

การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิววัตถุสำหรับติดตั้ง
บนเรือ

PERFORMANCE ENHANCEMENT OF LASER SCANNER FOR 3D
SURFACE RECONSTRUCTION FOR INSTALLATION ON BOAT

ธนพงษ์ อุสุพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิววัตถุสำหรับ
ติดตั้งบนเรือ


ธนพงษ์ อุตพันธ์


วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิววัตถุแบบ
สามมิติสำหรับติดตั้งบนเรือ
Performance Enhancement of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction
for Installation on Boat

ชื่อ - นามสกุล นายธนพงษ์ อุตพันธุ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

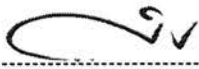
 ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.)

 กรรมการ
(อาจารย์รุ่ง เอกะวิภาต, Ph.D.)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 14 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิววัตถุแบบสามมิติสำหรับติดตั้งบนเรือ
ชื่อ - นามสกุล	นายธนพงษ์ อุตุพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิววัตถุแบบสามมิติสำหรับติดตั้งบนเรือ เนื่องจากเลเซอร์สแกนเนอร์นั้นให้ข้อมูลระยะทางตามแนวแกนรัศมีในระนาบเดียว เพื่อให้ได้ข้อมูลของกลุ่มจุดในแบบสามมิติจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาระบบการสแกนภาพในระนาบแนวตั้ง ที่สามารถปรับองศาการก้ม-เงย ด้วยระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง พร้อมกับระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา ของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้ โดยใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียงในการส่งค่าป้อนกลับ ไปควบคุมมอเตอร์ตัวที่สองให้หมุนปรับแก่งศา

การคำนวณและการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) การคำนวณหาแรงบิดมอเตอร์ทั้งสองตัวที่จำเป็น สำหรับระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงและระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink 2) การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้คำสั่งจากองศาการก้ม-เงย สำหรับระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง และการควบคุมแบบพีไอดีที่ป้อนกลับด้วยองศาการก้ม-เงยสำหรับระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา 3) การวัดระยะทางของกลุ่มจุดในสามมิติจากข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์

กลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงสามารถปรับให้เลเซอร์สแกนเนอร์มีองศาการหมุนแบบก้ม-เงย ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ ตามที่ออกแบบไว้ ระบบควบคุมป้อนไปข้างหน้ามีความเร็วรอบคงที่ $13.2^\circ/\text{วินาที}$ ส่วนระบบควบคุมพีไอดีสามารถหมุนปรับแก่งศาการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ อยู่ในช่วงที่น้อยกว่า $\pm 60^\circ$ ด้วยความเร็วรอบ $22.5^\circ/\text{วินาที}$ และการทดสอบความแม่นยำการสร้างพื้นผิวของข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติ มีค่าความผิดพลาด อยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร หรือ $\pm 2\%$

คำสำคัญ : เลเซอร์สแกนเนอร์ สร้างพื้นผิววัตถุแบบสามมิติ กลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา ระบบควบคุมป้อนไปข้างหน้า ระบบควบคุมพีไอดี

Thesis Title	Performance Enhancement of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction for Installation on Boat
Name - Surname	Mr. Thanapong Usupan
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pradya Prempraneerach, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

This research presents an enhancement of laser scanner performance for 3D surface reconstruction for installation on a boat. Because laser scanner provides only radial distances on the horizontal plane. To obtain three-dimensional point-cloud data, vertical surface scanning system was designed and developed such that a pitch-angle of laser scanner can be adjusted using a four-bar linkage mechanism, driven by the first motor. As well as a roll-stabilizing system of laser-scanner point-cloud data with a roll-angle feedback from IMU can be controlled by the second motor. As a result, point-cloud data is constrained on the horizontal plane.

Experimental tests are divided into three parts: 1) two-motor torque requirement calculations for the four-bar linkage mechanism and roll-stabilization systems using a mathematical model in MATLAB/Simulink, 2) a feed-forward control using the pitch-angle as a command for the four-bar linkage mechanism system and a PID control using the roll-angle as a feedback command for the roll-stabilization system, 3) 3D point-cloud distance measurement from the laser scanner.

The four-bar linkage mechanism can adjust the pitch-angle of the laser scanner within $\pm 16.5^\circ$ range, as designed. The feed-forward control system can maintain a constant angular velocity at $13.2^\circ/\text{second}$. The PID control system can correct the roll-angle of the laser scanner within smaller $\pm 60^\circ$ range with response of $22.5^\circ/\text{second}$. Accuracy test of 3D point-cloud surface reconstruction has distance error of reconstructed surface within ± 7 centimeter or $\pm 2\%$.

Keywords : laser scanner, 3D surface reconstruction, four-bar linkage mechanism, roll-stabilizing system, feed-forward control system, PID control system

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ข้อเสนอแนะ และให้แนวทางในการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิจัย รวมทั้งให้อุปกรณ์จำเป็นสำหรับ ใช้ประกอบการวิจัย และที่สำคัญคือให้ความดูแลและสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา จนทำให้ผู้เขียนมีกำลังใจทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ดร.รุจ เอกะวิภาต ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย พร้อมทั้งยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้วิจัยให้สามารถทำวิจัยได้อย่างราบรื่น รวมถึงสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาสำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ (โครงการวิจัยเรื่องเรือลาดตระเวนแบบสองท่อนควมระยะไกลเพื่อช่วยตรวจจับวัตถุต้องสงสัยด้วยภาพ ประจำปีงบประมาณ 2559)

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครูอาจารย์ ญาติพี่น้อง และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจ และช่วยเหลือจนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธนพงษ์ อุสุพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	13
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 งานวิจัยหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์.....	15
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
2.3 ระบบควบคุม (Control System).....	26
2.4 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control).....	30
2.5 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller).....	30
2.6 หลักการทำงานของซิมมูลิงโดยใช้สมการแมทแลบ (MATLAB/Simulink).....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	36
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	36
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	37
3.3 การหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model).....	37
3.4 การควบคุมมอเตอร์.....	44
3.5 ระบบไอเอ็มยู (IMU : Inertial Measurement Unit).....	45
3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาคูอินโน (Arduino Microcontroller).....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner)	47
3.8 มอเตอร์เกียร์ และมอเตอร์เกียร์แบบมีเอ็นโค้ดเดอร์	47
บทที่ 4 ผลการทดลอง	49
4.1 การทดสอบการหาแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสองตัวด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูแลชัน ...	49
4.2 ทดสอบระบบกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้าน โยงและระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา	50
4.3 ทดสอบวัฏระยะทางกลุ่มจุดในสามมิติของข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	66
5.1 สรุปผลการทดลอง	66
5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา	67
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก แสดงวิธีคำนวณการหาสมการพลาศาสตร์ของหุ่นยนต์	73
ภาคผนวก ข แบบชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพ	83
ภาคผนวก ค แบบตอบรับตีพิมพ์ในวารสารและรายละเอียด	89
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองของตัวแปร	33
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	36
ตารางที่ 3.2 แสดง D-H Table พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แบบสองแกนในงานวิจัย.....	39
ตารางที่ 4.1 ผลการประมวลค่าความแม่นยำของความกว้างของผนัง (W) จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่ม จุดในสามมิติที่ประเมินจากค่าเฉลี่ยของความกว้าง หรือ Mean (W) และ ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานของ ความกว้าง หรือ Std (W) จากการทดสอบ 3 ครั้ง.....	60



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	เรือผิวน้ำอัตโนมัติสำหรับสำรวจคุณภาพน้ำ (Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference)	13
รูปที่ 2.1	เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรือที่ใช้สำรวจ	15
รูปที่ 2.2	แบบจำลองที่แสดง Coordinate frames adopted	16
รูปที่ 2.3	ระบบส่งสัญญาณการควบคุมระบบของแผ่นรักษาความเสถียร	16
รูปที่ 2.4	การเปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติกับสภาวะที่มีตัวควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพ	17
รูปที่ 2.5	การติดตั้งระบบ Ball on Beam	18
รูปที่ 2.6	โครงสร้างหุ่นยนต์กระพ้อปีก	18
รูปที่ 2.7	เรือผิวน้ำอัตโนมัติที่ใช้ Laser Scanner และ MOOS IvP ในการควบคุม	19
รูปที่ 2.8	UGV ที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้เก็บข้อมูลรอบเมืองในรูปแบบ 3D	19
รูปที่ 2.9	ช่วงมุมมองในการส่งถ่ายแรง γ	20
รูปที่ 2.10	การหมุนเฟรมรอบแกน z	21
รูปที่ 2.11	การหมุนเฟรมรอบแกน y	22
รูปที่ 2.12	การหมุนเฟรมรอบแกน x	22
รูปที่ 2.13	พารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก	23
รูปที่ 2.14	ส่วนประกอบของระบบควบคุม	27
รูปที่ 2.15	ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด	28
รูปที่ 2.16	ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด	29
รูปที่ 2.17	ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	29
รูปที่ 2.18	การควบคุมดีซีเซอร์โวมอเตอร์	29
รูปที่ 2.19	โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า	30
รูปที่ 2.20	การควบคุมแบบพีไอดี	31
รูปที่ 2.21	การควบคุมแบบป้อนกลับ	31
รูปที่ 2.22	ระบบ Simulink	34
รูปที่ 2.23	ระบบ Simulink ให้อยู่ในรูป Subsystem	34
รูปที่ 2.24	ผลที่ได้จากการทำ Simulink	35
รูปที่ 3.1	อุปกรณ์สำหรับงานวิจัยที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS	37

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.2	รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งมอเตอร์แบบสองแกน.....	38
รูปที่ 3.3	การตั้งแกนหุ่นยนต์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก.....	39
รูปที่ 3.4	พิกัดการหมุนและก้านโยงของหุ่นยนต์ในงานวิจัย.....	42
รูปที่ 3.5	สมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยโปรแกรมเมทแลบซิมมูลิงค์	42
รูปที่ 3.6	วิเคราะห์ชุดกลไกสี่ก้านโยงด้วยโปรแกรมเมทแลบ	43
รูปที่ 3.7	องศาการเคลื่อนที่ของชุดกลไกสี่ก้านโยงจากโปรแกรมเมทแลบ	43
รูปที่ 3.8	วงจรการติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวที่ต่อไปยังไมคอนโทรเลอร์	44
รูปที่ 3.9	แผนภาพการควบคุมมอเตอร์ตัวบนด้วยพีไอดี (PID Control).....	44
รูปที่ 3.10	แผนภาพการควบคุมมอเตอร์ตัวล่างด้วยการป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control)....	45
รูปที่ 3.11	เซนเซอร์วัดมุมเชิงแบบ 9 แกน ขนาดเล็ก (MinIMU-9) ของ Pololu.....	46
รูปที่ 3.12	อาคูอินโอ (Arduino DUE : AT91SAM3X8E microcontroller chip).....	46
รูปที่ 3.13	เลเซอร์สแกนเนอร์ Hokuyo UXM-30LXH-EWA	47
รูปที่ 3.14	มอเตอร์เกียร์ 24 VDC 250 RPM พร้อม Encoder 500 P/R และมอเตอร์เกียร์ 24 VDC 168 RPM	48
รูปที่ 4.1	การหาแรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว จากโปรแกรมเมทแลบซิมมูลิงค์.....	49
รูปที่ 4.2	วงจรของระบบกลไกสี่ก้านโยงและระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา	50
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลัสของเอ็นโค้ดเดอร์กับคำสั่งควบคุมมอเตอร์	51
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างองศาแก้ม-งัย และคำสั่งของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า.....	52
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างองศาการกลิ้ง คำสั่งระบบควบคุมแบบพีไอดี และค่าพลัสของเอ็นโค้ด ของระบบรักษาระนาบการเอียงซ้าย-ขวา	53
รูปที่ 4.6	มุมแก้ม-งัย ที่มีระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (ซ้าย) และที่ไม่มีระบบควบคุม (ขวา)..	54
รูปที่ 4.7	มุมกลิ้งของไอเอ็มยู (บน) และมุมกลิ้งของเอ็นโค้ดเดอร์ (ล่าง)	55
รูปที่ 4.8	เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น	56
รูปที่ 4.9	ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมี และกวาดเป็นมุม α	56
รูปที่ 4.10	ระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์เมื่อเทียบกับจุด o_B ที่แผ่นฐานในระนาบ xz	57
รูปที่ 4.11	ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมีและองศาการแก้ม-งัย ในช่วงเวลา 3 วินาที	58
รูปที่ 4.12	สถานที่ใช้ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร	58

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.13	ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติในระนาบ yz เมื่อมองจากด้านหน้า (ซ้าย) และในระนาบ xz เมื่อมองจากด้านข้าง (ขวา) จากการทดสอบครั้งที่ 1	58
รูปที่ 4.14	ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นในพิกัด xyz ของผนังในห้องทดลอง (ก) ทดสอบครั้งที่ 1 (ข) ทดสอบครั้งที่ 2	59
รูปที่ 4.15	ความกว้างผนังที่วัดจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดใน 3 มิติสำหรับการทดสอบ 3 ครั้ง	59
รูปที่ 4.16	ระยะทางของกล่องอลูมิเนียมกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์	60
รูปที่ 4.17	ข้อมูลระยะทางระหว่างกล่องอลูมิเนียมกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์จาก UrgBenriPlus ..	61
รูปที่ 4.18	ระยะทางของกล่องกระดาษที่เจาะรูกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์	61
รูปที่ 4.19	ข้อมูลระยะความกว้างของกล่องกระดาษที่เจาะรู ที่วัดจากโปรแกรม UrgBenriPlus เมื่อจุดปล่อยแสงของเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0)$	62
รูปที่ 4.20	ข้อมูลระยะความกว้างของรูด้านซ้าย ที่วัดจาก โปรแกรม UrgBenriPlus เมื่อจุดปล่อยแสงของเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง $(0, 0)$	62
รูปที่ 4.21	ตำแหน่งที่สแกนของวัตถุ 2 ชนิด ที่วัดด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์	63
รูปที่ 4.22	ข้อมูลระยะห่างของวัตถุ 2 ชนิด คือ กล่องกระดาษและกล่องอลูมิเนียม จากจุดปล่อยแสงของเลเซอร์ ที่วัดโดยโปรแกรม UrgBenriPlus	63
รูปที่ 4.23	พื้นที่ทดสอบการสแกนกล่องสี่เหลี่ยมที่มีการเจาะรู	64
รูปที่ 4.24	ข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติที่ได้จากการเก็บข้อมูลในห้องทดลอง	64
รูปที่ 4.25	ระยะความกว้างของกล่องที่เจาะรูที่แสดงในข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติ	65
รูปที่ 4.26	ระยะความกว้างของรูเจาะบนกล่องที่แสดงในข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติ	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพอากาศของโลกที่เปลี่ยนแปลงไป ภัยพิบัติในรูปแบบต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น รวมไปถึงภัยพิบัติจากเหตุอุทกภัยที่เกิดขึ้นในประเทศไทยมาโดยตลอด เป็นสิ่งกระตุ้นให้หน่วยงานต่างๆ เร่งดำเนินการเพื่อหามาตรการป้องกันที่มี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการเตรียมความพร้อม ได้แก่ การสำรวจเพื่อหยังความลึกและความกว้างของแม่น้ำลำคลองสายต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดการและวางแผนการระบายน้ำ ซึ่งการทราบถึงหน้าตัดของลำน้ำ (Cross Section) ตลอดสายมีความสำคัญอย่างยิ่ง และในการเก็บข้อมูลทางน้ำจะต้องใช้อุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลที่ถูกต้องบนเรือ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) โดยประสิทธิภาพของการติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์บนเรื่อนั้นยังคงมีข้อจำกัดและความผิดพลาดของข้อมูลอยู่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุสำหรับติดตั้งบนเรือขึ้น เพื่อที่จะลดความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ลง สร้างระบบรักษาเสถียรภาพในระนาบการ โคลงและเพิ่มระนาบการสแกนข้อมูลให้มีขอบเขตในการเก็บข้อมูลเพิ่มขึ้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างผิววัตถุสำหรับติดตั้งบนเรือ โดยใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียง หรือ ที่เรียกว่า ไอเอ็มยู ในการวัดค่ามุมองศาต่างๆ จากเลเซอร์สแกนเนอร์ และส่งค่าไปควบคุมมอเตอร์ตัวที่หนึ่งให้หมุนรอบแกนเอ็กซ์ (x) โดยมีมุม $\pm 16.5^\circ$ เพื่อเพิ่มระนาบการเก็บข้อมูล และมอเตอร์ตัวที่สองให้หมุนรอบแกนวาย (y) เพื่อรักษาข้อมูลไม่ให้เกิดการ โคลงจากการเคลื่อนที่ของเรือ โดยการควบคุมมอเตอร์ตัวที่สองนั้นจะใช้หลักการควบคุมแบบพีไอดี เพื่อปรับให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถรักษาสภาพให้อยู่ในแนวระนาบขนานกับผิวโลกตลอดเวลา



รูปที่ 1.1 เรือผิวน้ำอัตโนมัติสำหรับสำรวจคุณภาพน้ำ (Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference) [1]

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบชุดกลไกควบคุมช่วยรักษาเสถียรภาพการโคลงที่เกิดจากเรือ ในแนวแกนที่ 1 ที่ขนานกับหัวเรือ และ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ ในแนวแกนที่ 2 เพื่อให้เลเซอร์กัม-เมย ในแนวตั้ง

1.2.2 ประมวลผลข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติ

1.2.3 ออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ในทั้ง 2 แกน โดยการใช้ ระบบควบคุมแบบพีไอดี สำหรับมอเตอร์ในแนวแกนที่ 1 และ ระบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับมอเตอร์ในแนวแกนที่ 2 เพื่อป้อนกลับองศาการโคลง และ องศาการกัมเมย ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit หรือ IMU)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ออกแบบชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ ให้หมุนรอบแกน y หรือในแนวแกนที่ 2 โดยมีองศาการกัมเมย $\pm 16.5^\circ$ จากระนาบแนวนอน ให้หมุนรอบแกน x หรือในแนวแกนที่ 1 โดยมีองศาเอียงซ้าย-ขวา อยู่ในช่วงน้อยกว่า $\pm 60^\circ$ จากระนาบแนวตั้ง

1.3.2 ใช้เซนเซอร์วัดความเฉื่อย (Inertial Measurement Unit หรือ IMU) ในการป้อนกลับองศาการโคลงและองศาแก้มแยงของการเคลื่อนที่ของชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5 องศา ในทั้งสองแนวแกน

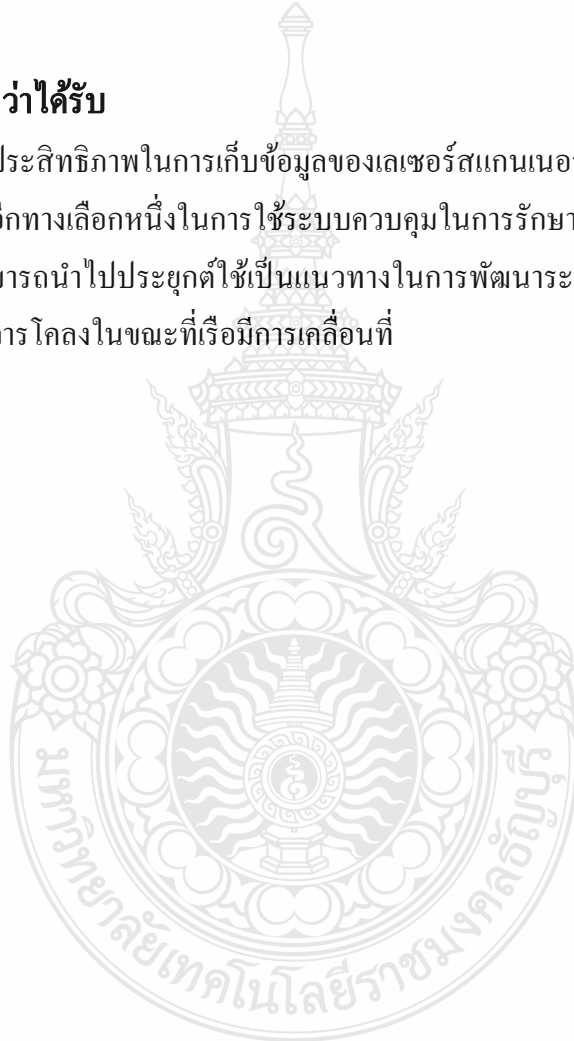
1.3.3 เลเซอร์สแกนเนอร์ตรวจจับวัตถุในระยะไม่เกิน 80 เมตร โดยมีความแม่นยำในการคลาดเคลื่อน ± 5 cm และข้อมูลระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพนั้นมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 10 cm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลของเลเซอร์สแกนเนอร์

1.4.2 เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ระบบควบคุมในการรักษาความเสถียรภาพของข้อมูล

1.4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมเพื่อให้เกิดความเสถียรภาพ ไม่ให้เกิดการโคลงในขณะที่เรือมีการเคลื่อนที่



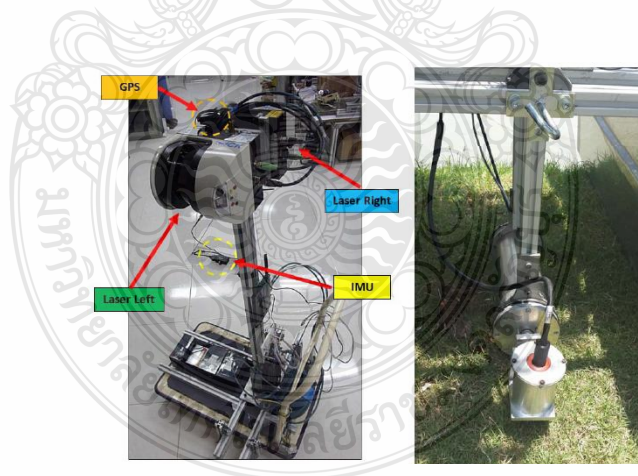
บทที่ 2

งานวิจัยหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุสำหรับติดตั้งบนเรือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วิธีการหาและสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ หลักการทำงานของซิมมูลิง (Simulink) โดยใช้โปรแกรมเมทแลบ (MATLAB) และการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับมอเตอร์ดีซี

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบรักษาเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์

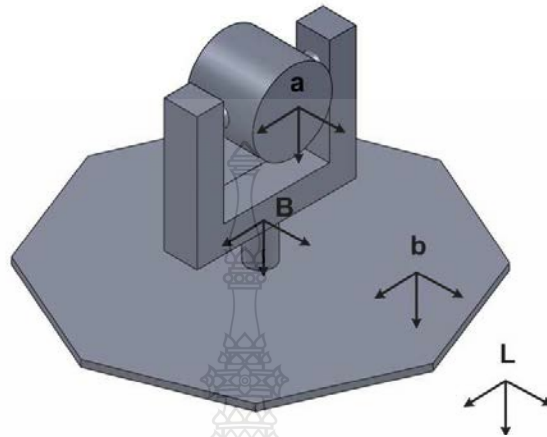
Pradya Prempraneerach และคณะ[2] จาก Mechanical Engineering Department, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand ได้ทำการวิจัยเรื่อง Hydrographical Survey using Point Cloud Data from Laser Scanner and Echo Sounder โดยข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรื่อนั้นยังคงมีข้อจำกัดของข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่เก็บได้ในแนวตั้ง เมื่อเรือปะทะกับคลื่นลมจะทำให้ข้อมูลที่วัดได้เอียงไปทำให้ข้อมูลอาจขาดหายไปบางช่วง และความแม่นยำของข้อมูลนั้นยังขึ้นกับความแม่นยำของเซนเซอร์จีพีเอสในการระบุตำแหน่งอีกด้วย



