GPS ทุกตัวมีความผิดเพี้ยนไป

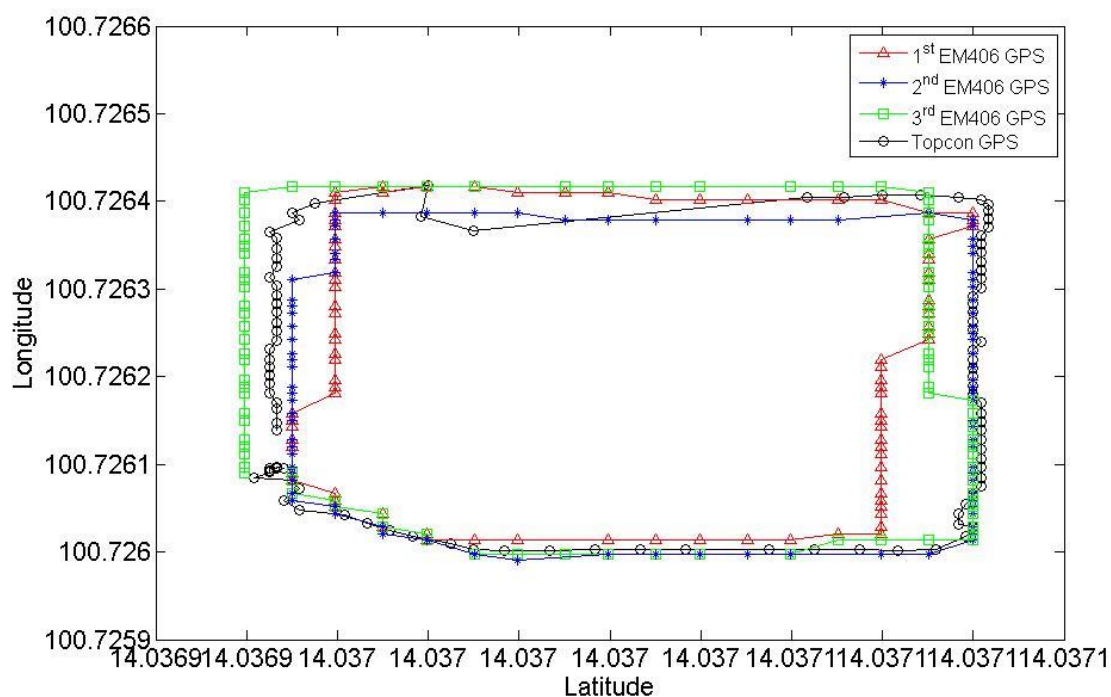


รูปที่ 6.8 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพง จำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topcon ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับการทดลองครั้งที่ 1

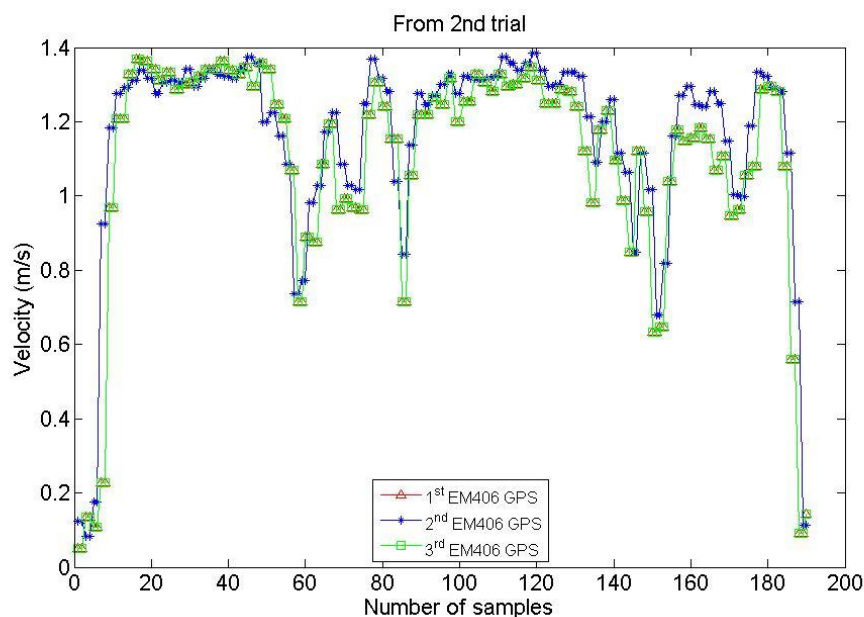
ผลการทดลองในครั้งที่ 2 และ 3 ในรูปที่ 5.21 และ 5.22 แสดงให้เห็นว่า GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงทั้ง 3 ตัว ให้ค่าพิกัดของละติจูดและลองจิจูดใกล้เคียงกับพิกัดที่วัดได้จาก GPS Topcon แต่ทว่าค่าพิกัดของ GPS EM-406 A ตัวที่ 1 ยังคงมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าตัวที่ 2 และ 3 สาเหตุของความคลาดเคลื่อนของ GPS EM-406 A ตัวที่ 1 นั้นอาจจะมาจากการรับสัญญาณดาวเทียมที่ต่างกลุ่มกันออกไป ทำให้ค่าพิกัดผิดเพี้ยนไปมาก นอกจากนั้นเรายังได้วัดสัญญาณความเร็วในการเคลื่อนที่ และ มุมหันเหเทียบกับทิศเหนือจาก GPS EM-406 A ในการทดลองครั้งที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ ผลที่วัดได้แสดงให้เห็นว่า GPS EM-406 A ทั้ง 3 ตัว ให้ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ และ มุมหันเหเทียบกับทิศเหนือ ที่ใกล้เคียงกันมาก จากผลการทดสอบในพื้นที่ประเภทที่สองแสดงให้เห็นว่า พิกัดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพงเพียงตัวเดียวหรือหลายๆตัว ไม่สามารถนำมาใช้นำร่องการเคลื่อนที่ให้ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นจึงต้องมีการบูรณาการของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ชนิดอื่นๆด้วย



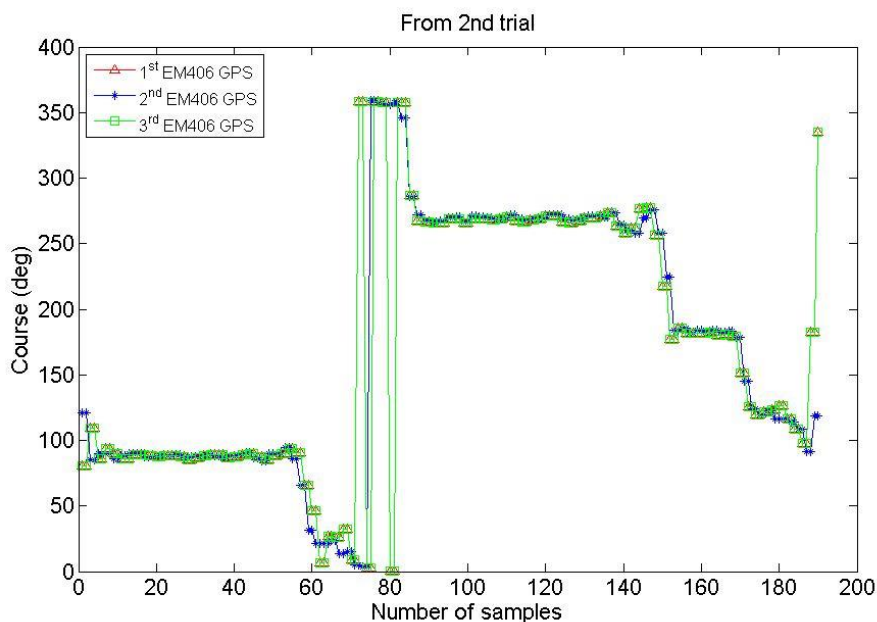
รูปที่ 6.9 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพง จำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topcon ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับการทดลองครั้งที่ 2



รูปที่ 6.10 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A ที่ราคาไม่แพง จำนวนสามตัวและได้จาก GPS Topcon ในพื้นที่ประเภทที่ 2 สำหรับการทดลองครั้งที่ 3



รูปที่ 6.11 ความเร็วในการเคลื่อนที่ ที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทั้ง 3 ตัว



รูปที่ 6.12 มุมหันเหเทียบกับทิศเหนือ ที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทั้ง 3 ตัว

ส่วนผลการทดลองที่วัดพิกัดในพื้นที่ประเภทที่ 3 โดยการเดินรอบสระน้ำข้างตึกอาคารวิทยบริการที่สูง 6 ชั้น ในมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร ซึ่งพื้นที่ๆโล่งแจ้ง ได้แสดงในรูปที่ 6.13 และ 6.14 พิกัดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทั้ง 2 ตัว มีความแม่นยำดีและเกือบจะซ้อนทับกันตลอดเวลาโดยที่พิกัดจะต่างกันไม่เกิน 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ทางขวามือ แต่ทว่าค่าพิกัดที่วัดได้ขณะที่เริ่มเดินจากข้างตึกวิทยบริการมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ดังแสดงในรูปที่ 6.14 ทางซ้ายมือ ซึ่งจะเป็นปัญหาของการรับสัญญาณจากดาวเทียมเมื่อมีตึกสูงมาบังอยู่ข้างหนึ่ง คล้ายกันกับปัญหาในพื้นที่ประเภทที่ 1 โดยรวมแล้วค่าพิกัดจาก GPS EM-406 A มีความแม่นยำที่ดีเมื่อใช้งานในพื้นที่โล่งแจ้ง

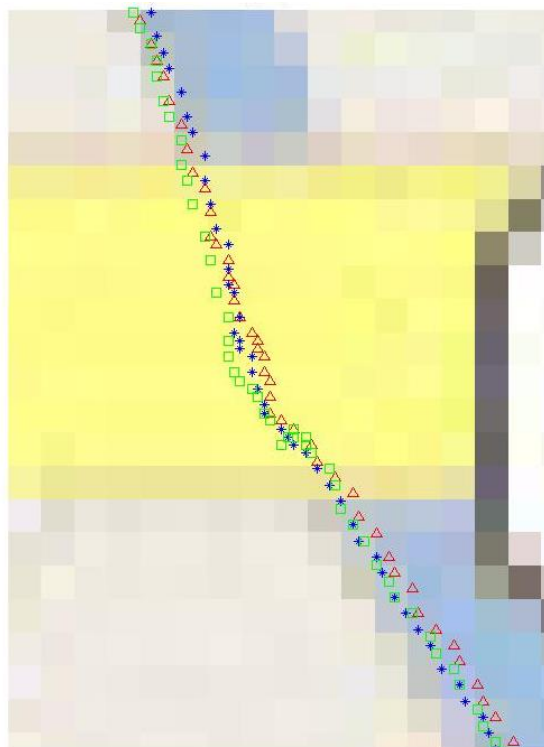
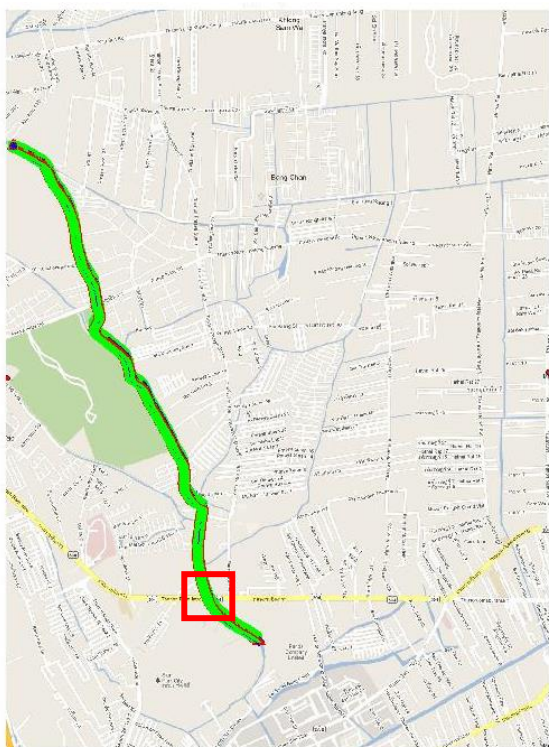