รูปที่ 2.1 เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรือที่ใช้สำรวจ [2]

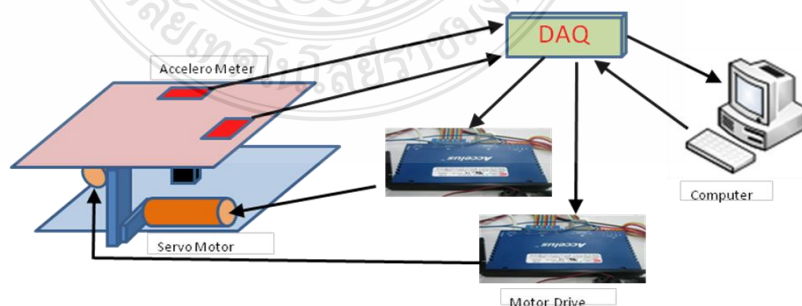
Andrei Battistel และคณะ [3] จาก Department of Electrical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil ได้ทำการวิจัยเรื่อง Inertially Stabilized Platforms Using Dual-axis Gyros : Sensitivity Analysis to Unmodeled Motion and an Extension to Visual Tracking ซึ่งได้

ใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปจำนวน 2 ตัว ในการควบคุมการรักษาเสถียรภาพความเอียงของแพลตฟอร์มที่สร้างขึ้นและติดตามผลการเปลี่ยนแปลง



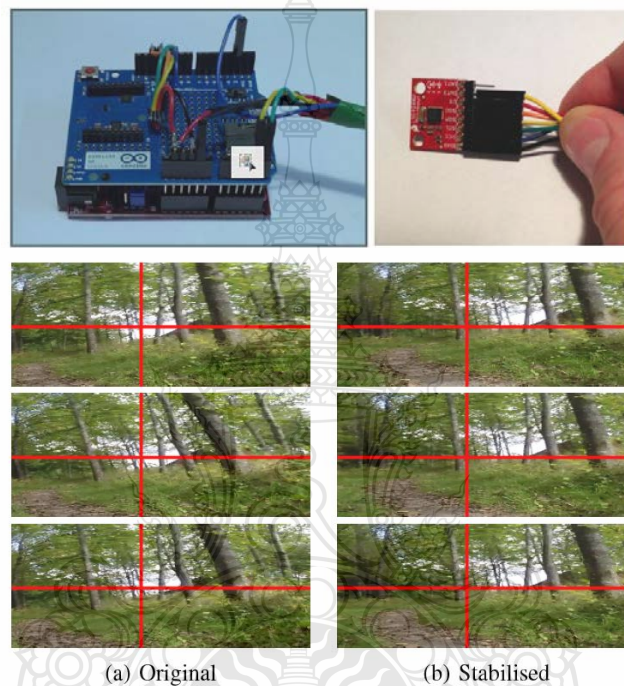
รูปที่ 2.2 แบบจำลองที่แสดง Coordinate frames adopted [3]

วิชา อุปลักษณ์ [4] จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ทำการวิจัยเรื่อง ระบบควบคุมแผ่นรักษาความเสถียรภาพโดยแบ่งระบบการควบคุมออกเป็นสองส่วน คือ ระบบควบคุมการทำงานแบบพีไอดี (PID - controller) และระบบควบคุมการทำงานแบบฟัซซี่ลอจิก (FUZZY Logic - controller) โดยมีการสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink เป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นรักษาความเสถียรในแกน x และแกน y และทดลองทำจริงโดยใช้โมดูลวัดความเร่งในการวัดมุมเอียงของแผ่นรักษาความเสถียร และใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ควบคุมระดับของแผ่นระนาบ



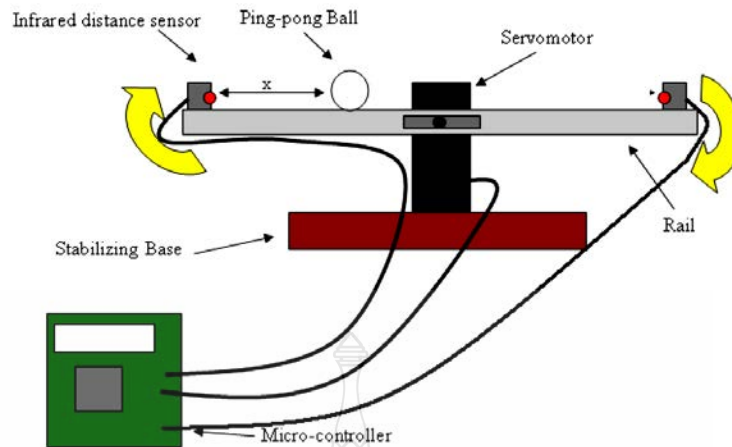
รูปที่ 2.3 ระบบส่งสัญญาณการควบคุมระบบของแผ่นรักษาความเสถียร [4]

Hannes Ovren and Per-Erik Forssen [5] จาก Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden ได้ทำการวิจัยเรื่อง Gyroscope-based Video Stabilisation With Auto-Calibration ได้ใช้ Uno32 Arduino Compatible Board และ L3G4200D Triple-axis MEMS Gyro ในการรักษาเสถียรภาพการบันทึกภาพวิดีโอในการหมุน เดิน และการติดตั้งที่รบกวนบังคับ ซึ่งทำให้ภาพสมดุลงขึ้นจากการลดการบิดเบือนจากเลนส์และกล้องลดลง



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบระหว่างสภาวะปกติกับสภาวะที่มีตัวควบคุมเพื่อรักษาเสถียรภาพ [5]

David Evanko และคณะ [6] จาก Department of Electrical Engineering University of North Florida ได้ทำการวิจัยเรื่อง A Ball on Beam System with an Embedded Controller ซึ่งเป็นการทำวิจัยโดยใช้เซนเซอร์แบบ GP2D12 Interface Distance Sensor ซึ่งจะส่งสัญญาณออกมาในรูปแบบแรงดันทางไฟฟ้า(Voltage) และส่งสัญญาณไปยังชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ แบบ MC9S12C32 ในการสร้างสัญญาณขาออก (Out Put) ของระบบโดยใช้ระบบควบคุม พีไอดี ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ในด้านของการใช้ Sensor เพื่อส่งสัญญาณในรูปแบบแรงดันไฟฟ้าและการใช้ระบบควบคุม พีไอดีในการควบคุม



รูปที่ 2.5 การติดตั้งระบบ Ball on Beam [6]

วสันต์ ลีละธนาฤกษ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ [7] จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ได้ทำวิจัยเรื่องการศึกษาและออกแบบสร้างหุ่นยนต์กระพ้อปีกควบคุมด้วยวิทยุบังคับ ซึ่งได้ออกแบบกลไกการเคลื่อนไหวลักษณะขึ้นต่อโยง 4 ชั้น (Four-Bar Linkage) เพื่อช่วยในการออกแบบกลไกการกระพ้อปีก และลดการเกิดติดขัดของกลไก (Dead Points) ช่วงมุมในการส่งถ่ายแรงการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.6 โครงสร้างหุ่นยนต์กระพ้อปีก [7]

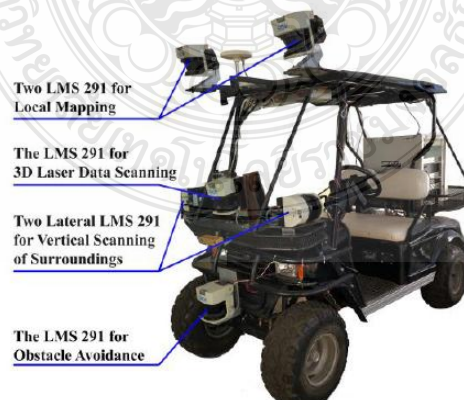
Thomas J. Pastore และ Andrew N. Patrikalak [8] จาก NATO Undersea Research Centre (NURC) และ ที่ปรึกษาอิสระ ได้ทำการวิจัยเรื่อง Laser Scanners for Autonomous Surface Vessels in Harbor Protection: Analysis and Experimental Result ซึ่งเป็นการทำวิจัยโดยใช้ Laser Scanner และ

MOOS-IvP Suite of Open-source Software ในการควบคุมเรือผิวน้ำอัตโนมัติเพื่อหลบหลีกหรือเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย ซึ่งการใช้ Laser Scanner สำหรับเรือผิวน้ำอัตโนมัติเป็นประโยชน์ในงานวิจัยนี้และทำให้เกิดแนวคิดที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ Laser Scanner ที่จะติดตั้งบนเรืออื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 2.7 เรือผิวน้ำอัตโนมัติที่ใช้ Laser Scanner และ MOOS IvP ในการควบคุม [8]

LIU Hongkai และคณะ [9] จาก School of Control Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian ได้ทำการวิจัยเรื่อง Fast 3D Scene Segmentation and Classification with Sequential 2D Laser Scanning Data in Urban Environments ซึ่งใช้ Laser Scanner จำนวน 6 ตัว ติดตั้งบนยานภาคพื้นไร้คนขับ (Unmanned Ground Vehicle : UGV) เก็บข้อมูลรอบเมือง โดยได้ข้อมูลเป็นแบบ 3D และทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำ Laser Scanner มาใช้เก็บข้อมูลเพื่อให้ได้ข้อมูล 3D โดยจะใช้ Laser Scanner เพียงตัวเดียวและเพิ่มประสิทธิภาพให้สามารถเก็บข้อมูลในรูปแบบ 3D ได้



รูปที่ 2.8 UGV ที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้เก็บข้อมูลรอบเมืองในรูปแบบ 3D [9]

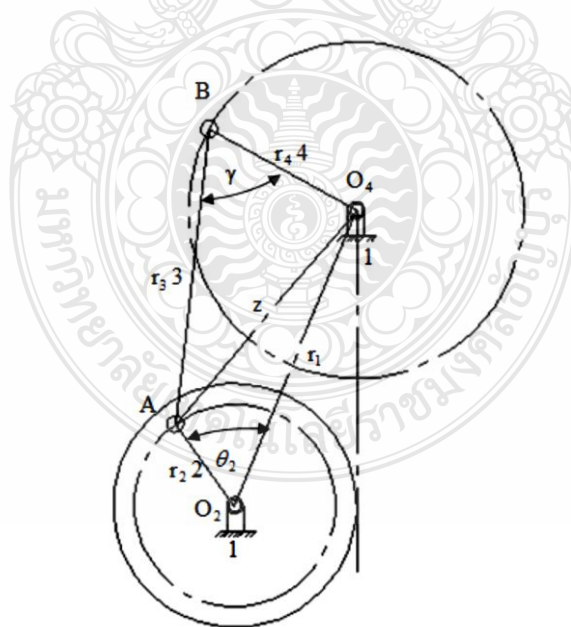
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematics Model) [7], [10]

การหาจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ เราจะใช้การพิจารณาหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายกับแขนกล โดยจะประกอบไปด้วยตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุม ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้จะใช้อธิบายถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง และตำแหน่งของวัตถุจะสามารถบอกได้จากตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวัตถุ ประกอบกับตำแหน่งเชิงมุมของวัตถุนั้น หุ่นยนต์หรือแขนกลในทางจลนศาสตร์นั้นมาจากการประกอบหรือการต่อกันของก้านโยง ซึ่งการโยงจะมีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็งที่ไม่มีการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงมากระทำ ก้านโยงนั้นจะมีหลายวิธีในการนำมาต่อกัน ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นจลนศาสตร์ลูกโซ่ โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยงและข้อต่อ

ลักษณะซันต่อโยง 4 ซัน (Four-Bar Linkage) ใช้สำหรับการออกแบบและลดการเกิดติดขัดของกลไก (Dead Points) ช่วงมุมในการส่งถ่ายแรงการเคลื่อนที่ ระหว่างมุมของซันต่อโยง 3 ไปยังตัวตามซันต่อโยง 4 ควรมีค่ามุมอยู่ระหว่าง 40-140 องศา

การเลือกลักษณะกลไกที่เป็นแบบ Crank Rocker จากกฎของ Grashoff (Grashoff's Law) และใช้กฎของ Cosines (Law of Cosines) มาช่วยในการคำนวณ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ช่วงมุมมองในการส่งถ่ายแรง γ

จากรูปสามเหลี่ยม AO_2O_4 และ ABO_4 จะได้

$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\theta_2 \quad (2.1)$$

$$z^2 = r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4\cos\gamma_2 \quad (2.2)$$

และเมื่อ (2.1)=(2.2)

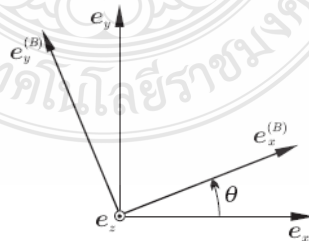
$$\begin{aligned} r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\theta_2 &= r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4\cos\gamma_2 \\ \cos\gamma_2 &= \frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2\cos\theta_2}{-2r_3r_4} \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.2.2 เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) [11]

เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) สัญลักษณ์ R เป็นตัวแปลว่าวัตถุที่มีการหมุนเปลี่ยนแปลงไปจากแกนอ้างอิง

ถ้าให้ $\{A\}$ และ $\{B\}$ เป็นเฟรม 2 เฟรมที่ทับกัน (Coincident Frame) ณ ขณะเริ่มต้น หากหมุนเฟรม $\{B\}$ รอบแกน z ด้วยมุม θ เมทริกซ์การหมุน R_B^A นี้จะนิยมเขียนแสดงด้วยสัญลักษณ์

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} c_\theta & -s_\theta & 0 \\ s_\theta & c_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

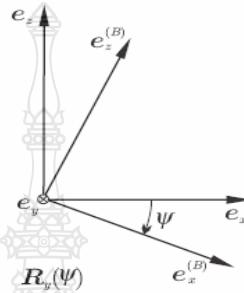


$R_z(\theta)$

รูปที่ 2.10 การหมุนเฟรมรอบแกน z

ซึ่งหมายถึงเมทริกซ์การหมุนรอบแกน z ด้วยมุม θ และในทำนองเดียวกัน

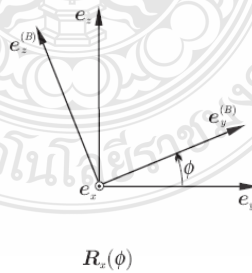
$$R_{y,\psi} = \begin{bmatrix} c_\psi & 0 & s_\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\psi & 0 & c_\psi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.11 การหมุนเฟรมรอบแกน y

ซึ่งหมายถึงเมทริกซ์การหมุนรอบแกน y ด้วยมุม ψ และในทำนองเดียวกัน

$$R_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.12 การหมุนเฟรมรอบแกน x

ซึ่งหมายถึงเมทริกซ์การหมุนรอบแกน x ด้วยมุม ϕ

โดยที่

$$c = \cos$$

$$s = \sin$$

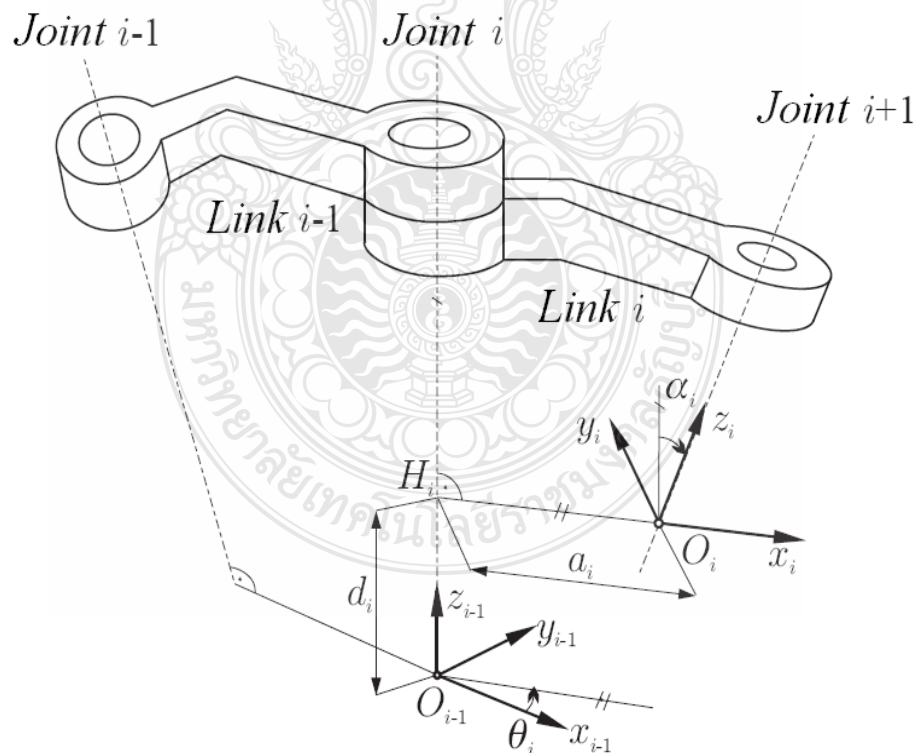
$$\theta = \text{มุมรอบแกน } z$$

$$\psi = \text{มุมรอบแกน } y$$

$$\phi = \text{มุมรอบแกน } x$$

2.2.3 พารามิเตอร์ของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก (Denavit – Hartenberg) [12]

การสร้างแขนกล (Manipulator) โดยทั่วไปนั้นมักจะประกอบด้วยก้าน โยงที่ต่อกันแบบอนุกรม จากนั้นก็จะกำหนดแกนอ้างอิงที่ติดกับวัตถุในแต่ละก้านโยงเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงโดยอ้างอิงจากแต่ละก้านโยงไปยังปลายสุดหรือจุดสุดท้ายของปลายแขนกล โดยทั่วไปมักเป็นมือที่ใช้จับชิ้นงาน (End Effector) จากการคำนวณนี้สามารถบอกตำแหน่งในระนาบสามมิติ ซึ่งวิธีนี้มีการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยใช้ตัวย่อเรียกสั้นๆ ว่า D-H Parameter จากรูปที่ 2.13 จะแสดงถึงพารามิเตอร์ต่างๆ



รูปที่ 2.13 พารามิเตอร์ของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก

โดยที่ a_i คือ ระยะทางจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i
 d_i คือ ระยะทางจากแกน X_{i-1} ไปยังแกน X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1}
 α_i คือ มุมที่วัดจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i รอบแกน X_i
 θ_i คือ มุมที่วัดจากแกน X_{i-1} ไปยัง X_i รอบแกน Z_{i-1}

จากรูปจะได้ Transformation matrix เป็น

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

จากสมการ 2.7 จะได้เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Translation Matrix)

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \text{Rotation}_{3 \times 3} & \text{Translation}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.2.4 จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) [11], [12], [13]

จาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) คือเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายก้าน โยงหรือแขนหุ่นยนต์ (\dot{x}) และความเร็วของข้อต่อ (\dot{q})

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (2.9)$$

แทนค่า

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

เมทริกซ์จacobeanสามารถแยกออกเป็นเมทริกซ์ย่อย (Submatrix) 2 เมทริกซ์ ได้แก่ J_{Pi} ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ของความเร็วข้อต่อกับความเร็วเชิงเส้นของส่วนปลายแขนและ J_{Oi} ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวกเตอร์ของความเร็วข้อต่อกับความเร็วเชิงมุมของส่วนปลายแขน J_{Pi} และ J_{Oi} สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{Pi} \\ J_{Oi} \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} \vec{z}_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix} & ; \text{เมื่อข้อต่อที่ } i \text{ เป็นข้อต่อแบบเลื่อนขนาน} \\ \begin{bmatrix} \vec{z}_{i-1} \times \vec{r}_{i-1,T} \\ \vec{z}_{i-1} \end{bmatrix} & ; \text{เมื่อข้อต่อที่ } i \text{ เป็นข้อต่อแบบหมุน} \end{cases} \quad (2.11)$$

กำหนดให้

$$\vec{z}_{i-1} = {}^0R^1R^2R \dots R^{i-3,i-2} R^{i-2,i-1} R \vec{z}_0 \quad (2.12)$$

T คือ จุดที่ปลายแขนของก้าน โยงหรือปลายแขนหุ่นยนต์

2.2.5 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model) [11], [13]

สำหรับสมการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์กรณีไม่คิดแรงเสียดทานจะได้เป็น

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \quad (2.13)$$

โดยที่ $M(q)$ คือ Inertia Matrix เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับสองของ q
 $C(q, \dot{q})$ คือ Coriolis Matrix เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ q
 $G(q)$ คือ 2-Vector ของแรงบิดที่มาจากแรงโน้มถ่วงของโลก

Q	คือ	แรงบิดที่เป็น Input ของระบบ
\ddot{q}	คือ	Vector ของ Joint Acceleration
\dot{q}	คือ	Vector ของ Joint Velocities
q	คือ	Vector ของ Generalized Joint Coordinates

เมื่อ

$$Q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Manipulator Inertia Matrix

$$M(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(J_T^{(Si)} \right)^T J_T^{(Si)} + \left(J_R^{(Si)} \right)^T {}^{0i}R_i J_i^{(S)} {}^{0i}R_i^T J_R^{(Si)} \right] \quad (2.15)$$

Velocity Coupling Vector

$$C(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{i,jk}(q) \quad (2.16)$$

$$C_{i,jk}(q) = \frac{\partial M_{ij}(q)}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}(q)}{\partial q_i} \quad (2.17)$$

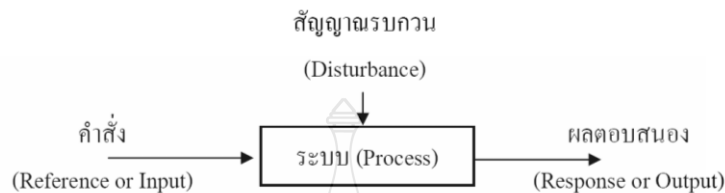
Vector of Gravitation Forces

$$G(q) = g_i(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q_i} = \sum_{j=1}^n (J)_i^T \frac{\partial U}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

2.3 ระบบควบคุม (Control System) [14]

ระบบควบคุม (Control System) หมายถึงส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่างๆ เข้าด้วยกัน เพื่อใช้บังคับหรือสั่งการเพื่อให้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเป็นไปตามความต้องการ โดยพัฒนาการของระบบ

ควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ยุคหลักๆ คือระบบควบคุมแบบดั้งเดิม และระบบควบคุมแบบสมัยใหม่ อีกทั้งยังแบ่งรูปแบบของการควบคุมได้ 2 ชนิด คือ ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด และระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

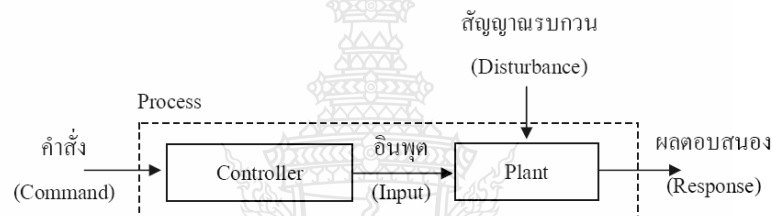


รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของระบบควบคุม [14]