รูปที่ 6.13 พิกัดหรือตำแหน่งที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางดลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณรอบสระน้ำข้างอาคารวิทยบริการ



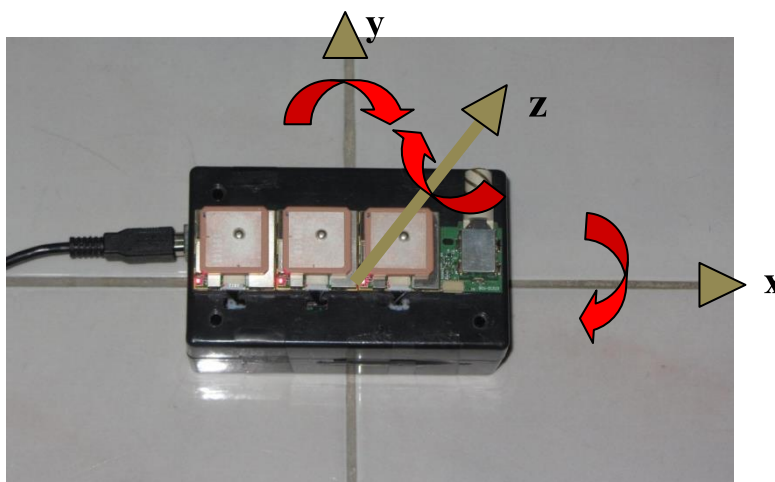
รูปที่ 6.14 พิกัดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางดลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 3 บริเวณที่ใกล้กับตึกอาคารวิทยบริการ (ด้านซ้าย) และ บริเวณโค้งแจ้งริมขาสุดของสระน้ำ (ด้านขวา)

สำหรับผลการทดลองที่วัดพิกัดในพื้นที่ประเภทที่ 4 โดยการใช้เรือแล่นไปตามคลองพระยาสุเรนทร์เป็นระยะทาง 7 กิโลเมตร คลองนี้จะมี ความกว้างโดยประมาณอยู่ระหว่าง 5-6 เมตรโดยสภาพในคลองจะมีผักตบชวาในบางพื้นที่และมีสะพานคนข้ามและสะพานเดินรถอยู่เป็นระยะตลอดแนวของคลอง ดังแสดงในรูปที่ 6.15 ค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสามตัวมีความแม่นยำที่ใช้ได้ คือ ค่าพิกัดจะอยู่ภายในความกว้างของคลอง ดังแสดงในรูปที่ 6.15 (ด้านซ้าย) แต่ในส่วนบริเวณใต้สะพานเดินรถจะบังสัญญาณดาวเทียมทำให้พิกัดที่วัดได้จาก GPS EM-406 A ทุกตัวมีค่าที่กระโดดและความแม่นยำจะลดลงไป (ด้านขวา)



รูปที่ 6.15 พิกัดที่วัดได้ในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดที่ได้จาก GPS EM-406 A จำนวนสองตัว ที่นำมาวางดลงบน Google Earth ในพื้นที่ประเภทที่ 4 คลองพระยาสุเรนทร์เป็นระยะทาง 7 กิโลเมตร (ด้านซ้าย) และ ภาพขยายในบริเวณใต้สะพานทางด่วน (ด้านขวา)

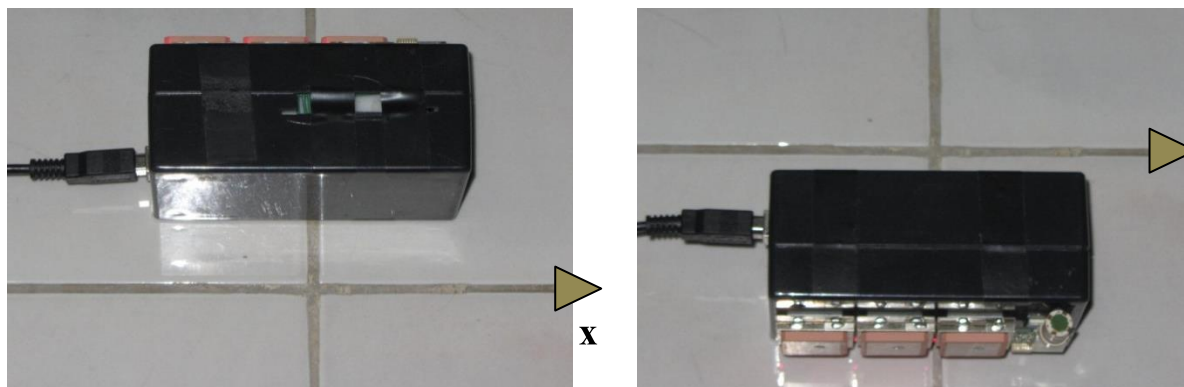
6.2 การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดมุมเอียงและความเร่งและเข็มทิศแบบดิจิทัล



รูปที่ 6.16 แกนพิกัดการหมุนของเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ ภายในกล่องระบบนาร่อง

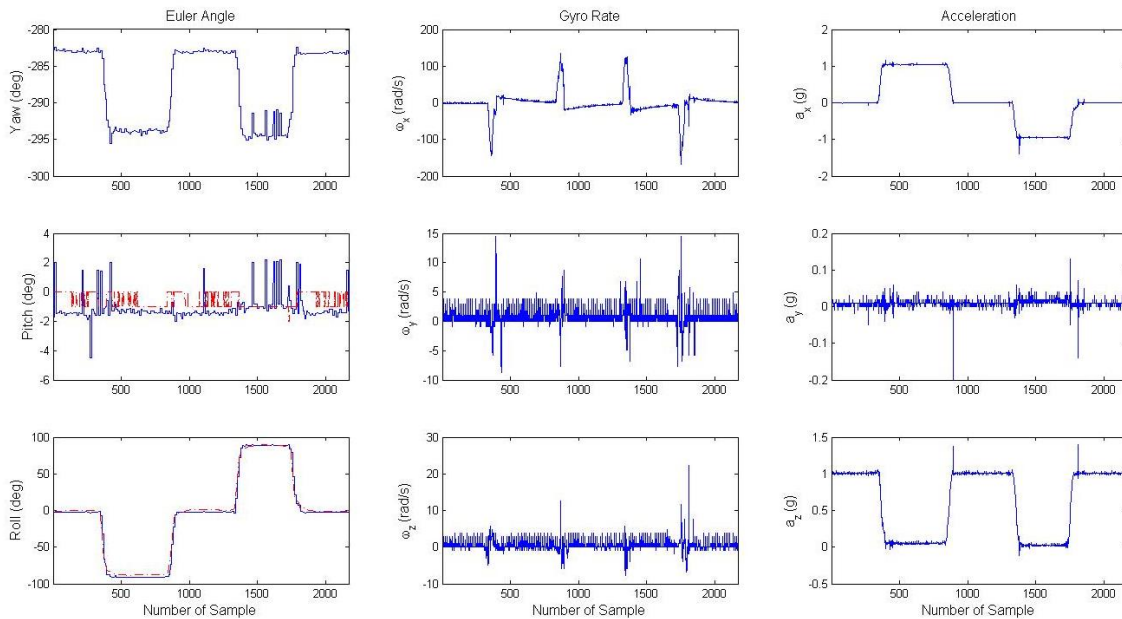
การทดลองในส่วนนี้จะทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์วัดมุมเอียงและเซนเซอร์วัดความเร่งที่อยู่บนบอร์ดเดียวกันของ IMU 6DOF Razor และการทำงานของเซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิทัลของ HMC6343 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการทำงาน ก่อนที่จะนำข้อมูลมาบูรณาการกับเซนเซอร์ GPS EM-406 A

ในระบบนำร่อง ในรูปที่ 6.16 แสดงแกนพิกัดการหมุนของเซนเซอร์ IMU และเข็มทิศ ของกล่องระบบนำร่อง โดยในที่นี้จะทดสอบการหมุนรอบแกน x, y และ z แล้วแสดงผลอัตราการหมุนเชิงมุมและความเร่งและองศาการหมุนในแต่ละแกน



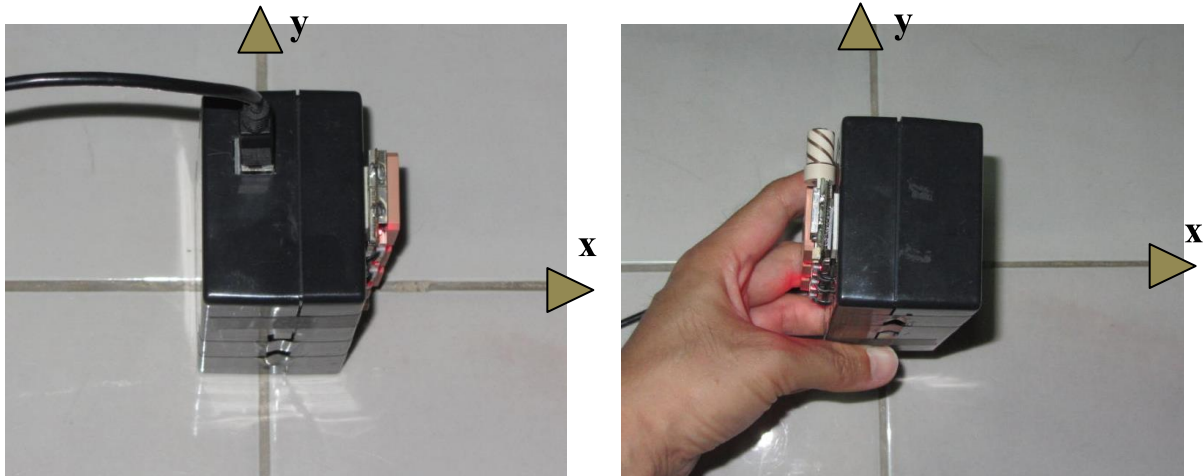
รูปที่ 6.17 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน x เป็นมุม -90 องศา (ด้านซ้าย) แล้วหมุนรอบแกน x เป็นมุม 90 องศา (ด้านขวา)

อันดับแรกจะทำการทดสอบการหมุนรอบแกน x โดยจะอยู่ในระนาบแนวนอนเป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนรอบแกน x เป็นมุม -90 องศา และค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และหมุนกลับมาที่ 0 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนเป็นมุม 90 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และจึงหมุนกลับมาที่ 0 องศาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ผลการทดสอบในรูปที่ 6.18 แสดงมุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียง และความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยที่ค่ามุม Roll จากเข็มทิศ (เส้นสีน้ำเงินทึบ) และการประมาณค่าของมุม Roll จากการบูรณาการของข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งและวัดมุมเอียง (เส้นสีแดงประ) มีค่าที่ตรงกัน โดยจะเปลี่ยนเป็น -90 องศา แล้วเป็น 90 องศา ตามทิศทางการหมุน ค่าประมาณของมุม Pitch จากการบูรณาการของข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งและวัดมุมเอียงก็เหมือนกับมุม Pitch จากเข็มทิศ ส่วนอัตราการหมุนเชิงมุม ω_x จะมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งสังเกตได้จากเครื่องหมาย และการเปลี่ยนแปลงจะมีเฉพาะช่วงที่มีการเคลื่อนที่เท่านั้น ส่วน ω_y และ ω_z มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ส่วนความเร่งที่วัดได้จะเป็นค่าที่เทียบกับความโน้มถ่วงโลก ดังนั้นเมื่อหมุนไป -90 องศา รอบแกน x ความโน้มถ่วงโลกจะย้ายมาขนานกับแกนบวก x ส่วนความเร่งในแนวแกน z จะกลายเป็นศูนย์ แต่เมื่อหมุนไป 90 องศา รอบแกน x ความโน้มถ่วงโลกจะย้ายมาขนานกับแกนลบ x ส่วนความเร่งในแนวแกน z จะกลายเป็นศูนย์

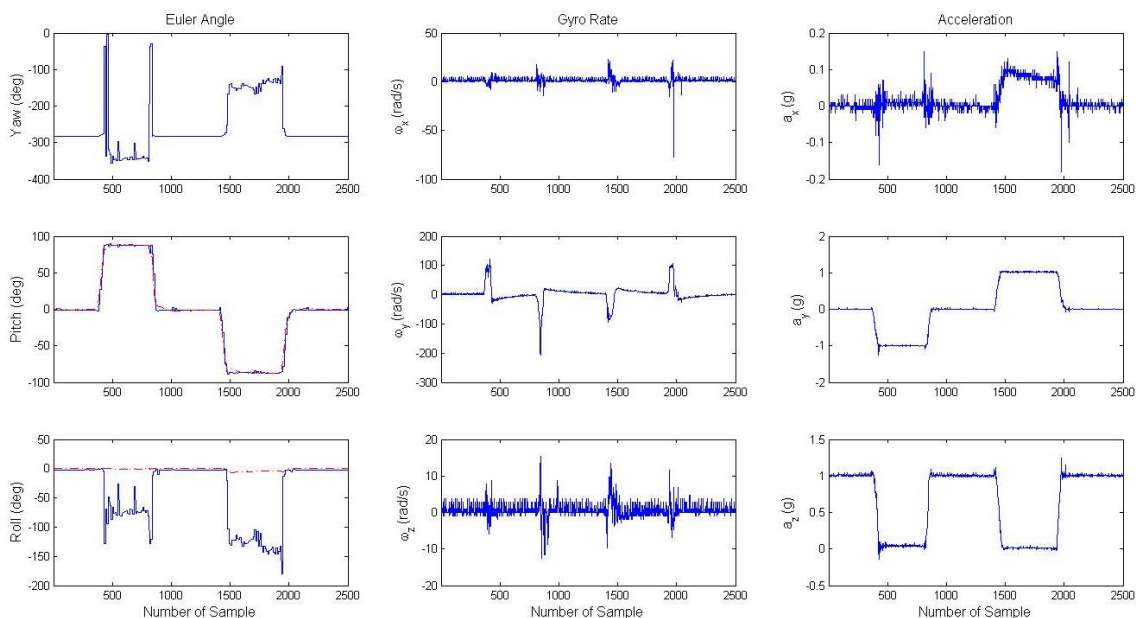


รูปที่ 6.18 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และ ความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบแกน x เป็นมุม -90 องศา แล้วเป็นมุม 90 องศา

อันดับที่สองจะทำการทดสอบการหมุนรอบแกน y โดยจะอยู่ในระนาบแนวนอนเป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนรอบแกน y เป็นมุม 90 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และหมุนกลับไปที่ 0 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนเป็นมุม -90 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และจึงหมุนกลับไปที่ 0 องศาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ผลการทดสอบในรูปที่ 6.18 แสดงมุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียง และ ความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยที่ค่ามุม Pitch จากเข็มทิศ (เส้นสีน้ำเงินทึบ) และการประมาณค่าของมุม Pitch จากการบูรณาการของข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งและวัดมุมเอียง (เส้นสีแดงประ) มีค่าที่ตรงกัน โดยจะเปลี่ยนเป็น 90 องศา แล้วเป็น -90 องศา ตามทิศทางการหมุน ค่าประมาณของมุม Roll จากการบูรณาการของข้อมูลจากเซนเซอร์วัดความเร่งและวัดมุมเอียงแม่นยำกว่ามุม Roll จากเข็มทิศ ส่วนอัตราการหมุนเชิงมุม ω_y จะมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งสังเกตได้จากเครื่องหมาย และการเปลี่ยนแปลงจะมีเฉพาะช่วงที่มีการเคลื่อนที่เท่านั้น ส่วน ω_x และ ω_z มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ส่วนความเร่งที่วัดได้จะเป็นค่าที่เทียบกับความโน้มถ่วงโลก ดังนั้นเมื่อหมุนไป 90 องศา รอบแกน y ความโน้มถ่วงโลกจะย้ายมาขนานกับแกนลบ y ส่วนความเร่งในแนวแกน z จะกลายเป็นศูนย์ แต่เมื่อหมุนไป -90 องศา รอบแกน y ความโน้มถ่วงโลกจะย้ายมาขนานกับแกนบวก y ส่วนความเร่งในแนวแกน z จะกลายเป็นศูนย์



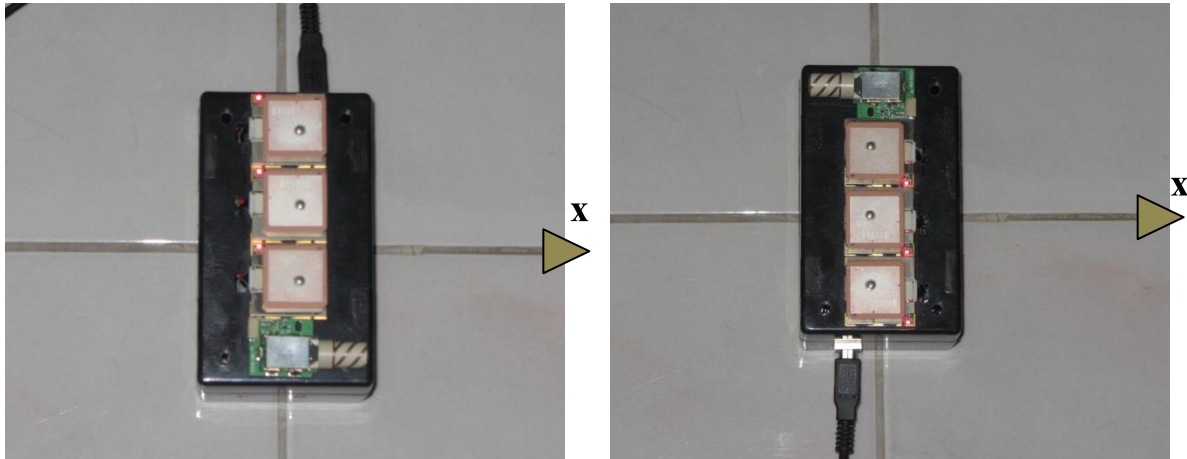
รูปที่ 6.19 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน y เป็นมุม 90 องศา (ด้านซ้าย) แล้วหมุนรอบแกน -90 องศา (ด้านขวา)



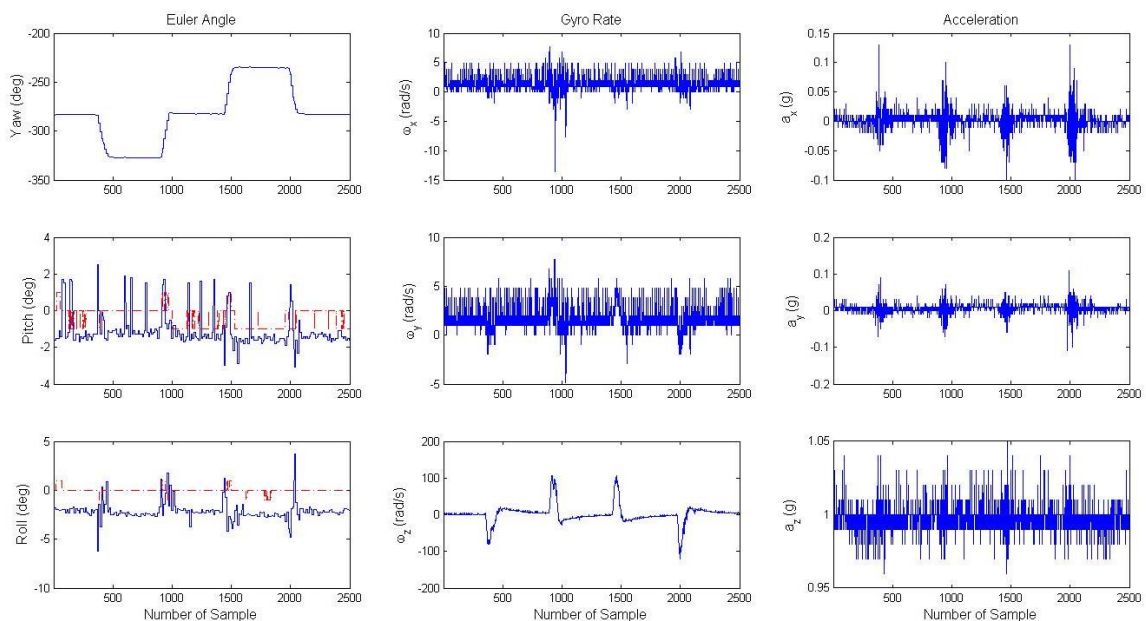
รูปที่ 6.20 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และ ความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบแกน y เป็นมุม 90 องศา แล้วเป็นมุม -90 องศา

อันดับที่สามจะทำการทดสอบการหมุนรอบแกน z โดยจะอยู่ในระนาบแนวนอนเป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนรอบแกน z เป็นมุม -90 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และหมุนกลับมาที่ 0 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนเป็นมุม 90 องศาและค้างไว้เป็นเวลา 5 วินาที และจึงหมุนกลับมาที่ 0 องศาตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6.19 ผลการทดสอบในรูปที่ 6.20 แสดงมุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียง และ ความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยที่ค่ามุม Yaw จากเข็มทิศ จะเปลี่ยนเป็น -90 องศา แล้ว

เป็น 90 องศา ตามทิศทางการหมุน ส่วนอัตราการหมุนเชิงมุม ω_z จะมีการเปลี่ยนแปลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งสังเกตได้จากเครื่องหมาย และการเปลี่ยนแปลงจะมีเฉพาะช่วงที่มีการเคลื่อนที่เท่านั้น ส่วน ω_x และ ω_y มีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ส่วนความเร่งที่วัดได้จะเป็นค่าที่เทียบกับความโน้มถ่วงโลก ดังนั้นเมื่อหมุนไป 90 องศา รอบแกน z ความโน้มถ่วงโลกจะอยู่ในแนวแกน z เสมอ ดังนั้นความเร่งในแนวแกน x และ y จะเป็นศูนย์



รูปที่ 6.21 การทดสอบเซนเซอร์ IMU และ เซนเซอร์เข็มทิศ เมื่อหมุนรอบแกน z เป็นมุม -90 องศา (ด้านขวา) และ 90 องศา (ด้านซ้าย)



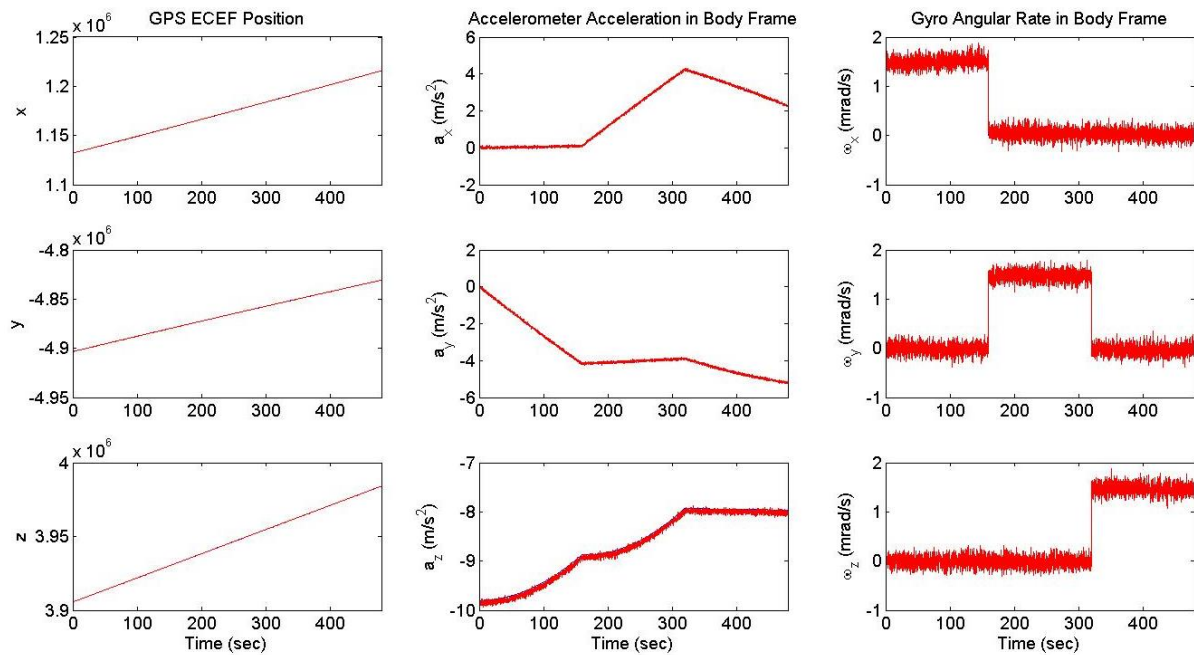
รูปที่ 6.22 มุมของ Euler (Yaw, Pitch, Roll) ที่วัดได้จากเซนเซอร์เข็มทิศ (หลักซ้าย) และ อัตราการหมุนเชิงมุม ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU (หลักกลาง) และ ความเร่ง (a_x, a_y, a_z) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (หลักขวา) เมื่อหมุนรอบแกน z เป็นมุม -90 องศา แล้วเป็นมุม 90 องศา