2.3.1 ระบบควบคุมดั้งเดิม (Classical Control Systems) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆที่มีการนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักมาใช้ควบคุมระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ก็จะอยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ระบบควบคุมพีไอดี (PID Controllers) เส้นทางเดินราก (Root Locus) แผนภาพโบด (Bode Plot) และแผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) เป็นต้น

2.3.2 ระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control Systems) เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงหลังๆอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานของทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิมที่จำกัดการนำไปใช้งานกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Systems) และแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-variant Systems) โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมักมีข้อจำกัดในการใช้งานกับระบบประเภทนี้จึงได้มีการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการควบคุมรูปแบบใหม่ๆขึ้นมาตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ระบบที่อาศัยรูปแบบของสมการสเตต (State Variable) ในการคำนวณระบบควบคุมความเหมาะสม (Optimal Control) ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ระบบควบคุมลูกผสม (Hybrid Control) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นต้น

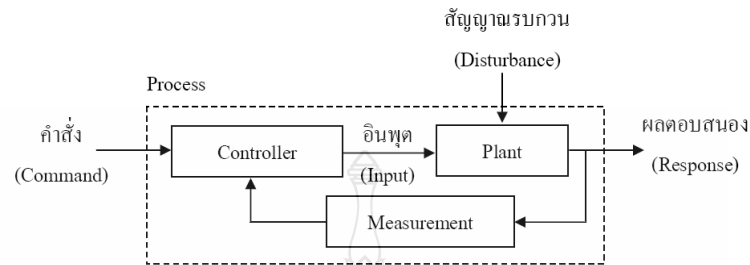
2.3.3 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control) ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.14 ในการควบคุมแบบวงรอบเปิดตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or Referent) ที่รับมาโดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้นก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหวังไว้โดยไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริงว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่ตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบเปิดได้แก่ตู้อบไมโครเวฟที่มีลักษณะการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าโดยที่ไม่มีการตรวจสอบว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ออกมาในรูปของสัญญาณไมโครเวฟนั้นว่าเป็นเท่าใดกันแน่หรือออกมาได้เท่ากับที่ปรับตั้งไว้หรือไม่ลักษณะการทำงานจึงเป็นวงรอบเปิด



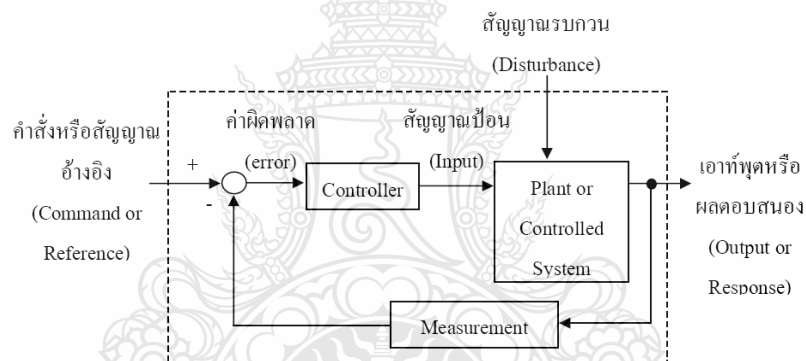
รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด [14]

2.3.4 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control) ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.16 ในการควบคุมแบบวงรอบปิดตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System Under Controlled or Plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนองให้ เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference) ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามรูปที่ 2.17 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการโดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุมตัวอย่างของลักษณะการทำงานของดีซีเซอร์โวมอเตอร์ตามรูปที่ 2.18 มีลักษณะที่ชัดเจนว่าเป็นการควบคุมแบบ

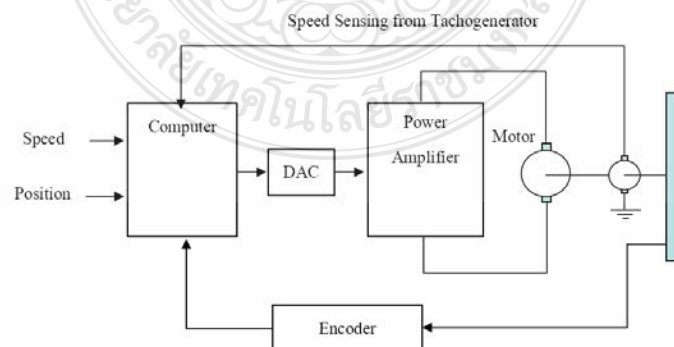
วงรอบปิดสังเกตได้จากกราฟที่มีการตรวจจับและควบคุมทั้งตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ด้วยการควบคุมแรงดันที่จ่ายเข้าที่ขั้วของมอเตอร์



รูปที่ 2.16 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด [14]



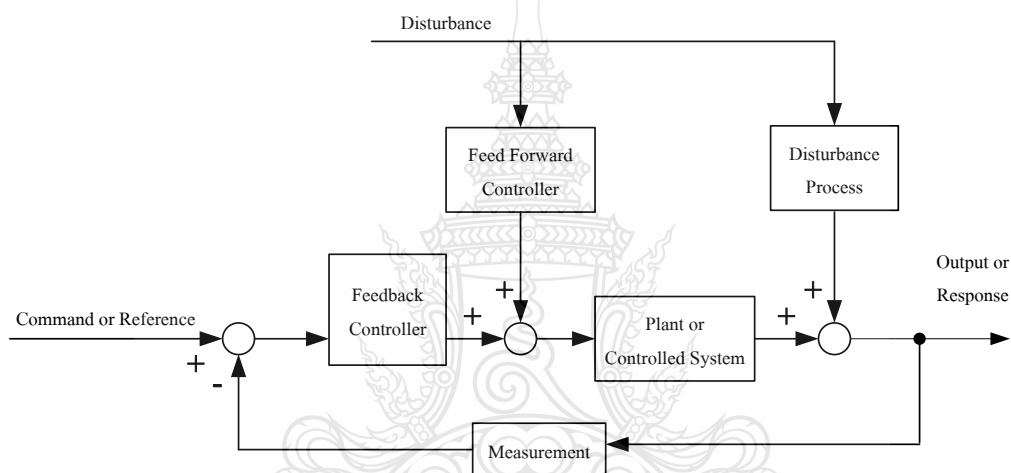
รูปที่ 2.17 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ [14]



รูปที่ 2.18 การควบคุมดีซีเซอโรไว้มอเตอร์ [14]

2.4 การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) [15]

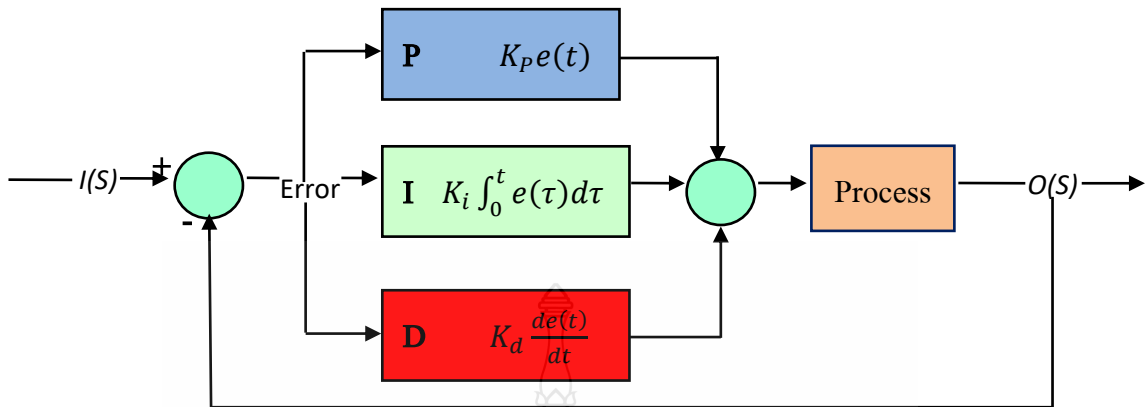
การควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) หมายถึง การควบคุมโดยการคาดการณ์ถึงผลกระทบของการรบกวน และทำการแก้ไขผลลบล้างผลกระทบที่จะมีต่อระบบก่อนที่จะเกิดผลกระทบนั้นขึ้น โดยที่หากมีความผิดพลาดในการพยากรณ์ผลกระทบของการรบกวน หรือมีความผิดพลาดในแบบจำลอง จะทำให้เกิด Offset ขึ้น ดังนั้น การควบคุมแบบนี้จึงมักไม่ใช่เดี่ยวๆ แต่โดยมากจะใช้ควบคู่กับการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เพื่อปรับปรุงการควบคุมการรบกวนให้ดียิ่งขึ้น รูปที่ 2.19



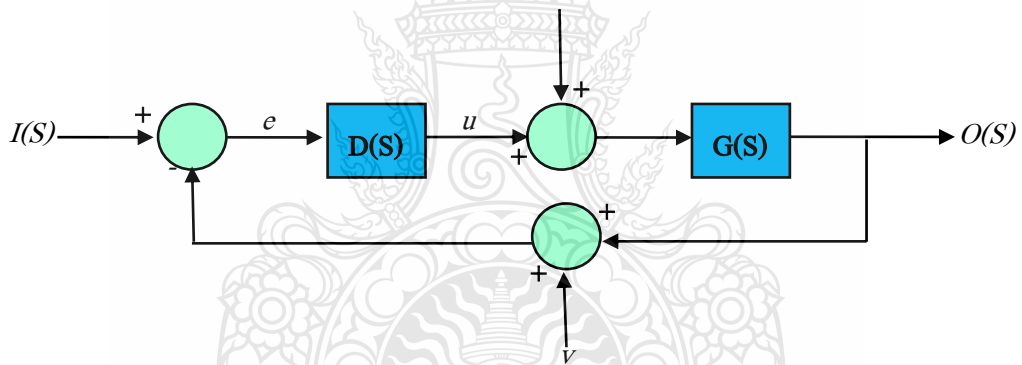
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของระบบควบคุมที่ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

2.5 ตัวควบคุมพีไอดี (PID Controller) [16]

ระบบควบคุมพีไอดี คือการควบคุมสัดส่วนป้อนกลับเป็นระบบการควบคุมรูปแบบหนึ่ง ซึ่งใช้การควบคุมในระบบวงปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed-loop Control System, Feedback Control) เพื่อลดความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวน อย่างไรก็ตาม ความผิดพลาดสถานะคงตัวก็ยังไม่หมดไป และเมื่อเพิ่มสัดส่วนป้อนกลับการตอบสนองความเร็วจะมีโอเวอร์ชูตเพิ่มขึ้น การรวมการควบคุมสัดส่วนและการควบคุมปริพันธ์เข้าด้วยกันจะสามารถกำจัดความผิดพลาดสถานะคงตัวได้ แต่จะทำให้การตอบสนองการเคลื่อนที่ไม่ดี ดังนั้น จึงต้องมีการควบคุมอนุพันธ์ เพื่อทำให้การตอบสนองของระบบดีขึ้น เมื่อรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกันจะได้รูปแบบการควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) ดังรูปที่ 2.20 และ รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 การควบคุมแบบพีไอดี [16]



รูปที่ 2.21 การควบคุมแบบป้อนกลับ [16]

ตัวควบคุมพีไอดี ประกอบด้วย

2.5.1 การควบคุมสัดส่วน (Proportional Feedback Control : P)

การควบคุมสัดส่วน คือ การควบคุมสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาดเพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณขาออก สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P = Ke \quad (2.19)$$

ดังนั้น จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.21 จะได้สมการต่อไปนี้

$$D(s) = K \quad (2.20)$$

เมื่อ P คือ สัญญาณขาออก
 K คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)
 e คือ ค่าความผิดพลาด

2.5.2 การควบคุมปริพันธ์ (Proportional–Integral Feedback Control : PI)

การควบคุมปริพันธ์ (Integral) เพื่อลดหรือกำจัดความผิดพลาดสถานะคงตัว แต่จะทำให้การตอบสนองช่วงขณะมีประสิทธิภาพลดลง โดยการคูณด้วยอัตราขยายปริพันธ์ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I(t) = \frac{K}{T_I} \int_{t_0}^t e dt \quad (2.21)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.21 จะได้สมการต่อไปนี้

$$\frac{U(s)}{E(s)} = D(s) = \frac{K}{T_I s} \quad (2.22)$$

เมื่อ $I(t)$ คือ สัญญาณขาออก
 T คือ เวลา
 D คือ ตัวแปรปริพันธ์
 E คือ ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาด

2.5.3 การควบคุมอนุพันธ์หรืออนุพันธ์ป้อนกลับ (Derivative Feedback Control : D)

การควบคุมอนุพันธ์หรืออนุพันธ์ป้อนกลับ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด เพื่อลดโอเวอร์ชูตและลดเวลาสู่สมดุล สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$D(t) = K T_D \dot{e} \quad (2.23)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.21 จะได้ว่า

$$D(s) = KT_D s \quad (2.24)$$

เมื่อ	$D(t)$	คือ	สัญญาณขาออก
	K	คือ	อัตราขยายอนุพันธ์
	T_D	คือ	อนุพันธ์เวลา (Derivative time)
	\dot{e}	คือ	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของความผิดพลาด

2.5.4 การควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ อนุพันธ์ (Proportional–Integral–Derivative Control : PID)

การควบคุมความผิดพลาดสถานะคงตัวและความผิดพลาดชั่วขณะ(Transient Error) สามารถควบคุมโดยการรวมทั้งสามเทอมเข้าด้วยกัน ได้แก่การควบคุมสัดส่วนการควบคุมปริพันธ์และการควบคุมอนุพันธ์ ซึ่งเรียกว่า การควบคุมแบบพีไอดี สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$Output = P + I(t) + D(t) = Ke + \frac{K}{T_I} \int_{t_0}^t e dt + KT_D \dot{e} \quad (2.25)$$

จากการควบคุมแบบป้อนกลับในรูปที่ 2.21 จะได้สมการต่อไปนี้

$$D(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.26)$$

ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองของตัวแปร [16]

ตัวแปร	ช่วงเวลายืน (Rise time)	โอเวอร์ชูต (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Settling time)	ความผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady – state error)
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด, กำจัด
K_d	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

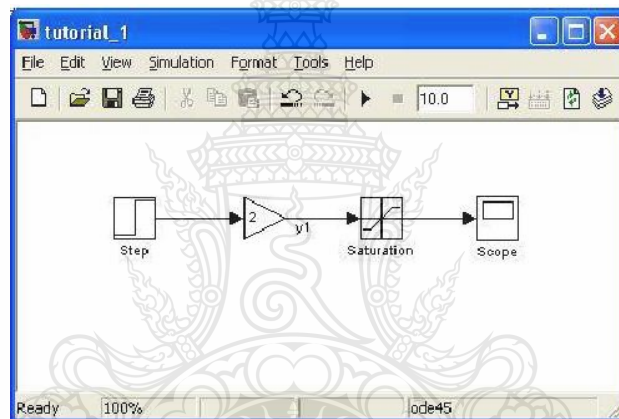
2.6 หลักการทำงานของซิมูลิงก์โดยใช้สมการแมทแลบ (MATLAB/Simulink) [17]

Simulink มาจากคำ 2 คำ คือ Simulation และ Link ซึ่งหมายถึงเครื่องมือ (Toolbox) ที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB ใช้สำหรับการจำลอง และทดสอบ ตลอดจนวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาไม่ว่าจะเป็นระบบเชิงเส้น (Linear system) หรือไม่เชิงเส้น (None-linear system)

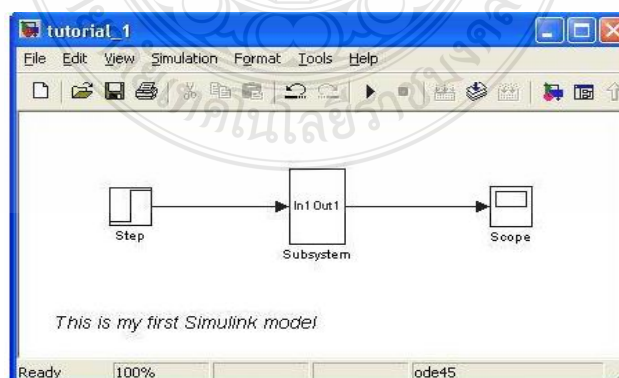
รวมถึงระบบแบบเวลาต่อเนื่องและเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยในการจำลองระบบSIMULINK จะเป็นการติดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิกโดยอาศัยการคลิกและการลากเมาส์

เมื่อต้องการวิเคราะห์สมการโดยใช้ Simulink จะต้องมีการวิเคราะห์และตั้งค่า รวมทั้งยังต้องมี Block Library ของ Continuous , Discrete , Function and Table, Math, Nonlinear, Signals and System, Sink, Sources และ Subsystem ด้วย

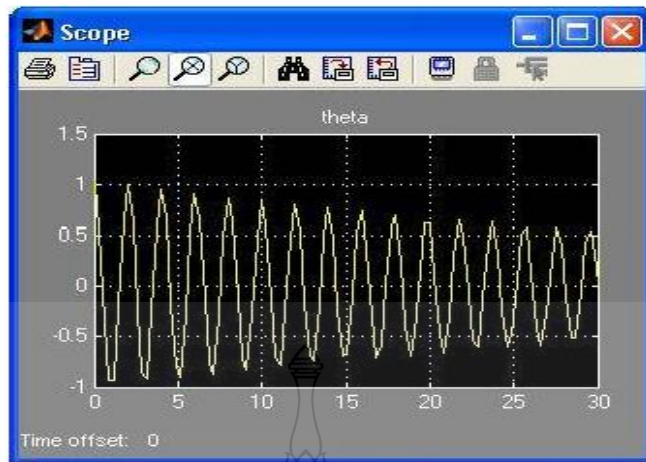
Simulink จะทำงานภายใต้หน้าต่างที่เป็นการเชื่อมต่อรูปภาพ (GUI) ของ SIMULINK เท่านั้น การเชื่อมโยงรูปภาพเป็นการนำเอาอุปกรณ์ใน Library มาเชื่อมต่อกัน โดยอาศัยการวิเคราะห์จากสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถ้าการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวถูกต้องก็จะได้ผลการทดลองในรูปแบบที่ต้องการ



รูปที่ 2.22 ระบบ Simulink [17]



รูปที่ 2.23 ระบบ Simulink ให้อยู่ในรูป Subsystem [17]



รูปที่ 2.24 ผลที่ได้จากการทำ Simulink [17]

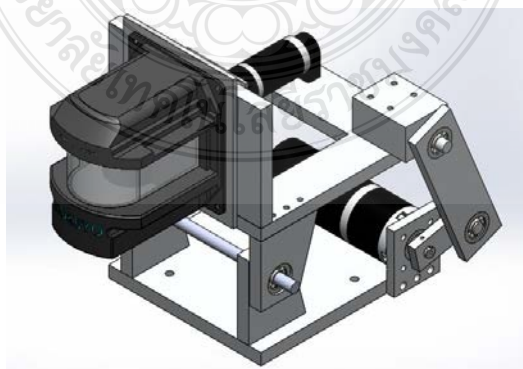


3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

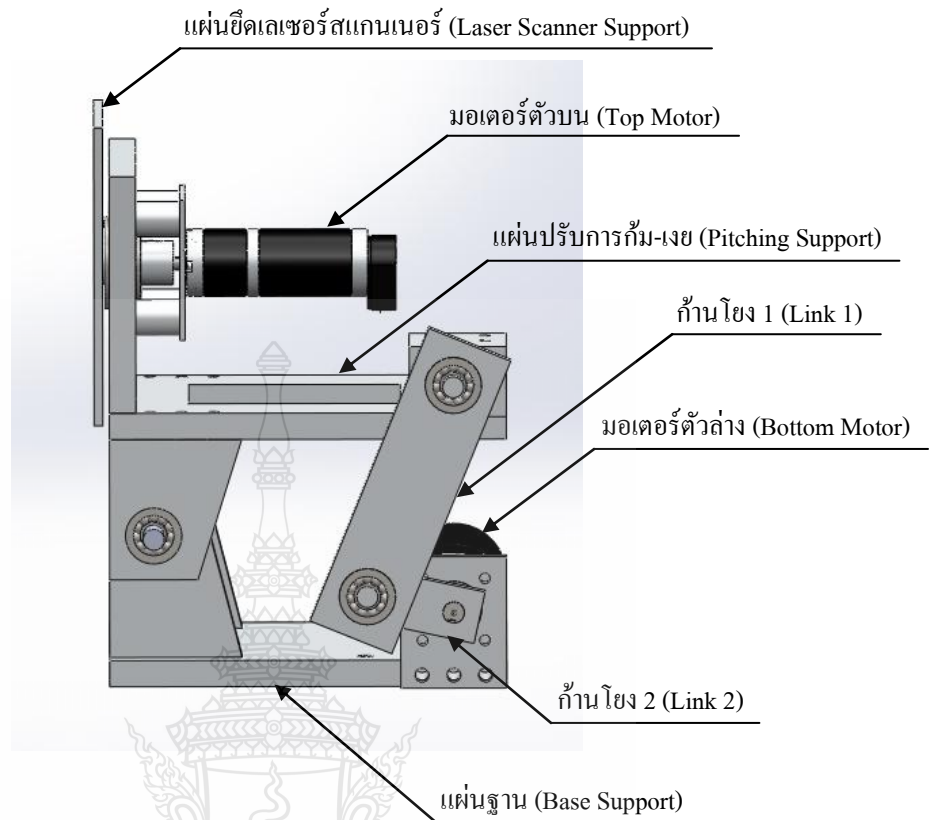
- 3.2.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูล
- 3.2.2 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของระบบทางจลศาสตร์และพลศาสตร์
- 3.2.3 ออกแบบระบบและอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุสำหรับติดตั้งบนเรือ
- 3.2.4 ทดสอบจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 3.2.5 ประดิษฐ์อุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุ
- 3.2.6 ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมระบบการทำงานจริง
- 3.2.7 ทดสอบระบบการทำงานและบันทึกผล
- 3.2.8 วิเคราะห์และแก้ไขปัญหา
- 3.2.9 จัดทำบทความทางวิชาการ เพื่อตีพิมพ์วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชวมงคลชัยบุรี
- 3.2.10 สรุป สอบ และจัดทำรูปเล่ม

3.3 การหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model)

ในการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของหุ่นยนต์สำหรับระบบรักษาเสถียรภาพการโคลงและเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ในงานวิจัยนี้ ในขั้นแรกได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับวิจัยในครั้งนี้ซึ่งประกอบด้วยชุดกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง (Four Bar Linkage) และแผ่นยึดอุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถติดตั้งมอเตอร์ในการหมุนสองแกนด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS สำหรับตรวจสอบการทำงานของกลไกต่างๆ แสดงในรูปที่ 3.1 และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งมอเตอร์ในการหมุนสองแกน แสดงในรูปที่ 3.2

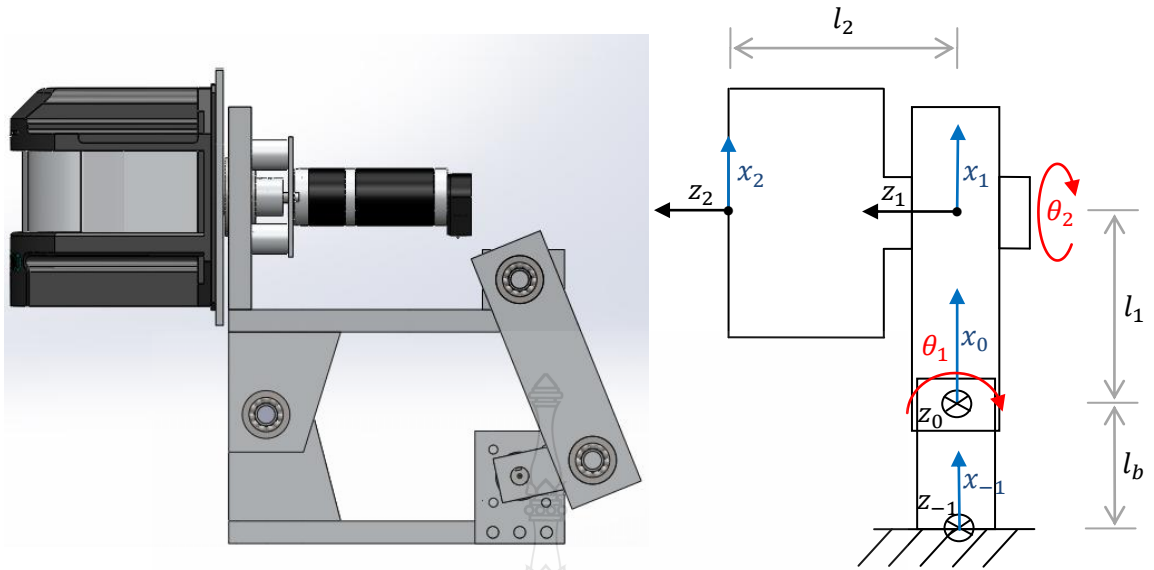


รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สำหรับงานวิจัยที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS



รูปที่ 3.2 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งมอเตอร์แบบสองแกน

ในขั้นที่สอง จะทำการหาสมการทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ โดยจะสามารถพิจารณาระบบรักษาเสถียรภาพในการหมุน เหมือนกับหุ่นยนต์ที่มีแกนหมุน 2 แกนที่ตั้งฉากกัน แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเริ่มแรกจะหาเมตริกซ์ในการหมุน (Rotation Matrix) โดยจะใช้พารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก (Denavit – Hartenberg) ดังในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 การตั้งแกนหุ่นยนต์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก

- เมื่อ
- a_i คือ ระยะทางจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i
 - d_i คือ ระยะทางจากแกน X_{i-1} ไปยังแกน X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1}
 - α_i คือ มุมที่วัดจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i รอบแกน X_i
 - θ_i คือ มุมที่วัดจากแกน X_{i-1} ไปยัง X_i รอบแกน Z_{i-1}

- กำหนดให้
- $\theta_1 =$ มุมของเฟรมที่ 0 รอบแกน Z_0
 - $\theta_2 =$ มุมของเฟรมที่ 1 รอบแกน Z_1

จากรูปที่ 3.3 หลังจากตั้งแกนหุ่นยนต์สำหรับการหาพารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg : D-H) ซึ่งจะเป็นเมทริกซ์ 4x4 แบบ homogeneous Transformation Matrix และนำไปสู่การหาเมตริกซ์การแปลงพิกัด (Transformation Matrix หรือ T)

ตารางที่ 3.2 แสดง D-H Table พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แบบสองแกนในงานวิจัย

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
0	0	l_b	0	0
1	90°	l_1	0	θ_1
2	0	0	l_2	θ_2

จากจลนศาสตร์ข้างหน้า สามารถหาเมตริกซ์การแปลงพิกัด (Transformation matrix) จากสมการที่ 2.7 ได้ คือ

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & l_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & l_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 + l_2 s_1 \\ c_2 s_1 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 - l_2 c_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดยที่ $c_1 = \cos\theta_1$, $c_2 = \cos\theta_2$, $s_1 = \sin\theta_1$ และ $s_2 = \sin\theta_2$

ในขั้นที่สามจะสามารถคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics Model) ที่ไม่คิดแรงเสียดทานจากสมการที่ 2.13 คือ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \quad (3.4)$$

หรือ

$$M(q)\ddot{\theta} + C(q, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(q) = Q \quad (3.5)$$

โดยมี เมตริกซ์ความเฉื่อยของหุ่นยนต์ (Manipulator Inertia Matrix) หรือ $M(q)$

$$m_{11} = I_{1y} + m_1 l_{s1}^2 + m_2 (l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x} s_2^2 + I_{2y} c_2^2 \quad (3.6)$$

$$m_{12} = m_{21} = 0 \quad (3.7)$$

$$m_{22} = I_{2z} \quad (3.8)$$

เมตริกซ์ของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือแรงแบบโคริโอลิส (Velocity Coupling Vector or Coriolis Force)

$$C_1 = 2c_2s_2(I_{2x} - I_{2y})\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (3.9)$$

$$C_2 = -c_2s_2(I_{2x} - I_{2y})\dot{\theta}_1^2 \quad (3.10)$$

เวกเตอร์ความโน้มถ่วงโลก (Vector of Gravitational Forces หรือ $G(q)$)

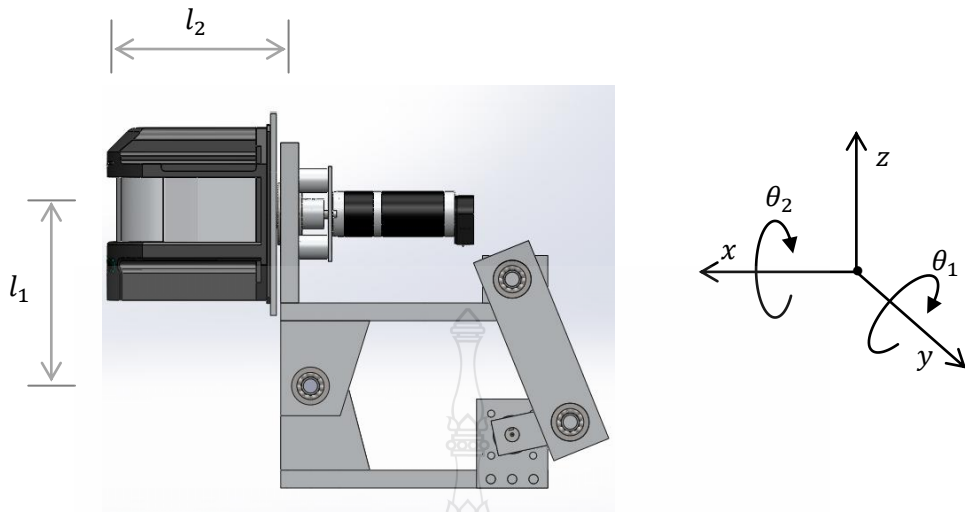
$$G_1 = -m_1gl_{s1}c_1 \quad (3.11)$$

$$G_2 = -m_2g(l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1) \quad (3.12)$$

ดังนั้นจะได้สมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้คือ

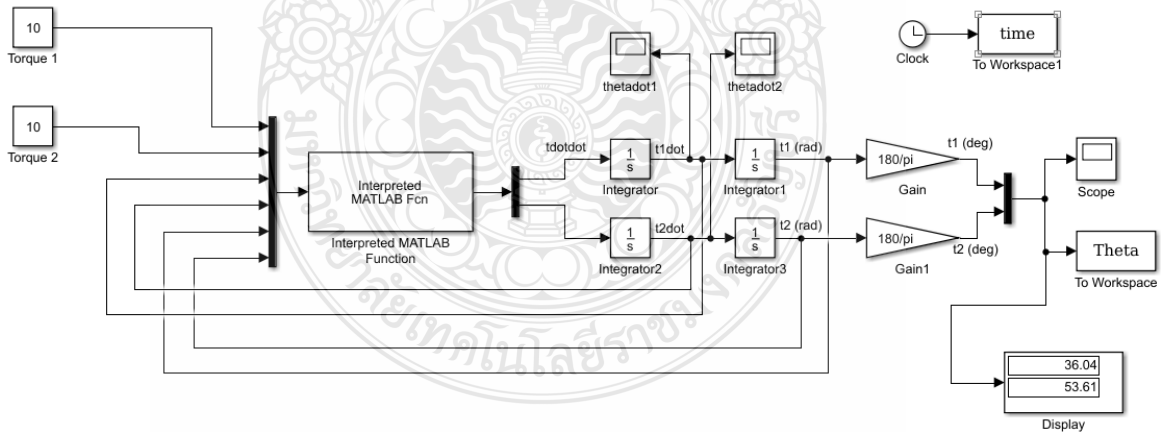
$$\tau_1 = (I_{1y} + m_1l_{s1}^2 + m_2(l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x}s_2^2 + I_{2y}c_2^2)\ddot{\theta}_1 + 2c_2s_2(I_{2x} - I_{2y})\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_1gl_{s1}c_1 \quad (3.13)$$

$$\tau_2 = I_{2z}\ddot{\theta}_2 - c_2s_2(I_{2x} + I_{2y})\dot{\theta}_1^2 - m_2g(l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1) \quad (3.14)$$



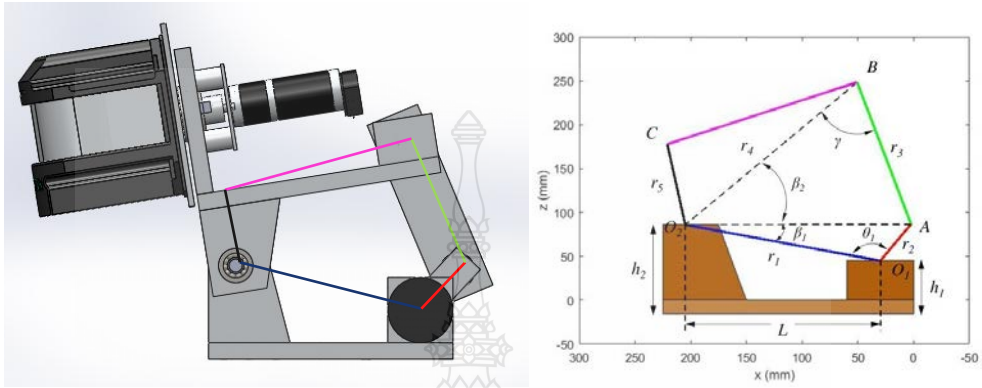
รูปที่ 3.4 พิกัดการหมุนและก้านโยงของหุ่นยนต์ในงานวิจัย

ขั้นที่สี่ นำสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จำลองการทำงานของระบบพลศาสตร์ในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์ (MATLAB/Simulink) สำหรับการคำนวณหาแรงบิดมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว แสดงในรูปที่ 3.5

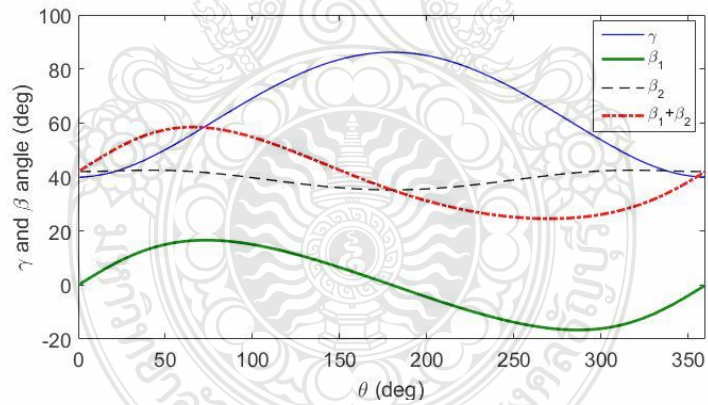


รูปที่ 3.5 สมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์

วิเคราะห์ห้องสกรูถ่ายแรงของชุดกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงที่ออกแบบในโปรแกรม SOLIDWORKS ไปคำนวณใน MATLAB แสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งค่าที่ได้ประมาณ 33 องศา

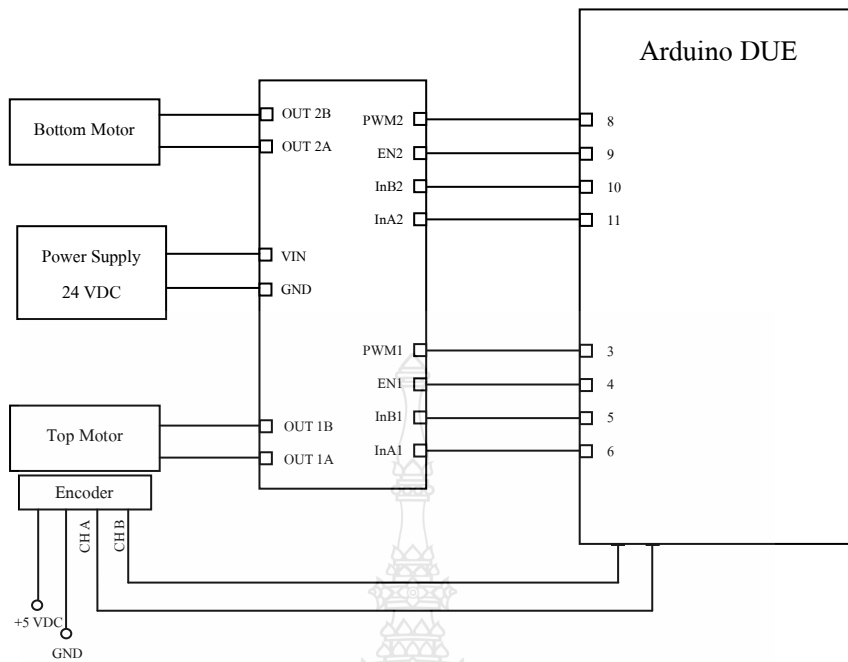


รูปที่ 3.6 วิเคราะห์ชุดกลไกสี่ก้านโยงด้วยโปรแกรมเมทแลบ



รูปที่ 3.7 องศาการเคลื่อนที่ของชุดกลไกสี่ก้านโยงจากโปรแกรมเมทแลบ

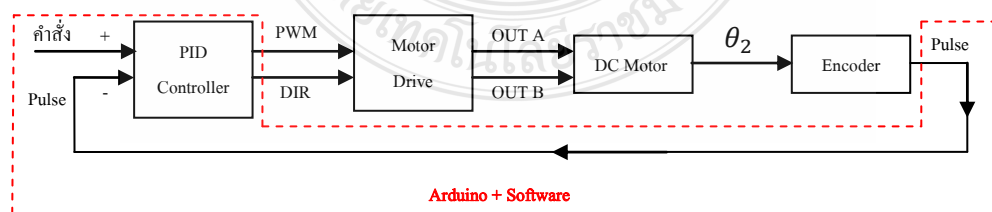
ออกแบบวงจรการติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ในที่นี้ได้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Arduino DUE



รูปที่ 3.8 วงจรการติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวที่ต่อไปยังไมคอนโทรลเลอร์

3.4 การควบคุมมอเตอร์

3.4.1 มอเตอร์ตัวบน (Top Motor) การควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ด้วย PID Control เพื่อควบคุมตำแหน่งตั้งตรงของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยติดตั้งลิมิตสวิตช์ (Limit Switch) เพื่อให้แกนของแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาและลิมิตสวิตช์ที่ 60° เมื่อเปิดการทำงานของระบบ และรีเซ็ตค่าพลัสจากโค้ดเคอร์ (Encoder) ให้เป็นศูนย์ จากนั้นจะมีคำสั่งให้มอเตอร์หมุนแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ไปตั้งตรงหรือทำมุม 90° จากระนาบแนวนอน (เอ็นโคดเดอร์นี้มีค่า 44,000 พลัสต่อรอบ และ 1 รอบ มี 360 องศา) แผนภาพการควบคุมแสดงในรูปที่ 3.9

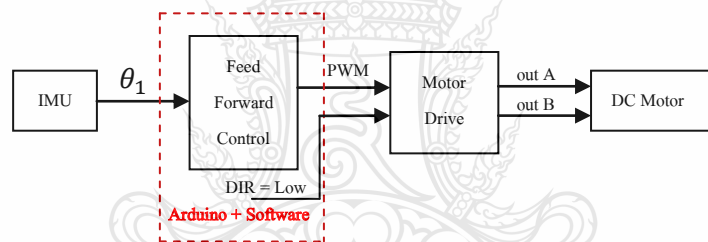


รูปที่ 3.9 แผนภาพการควบคุมมอเตอร์ตัวบนด้วยพีไอดี (PID Control)

3.4.2 มอเตอร์ตัวล่าง (Bottom Motor) ควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) เพื่อให้ความเร็วของชุดกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง (Four Bar Linkage) อยู่ในสถานะคงที่ไม่กระชากหรือมีความเร็วรอบที่สม่ำเสมอภายใต้ความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก และค่ามุมอ้างอิงจาก IMU จะเป็นตัวกำหนดความเร็วของมอเตอร์ สำหรับสมการการควบคุมมอเตอร์แสดงในสมการที่ 3.15

$$u_1(t) = K_F \sin(A_1(\theta_1(t) - B_1)) \quad (3.15)$$

เมื่อ แอมพลิจูด (K_F) เป็นอัตราขยายที่ใช้ช่วยปรับความเร็วรอบการหมุนที่ป้อนไปข้างหน้า ค่า A_1 เป็นอัตราขยายขององศาการก้ม-เงย และค่า B_1 ใช้ปรับแก้อองศาการก้มเงยของเซนเซอร์ วัดมุมเอียง (IMU) การทำงานของการควบคุมแบบไปข้างหน้าแสดงในรูปที่ 3.10

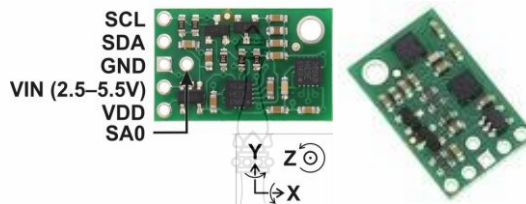


รูปที่ 3.10 การควบคุมมอเตอร์ตัวล่างด้วยการป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control)

3.5 ระบบไอเอ็มยู (IMU : Inertial Measurement Unit)

ระบบ IMU (Inertial Measurement Unit) เป็นระบบหนึ่งซึ่งบรรจุในระบบนำหนด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Navigation System : INS) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือเครื่องวัดความเร่งซึ่งวัดทั้งความเร่งเชิงมุมและความเร่งเชิงเส้น (สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง) และไจโรสโคป (เพื่อรักษาให้อยู่ในแนวอ้างอิงที่ถูกต้อง) ซึ่งโดยปกติจะต้องมี sensor ตรวจวัดอย่างน้อยหนึ่งตัวในแต่ละแนวแกนลักษณะการออกแบบโดยทั่วไป IMU จะมีลักษณะเป็นกล่องภายในบรรจุเครื่องวัดความเร่ง 3 ตัวและไจโรสโคปอีก 3 ตัวเครื่องวัดความเร่งจะถูกติดตั้งเข้าไปในแต่ละแนวแกนที่ต้องการวัดโดยที่แต่ละแนวแกนตั้งฉากกันไจโรสโคปอีก 3 ตัวจะถูกติดตั้งในลักษณะตั้งฉากเช่นเดียวกันทำการวัดอาการหมุนที่เบี่ยงเบนไปจากแนวอ้างอิงในระบบพิกัดที่กำหนดไว้จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ตรวจวัดหลักๆของระบบ IMU เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดความเร่งและเซนเซอร์สำหรับ

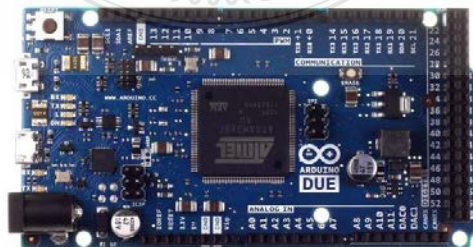
ตรวจวัดอาการเอียงในแนวแกนต่างๆซึ่งก็คือเครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) และไจโรสโคป (Gyroscope) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ MinIMU-9 ของ Pololu ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์วัดมุมเอียง (Compass) ความเร่ง (Accelerometer) ความเร็วในการหันเห (Gyro) ทั้งสามแกน มีขนาดเล็ก 0.9" x 0.6" x 0.1" ใช้ไฟเลี้ยง 2.6-5.5 VDC



รูปที่ 3.11 เซ็นเซอร์วัดมุมเอียงแบบ 9 แกน ขนาดเล็ก (MinIMU-9) ของ Pololu [18]

3.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาคูอิโน้ (Arduino Microcontroller)

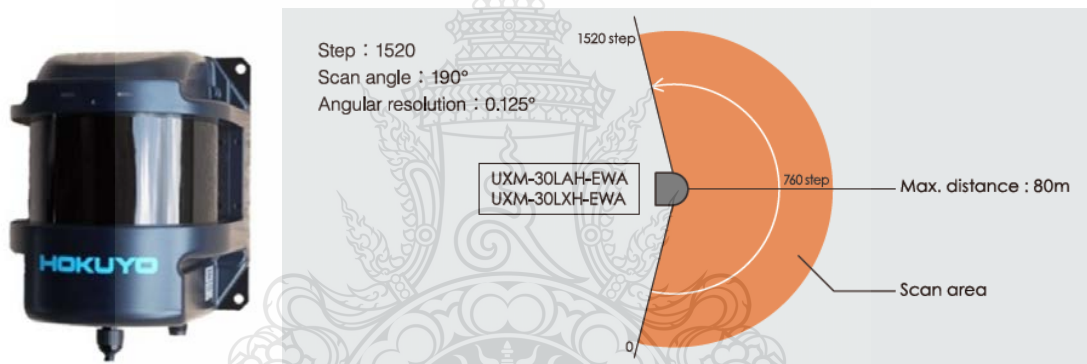
อาคูอิโน้ (Arduino) คือ Microcontroller (MCU) กึ่งสำเร็จรูป ถือเป็น Open-Source Hardware และ Software. ซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นบอร์ด MCU สำหรับทดลองวงจรต่างๆ เพราะมีความสะดวกมาก เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ ไปจะต้องมีการ โปรแกรม(เบิร์น) คำสั่งลงบนบอร์ดเพื่อใช้งาน ซึ่งจะต้องมีอุปกรณ์อื่นๆเข้าช่วย รวมทั้งต้องต่อวงจรไฟเลี้ยงและสัญญาณนาฬิกาเพิ่มเติม แต่สำหรับอาคูอิโน้นั้น ทุกสิ่งทุกอย่างถูกรวมไว้ในบอร์ดเดียวแล้ว เราจึงสามารถใช้งาน MCU ได้ง่ายๆ เพียงแค่เขียนโปรแกรมและอัปโหลด(Upload) ลงอาคูอิโน้ผ่านสายยูเอสบี(USB) เท่านั้น สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ อาคูอิโน้ดู (Arduino DUE) ซึ่งสามารถประมวลผลความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จากเอนโค้ดเดอร์ได้



รูปที่ 3.12 อาคูอิโน้ดู (Arduino DUE : AT91SAM3X8E microcontroller chip) [19]

3.7 เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner)