6.3 การจำลองการบูรณาการข้อมูลจาก GPS และ IMU โดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter โดยโปรแกรม Matlab

จากหัวข้อ 6.1 และ 6.2 จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่ได้จาก GPS เพียงอย่างเดียว นั้นมีค่าผิดพลาดหรือตำแหน่งที่ไม่แม่นยำเมื่อสัญญาณดาวเทียมนั้นสูญหายไปช่วงระยะหนึ่ง หรือ สัญญาณถูกสะท้อนด้วยสิ่งก่อสร้าง ส่วนข้อมูลที่ได้จาก IMU เพียงอย่างเดียว นั้นจะได้ค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่แต่จะบ่งบอกถึงทิศทางหรือองศาการหันเหในการเคลื่อนที่ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจะนำข้อมูลที่ได้จาก GPS และ IMU มาบูรณาเข้าด้วยกันโดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter (EKF) ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2.1 และ 3.2.2

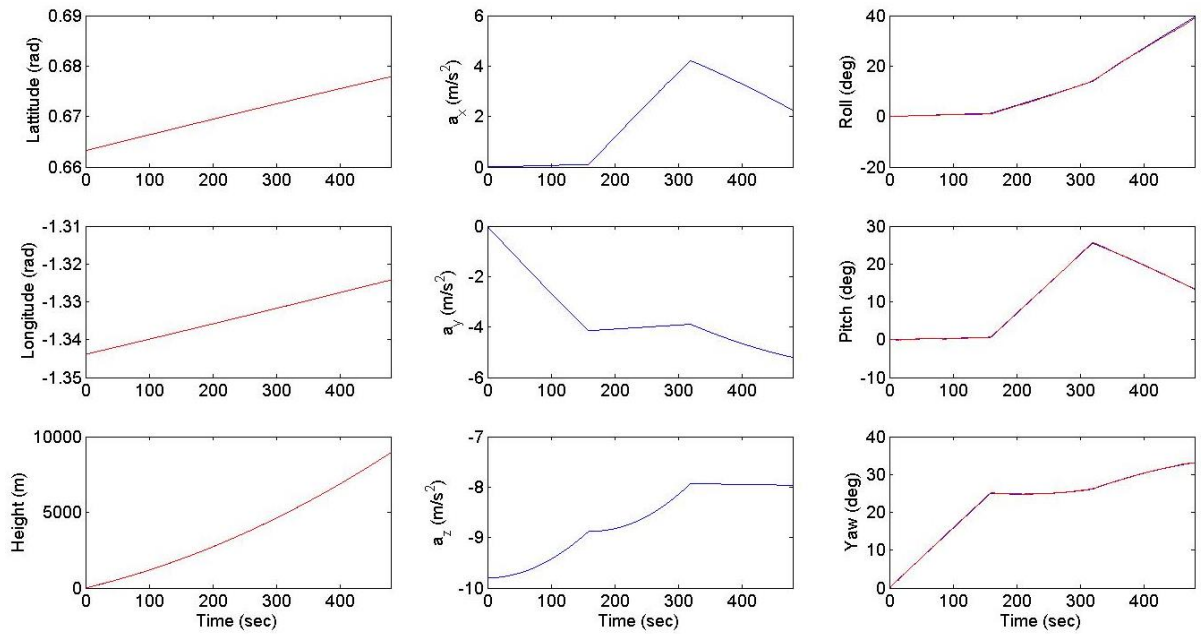
ในการทดลองนี้ เทคนิค Extended Kalman Filter (EKF) จะทำการคำนวณหาค่าประมาณของตัวแปรสถานะ 21 ตัว ในสมการที่ 3.29a โดยสมมติว่าเราทราบค่าจริงที่วัดได้ของ GPS, Accelerometer และ องศาการหันเหที่คำนวณได้จากการหาปริพันธ์ของอัตราเร็วเชิงมุมของ Gyroscope ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ด้วยเส้นสีน้ำเงิน เพื่อที่จะได้นำค่าจริงเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ประมาณได้จาก EKF และ จะได้สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะทุกตัวได้ สำหรับค่าที่วัดได้จาก GPS จะกำหนดให้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น 10 เมตร และ ค่า bias เป็น 85000 ส่วนสำหรับ Gyroscope จะกำหนดให้มีค่าความหนาแน่นทาง spectral เป็น $\sigma_{gv} = \sqrt{10} \times 10^{-5}$ และ $\sigma_{gu} = \sqrt{10} \times 10^{-6}$ และ สำหรับ Accelerometer จะกำหนดให้มีค่าความหนาแน่นทาง spectral เป็น $\sigma_{av} = \sqrt{9.81} \times 10^{-3}$ และ $\sigma_{au} = \sqrt{3600} \times 10^{-5}$

ในรูปที่ 6.23 แสดงค่าจริงที่วัดได้จาก GPS ในระบบพิกัด ECEF ในสมการที่ 2.38, Accelerometer และ Gyroscope ในระบบพิกัดที่ติดกับตัวเรือ ในสมการที่ 3.21j และ 3.21b ตามลำดับ ที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน ซึ่งจะเป็นค่าอินพุตที่ใส่เข้าไปในเทคนิค Extended Kalman Filter ส่วนเอาต์พุตที่ได้จากเทคนิค EKF จะเป็นค่าประมาณ (estimation) พร้อมทั้งค่าความแปรปรวน (covariance) ของตัวแปรสถานะทั้ง 21 ตัว ในรูปที่ 6.24 จะแสดงค่าประมาณของพิกัด GPS ในระบบ NED คือค่า Latitude, Longitude, Height และ องศาการหันเหคือค่า Roll, Pitch, Yaw โดยค่าประมาณจะถูกแสดงด้วยเส้นสีแดงซึ่งจะซ้อนทับกับค่าจริงค่อนข้างแม่นยำ

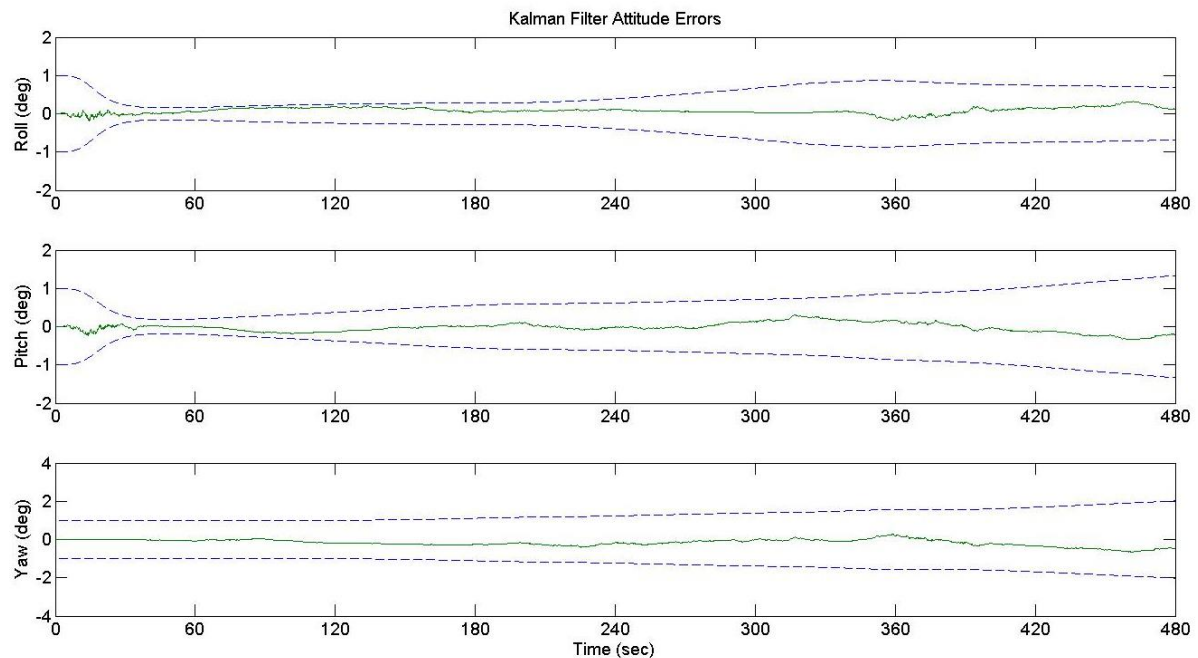


รูปที่ 6.23 ค่าพิกัด GPS ในระบบพิกัด ECEF ที่วัดได้ (หลักด้านซ้าย) และ ค่าความเร่งในแกน x,y,z ที่วัดได้จาก Accelerometer ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักกลาง) และ ค่าอัตราเร็วเชิงมุมในแกน x,y,z ที่วัดได้จาก Gyroscope ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักด้านขวา)

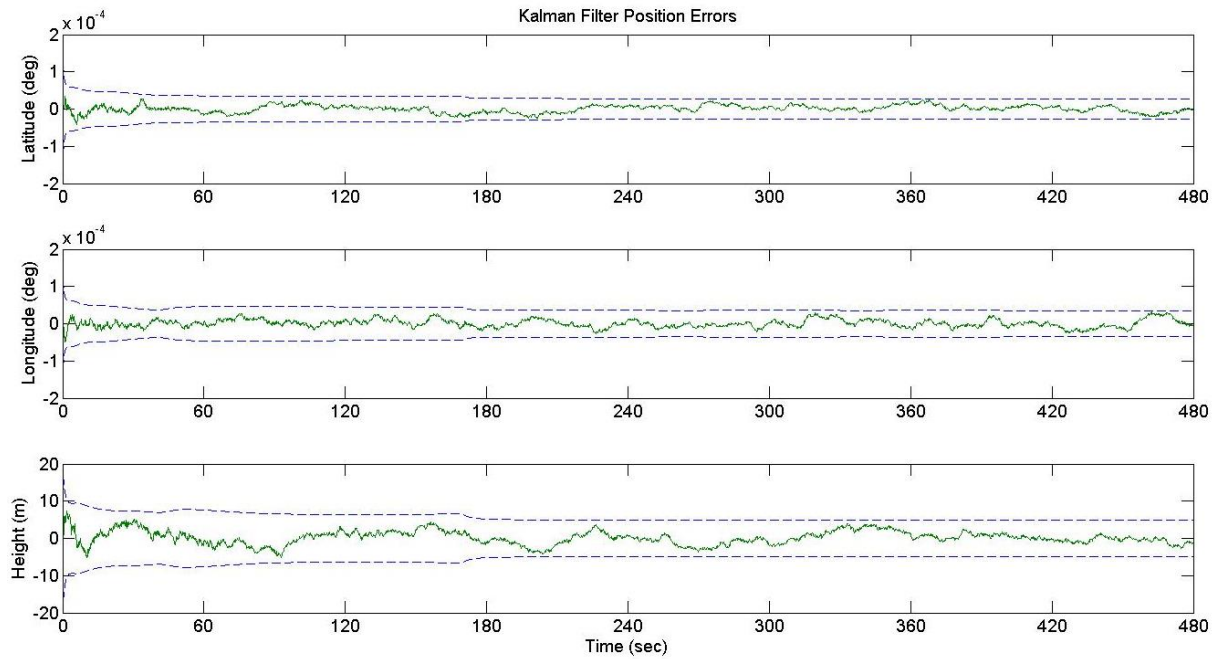
ในรูปที่ 6.26-6.31 แสดงถึงค่าความผิดพลาดของตัวแปรสถานะอย่างละ 3 ตัว โดยเส้นประแสดงถึง ± 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน หรือ square root ของค่าความแปรปรวน ซึ่งจะแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงที่น่าจะเป็นไปได้เมื่อกระบวนการของสัญญาณรบกวนเป็นแบบ Gaussian และ ค่าความผิดพลาด และ ค่า ± 3 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของ GPS คือค่า Latitude, Longitude, Height นั้นถูกแสดงในรูปที่ 5.38 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างน้อยสำหรับ Latitude และ Longitude ส่วนค่า Height จะอยู่ในช่วง ± 10 m, ขององศาการหันเห คือค่า Roll, Pitch, Yaw นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.25 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลา อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนแบบ Gaussian, ของความเร็วในการเคลื่อนที่ (V^N) ในทิศ North, East, Down นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.27 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดค่อนข้างน้อยที่อยู่ในช่วง ± 1 m/s, ของ gyro bias นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.28 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากค่าสัญญาณรบกวนที่สูง, ของอัตราส่วนขยายของ gyro นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.29 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่คงที่, ของ accelerometer bias นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.30 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลา เนื่องจากค่าสัญญาณรบกวนที่สูง, ของอัตราส่วนขยายของความเร่ง นั้นถูกแสดงในรูปที่ 6.31 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่คงที่