แสงเลเซอร์ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) โดยปกติเป็นแสงสีแดงที่เกิดจากการแผ่รังสี มีความเข้มแสงสูงที่สุดเนื่องจากมีแสง-สีและเฟสเดียวซึ่งแตกต่างจากแสงทั่วไป โดยมีความยาวคลื่นอยู่ที่ 0.01 mm หรือในช่วงความถี่ 10^{13} Hz ถึง 10^{15} Hz โดยประมาณ ข้อดีของเลเซอร์คือมีระยะการส่งแสงที่ไกลมากและสามารถเซนเซอร์วัตถุได้ทุกสี ตลอดจนสามารถเซนเซอร์วัตถุที่มีขนาดเล็กๆ ได้ แต่ข้อเสียคือ จะมีราคาแพงกว่าตัวกำเนิดแสงชนิดอื่น โดยงานวิจัยนี้จะใช้ Hokuyo UXM-30LXH-EWA มีขนาด 125 x 124 x 150 มม. มีน้ำหนัก 800 กรัม ใช้แหล่งจ่ายไฟในช่วง 10-30 VDC มีช่วงการวัดระยะทาง (Range) สูงสุดได้ถึง 80 เมตร มุมกวาดของเลเซอร์ (Scanning angle) 190° ความสามารถในการแสดงผลเชิงมุม (Angular resolution) 0.125° ความแม่นยำ (Accuracy) ± 50 มิลลิเมตร ความถี่ในการสแกน 20 Hz มีมาตรฐานการป้องกันแบบ IP67



รูปที่ 3.13 เลเซอร์สแกนเนอร์ Hokuyo UXM-30LXH-EWA [20]

3.8 มอเตอร์เกียร์และมอเตอร์เกียร์แบบมีเอ็นโค้ดเดอร์

มอเตอร์เกียร์ในงานวิจัยนี้มี 2 ตัว คือ มอเตอร์เกียร์แบบที่ไม่มีเอ็นโค้ดเดอร์ และแบบที่มีเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ในตัว โดยมอเตอร์เกียร์ตัวที่ 1 เป็นแบบไม่มี Encoder แรงดันไฟฟ้า 24 ดีซีโวลต์ ทดเกียร์ให้ความเร็วรอบสูงสุดที่ 168 รอบต่อนาที รับแรงบิดได้สูงสุดไม่เกิน $90 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ($8.82 \text{ N} \cdot \text{m}$) ใช้สำหรับเพิ่มเพิ่มมุมในการเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ และสำหรับมอเตอร์เกียร์ตัวที่ 2 เป็นแบบมีเอ็นโค้ดเดอร์ แรงดันไฟฟ้า 12 ดีซีโวลต์ ทดเกียร์ให้ความเร็วรอบสูงสุดที่ 250 รอบต่อนาที พร้อมติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์ 500 P/R รับแรงบิดได้ถึง $16 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ ($1.57 \text{ N} \cdot \text{m}$) หรือน้ำหนักประมาณ 40 กิโลกรัมรักษาแนวการโคลงของอุปกรณ์



รูปที่ 3.14 มอเตอร์เกียร์ 24 VDC 250 RPM พร้อม Encoder 500 P/R และมอเตอร์เกียร์ 24 VDC 168 RPM [21], [22]



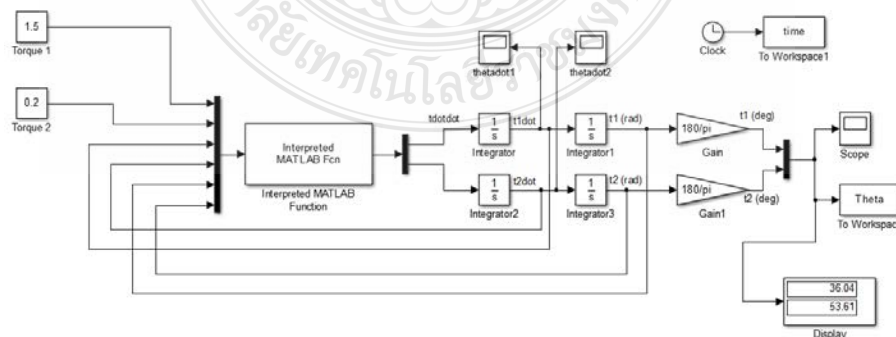
บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทที่นี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การคำนวณหาแรงบิดมอเตอร์ทั้งสองตัวของระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงและระบบรักษาแนวการเอียงซ้าย-ขวา จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์ (MATLAB/Simulink) 2) ทดสอบการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้คำสั่งจากองศาการก้ม-เงย สำหรับระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง และการควบคุมแบบพีไอดีที่ป้อนกลับด้วยองศาการก้มสำหรับระบบรักษาแนวการเอียงซ้าย-ขวา และ 3) ทดสอบการวิเคราะห์ทางของกลุ่มจุดในสามมิติจากข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์

4.1 การทดสอบการหาแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสองตัวด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์

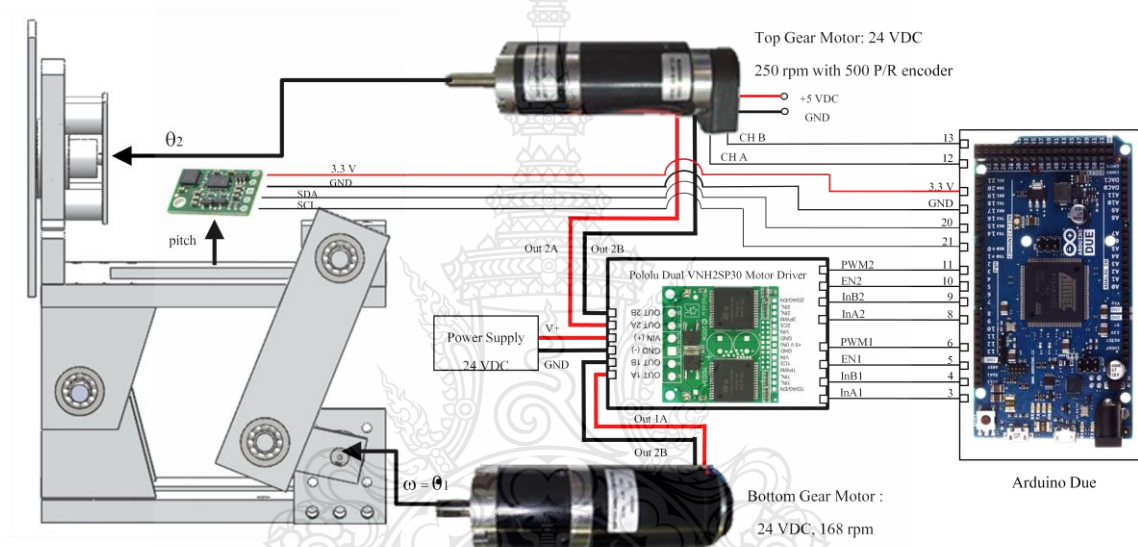
การทดสอบการหาแรงบิดของมอเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์เพื่อที่จะนำไปเลือกขนาดของมอเตอร์ที่เพียงพอสำหรับระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงและระบบรักษาแนวการเอียงซ้าย-ขวานี้ การทดสอบหาแรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว โดยการป้อนค่าแรงบิดต่างๆ ใส่ในบล็อกไดอะแกรมด้านอินพุต (Input) และรัน (Run) ในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์จนสามารถทราบค่าแรงบิดที่เหมาะสม ซึ่งพบว่ามอเตอร์ที่มีแรงบิดมากกว่า $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($15 \text{ kg} \cdot \text{cm}$) จะสามารถหมุนมอเตอร์ตัวล่าง (Torque 1) ได้ และมอเตอร์ที่มีแรงบิดมากกว่า $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($2 \text{ kg} \cdot \text{cm}$) จะสามารถหมุนมอเตอร์ตัวบน (Torque 2) โดยบล็อกไดอะแกรมในโปรแกรมสำหรับมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวแสดงใน รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การหาแรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว จากโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์

4.2 ทดสอบระบบกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้าน โยงและระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา

จากการออกแบบกลไกจากโปรแกรม SOLIDWORKS การคำนวณหาแรงบิดมอเตอร์ทั้งสองตัวของระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้าน โยงและระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยโปรแกรมแมทเล็บซิมูลิงค์ (MATLAB/Simulink) แล้วนั้น เราจะสามารถนำอุปกรณ์ต่างๆ ที่ออกแบบมาประกอบและต่อวงจรเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และจะทำการทดสอบการควบคุมการทำงานของระบบกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้าน โยง และระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา ต่อไป

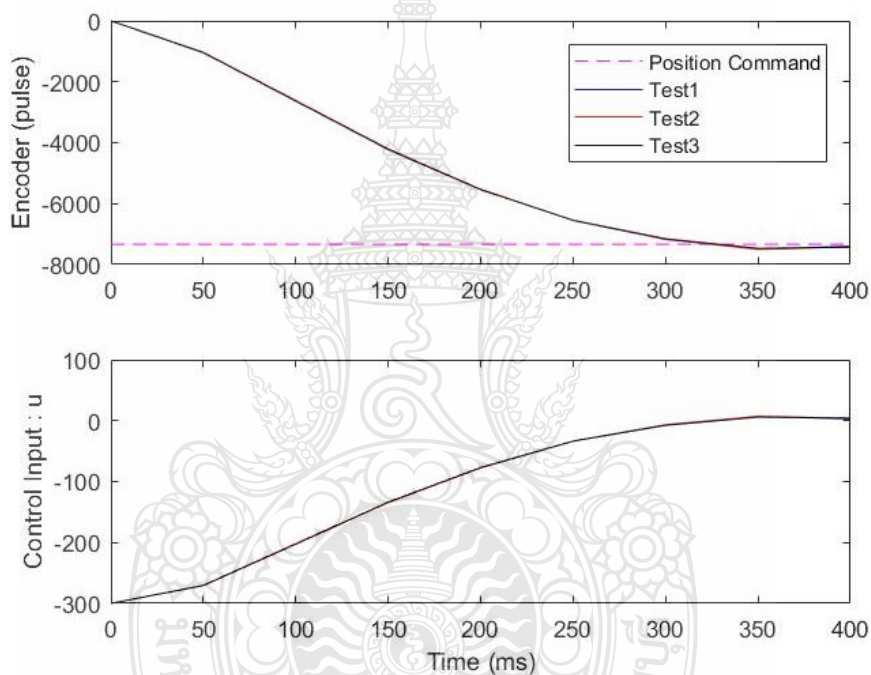


รูปที่ 4.2 วงจรของระบบกลไกสี่ก้าน โยงและระบบรักษาระนาบเอียงซ้าย-ขวา

4.2.1 ทดสอบการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ด้วยพีไอดี

ในการทดสอบการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ด้วยพีไอดีเพื่อที่จะให้มอเตอร์ตัวบนควบคุมแผ่นฮีดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้มีความสามารถในการหมุนกลับมาตั้งตรงในแนวตั้งได้อย่างรวดเร็ว โดยการควบคุมของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยขั้นต้นได้ทำการทดสอบการควบคุมตำแหน่งเริ่มแรกเพื่อให้แผ่นฮีดเลเซอร์สแกนเนอร์หมุนกลับมาตั้งตรงก่อน โดยเมื่อเปิดสวิตซ์การทำงานแผ่นฮีดเลเซอร์สแกนเนอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาและลิมิตสวิตซ์ที่ติดตั้งอยู่ที่ตำแหน่งองศาการกึ่งประมาณ 60° (ตามที่ได้ออกแบบไว้) จากระนาบแนวตั้งและจะรีเซ็ตค่าพลัสของเอ็นโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์ (0) เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์รู้ตำแหน่งอ้างอิงในช่วงแรกหลังจากเปิดเครื่อง และเมื่อค่าพลัส

ของเอ็นโค้ดเดอร์เป็นศูนย์แล้ว จะมีคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี กลับไปที่ตำแหน่งตั้งตรงหรือตั้งฉากกับระนาบแนวนอน 90° โดยคำสั่งพัลส์ที่สั่งมอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาไป $-7,333$ พัลส์ (ค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์สำหรับ 360° คือ $44,000$ พัลส์ และถ้าต้องการให้หมุนไป 60° จะประมาณ $7,333$ พัลส์) หรือเท่ากับค่าองศาการกึ่งประมาณ 60° จนถึงค่าที่กำหนดมอเตอร์จะหยุดหมุน โดยจะสัมพันธ์กับคำสั่งที่ไปสั่งมอเตอร์ (Control Input : u) ซึ่งค่าเท่ากับศูนย์ (0) และได้ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 4.2

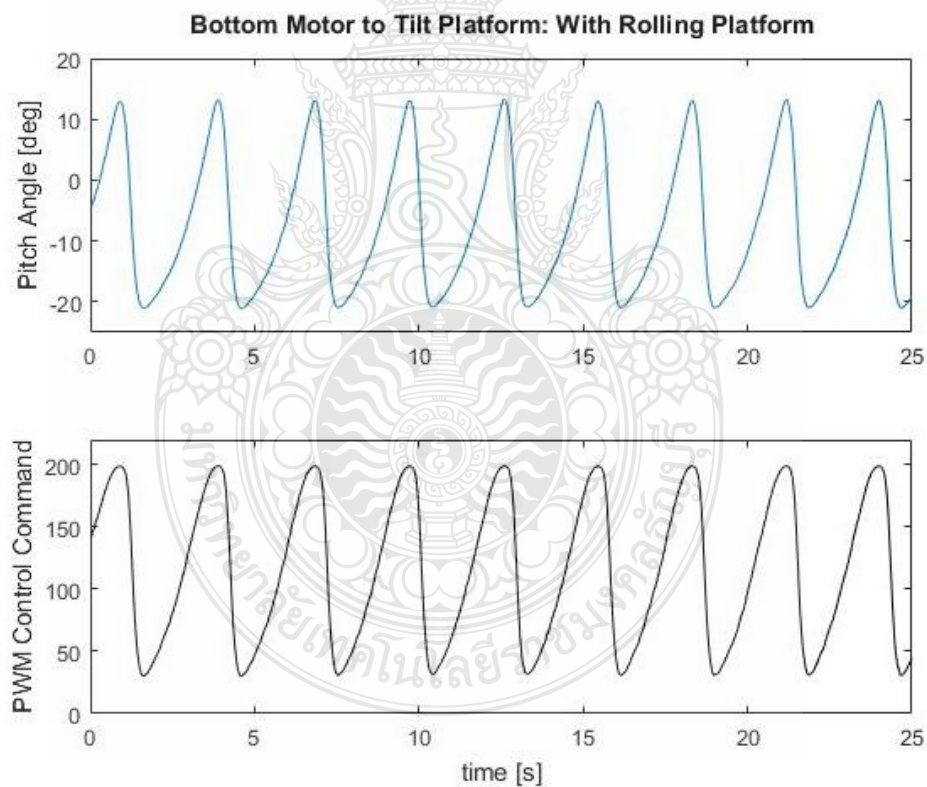


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์กับคำสั่งควบคุมมอเตอร์

4.2.2 ทดสอบกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงโดยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

การทดสอบกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยงโดยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้านี้จะช่วยปรับการหมุนของมอเตอร์ตัวที่สอง เพื่อให้ทำให้กลไกแบบสี่ก้านโยงนั้นมีความเร็วรอบที่คงที่และเพื่อช่วยชดเชยการยกโยงก้านโยงขึ้นต้านแรงโน้มถ่วงของโลก ทำการทดสอบโดยเมื่อเปิดระบบทำงาน และได้ทำการเอียงแผ่นฐานไปทางซ้ายและขวา จากผลทดสอบจะพบว่ามอเตอร์ตัวล่างสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและการหมุนขึ้นลงในแต่ละรอบนั้นมีความเร็วรอบที่คงที่และมี

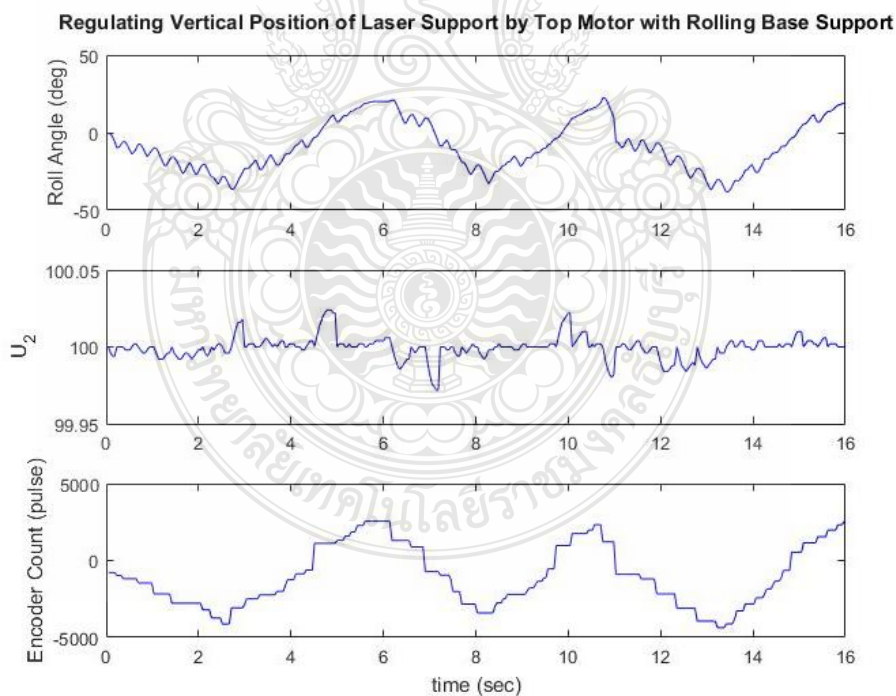
ช่วงเวลาในการหมุนขึ้น-ลงที่คงที่และเท่ากันและมุมมองของแผ่นปรับการก้ม-เงย อยู่ที่ 33° เป็นไปตามที่ได้ออกแบบ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่ามุมก้มเงย (Pitch Angle) ของ IMU ที่วัดได้ โดยในหนึ่งคาบใช้เวลาประมาณ 3 วินาที ซึ่งจะสัมพันธ์กับคำสั่งจากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจากไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน ที่ส่งเป็นค่าควบคุมแบบ PWM (PWM Control) เพื่อส่งไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์ตัวล่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 32 ถึง 199 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยในช่วงขาขึ้นของกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าก็จะมีคำสั่งไปจนถึง 199 (เพื่อสั่งให้มอเตอร์เพิ่มแรงดันทางไฟฟ้าให้มากขึ้น) และกลับกันในช่วงขาลงของกลไกเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจะสร้างคำสั่งที่ค่อยๆ ลดลงจนเหลือ 32 (มอเตอร์จะลดแรงดันทางไฟฟ้าลง)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างองศาการก้ม-เงย และคำสั่งของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า

4.2.3 ทดสอบระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา และระบบควบคุมแบบพีไอดี

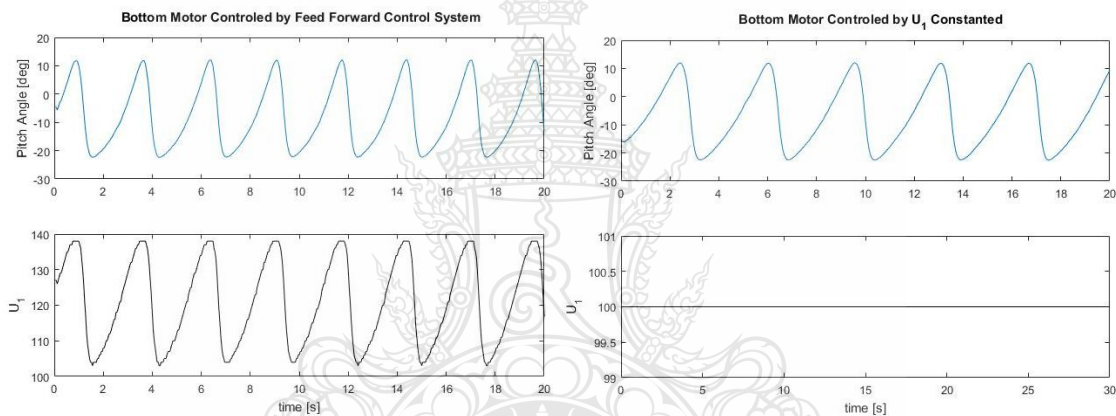
การทดสอบระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา และระบบควบคุมแบบพีไอดีนั้น เพื่อที่จะศึกษาการตอบสนองของแผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้กลับมาตั้งตรงหรือท่ามุมตั้งฉากกับระนาบแนวนอนจากการป้อนกลับขององศาการเอียงของแผ่นฐาน ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุมเอียง หรือไอเอ็มยู (IMU) เมื่อมีการเอียงแผ่นฐาน ไปทางซ้ายหรือทางขวา โดยในการทดสอบนั้นจะทำการเอียงแผ่นฐาน ไปทางซ้ายและทางขวา และสังเกตการตอบสนองของมอเตอร์ตัวบนในการปรับแผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้กลับมาตั้งตรงในแนวตั้ง ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้าย ซึ่งสังเกตได้จากองศาการก่่ง (Roll Angle) ของ IMU ที่เป็นลบ เมื่อ $t \in [0, 4.6]$ วินาที แผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์ก็จะถูกปรับให้หมุนกลับมาทางขวาให้ตั้งตรงกับแนวตั้ง โดยค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder Pulse) จะมีค่าเป็นลบ และคำสั่งของระบบควบคุมแบบพีไอดี (U_2) ที่สั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา ในทางกลับกันเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางขวาในช่วงเวลา $t \in [4.6, 7.1]$ วินาที ระบบควบคุมแบบพีไอดีก็จะพยายามปรับแผ่นยัดเลเซอร์ให้หมุนกลับมาทางซ้ายหรือสั่งให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยเช่นกัน และคำสั่ง U_2 ของระบบควบคุมจะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างองศาการก่่ง คำสั่งระบบควบคุมแบบพีไอดี และค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ของระบบรักษาการเอียงซ้าย-ขวา

4.2.4 ทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าเทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุม

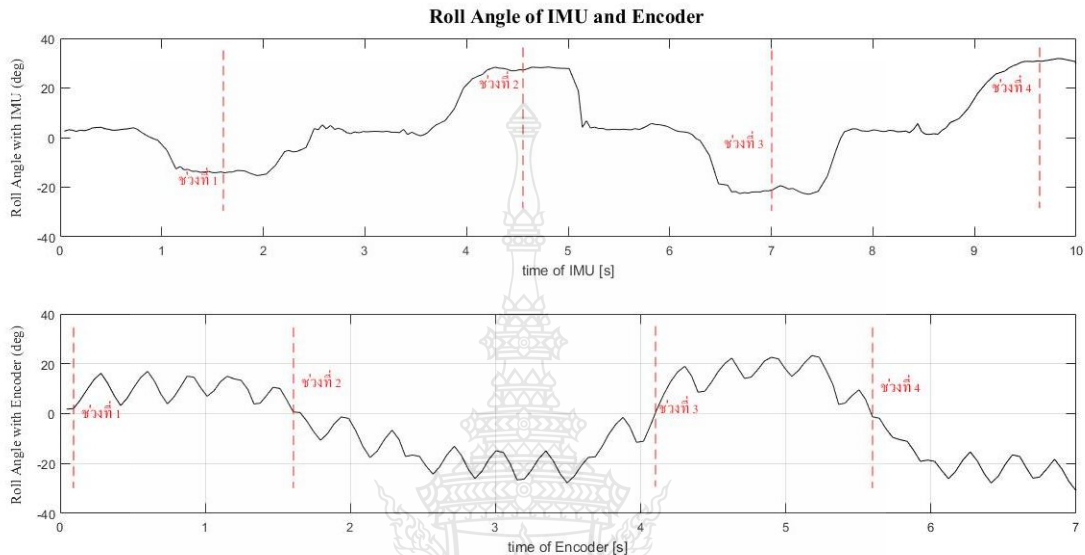
การทดสอบระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control System) เทียบกับระบบที่ไม่มีการควบคุม เพื่อที่จะดูการเปลี่ยนแปลงของมุมก้ม-เงย (Pitch Angle) ที่ต่างกัน เมื่อทำการทดสอบระบบควบคุมที่มีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า แสดงในรูปที่ 4.6 (ซ้าย) จะพบว่า ในช่วง 20 วินาที จะมีคาบของมุมก้ม-เงย ประมาณ 7 คาบ โดยจะมีจำนวนครั้งการหมุนมากกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุม แสดงในรูปที่ 4.6 (ขวา) และความชันขาขึ้นต่างกันจึงเป็นผลให้คาบของมุมก้ม-เงย ของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าจึงมีคาบที่สั้นกว่าสำหรับการทดสอบในช่วงเวลา 20 วินาที และความชันขาขึ้นของระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้านี้จะช่วยชดเชยหรือเพิ่มความเร็วยรอบของมอเตอร์ในช่วงขาขึ้นเพื่อให้มีแรงในการจับชุดคลัทช์เชื่อมต่อแบบสีก้าน โยงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น