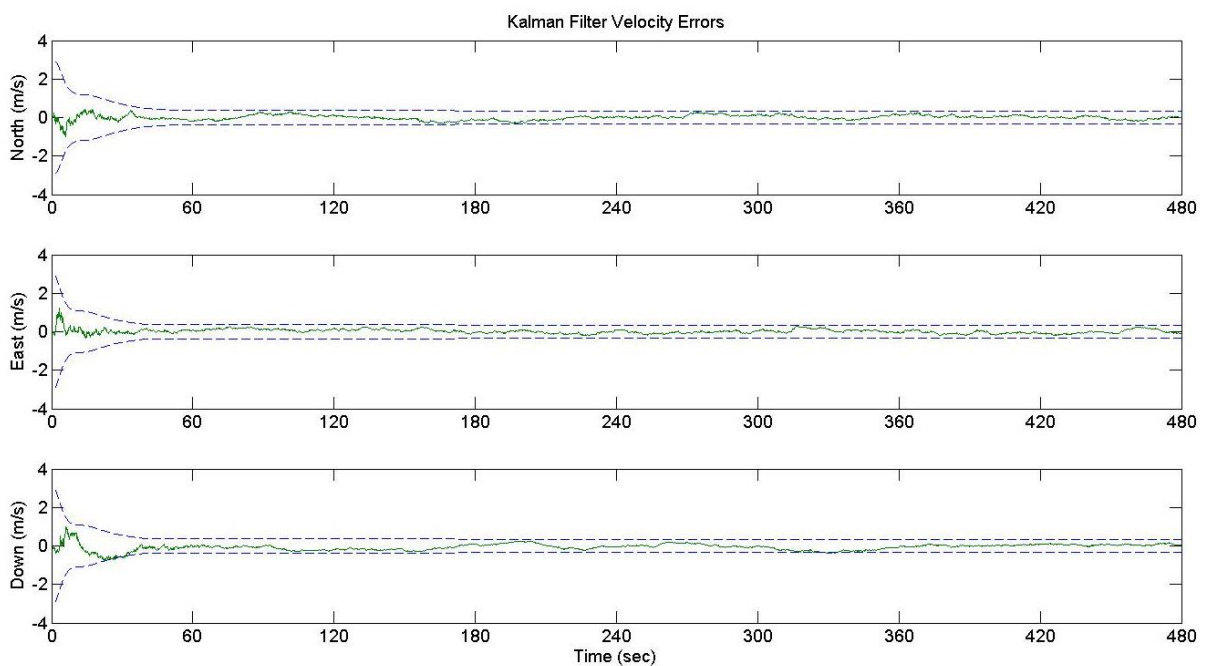
รูปที่ 6.24 ค่าพิกัด GPS ในระบบ NED (หลักด้านซ้าย) และ ค่าความเร่งในแกน x,y,z จาก Accelerometer ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักกลาง) และ ค่าอัตราเร็วเชิงมุมในแกน x,y,z จาก Gyroscope ในพิกัดที่ติดกับเรือ (หลักด้านขวา) โดย ค่าจริงแสดงด้วยสีน้ำเงิน และ ค่าประมาณจาก Extended Kalman Filter แสดงด้วยสีแดง



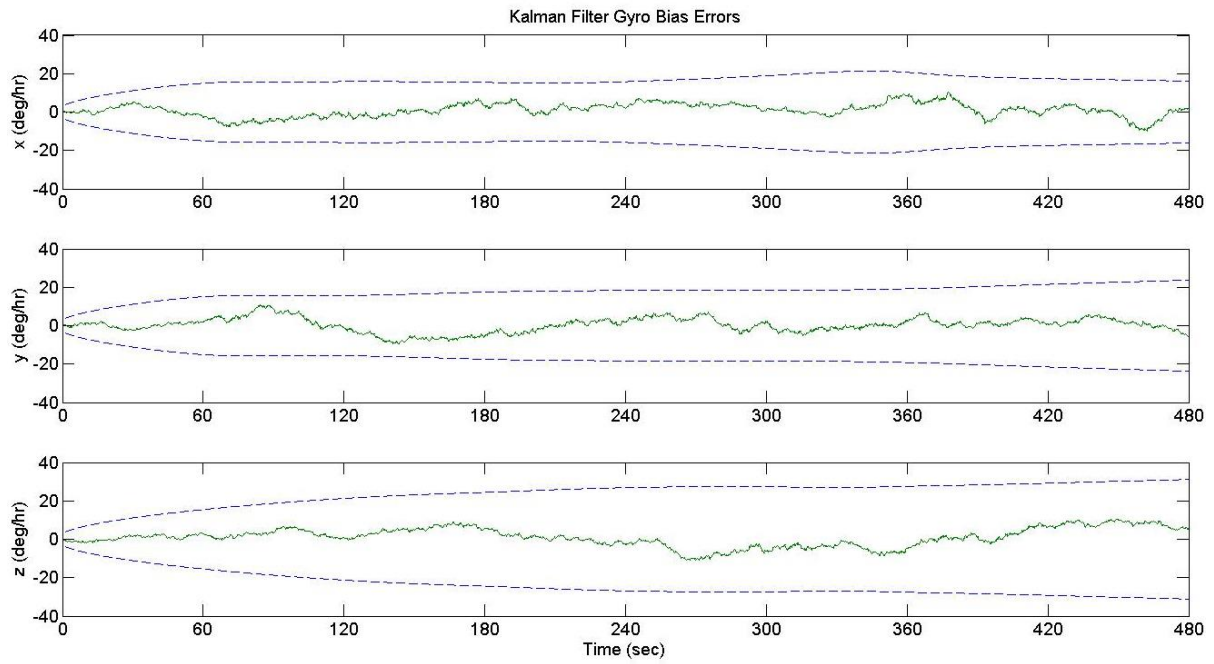
รูปที่ 6.25 ค่าความผิดพลาดขององศาการหันเห (q) Roll, Pitch, Yaw เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter



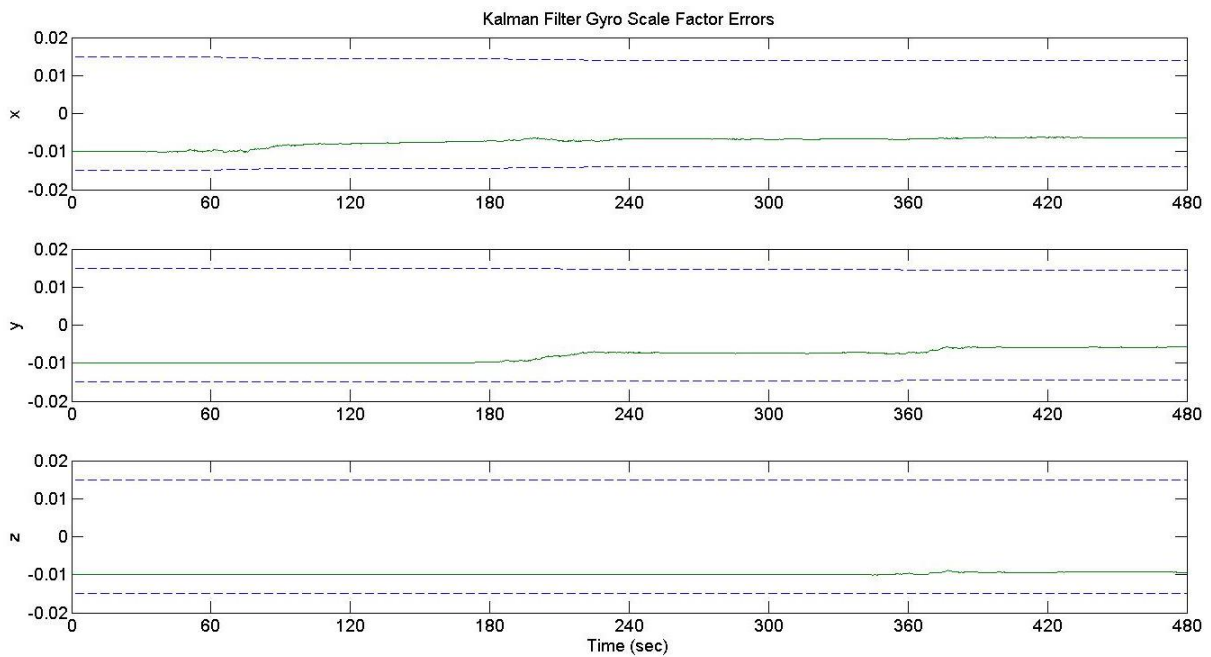
รูปที่ 6.26 ค่าความผิดพลาดของพิกัดตำแหน่ง (p) Latitude, Longitude, Height เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter



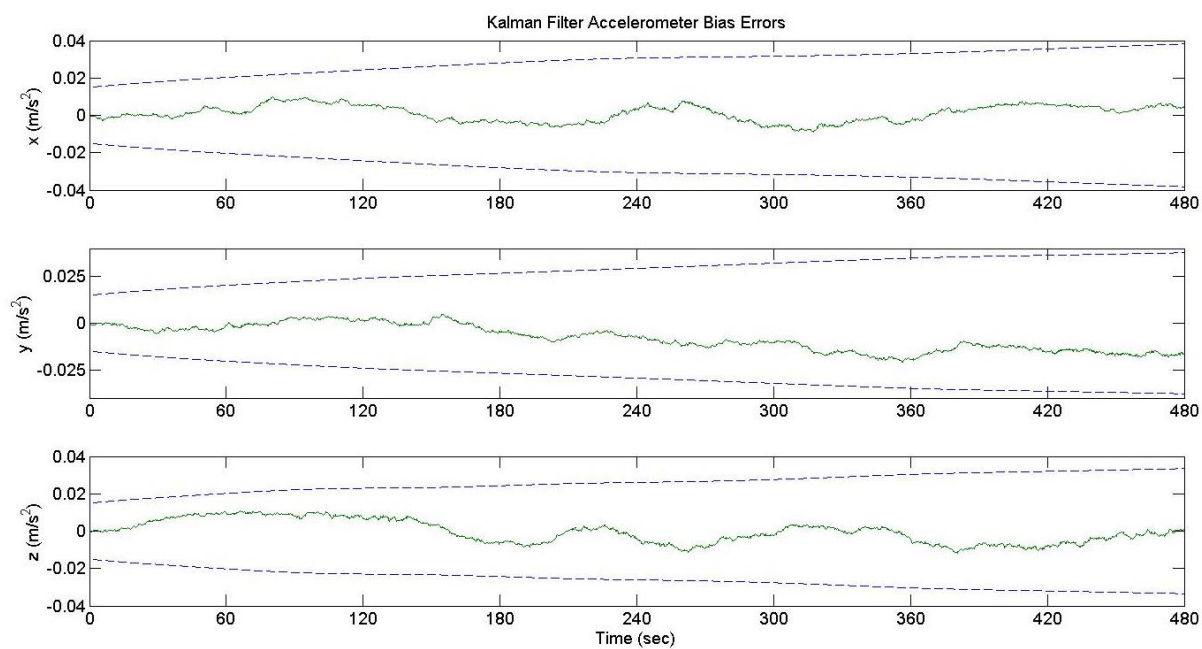
รูปที่ 6.27 ค่าความผิดพลาดของความเร็วในการเคลื่อนที่ (V^N) ในทิศ North, East, Down เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter



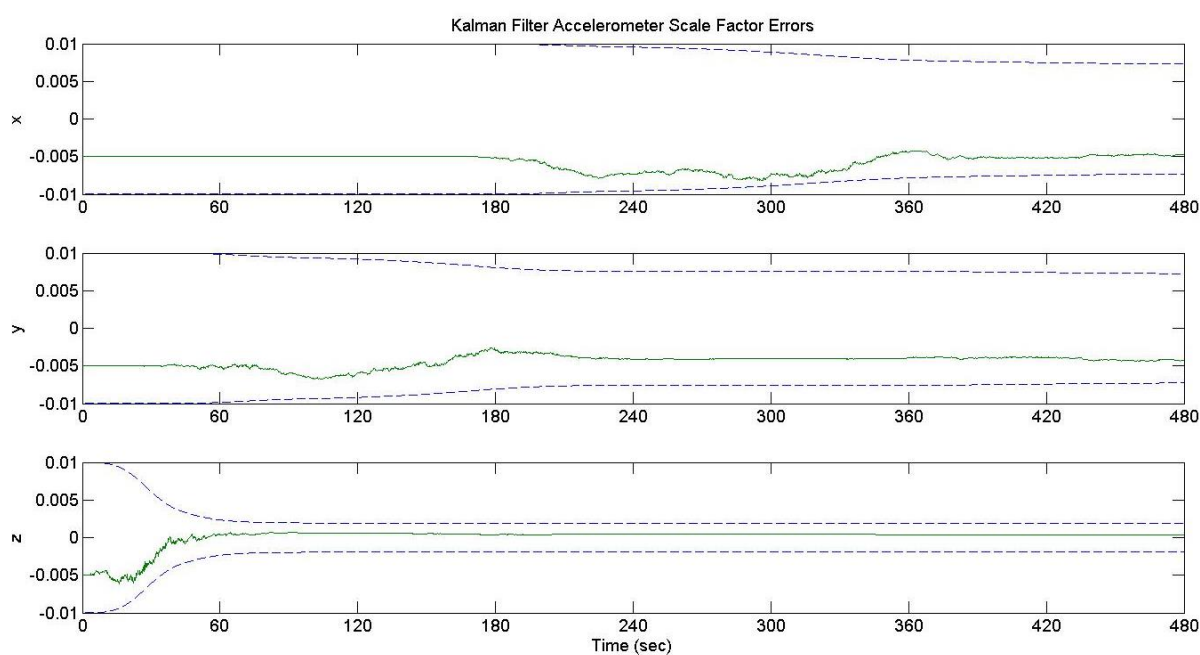
รูปที่ 6.28 ค่าความผิดพลาดของ gyro bias ในสมการที่ (3.16) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter



รูปที่ 6.29 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนขยายของ gyro ในสมการที่ (3.16) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter

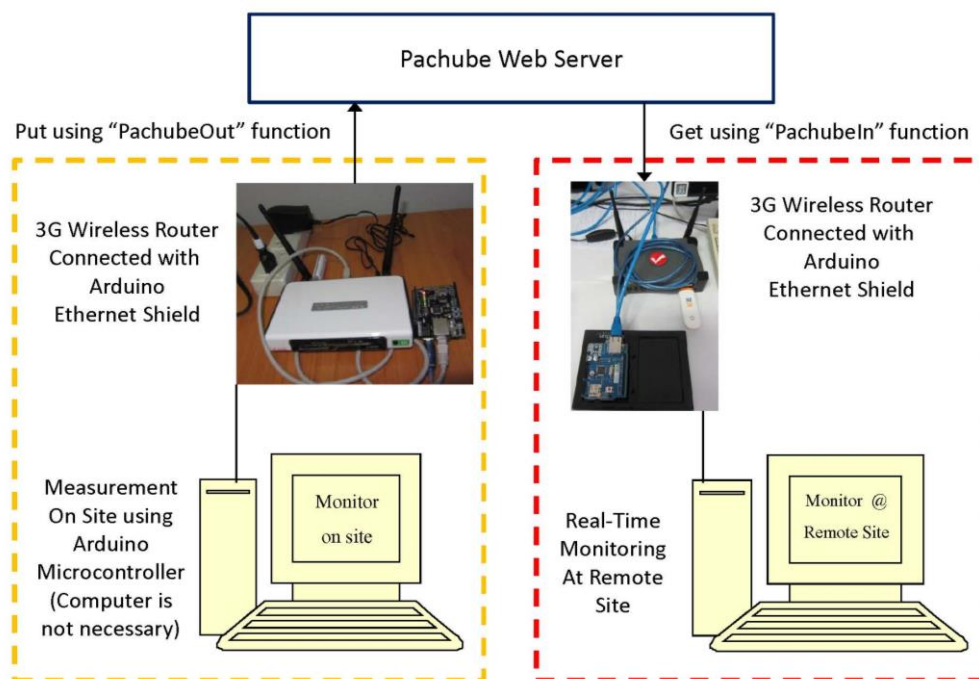


รูปที่ 6.30 ค่าความผิดพลาดของ accelerometer bias ในสมการที่ (3.18) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter



รูปที่ 6.31 ค่าความผิดพลาดของอัตราส่วนขยายของความเร่ง ในสมการที่ (3.18) เมื่อเทียบค่าจริงกับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิค Extended Kalman Filter

6.4 การส่งข้อมูลของคุณภาพน้ำที่วัดได้ผ่าน Pachube Web Server แบบ real time โดยใช้ Ethernet Shield



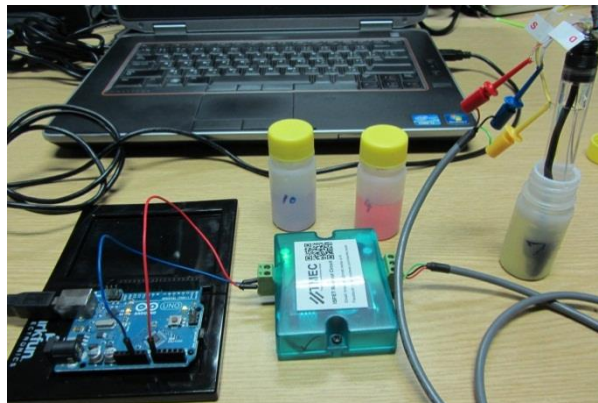
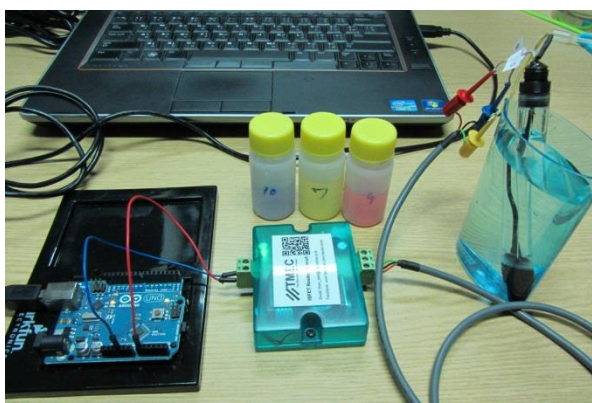
รูปที่ 6.32 การเชื่อมโยง 3G wireless router กับบอร์ด Arduino Ethernet Shield ที่ใช้ร่วมกับ Pachube Web Server เพื่อใช้ส่งข้อมูลจากการวัด ไปรายงานผลยังคอมพิวเตอร์ที่อยู่ระยะไกล (Remote Site)

ในขั้นแรกต้องทำการตั้งค่าอินเทอร์เน็ตในโปรแกรม Arduino ให้ตรงกับในเว็บ Pachube ซึ่งค่าที่ต้องกำหนดนั้นจะมี API key และ feed ID และ ต้องใส่ค่า MAC Address และ ค่า IP Address ในโปรแกรม Arduino ให้ตรงกับ Arduino Ethernet Shield และ 3G wireless Router ตามลำดับ จากนั้นจึงจะสามารถรันโปรแกรมได้ ถ้าหากรันโปรแกรมได้ผ่านสำเร็จทั้งส่วนของฟังก์ชัน PachubeIn และ PachubeOut สำหรับ Arduino Ethernet Shield ในทั้งฝั่งรับและส่งข้อมูลสัญญาณแบบดิจิตอลหรืออนาล็อก ดังแสดงในรูปที่ 5.45 การแสดงผลในโปรแกรมจะแสดงค่าออกมาทางหน้าต่าง output ที่รายงานผลจากพอร์ตอนุกรม โดยโปรแกรมจะทำการเช็คทุกครั้งที่ยายงานข้อมูลว่าข้อมูลที่รับและส่งนั้นสมบูรณ์หรือไม่ ถ้าสมบูรณ์จะแสดงค่า Status code = 200 โดยอัตราเร็วในการส่งและรับข้อมูลผ่านทาง Pachube Web Server นั้นจะใช้เวลาโดยเฉลี่ยประมาณ 2-3 วินาที ในการ update ข้อมูลในแต่ละครั้ง

ในขั้นที่สองได้ทำการทดลองส่งค่า analog จาก Voltage Reader ที่เชื่อมต่อกับ Potentiometer ซึ่งวัดโดยบอร์ด Arduino ไปยัง Pachube Web Server เพื่อที่จะแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่า analog ที่แตกต่างไปจากเดิม เมื่อเราสามารถหมุนปรับค่า Potentiometer ไปตามที่ต้องการ และสามารถสังเกตอัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลและการ update ข้อมูลไปยัง Pachube Web Server และ ในทำนองเดียวกันจะทำการสังเกตอัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลจาก Pachube Web Server มายัง Arduino Ethernet Shield ด้วย

6.4.1 การทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ชนิด ISFET

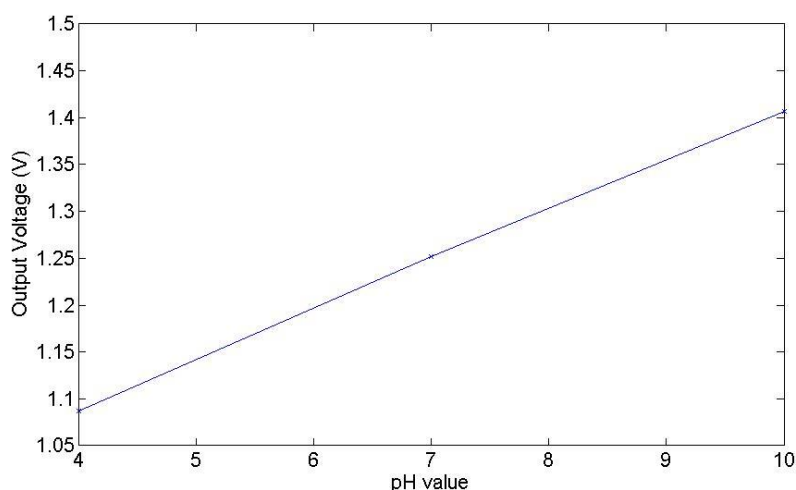
ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ชนิด ISFET เพื่อวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายมาตรฐานที่ได้เตรียมขึ้นจากสารเคมีที่รู้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างที่แน่นอนสามค่า คือ เป็นกรด ($\text{pH} = 4$), เป็นกลาง ($\text{pH} = 7$), เป็นด่าง ($\text{pH} = 10$) หลังจากที่ได้จุ่มเซนเซอร์ ISFET ลงในสารละลายแต่ละชนิดต้องทำการล้างสารละลายที่ตกค้างด้วยน้ำสะอาดก่อนนำไปจุ่มลงในสารละลายชนิดต่อไป และได้ใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม processing เพื่อแสดงค่าความเป็นกรดเป็นด่างแบบ real time บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ จากรูปที่ 6.33 แสดงการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างด้วยเซนเซอร์ชนิด ISFET ซึ่งผลที่อ่านได้มีค่าแม่นยำตรงตามค่า pH ของสารละลายแต่ละชนิด ในรูปที่ 6.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิด ISFET กับค่า pH เพื่อใช้ช่วยในการแปลงค่าในโปรแกรมของบอร์ด Arduino