รูปที่ 4.6 มุมก้ม-เงย ที่มีระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (ซ้าย) และที่ไม่มีระบบควบคุม (ขวา)

4.2.5 ทดสอบการเอียงของแผ่นฐานเพื่อสังเกตมุมก้มเงยของแผ่นฐานที่ได้จากไอเอ็มยู (IMU) กับมุมของแผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) เทียบกัน ซึ่งจะช่วยให้ทราบได้ว่าเมื่อมุมก้มเงยของแผ่นฐานเปลี่ยนไปแล้วจะยังสามารถทำให้แผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์กลับมาขนานกับระนาบแนวนอนหรือไม่ ในการทดสอบจะทำการเอียงแผ่นฐานไปทางซ้ายซึ่งจะทำให้มุมก้มเงยของไอเอ็มยูมีค่าลบและหยุดนิ่งในช่วงที่ 1 ของมุมก้มเงยไอเอ็มยู ซึ่งอยู่ประมาณ -18° จากนั้นคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้มุมก้มเงยของเอ็นโค้ดเดอร์พยายามหมุนกลับมาทางขวาโดยค่ามุมจะอยู่ประมาณ 18° ในช่วงที่ 1 ของมุมก้มเงยเอ็นโค้ดเดอร์ และทำให้แผ่นยัดเลเซอร์สแกนเนอร์ขนานกับแนวนอน กลับกันถ้าเอียงแผ่นฐานไปทางขวาและหยุดนิ่งในช่วงที่ 2 มุมก้มเงยของไอเอ็มยูจะอยู่ประมาณ 25° และมุมก้มเงยของเอ็นโค้ดเดอร์พยายามหมุนกลับมาทางขวาโดยค่ามุมจะอยู่ประมาณ

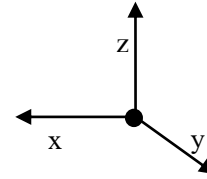
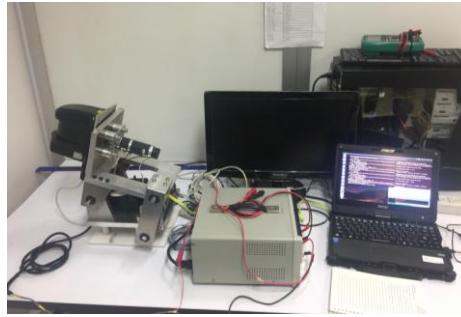
-25 ° แสดงในช่วงที่ 2 ของมุมกลิ้งเอ็นโค้ดเดอร์ ซึ่งจะทำให้แผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์กลับมาขนานกับระนาบแนวนอนเช่นกัน และคาบเวลาการหมุนกลับของแผ่นยึดเลเซอร์ที่แสดงโดยมุมกลิ้งของเอ็นโค้ดเดอร์จะมีระยะเวลาที่ต่างกันในแต่ละช่วง แสดงในรูปที่ 4.7



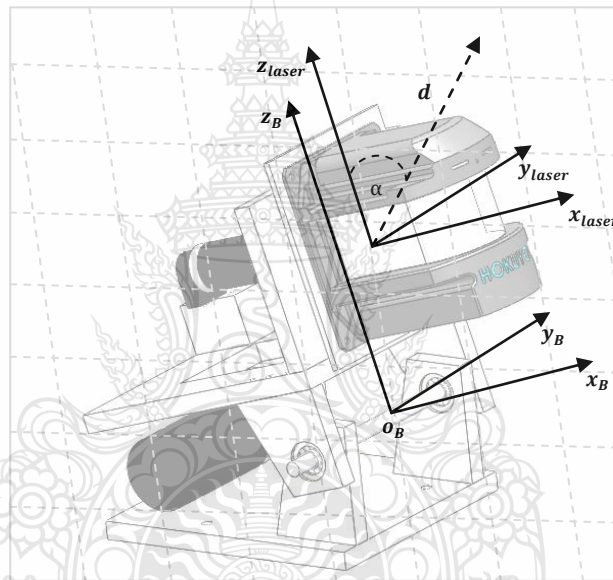
รูปที่ 4.7 มุมกลิ้งของไอเอ็มยู (บน) และมุมกลิ้งของเอ็นโค้ดเดอร์ (ล่าง)

4.3 ทดสอบวิเคราะห์ทางกลุ่มจุดในสามมิติของข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์

4.3.1 หลังจากทำการทดสอบอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นแล้ว จะต้องทำการทดสอบการทำงานของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น แสดงในรูปที่ 4.8 และเพื่อที่จะนำข้อมูลระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบสองมิติมาบูรณาเข้ากับองศาการก้ม-เงย (θ_1) ที่วัดได้จาก IMU ในการสร้างพื้นผิวสามมิติ โดยการนำข้อมูลกลุ่มจุดระยะทางในแนวรัศมีจากเลเซอร์สแกนเนอร์ (d) ที่กวาดเป็นมุม α ในช่วง $\pm 95^\circ$ มาแปลงให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนเทียบกับแกนอ้างอิงที่ตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเพลาของฐานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์หรือจุด o_b ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.8 เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งกับอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้น



รูปที่ 4.9 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมี และกวาดเป็นมุม α

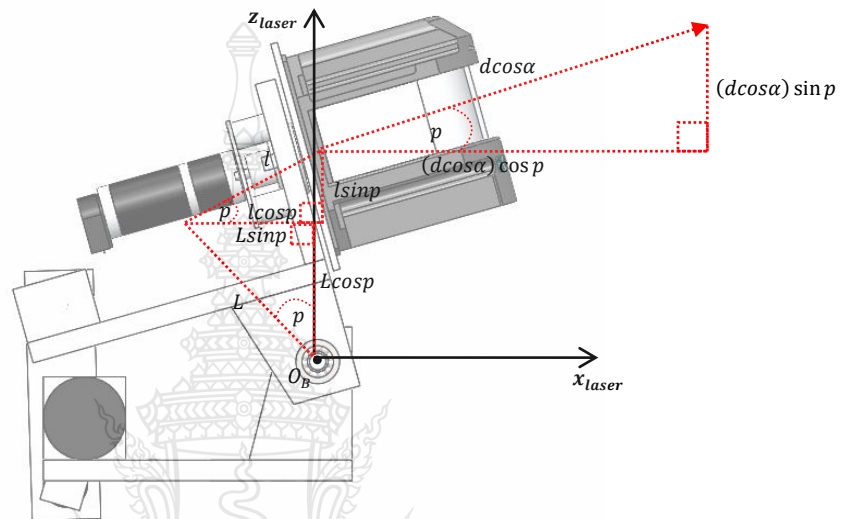
จากรูปที่ 4.9 จะพบว่าจุดที่เลเซอร์สแกนเนอร์วัดระยะทางในแนวรัศมีเป็น d ที่กวาดเป็นมุม α จากฝั่งด้านซ้ายไปขวา เมื่อพิจารณาในระนาบ xz และระนาบ yz จะได้ระยะทางในแนวรัศมีเป็น $d \cos \alpha$ และ $d \sin \alpha$ ตามลำดับ ฉะนั้นจะได้ระยะทางของวัตถุเทียบกับจุด O_B ตามแกน x_B, y_B และ z_B ที่อธิบายด้วยสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ดังในรูปที่ 4.10

$$x = (d \cos \alpha) \cos \rho + l \cos \rho - L \sin \rho \quad (4.1)$$

$$y = d \sin \alpha \quad (4.2)$$

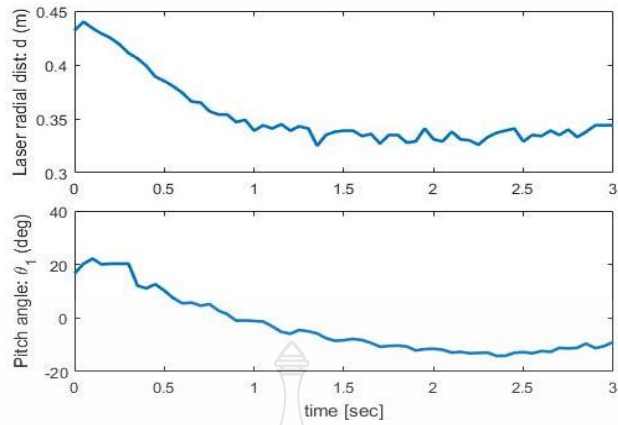
$$z = (d \cos \alpha) \sin \rho + l \sin \rho + L \cos \rho \quad (4.3)$$

โดยที่ จุด o_B นั้นตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของเพลลาที่ฐาน ส่วน z_B และ z_{laser} ซึ่งขนานกับขอบด้านข้างในแนวตั้งของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ y_B และ y_{laser} ซึ่งขนานไปกับเพลลาที่ฐานของชุดกลไก และ x_B และ x_{laser} ซึ่งไปข้างหน้าของเลเซอร์สแกนเนอร์

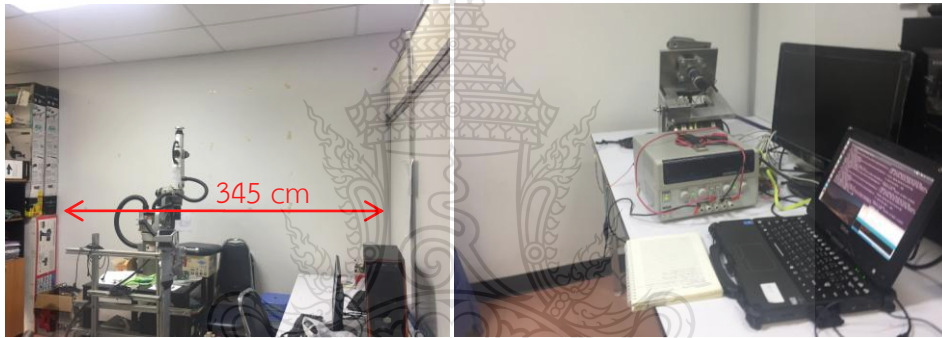


รูปที่ 4.10 ระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์เมื่อเทียบกับจุด o_B ที่แผ่นฐานในระนาบ xz

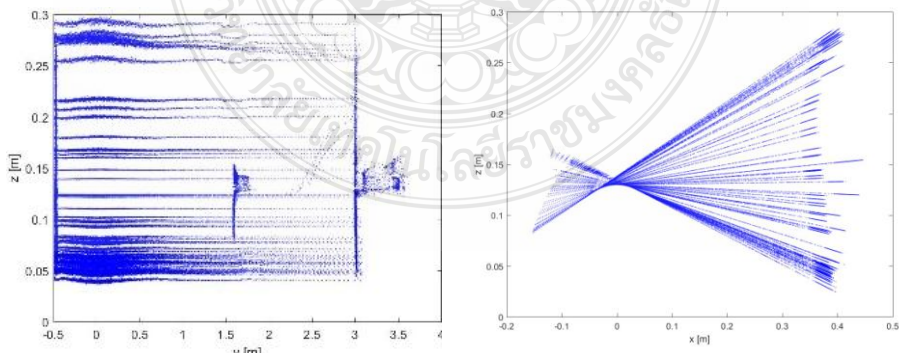
จากสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เมื่อนำข้อมูลองศาแกม-เบตา (θ_1) ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 4.11 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี (d) ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 4.12 แทนลงในสมการที่ 4.1, 4.2, 4.3 และนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นไปแสดงผลในพิกัดคาร์ทีเซียนจากการทดสอบด้วยโปรแกรม MATLAB ดังในรูปที่ 4.13 และ 4.14 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัดแนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด o_B นั้นอยู่ที่พิกัด $(x, y, z) = (0,0,0.13)$ เมตร



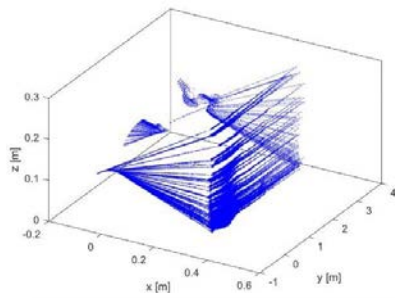
รูปที่ 4.11 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมีและองศาการก้ม-เงย ในช่วงเวลา 3 วินาที



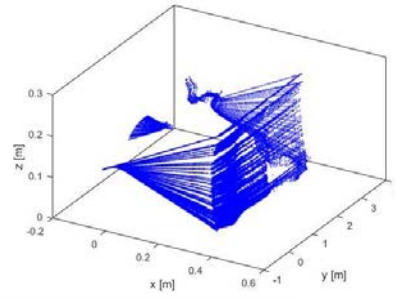
รูปที่ 4.12 สถานที่ใช้ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร



รูปที่ 4.13 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติในระนาบ yz เมื่อมองจากด้านหน้า (ซ้าย) และในระนาบ xz เมื่อมองจากด้านข้าง (ขวา) จากการทดสอบครั้งที่ 1



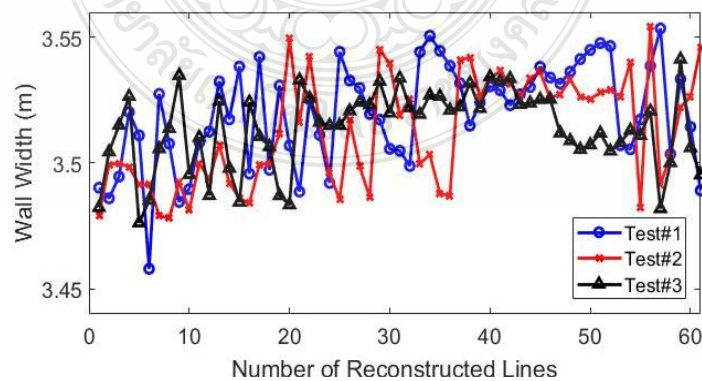
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.14 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นในพิกัด xyz ของผนังในห้องทดลอง ก) ทดสอบครั้งที่ 1 ข) ทดสอบครั้งที่ 2

จากผลการทดสอบสามครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของความกว้างผนังที่วัดได้จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติ จำนวนแนวเส้นที่สแกนได้ (Number of Reconstructed Lines) จากเลเซอร์ในครั้งรอบในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีจำนวนทั้งหมด 62 เส้น และระยะทางความกว้างของผนังดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแต่ละเส้นนั้นมีความใกล้เคียงกันมากในระดับมิลลิเมตร แล้วจึงทำการหาค่าน้อยสุด (Min) ค่ามากที่สุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std) จากข้อมูลความกว้างทั้ง 62 แนวเส้นในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังในตารางที่ 4.1 เมื่อเทียบความกว้างของผนังในห้องทดลองที่วัดด้วยตลับเมตร กับ ค่าเฉลี่ยของความกว้างผนังที่ประมวลจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดที่เก็บจากเลเซอร์สแกนเนอร์ จะพบว่ามีค่าความผิดพลาด ± 7 เซนติเมตร หรือ $\pm 2\%$ ซึ่งจะมาได้จากความผิดพลาดในการวัดความกว้างด้วยตลับเมตร และ มุมก้ม-เงยที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU



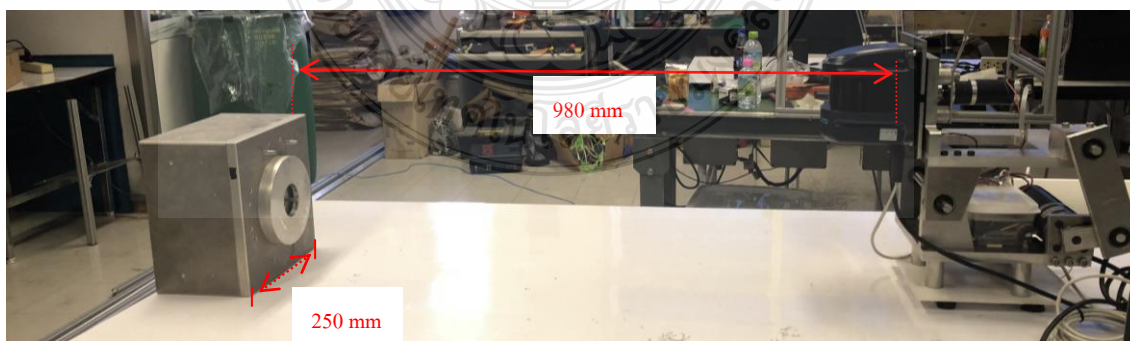
รูปที่ 4.15 ความกว้างผนังที่วัดจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดใน 3 มิติสำหรับการทดสอบ 3 ครั้ง

ตารางที่ 4.1 ผลการประมวลค่าความแม่นยำของความกว้างของผนัง (W) จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติที่ประเมินจากค่าเฉลี่ยของความกว้าง หรือ Mean (W) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้าง หรือ Std (W) จากการทดสอบ 3 ครั้ง

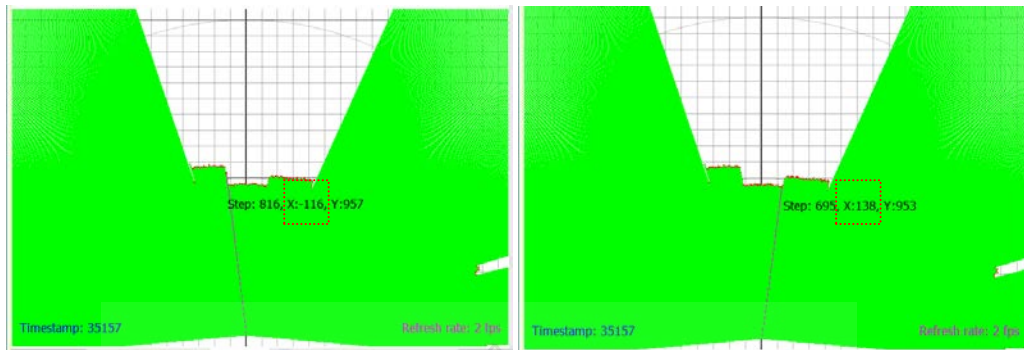
Test No.	Min (W) (เมตร)	Max (W) (เมตร)	Mean (W) (เมตร)	Std (W) (เมตร)
1	3.458	3.554	3.520	0.020
2	3.478	3.554	3.513	0.022
3	3.476	3.541	3.514	0.016

4.3.2 ทดสอบความแม่นยำของเลเซอร์สแกนเนอร์กับวัตถุประเภทต่างๆ เช่น ก่อ่งอลูมิเนียม และก่อกกระดาศ โดยจะเปรียบเทียบผลข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ว่ามีความผิดพลาดอย่างไรเมื่อเทียบกับระยะทางความกว้างที่ได้ทำการวัดจริง โดยใช้โปรแกรมของ UrgBenriPlus ในการแสดงผลข้อมูลของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่มองจากมุมมองด้านบน โดยข้อมูลเบื้องต้นของเลเซอร์สแกนเนอร์ Hokuyo UXM-30LXH-EWA นั้นจะมีความผิดพลาดไม่เกิน ± 30 มิลลิเมตร ที่ระยะห่างระหว่าง 0.1-15000 มิลลิเมตร สำหรับการสแกนในห้องที่มีแสงสว่างประมาณ 1,000 lux

4.3.2.1 ทดสอบผลการเก็บข้อมูลระยะทางความกว้างของก่อกอลูมิเนียมที่มีความกว้าง 250 มิลลิเมตร เทียบกับขนาดที่วัดได้จริงเพื่อจะหาความผิดพลาดของข้อมูลที่วัดได้ โดยได้เว้นระยะระหว่างจุดที่ปล่อยแสงเลเซอร์สแกนเนอร์และก่อกอลูมิเนียมที่มีระยะห่าง 980 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อทำการสแกนด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ตรงผิวที่เรียบของก่อกอลูมิเนียมจะได้ระยะทางความกว้าง 254 มิลลิเมตร จากโปรแกรม UrgBenriPlus ที่แสดงในรูปที่ 4.17 ระยะความกว้างนั้นมีค่าความผิดพลาดเพียง 4 มิลลิเมตรหรือคิดเป็นร้อยละ 1.60

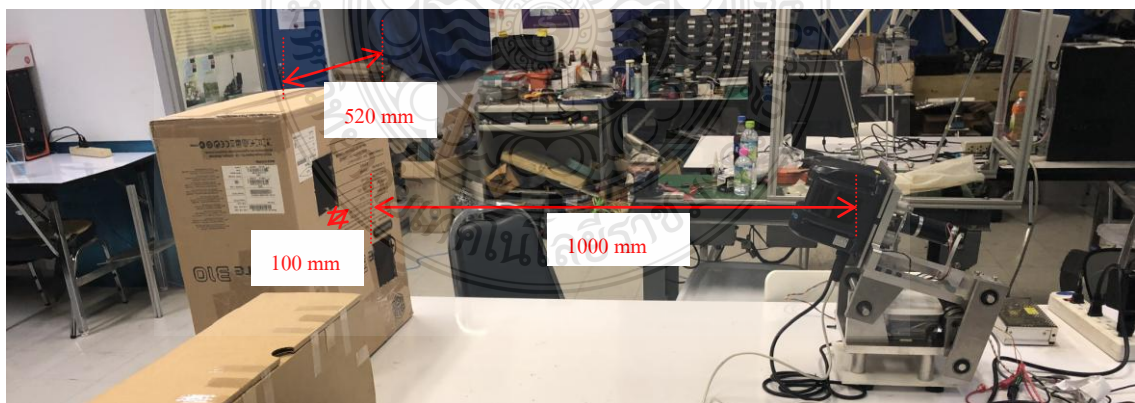


รูปที่ 4.16 ระยะทางของก่อกอลูมิเนียมกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์

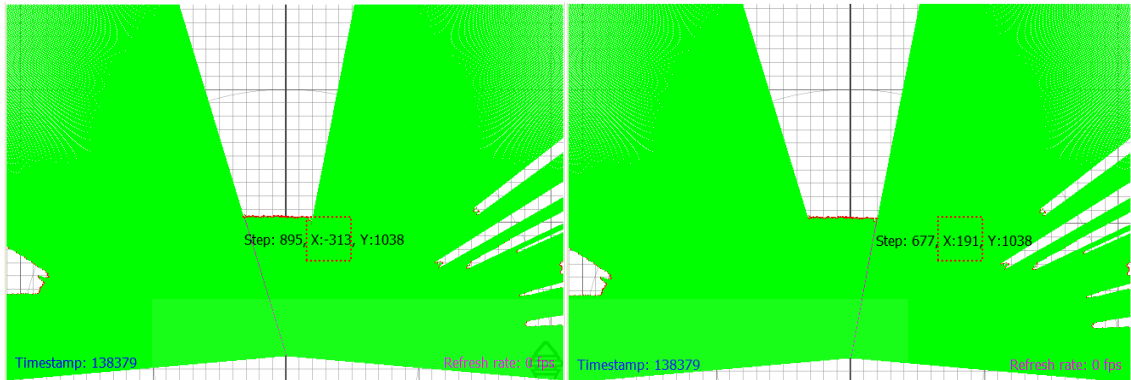


รูปที่ 4.17 ข้อมูลระยะทางระหว่างกล่องอคูมินิยมกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์จาก UrgBenriPlus

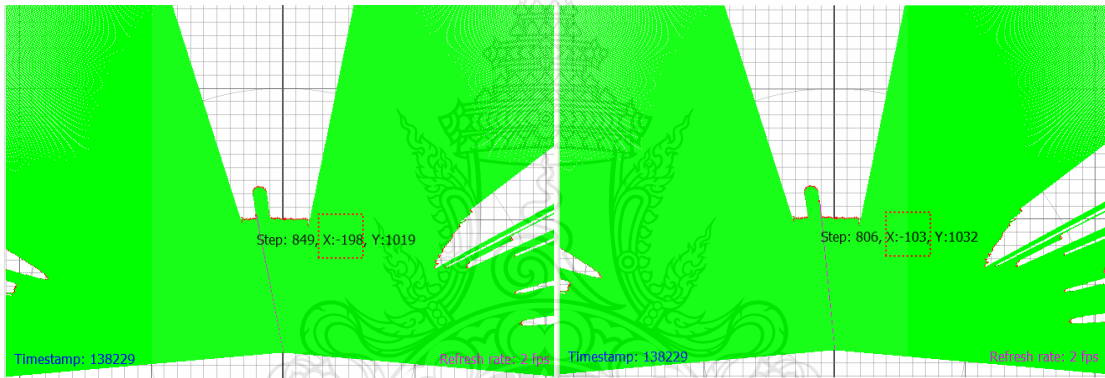
4.3.2.2 ทดสอบผลการเก็บข้อมูลระยะความกว้างของกล่องกระดาษที่มีความกว้าง 520 มิลลิเมตร และ ถูกเจาะรูขนาด 100 มิลลิเมตร เทียบกับขนาดที่วัดจริงเพื่อจะหาความผิดพลาดของข้อมูลที่วัดได้ โดยได้เว้นระยะระหว่างจุดปล่อยแสงเลเซอร์สแกนเนอร์กับกล่องอคูมินิยมที่มีระยะห่าง 1000 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.18 เมื่อทำการสแกนด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ตรงผิวที่เรียบของกล่องกระดาษตรงที่ไม่มีการเจาะรูจะได้ระยะความกว้าง 504 มิลลิเมตร ที่วัดจากโปรแกรม UrgBenriPlus ที่แสดงในรูปที่ 4.19 ระยะทางความกว้างนั้นมีค่าความผิดพลาดเพียง 16 มิลลิเมตรหรือคิดเป็นร้อยละ 3.08 และเมื่อทำการสแกนไปยังตำแหน่งที่มีการเจาะรูทางด้านซ้าย แสดงในรูปที่ 4.20 จะได้ระยะทางความกว้างของรู 95 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดของความกว้างของรูเพียง 5 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 5



รูปที่ 4.18 ระยะทางของกล่องกระดาษที่เจาะรูกับจุดปล่อยแสงของเลเซอร์



รูปที่ 4.19 ข้อมูลระยะความกว้างของกล่องกระดาษที่เจาะรู ที่วัดจากโปรแกรม UrgBenriPlus เมื่อจุดปล่อยแสงของเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0)

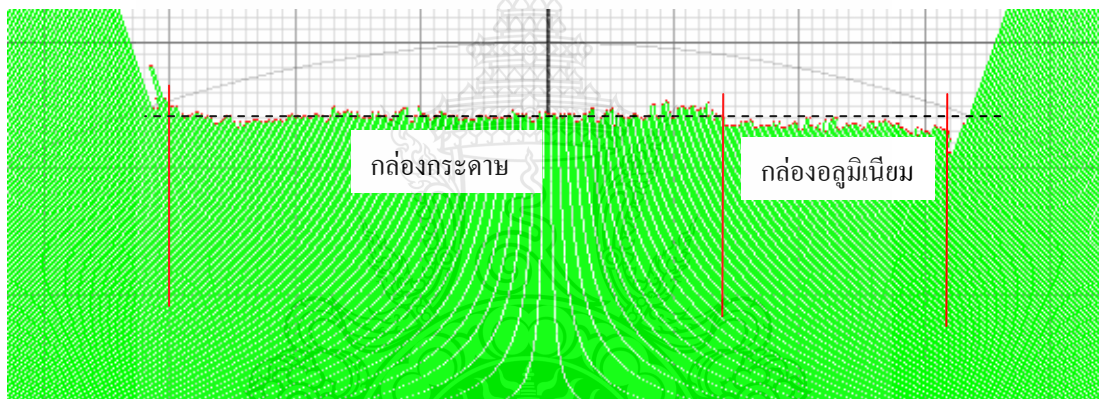


รูปที่ 4.20 ข้อมูลระยะความกว้างของรูด้านซ้าย ที่วัดจาก โปรแกรม UrgBenriPlus เมื่อจุดปล่อยแสงของเลเซอร์อยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0)

4.3.2.3 ทดสอบผลการเก็บข้อมูลระยะทางของกล่องอลูมิเนียมกับกล่องกระดาษเพื่อจะเปรียบเทียบผลกระทบของผิววัตถุ 2 ชนิด ที่มีต่อการสแกนด้วยเลเซอร์ แสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งเมื่อทำการสแกนด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์ในตำแหน่งที่ผิวเรียบและมีระยะห่างระหว่างกล่องและจุดที่ปล่อยแสงเลเซอร์ที่เท่ากันนั้น จะพบว่าผิวของกล่องอลูมิเนียมมีผลกระทบที่แตกต่างจากผิวของวัตถุกล่องกระดาษที่ทำให้ข้อมูลระยะห่างต่างกันประมาณ 0.5 หรือ 1 ช่อง ที่วัดจาก โปรแกรม UrgBenriPlus หรือประมาณ 10 ตารางมิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.20 จากผลการทดลองทำให้ทราบว่าพื้นผิววัตถุแบบโลหะที่มีการสะท้อนแสงได้ของอลูมิเนียมนั้นอาจจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีค่าความผิดพลาดของระยะห่างที่ต่างจากวัตถุที่ไม่สะท้อนแสงแบบกล่องกระดาษ



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งที่สแกนของวัตถุ 2 ชนิด ที่วัดด้วยเลเซอร์สแกนเนอร์



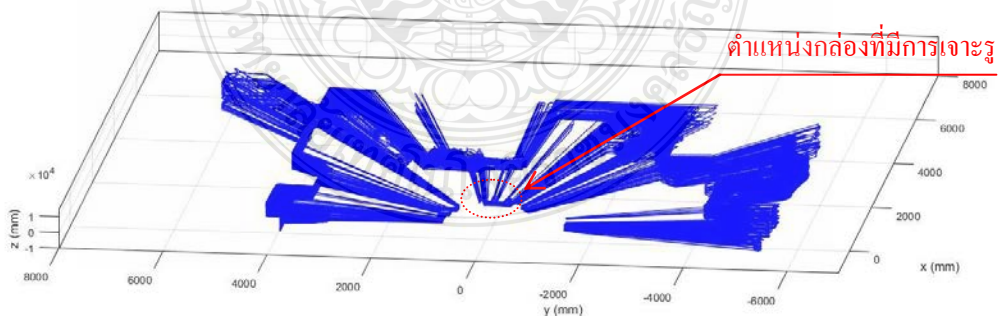
รูปที่ 4.22 ข้อมูลระยะห่างของวัตถุ 2 ชนิด คือ กล่องกระดาษและกล่องอลูมิเนียม จากจุดปล่อยแสงของเลเซอร์ ที่วัด โดยโปรแกรม UrgBenriPlus

4.3.3 ทำการทดสอบเก็บข้อมูลการสแกนกล่องสี่เหลี่ยมขนาดเล็กที่มีการเจาะรูด้วยเลเซอร์สแกน เพื่อนำไปสร้างพื้นผิวในรูปแบบของข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างพื้นผิวในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ดังเช่นในหัวข้อ 4.3.1 และประเมินผลระยะความกว้างของวัตถุหรือกล่อง โดยพื้นที่การทดสอบแสดงในรูปที่ 4.23 ซึ่งกล่องที่ใช้ทดสอบมีขนาดกว้าง 520 มิลลิเมตร ยาว 520 มิลลิเมตร โดยมีรูที่ถูกระบายที่กว้าง 100 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร

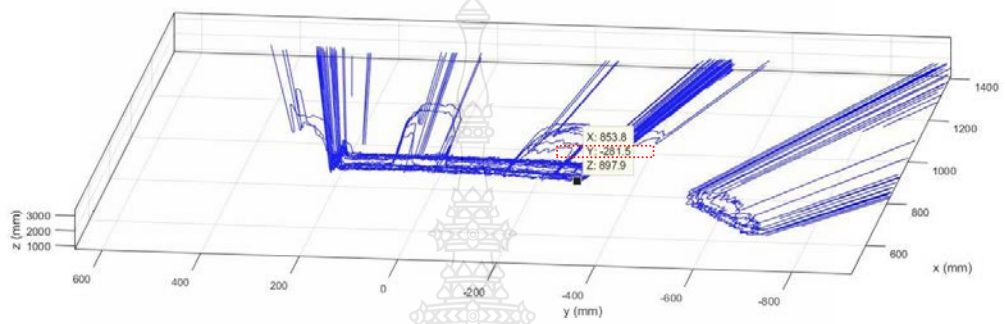
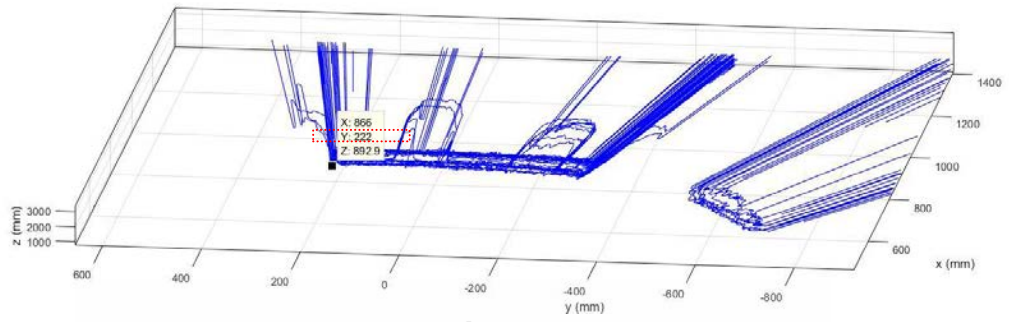


รูปที่ 4.23 พื้นที่ทดสอบการสแกนกล้องสี่เหลี่ยมที่มีการเจาะรู

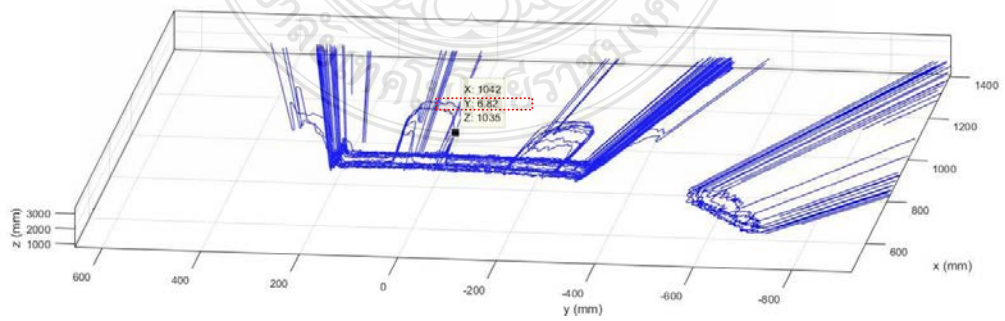
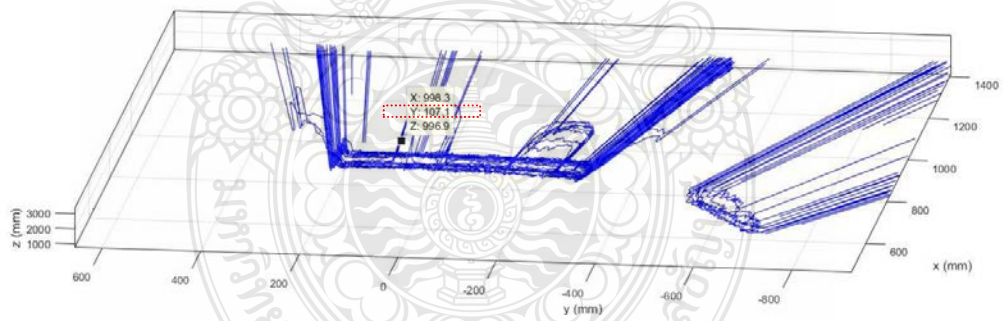
ผลการสอบนั้นจะได้พื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติที่แสดงผลในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ดังในรูปที่ 4.24 โดยระยะความทางกว้างของกล้องอยู่ที่ 504 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 16 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 3.08 ส่วนระยะทางความกว้างของรูนั้นมีค่า 100.3 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตรหรือ คิดเป็นร้อยละ 0.30



รูปที่ 4.24 ข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติที่ได้จากการเก็บข้อมูลในห้องทดสอบ



รูปที่ 4.25 ระยะความกว้างของกล่องที่เจาะรูที่แสดงในข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติ



รูปที่ 4.26 ระยะความกว้างของรูเจาะบนกล่องที่แสดงในข้อมูลกลุ่มจุดแบบสามมิติ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุสำหรับติดตั้งบนเรือ โดยชุดกลไกที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ให้ข้อมูลกลุ่มจุดเฉพาะในระนาบแนวนอน ให้สามารถวัดข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบแนวตั้งเพิ่มขึ้นมา แล้วจึงจะสามารถช่วยสร้างเป็นพื้นผิวสามมิติ โดยจะใช้กลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง (Four-bar Linkage) ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เพื่อให้เลเซอร์มีองศาการหมุนแบบก้ม-เงย (Pitch Angle) รอบแกน y หรือ เป็นการเพิ่มองศาอิสระในการเก็บข้อมูลระยะทางในแนวตั้งจากเลเซอร์ โดยมีองศาการก้มเงยอยู่ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ และมีความเร็วรอบคงที่ $13.2^\circ/\text{วินาที}$ จากการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control System) นอกจากนั้นชุดกลไกนี้ยังมีระบบรักษาระนาบการเอียงซ้าย-ขวา ของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ ซึ่งใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียง (Inertial Measurement Unit) ในการวัดค่ามุมเอียงแบบกิ้ง (Roll Angle) ของแผ่นฐานเลเซอร์สแกนเนอร์ และส่งค่าป้อนกลับไปควบคุมมอเตอร์ตัวที่หนึ่งที่มีเอนโค้ดเดอร์ด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี ให้หมุนปรับแก้องศาการเอียงซ้าย-ขวารอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าของหัวเรือ โดยจะสามารถปรับแก้องศาการเอียงของแผ่นฐานเลเซอร์ เมื่อมีองศาการเอียงอยู่ในช่วงที่น้อยกว่า $\pm 60^\circ$ และ มีความเร็วรอบในการปรับแก้องศาการเอียงเป็น $22.5^\circ/\text{วินาที}$

ในการออกแบบกลไกก่อนการจัดทำชิ้นส่วน ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางจลนศาสตร์และพลศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำให้สามารถคำนวณหาแรงบิดอย่างน้อยที่ที่ต้องการ เพื่อนำมาใช้เลือกมอเตอร์ที่จะมาประยุกต์สร้างชุดกลไกที่ออกแบบไว้ให้มีกำลังเพียงพอ การพัฒนาระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) สำหรับมอเตอร์ตัวบนเพื่อให้สามารถควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาได้เมื่อฐานของชุดกลไกเกิดการเอียง ที่ส่งผลให้สามารถรักษาระนาบของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน ส่วนระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง จะสามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยการเพิ่มความเร็วในช่วงขาขึ้นและลดความเร็วในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยง ที่ช่วยชดเชยน้ำหนักของกลไกแบบสี่ก้านโยงเมื่อมีการหมุนขึ้น ส่งผลให้ได้ข้อมูลของกลุ่มจุดจากเลเซอร์ที่วัดได้แบบสม่ำเสมอในแนวตั้ง

ในการวิเคราะห์ความแม่นยำในการสร้างพื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติ ในระบบ พิกัดคาร์ทีเซียนที่สร้างขึ้นจาก กลุ่มจุดข้อมูลวัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบแนวนอนหรือ แนวรัศมี โดยได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของความกว้างของผนังในห้องทดลอง โดยตรวจสอบ ค่าความผิดพลาด อยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร หรือ คิดเป็น $\pm 2\%$ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ไม่เกินกว่า 2 เซนติเมตร

นอกจากนั้นได้ทำการทดสอบหาค่าความผิดพลาดในการวัดระยะความกว้างของวัตถุจาก ข้อมูลที่วัดได้โดยเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยใช้โปรแกรม UrgBenriPlus ในการทดสอบมีระยะห่างใน การสแกนระหว่างจุดปล่อยแสงเลเซอร์และวัตถุที่จะทำการวัดความกว้างอยู่ที่ 980 มิลลิเมตร และทำ การสแกนวัตถุ 2 ชนิด ได้แก่ ก่อถ่วงอลูมิเนียมและก่อกองกระดาษ ผลของค่าความผิดพลาดในการวัด ความกว้างของข้อมูลจากกล้องมีค่าร้อยละ 1.60 และ 3.08 ตามลำดับ อีกทั้งได้ทำการทดสอบสร้าง พื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติจากกล้องที่มีการเจาะรูและหาค่าความผิดพลาดของระยะ ความกว้างของกล้องและรูที่เจาะ ผลค่าความผิดพลาดในการวัดความกว้างของกล้องและรูที่วัดได้มีค่า ร้อยละ 3.08 และ 0.3 ตามลำดับ

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

5.2.1 ปัญหาการทำงานของเซนเซอร์ที่เชื่อมต่อสายไม่แน่น หรือสายไฟที่ต่อกับชุดควบคุม หลวมหรือเสื่อมสภาพ

5.2.2 ปัญหาของชุดกลไกๆ ที่ยังมีขนาดใหญ่ซึ่งทำให้เป็นปัญหาในการติดตั้งบนเรือ หรือ ยานพาหนะอื่นๆ ซึ่งอาจจะออกแบบชุดกลไกๆ ให้มีขนาดกระทัดรัด และสามารถนำไปติดตั้งบนเรือ และยานพาหนะอื่นๆ ได้

5.2.3 ปัญหาจากการทดลองเมื่อเกิดอุบัติเหตุจากการตกน้ำ เป็นสาเหตุให้ต้องซ่อมระบบ อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ทั้งหมด

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

5.3.1 ควรจะพัฒนาระบบให้สามารถนำไปเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ สร้างยานพาหนะที่ใช้หลบสิ่งกีดขวางได้

5.3.2 ควรจะพัฒนาระบบข้อมูลให้สามารถออกมาแสดงแบบออนไลน์ได้ กรณีนำไป สํารวจอุทกศาสตร์ต่างๆ

5.3.3 ออกแบบชุดกลไกให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์เก็บข้อมูลต่างๆ ที่นอกเหนือจากเลเซอร์ สแกนเนอร์ที่ใช้วิจัยได้ ได้ เช่น กล้อง หรือ สแกนเนอร์ยี่ห้ออื่น เป็นต้น

5.3.4 พัฒนาการรักษาระนาบการเอียงซ้าย-ขวา ของกลไกๆ นี้ ให้สามารถนำไปใช้งานใน น้ำได้เพื่อประสิทธิภาพในการเก็บข้อมูลในน้ำที่ดีขึ้น



บรรณานุกรม

- [1] Experimental evaluation of an Autonomous Surface Vehicle for water quality and greenhouse (Online), Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-evaluation-of-an-Autonomous-Surface-V-DunbabinGrinham/582cb52016794bf3cda4ea085bb38146f67a2a9f/figure/0>, (March 10, 2017).
- [2] P. Prempraneerach, M. Janthong, K. Phothongkum, C. Choosui, S. Timpitak, "Hydrographical survey using point cloud data from laser scanner and echo sounder," 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1-6, 2016.
- [3] Andrei Battistel, Fernando Lizarralde and Liu Hsu, Inertially stabilized platforms using dual-axis gyros, Department of Electrical Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Brazil, (2012).
- [4] วิชา อุปภัย, ระบบควบคุมระดับของแผ่นรักษาความเสถียร, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [5] Hannes Ovren and Per-Erik Forssen, Gyroscope-based Video Stabilisation With Auto-Calibration (online), 2015. available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7139474>, (July 2, 2015).
- [6] David Evanko, Arend Dorrsett and Chiu Choi, A ball on beam system with embradedd controller (online), 2008. available: https://www.asee.org/documents/zones/zone1/2008/professional/ASEE12008_0012_paper.ppd, (Jun 13, 2008).
- [7] วสันต์ ลีละธนาฤกษ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, การศึกษาและออกแบบสร้างหุ่นยนต์กระพ้อปีกควบคุมด้วยวิทยุบังคับ, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557.
- [8] Thomas J. Pastore and Andrew N. Patrikalakis, Laser Scanners for Autonomous Surface Vessels in Harbor Protection: Analysis and Experimental Results (online), 2011. available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5730270/> (March 14, 2011).

- [9] LIU Hongkai, HE Guojian, YU Haichen, ZHUANG Yan and WANG Wei, Fast 3D Scene Segmentation and Classification with Sequential 2D Laser Scanning Data in Urban Environments (online), 2016. available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7554484>, (August 29, 2016).
- [10] ไกรศักดิ์ โพธิ์ทองคำ, การควบคุมแบบพีไอดี+พีซซีของระบบหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ภายในอาคาร, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2558.
- [11] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo, Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [12] Reza N. Jazar, Theory of Applied Robotics : Kinematics, Dynamics, and Control, Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC 2006, 2010 .
- [13] พงศ์แสน พิทักษ์วัชร, พื้นฐานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบอนุกรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
- [14] สุชาติ จันทร์จรมานิตย์, Control Systems (Online), 2551, Available : <http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/Control.pdf>, (January 7, 2015).
- [15] การควบคุมพลังงานไฟฟ้าอัตโนมัติและการประมวลผล (Online), Available: http://www2.dede.go.th/bhrd/old/Download/file_handbook/Pre_Elec/Elec_3.pdf, (December 3, 2017)
- [16] ระบบควบคุมพีไอดี (Online), Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมพีไอดี>, (December 18, 2014).
- [17] วีระยุทธ บุญครอง, หลักการทำงานของซิมมูลิ่งในแมทแลป, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ , ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120 (21/6/2547).
- [18] MinIMU-9 v3 Gyro, Accelerometer, and Compass (L3GD20H and LSM303D Carrier) (Online), Available: : <https://www.pololu.com/product/2468>, (September 8, 2017).
- [19] Arduino DUE (Online), <http://www.thaieasyelec.com/products/development-boards/arduino-due-detail.html>, (October 18, 2017).
- [20] Hokuyo UXM-30LXH-EWA (Online), <https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/07/UXM-30LXH-EWA.pdf>, (October 30, 2017).
- [21] มอเตอร์เกียร์รหัส J2046 (Online), <http://www.nattakit.com/L2046.jpg>, (November 10, 2017).