รูปที่ 6.33 การทดสอบเซนเซอร์ชนิด ISFET เพื่อใช้ในการวัดค่าความเป็นกรดเป็นด่างผ่านบอร์ด Arduino



รูปที่ 6.34 การวัดค่า pH ด้วยเซนเซอร์ชนิด ISFET ของสารละลายสามชนิดที่มีค่า $\text{pH} = 4, 7, 10$



รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่วัดได้จากเซนเซอร์ชนิด ISFET กับค่า pH

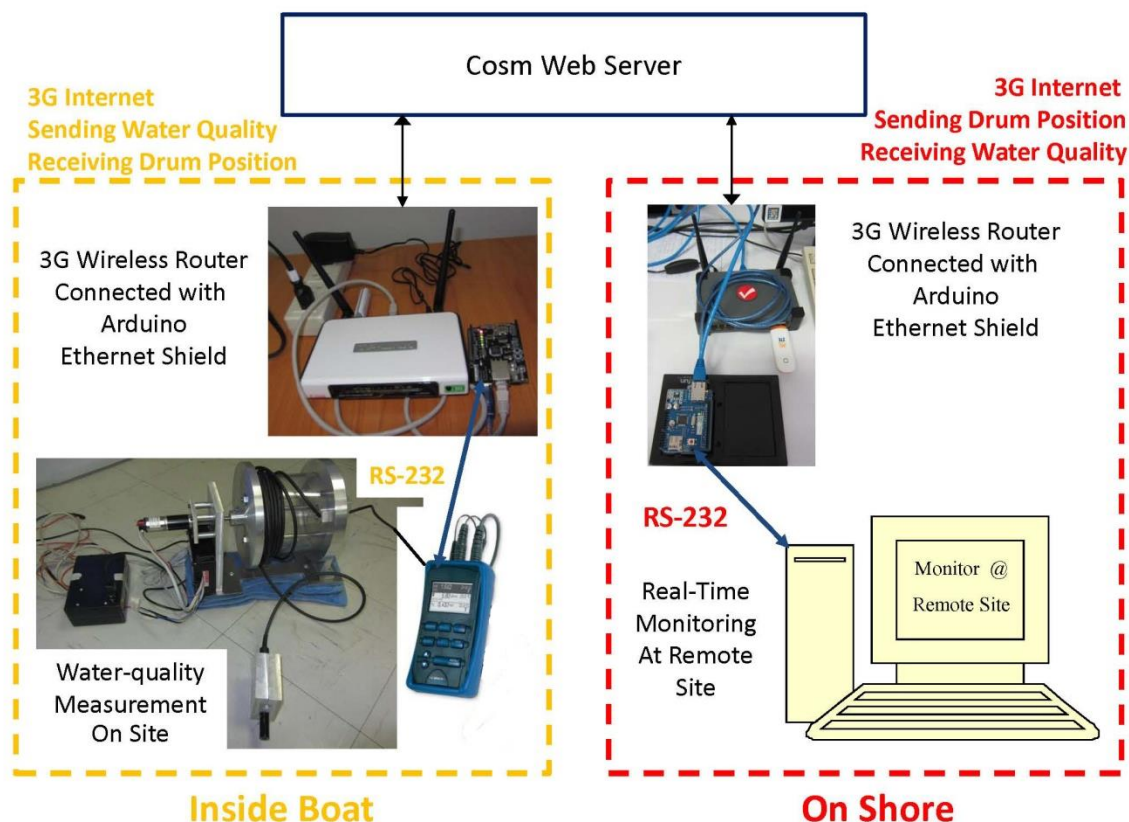
6.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการส่งข้อมูลคุณภาพน้ำของเซนเซอร์ชนิด ISFET ผ่าน 3G Router และ Arduino Ethernet Shield

มากไปกว่านั้นเมื่อทราบค่าจากการ calibrate หัววัดพีเอส ดังในรูปที่ 6.35 จะสามารถส่งข้อมูลของแรงดันไฟฟ้าแบบ analog จาก Ethernet Shield สำหรับฝั่งส่งข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 6.36 ไปยัง Pachube Web Server ได้โดยตรง และ จะสามารถนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่รับมาจาก Pachube Web Server ผ่าน Ethernet Shield สำหรับฝั่งรับข้อมูล มาแปลงเป็นค่าพีเอส เพื่อรายงานผลบนหน้าจอบริการคอมพิวเตอร์ได้แบบ real time



รูปที่ 6.36 การส่งข้อมูลคุณภาพน้ำจากเซนเซอร์ชนิด ISFET ผ่าน Pachube Web Server โดยใช้ 3G Router และ Arduino Ethernet Shield

6.4.3 การส่งข้อมูลคุณภาพน้ำของเซนเซอร์ WTW-340 และ การควบคุมการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำระยะไกล ผ่าน Arduino Ethernet Shield ที่เชื่อมต่อกับ 3G Router



รูปที่ 6.37 การรายงานผลข้อมูลคุณภาพน้ำและการควบคุมระยะไกลเครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำระยะไกลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G

จากรูปที่ 6.37 นั้นแสดงการรายงานผลข้อมูลและควบคุมระยะไกล (Remote Site) ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการเชื่อมโยง 3G wireless router กับบอร์ด Arduino Ethernet Shield ที่ติดตั้งภายในเรือ เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลคุณภาพน้ำจากหัววัดคุณภาพน้ำ WTW-340 ที่สามารถวัดค่าอุณหภูมิและค่าความเค็มหรือออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ไปยัง Cosm Web Server และ ในขณะเดียวกันก็จะรับตำแหน่งการหมุนของเครื่องหย่อน จาก Cosm Web Server โดย Cosm ก็จะส่งข้อมูลของคุณภาพน้ำมายังคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนฝั่งผ่านพอร์ตอนุกรม (RS-232) มายังบอร์ด Arduino Ethernet Shield ที่ใช้ร่วมกับ 3G wireless router และคอมพิวเตอร์ที่ชายฝั่งก็จะส่งข้อมูลความลึกที่ต้องการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำเพื่อใช้ส่งการระยะไกลด้วย

เครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำและ 3G wireless router ที่ได้ติดตั้งไว้ที่หัวเรื่อนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.38 และ 6.39 นั้นจะสามารถหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำได้ลึกมากที่สุดเท่ากับ 5 เมตร โดยมอเตอร์ที่ติดกับเครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำนั้นจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ PID โดยรับคำสั่งความลึกจาก Cosm Web Server โดยในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย 3G จากคอมพิวเตอร์บนฝั่งไปยังมอเตอร์บนเรือหรือจากเครื่องวัดคุณภาพน้ำไปยังคอมพิวเตอร์ที่อยู่บนฝั่ง ในแต่ละครั้งจะมีค่าความหน่วงของเวลาโดนเฉลี่ยประมาณ 6-7 วินาที และ มีความเร็วเฉลี่ยในการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำประมาณ 0.1 m/s



รูปที่ 6.38 การติดตั้งเครื่องหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำและ 3G wireless router เข้ากับเรือคายัค



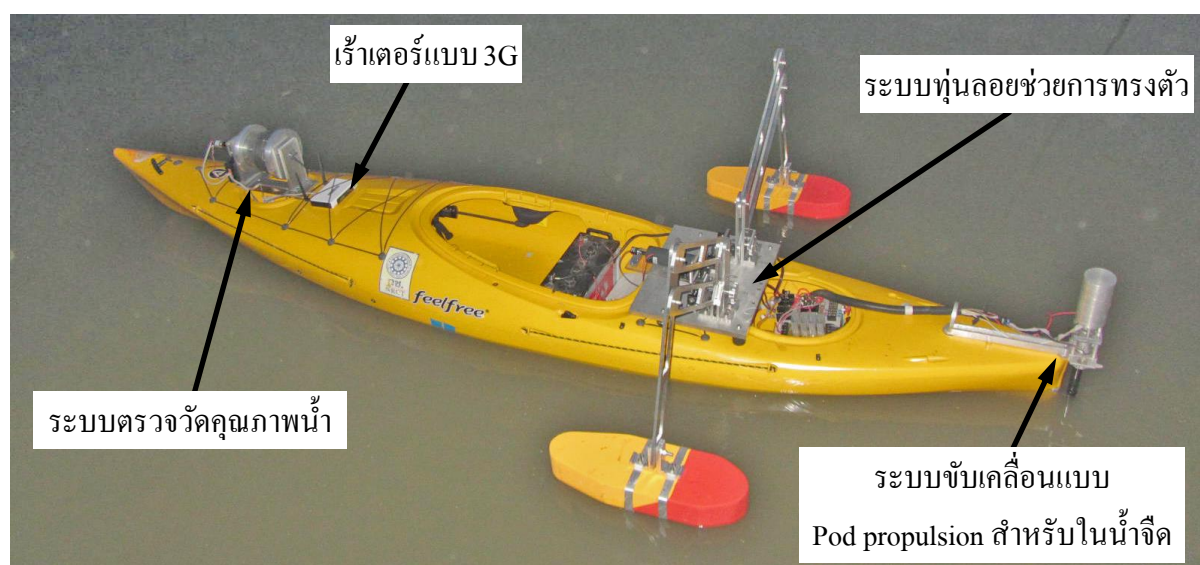
รูปที่ 6.39 การทดสอบการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำจากที่ผิวน้ำไปยังความลึกที่ต้องการ



รูปที่ 6.40 แสดงการควบคุมการหย่อนหัววัดคุณภาพน้ำจากคอมพิวเตอร์ที่ชายฝั่งผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G

7. สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะของโครงการย่อยที่ 2

ในโครงการย่อยที่ 1 นี้จะเน้นการออกแบบและพัฒนาระบบการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ณ เวลาจริง สำหรับเรือคายัค เพื่อจุดประสงค์ในการตรวจวัดคุณภาพน้ำให้เป็นไปได้อย่างสะดวกรวดเร็ว โดยไม่ต้องส่งผู้ปฏิบัติการลงไปพร้อมกับเรือ และสามารถรายงานข้อมูลของคุณภาพน้ำมาสู่ผู้ปฏิบัติการผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G เวลาจริง ดังนั้นผู้ปฏิบัติการที่ออกไปดำเนินการในภาคสนามทั้งในน้ำจืดและน้ำทะเลนั้น จะใช้เพียง 3-4 คน เท่านั้นในการขนย้ายและประกอบติดตั้งเพียงเท่านั้น และเพิ่มการบูรณาการของข้อมูล เซนเซอร์ GPS และ IMU เพื่อให้ได้ระบบนำร่องที่ราคาน้อยกว่าเดิม ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าในโครงการนี้ จำเป็นต้องใช้การบูรณาการของเทคโนโลยีในหลายๆด้านเข้าด้วยกัน



รูปที่ 7.1 ภาพรวมของระบบทั้งหมดที่ได้ติดตั้งกับเรือคายัค

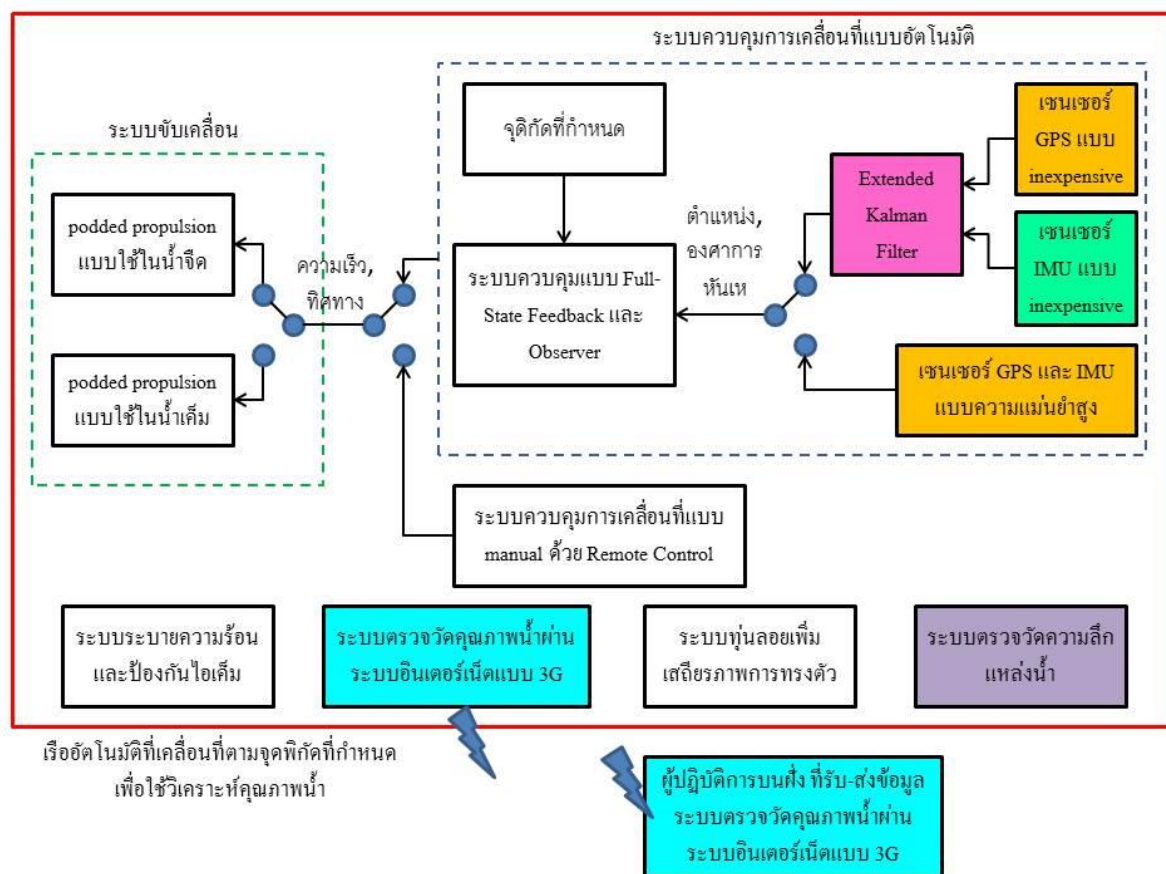
ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเซนเซอร์ที่ใช้และระบบต่างของเรือในโครงการย่อยที่ 2

ขนาด : กว้าง x ยาว	0.68 x 3.85 เมตร
กินน้ำลึก	0.60 เมตร
น้ำหนักเรือเปล่า	18.5 กิโลกรัม
น้ำหนักบรรทุก	100 กิโลกรัม
ความเร็วเฉลี่ย	7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำ	WTW-Multi 340i (อุณหภูมิ ความเค็ม หรือ ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ) และ ISFET (ความเป็นกรด-ด่าง)
เซนเซอร์นำร่อง	GPS EM-406 A และ Pololu - MiniIMU-9 DOF
ระบบสื่อสาร	อินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย และ อินเทอร์เน็ตบนเครือข่าย 3G

ในการสร้างและพัฒนาปรับปรุงระบบโดยรวมของเรืออัตโนมัติในโครงการย่อยที่ 2 จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.2 ที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ คือ

1. ระบบนำร่องของเรือที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์ GPS ที่ให้ค่าพิกัดตำแหน่ง เข้ากับ ข้อมูลจากเซนเซอร์ Accelerometer ที่ให้ค่าความเร่งและเซนเซอร์ Gyroscope ที่ให้ค่า อัตราเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ โดยใช้เทคนิค Extended Kalman Filter เพื่อให้ได้ค่าประมาณของ ตำแหน่งและองศาการหันเหของหัวเรือและความเร็วในการเคลื่อนที่ๆจะใช้สำหรับควบคุมทิศทางการ เคลื่อนที่ของเรือคายัคแบบอัตโนมัติ
2. ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำ โดยสามารถวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ค่าความเค็มของน้ำ หรือ ค่า ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จากจุดพิกัดต่างๆที่ต้องการ และ ที่ระดับความลึกที่ไม่เกิน 5 เมตร โดยข้อมูลคุณภาพน้ำที่ได้นี้จะถูกส่งผ่านระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ตแบบ 3G ไปยัง Web Server หรือ คอมพิวเตอร์ของผู้ปฏิบัติการ ได้แบบ ณ เวลาจริง (real time) ในพื้นที่ๆครอบคลุมด้วยระบบ เครือข่ายมือถือแบบ 3G โดยจะมีค่าเวลาหน่วงโดยเฉลี่ยประมาณ 6 วินาที

ระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ที่ใช้งานบนเรือนี การตรวจวัดคุณภาพน้ำ จะสามารถปล่อยหัววัดคุณภาพน้ำไปยังความลึกที่กำหนด โดยจะมีการจัดเก็บสายไฟฟ้าของหัววัดคุณภาพน้ำ เพื่อป้องกันการพันกันของสายไฟระหว่างการใช้งาน ระบบที่มีความสามารถที่จะช่วยบรรเทาและลดภาระงาน ของนักวิทยาศาสตร์ นอกเหนือจากระบบตรวจวัดคุณภาพน้ำที่ติดไปกับเรือแล้ว ประโยชน์การใช้งานของเรือ คายัคนี้ก็ได้จำกัดเพียงการตรวจวัดคุณภาพน้ำเพียงอย่างเดียว อุปกรณ์เสริมที่ติดกับเรือนั้นจะรวมถึง เครื่องวัดแบบคลื่นเสียง (echo sounder) เพื่อใช้ในการวัดความลึกของร่องน้ำ โดยจะนำข้อมูลที่ได้จะมีประ โยชน์ใช้ช่วยในการคำนวณหาปริมาตรรวมของแหล่งน้ำต่างๆจากการประมวลผลภายหลังได้



รูปที่ 7.2 แผนภาพรวมของระบบต่างๆทั้งหมดของเรือคายัคสำหรับโครงการย่อยที่ 2 (เฉพาะที่มีสี่)

คณะผู้วิจัยมีความประสงค์จะนำเรืออัตโนมัตินี้ไปประยุกต์ใช้ร่วมกับหุ่นยนต์ดำน้ำขนาดเล็กที่สามารถติดตั้งไปกับเรือคายัคได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการเก็บข้อมูลคุณภาพน้ำหรือเพื่อช่วยลงไปสำรวจสภาพแวดล้อมใต้น้ำ โดยการถ่ายภาพใต้น้ำทั้งในแหล่งน้ำที่เป็นน้ำจืดหรือน้ำเค็มก็ได้ และ ส่งข้อมูลภาพมาในรูปแบบ real-time สำหรับการสำรวจบริเวณผิวน้ำที่ลึกนั้นจะกระทำโดยผ่านการควบคุมระยะไกลจากผู้ปฏิบัติการที่อยู่บนเรือเองหรือที่อยู่บนฝั่งผ่านสายที่เชื่อมต่อระหว่างเรือและหุ่นยนต์ดำน้ำขนาดเล็กนี้

8. บรรณานุกรมของโครงการย่อยที่ 2

1. Ahmad M.R., Khan N., Hoong C.C., Abas N. "Remote data acquisition through Internet based telemetry", *Student Conference on Research and Development 2003. Proceedings.* pp. 237-244, 2003
2. Allerton D.J. and Jia H. "Distributed data fusion algorithms for inertial network systems", *Radar, Sonar & Navigation, IET*, Vol. 2, Issue 1, pages 51-62, 2008.
3. Bennoch C.J., Judd M.D., Pearson J.S. "System for On-line Monitoring of Pollution Levels on Solid Insulator", *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 237-240, April 2002.
4. Bourgeois, B.; Harris, M. "ORCA's oceanographic sensor suite" *OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment.Conference Proceedings.*, Vol. 1, pages 655-662, 1995.
5. Bomben S., Sedding H.G., Rizzetto S. "Assessment of Station Cable Condition Using Wireless Telemetry and Diagnostic Tests", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 8, No. 4, pp. 24-29, 2002.
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. Caron F., Duflos E., Pomorski D. and Vanheeghe P. "GPS/IMU data fusion using multisensory Kalman filtering: introduction of contextual aspects", *Journal Information Fusion*, Vol. 7, Issue 2, pages 221-230, 2006.
8. Kim J. and Sukkarieh S. and Wishart S. "Real-time Navigation, Guidance and Control of a UAV using Low-cost Sensors". In *International Conference of Field and Service Robotics (FSR'03)*, pages 95-100, Yamanashi, Japan, July 2003.
9. Kleinbauer R. "Kalman Filtering Implementation with Matlab", Study Report in the Field of Study Geodesy and Geoinformatics at Universität Stuttgart, November 2004.
10. Ning A. and Yu A. "A Monitoring System for Water Quality" *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, pages 4615-4617, 2010.
11. Stover J., Hall D. and Gibson R. "A fuzzy-logic architecture for autonomous multisensory data fusion", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 43, pp. 403-410, 1996.
12. Suranthiran S. and Jayasuriya S. "Optimal Fusion of Multiple Nonlinear Sensor Data", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 651-663, 2004.
13. "เซนเซอร์วัดคุณภาพน้ำ WTW รุ่น Multi 340i". [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้ จาก : <http://www.aquamerik.com/catalogue/produits.cgi%3Fcategory%3Danalyseeau>
14. "เซนเซอร์วัดความลึกแหล่งน้ำ Echo Sounder รุ่น Garmin 421s". [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้ จาก : http://www.fishfinder-gps.com/product.detail_93588_th_2666523

15. “เซนเซอร์พีเอชชนิด ISFET”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้จาก : <http://tmecl.nectec.or.th/products/index/lang/th>
16. “บอร์ด Arduino MEGA 2560” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 24 มกราคม 2555) เข้าถึงได้จาก : <http://www.sparkfun.com/products/11061> หรือ http://www.warf.com/view.Arduino_Mega_2560_R3-6615.html
17. “บอร์ด Netduino Plus” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้จาก : <http://www.sparkfun.com/products/10186> หรือ http://www.warf.com/view.Netduino_Plus-4456.html
18. “อุปกรณ์เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต Arduino Ethernet Shield” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้จาก : <https://www.sparkfun.com/products/9026>
19. “เซนเซอร์วัดมุมเอียงและวัดความเร่ง IMU 6DOF Razor”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม) เข้าถึงได้จาก : <http://www.sparkfun.com/products/10010>
20. “เซนเซอร์วัดมุมเอียงและวัดความเร่ง MinIMU-9 Gyro, Accelerometer, and Compass”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 21 เมษายน 2555) เข้าถึงได้จาก : <http://www.pololu.com/catalog/product/1265>
21. “เซนเซอร์เข็มทิศแบบดิจิตอล HMC6343”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : http://www.warf.com/view.Compass_Module_with_Tilt_Compensation_HMC6343-502.html
22. “เซนเซอร์ GPS EM-406A”. [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : http://www.warf.com/view.20_Channel_EM-406A_SiRF_III_Receiver_with_Antenna-51.html
23. “Real time web server : Pachube” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2555) เข้าถึงได้จาก : www.pachube.com
24. “Topcon GPS รุ่น Hiper GA จาก บริษัท Topcon Position Systems Inc.” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : <http://www.topconpositioning.com/products/gps/receivers/hiper-ga>
25. “IMU ของ Micro-Strain รุ่น 3DM-GX2 จาก บริษัท MicroStrain Inc.” [ออนไลน์] (สืบค้นเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม 2554) เข้าถึงได้จาก : <http://www.microstrain.com>