[22] มอเตอร์ครอบ (Online), http://www.sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=261&lng=th, (November 22, 2017).



ภาคผนวก

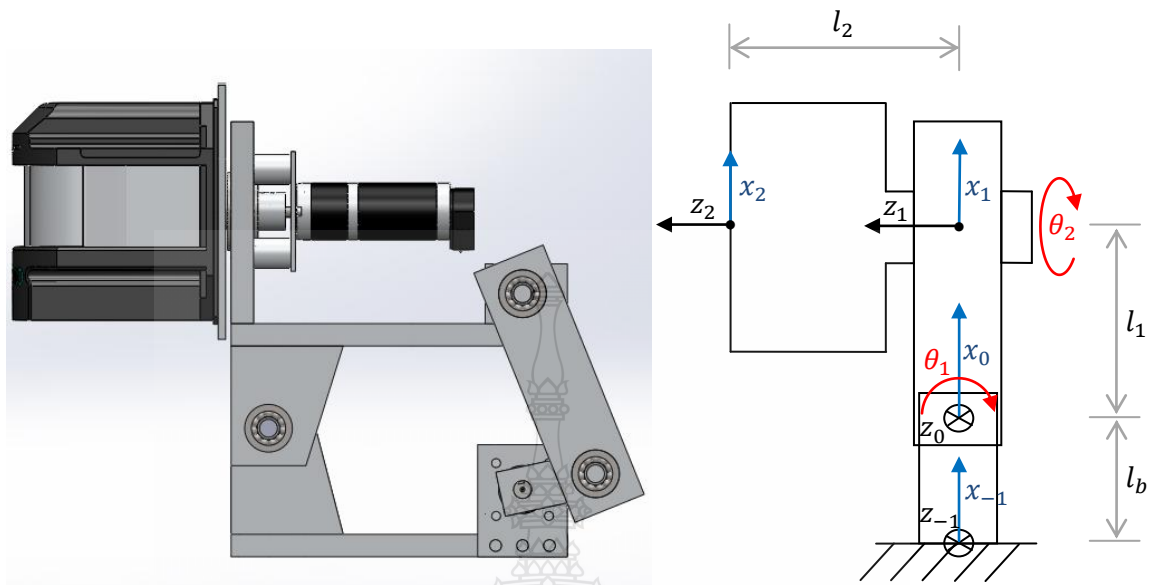


ภาคผนวก ก

แสดงวิธีคำนวณการหาสมการพหุนามของหุ่นยนต์



ก.1 แสดงวิธีคำนวณ



ภาพที่ ก.1 แสดงการตั้งแกนหุ่นยนต์สำหรับคำนวณหาพารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก

- โดยที่
- a_i คือ ระยะทางจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i
 - d_i คือ ระยะทางจากแกน X_{i-1} ไปยังแกน X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1}
 - α_i คือ มุมที่วัดจากแกน Z_{i-1} ไปยังแกน Z_i รอบแกน X_i
 - θ_i คือ มุมที่วัดจากแกน X_{i-1} ไปยัง X_i รอบแกน Z_{i-1}

ตารางที่ ก.1 D-H Table

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
0	0	l_b	0	0
1	90°	l_1	0	θ_1
2	0	0	l_2	θ_2

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_b \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & l_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & l_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 & l_1 c_1 + l_2 s_1 \\ c_2 s_1 & -s_1 s_2 & -c_1 & l_1 s_1 - l_2 c_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จาก T_1^0 , T_2^1 และ T_2^0 จะได้

$${}_{(0)}\vec{r}_1 = [l_1 c_1 \quad l_1 s_1 \quad 0]^T, \quad {}^{01}R = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}_{(1)}\vec{r}_2 = [0 \quad 0 \quad l_2]^T, \quad {}^{12}R = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}\vec{r}_2 = [l_1 c_1 + l_2 s_1 \quad l_1 s_1 - l_2 c_1 \quad 0]^T,$$

$${}^{02}R = \begin{bmatrix} c_1 c_2 & -c_1 s_2 & s_1 \\ c_2 s_1 & -s_1 s_2 & -c_1 \\ s_2 & c_2 & 0 \end{bmatrix}$$

การหา Jacobian ของแต่ละ link เมื่อข้อต่อที่ i เป็นข้อต่อแบบหมุน

$$J_q = \begin{bmatrix} J_{p1} \\ J_{o1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{z}_{i-1} \times {}_{(0)}\vec{r}_{i-1,P} \\ \vec{z}_{i-1} \end{bmatrix}$$

หรือ สามารถหา Jacobian ที่จุด CG ของแต่ละ link ได้ดังนี้

Jacobain ที่ CG ของ link ที่ 1 คือ

$$J_q = \begin{bmatrix} J_{p1} \\ J_{o1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{z}_0 \times {}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} & 0 \\ \vec{z}_0 & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $\vec{z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$ และ ${}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} = [l_{s1}c_1 \ l_{s1}s_1 \ 0]^T$

และ l_{s1} แทนที่จุด CG ของ link ที่ 1

$$J_{s1} = \begin{bmatrix} 0 & l_{s1}c_1 & 0 \\ 0 \times l_{s1}s_1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{s1}s_1 & 0 \\ l_{s1}c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

และ jacobain ที่ CG ของ link ที่ 2 คือ

$$J_{s2} = \begin{bmatrix} J_{p2} \\ J_{o2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{z}_0 \times {}_{(0)}\vec{r}_{0,s2} & \vec{z}_1 \times {}_{(0)}\vec{r}_{1,s2} \\ \vec{z}_0 & \vec{z}_1 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\vec{z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \vec{z}_1 = {}^{01}R\vec{z}_0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^{(0)}\vec{r}_{1,s2} = {}^{01}R_{(1)}\vec{r}_{s2} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{s2}s_1 \\ -l_{s2}c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^{(0)}\vec{r}_{0,s2} = {}^{(0)}\vec{r}_{0,s1} + {}^{01}R_{(1)}\vec{r}_{s2} = \begin{bmatrix} l_{s1}c_1 \\ l_{s1}s_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{s2}s_1 \\ -l_{s2}c_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 \\ l_{s1}s_1 - l_{s2}c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

และ l_{s2} แทนที่จุด CG ของ link ที่ 2

∴

$$J_{s2} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 \\ l_{s1}s_1 - l_{s2}c_1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_{s2}s_1 \\ -l_{s2}c_1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} l_{s2}c_1 - l_{s1}s_1 \\ l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_1 & 0 & 0 & 0 & s_1 & 0 \\ 0 & -c_1 & 0 & 0 & 0 & -c_1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

หา ${}^{(0)}I_i^{(s)}$ ของแต่ละ link $\Rightarrow {}^{(0)}I_1^{(s)}$ และ ${}^{(0)}I_2^{(s)}$

โดยที่ ${}^{(0)}I_1^{(s)} = {}^{01}R_{(1)}I^{(s)}{}^{01}R^T$ และค่า ${}^{(1)}I^{(s)} = \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix}$

$${}^{(0)}I_1^{(s)} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ s_1 & -c_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1x}c_1^2 + I_{1z}s_1^2 & I_{1x}c_1s_1 - I_{1z}c_1s_1 & 0 \\ I_{1x}c_1s_1 - I_{1z}c_1s_1 & I_{1z}c_1^2 + I_{1x}s_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{1y} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} I_{1x}c_1^2 + I_{1z}s_1^2 & (I_{1x} - I_{1z})c_1s_1 & 0 \\ (I_{1x} - I_{1z})c_1s_1 & I_{1z}c_1^2 + I_{1x}s_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{1y} \end{bmatrix}$$

และ ${}_{(0)}I_2^{(s)} = {}^{02}R_{(2)}I^{(s)}{}^{02}R^T$ และถ้า ${}_{(2)}I^{(s)} = \begin{bmatrix} I_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2z} \end{bmatrix}$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = \begin{bmatrix} c_1c_2 & -c_1s_2 & s_1 \\ s_1c_2 & -s_1s_2 & -c_1 \\ s_2 & c_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2x} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2y} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1c_2 & s_1c_2 & s_2 \\ -c_1s_2 & -s_1s_2 & c_2 \\ s_1 & -c_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} I_{2x}c_1^2c_2^2 + I_{2y}c_1^2s_2^2 + I_{2z}s_1^2 & I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & I_{2x}c_1c_2s_2 - I_{2y}c_1c_2s_2 \\ I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & I_{2x}c_2^2s_1^2 + I_{2y}s_1^2s_2^2 + I_{2z}c_1^2 & I_{2x}c_2s_1s_2 - I_{2y}c_2s_1s_2 \\ I_{2x}c_1c_2s_2 - I_{2y}c_1c_2s_2 & I_{2x}c_2s_1s_2 - I_{2y}c_2s_1s_2 & I_{2x}s_2^2 + I_{2y}c_2^2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} I_{2x}c_1^2c_2^2 + I_{2y}c_1^2s_2^2 + I_{2z}s_1^2 & I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & (I_{2x} - I_{2y})c_1c_2s_2 \\ I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & I_{2x}c_2^2s_1^2 + I_{2y}s_1^2s_2^2 + I_{2z}c_1^2 & (I_{2x} - I_{2y})c_2s_1s_2 \\ (I_{2x} - I_{2y})c_1c_2s_2 & (I_{2x} - I_{2y})c_2s_1s_2 & I_{2x}s_2^2 + I_{2y}c_2^2 \end{bmatrix}$$

จากสมการ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q$$

หรือ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q$$

ดึง \dot{q} เข้าไปเป็นฟังก์ชันของ C

หา $M(q)$ จาก

$$M(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(J_{pi}^{(Si)} \right)^T J_{T}^{(Si)} + \left(J_R^{(Si)} \right)^T {}^{0i}R_{(i)} I_i^{(S)} {}^{0i}R^T J_R^{(Si)} \right]$$

หรือ

$$M(q) = \sum_{i=1}^n \left[m_i \left(J_{pi} \right)^T J_{pi} + \left(J_{oi} \right)^T {}_{(0)}I_i^{(S)} J_{oi} \right]$$

โดย p คือ Position of vector และ o คือ Orientation of vector

ดังนั้นจะได้

$$M(q) = \sum_{i=1}^3 \left[m_i \left(J_{pi} \right)^T J_{pi} + \left(J_{oi} \right)^T {}_{(0)}I_i^{(S)} J_{oi} \right]$$

$$M(q) = \left[m_1 \left(J_{p1} \right)^T J_{p1} + \left(J_{o1} \right)^T {}_{(0)}I_1^{(S)} J_{o1} \right] + \left[m_2 \left(J_{p2} \right)^T J_{p2} + \left(J_{o2} \right)^T {}_{(0)}I_2^{(S)} J_{o2} \right] \\ + \left[m_3 \left(J_{p3} \right)^T J_{p3} + \left(J_{o3} \right)^T {}_{(0)}I_3^{(S)} J_{o3} \right]$$

โดยที่

$$J_{p1} = \begin{bmatrix} -l_{s1}s_1 & 0 \\ l_{s1}c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{o1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$J_{p2} = \begin{bmatrix} l_{s2}c_1 - l_{s1}s_1 & 0 \\ l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad J_{o2} = \begin{bmatrix} 0 & s_1 \\ 0 & -c_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

∴

$$\begin{aligned}
 M(q) &= \begin{bmatrix} m_1 \begin{bmatrix} -l_{s1}s_1 & l_{s1}c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -l_{s1}s_1 & 0 \\ l_{s1}c_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1x}c_1^2 + I_{1z}s_1^2 & (I_{1x} - I_{1z})c_1s_1 & 0 \\ (I_{1x} - I_{1z})c_1s_1 & I_{1z}c_1^2 + I_{1x}s_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & I_{1y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} m_2 \begin{bmatrix} l_{s2}c_1 - l_{s1}s_1 & l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{s2}c_1 - l_{s1}s_1 & 0 \\ l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ s_1 & -c_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{2x}c_1^2c_2^2 + I_{2y}c_1^2s_2^2 + I_{2z}s_1^2 & I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & (I_{2x} - I_{2y})c_1c_2s_2 \\ I_{2x}c_1s_1c_2^2 + I_{2y}c_1s_1s_2^2 - I_{2z}c_1s_1 & I_{2x}c_2^2s_1^2 + I_{2y}s_1^2s_2^2 + I_{2z}c_1^2 & (I_{2x} - I_{2y})c_2s_1s_2 \\ (I_{2x} - I_{2y})c_1c_2s_2 & (I_{2x} - I_{2y})c_1c_2s_2 & I_{2x}s_2^2 + I_{2y}c_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & s_1 \\ 0 & -c_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 M(q) &= \begin{bmatrix} I_{1y} + m_1l_{s1}^2 + m_2(l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x}s_2^2 + I_{2y}c_2^2 & 0 \\ 0 & I_{2z} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

หาค่า $C(q, \dot{q})$ จาก

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\partial M_{1j}(q)}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}(q)}{\partial q_1} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k \\
 &= \left(\frac{\partial m_{11}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{11}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{\partial m_{11}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{12}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
 &\quad + \left(\frac{\partial m_{12}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{21}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial m_{12}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{22}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2^2 \\
 &= 2c_2s_2(I_{2x} - I_{2y})\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2
 \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned}
C_2 &= \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\partial M_{2j}(q)}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}(q)}{\partial q_2} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k \\
&= \left(\frac{\partial m_{21}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{11}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{\partial m_{21}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{12}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&\quad + \left(\frac{\partial m_{22}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{21}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial m_{22}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial m_{22}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_2^2 \\
&= -c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2y}) \dot{\theta}_1^2
\end{aligned}$$

หา $G(q)$ จาก

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \frac{\partial U(q)}{\partial \theta_1} \quad \text{และ} \quad G_2 = \frac{\partial U(q)}{\partial \theta_2}$$

และ

$$U(q) = -\sum_{i=1}^2 m_i \bar{g}^T_{(0)} \bar{r}_{s_i}$$

โดยที่ $\bar{g}^T = [g \quad 0 \quad 0]$

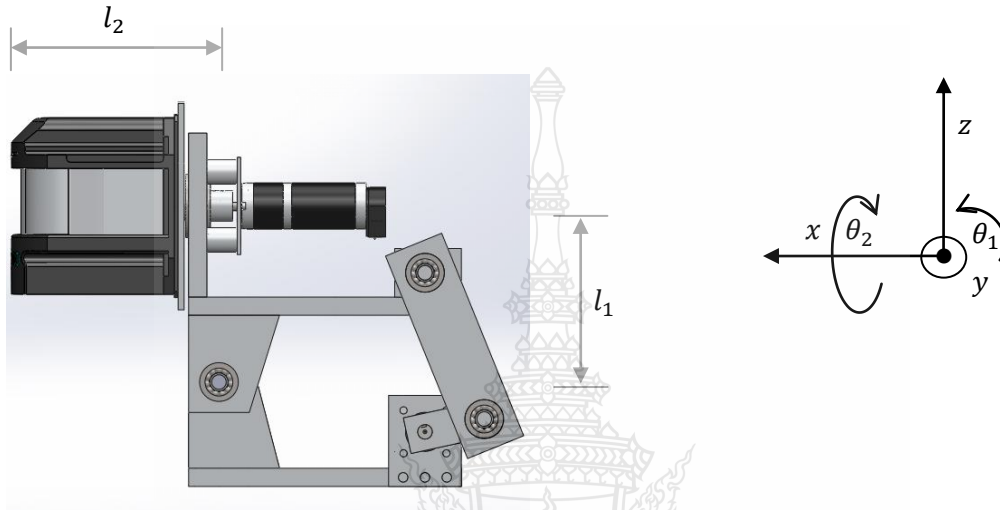
$$\therefore U(q) = -m_1 \bar{g}^T_{(0)} \bar{r}_{s_1} - m_2 \bar{g}^T_{(0)} \bar{r}_{s_2}$$

$$U(q) = -m_1 [g \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} l_{s_1} c_1 \\ l_{s_1} s_1 \\ 0 \end{bmatrix} - m_2 [g \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} l_{s_1} c_1 + l_{s_2} s_1 \\ l_{s_1} s_1 - l_{s_2} c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$U(q) = -m_1 g l_{s_1} c_1 - m_2 g (l_{s_1} c_1 + l_{s_2} s_1)$$

$$G_1 = -m_1 g l_{s1} c_1$$

$$G_2 = -m_2 g (l_{s1} c_1 + l_{s2} s_1)$$



การเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamic Model) กรณีไม่คิดแรงเสียดทาน คือ

$$M(q)\ddot{\theta} + C(q, \dot{q}) + G(q) = Q$$

$$\begin{bmatrix} I_{1y} + m_1 l_{s1}^2 + m_2 (l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x} s_2^2 + I_{2y} c_2^2 & 0 \\ 0 & I_{2z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2y}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ -c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2y}) \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -m_1 g l_{s1} c_1 \\ -m_2 g (l_{s1} c_1 + l_{s2} s_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

∴

$$\tau_1 = (I_{1y} + m_1 l_{s1}^2 + m_2 (l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x} s_2^2 + I_{2y} c_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2y}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_1 g l_{s1} c_1$$

$$\tau_2 = I_{2z} \ddot{\theta}_2 - c_2 s_2 (I_{2x} + I_{2y}) \dot{\theta}_1^2 - m_2 g (l_{s1} c_1 + l_{s2} s_1)$$

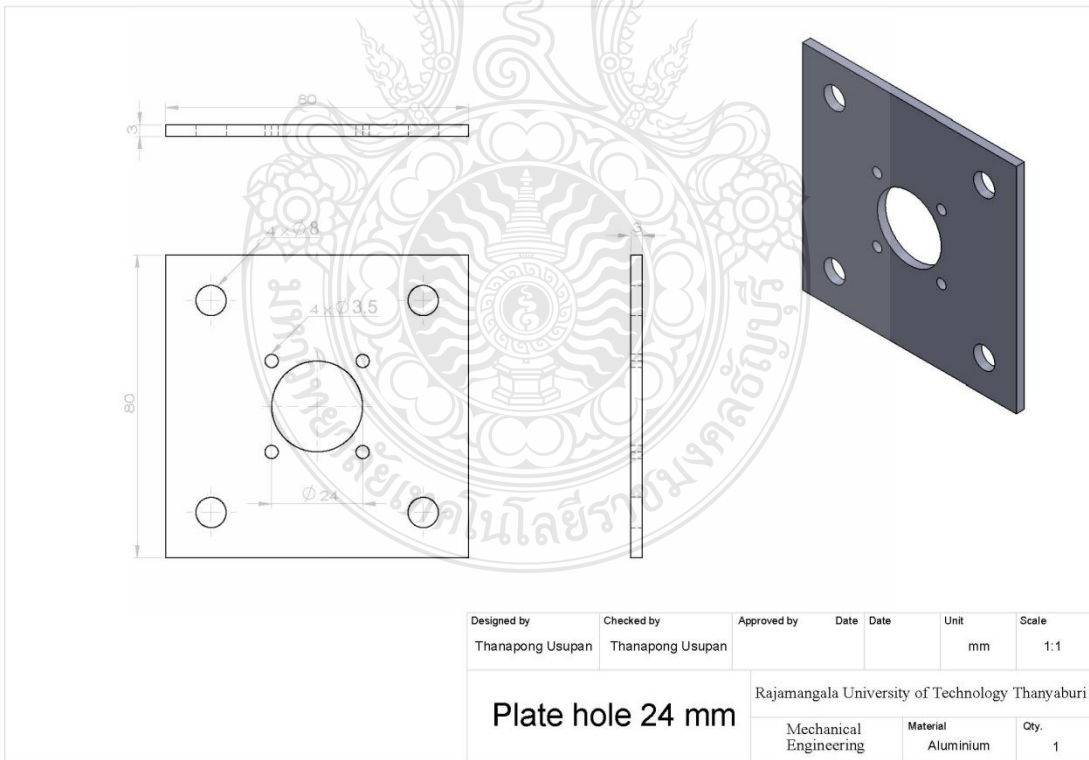
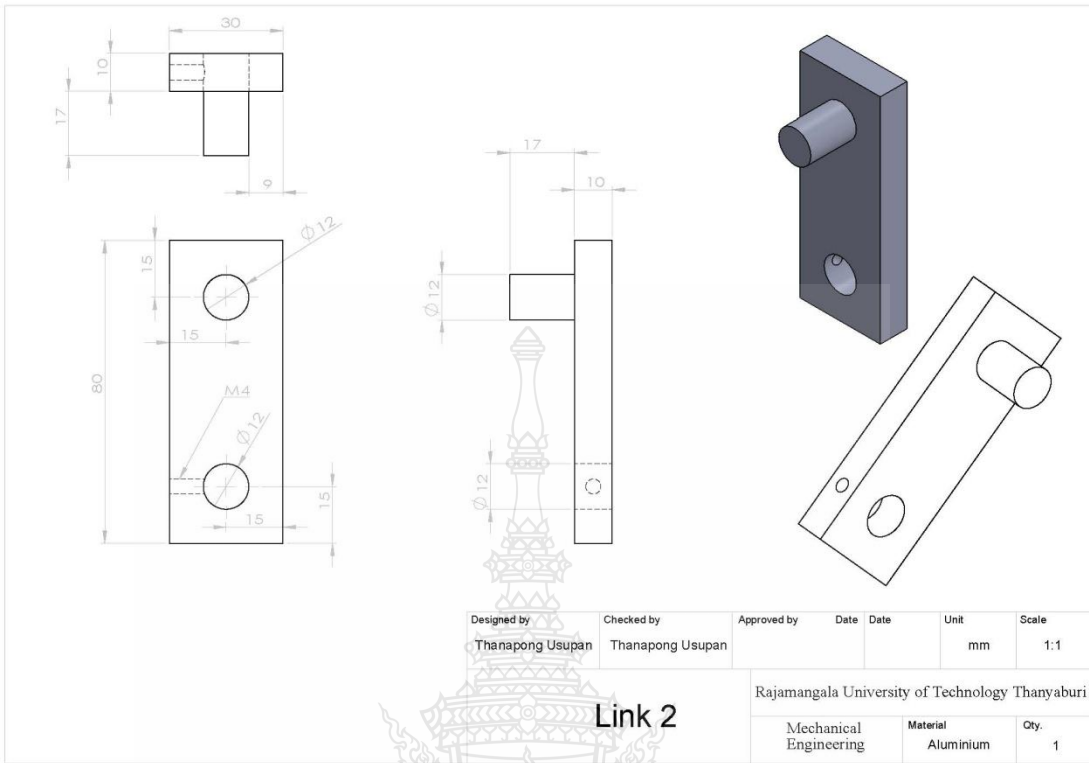
ภาคผนวก ข
แบบชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพ

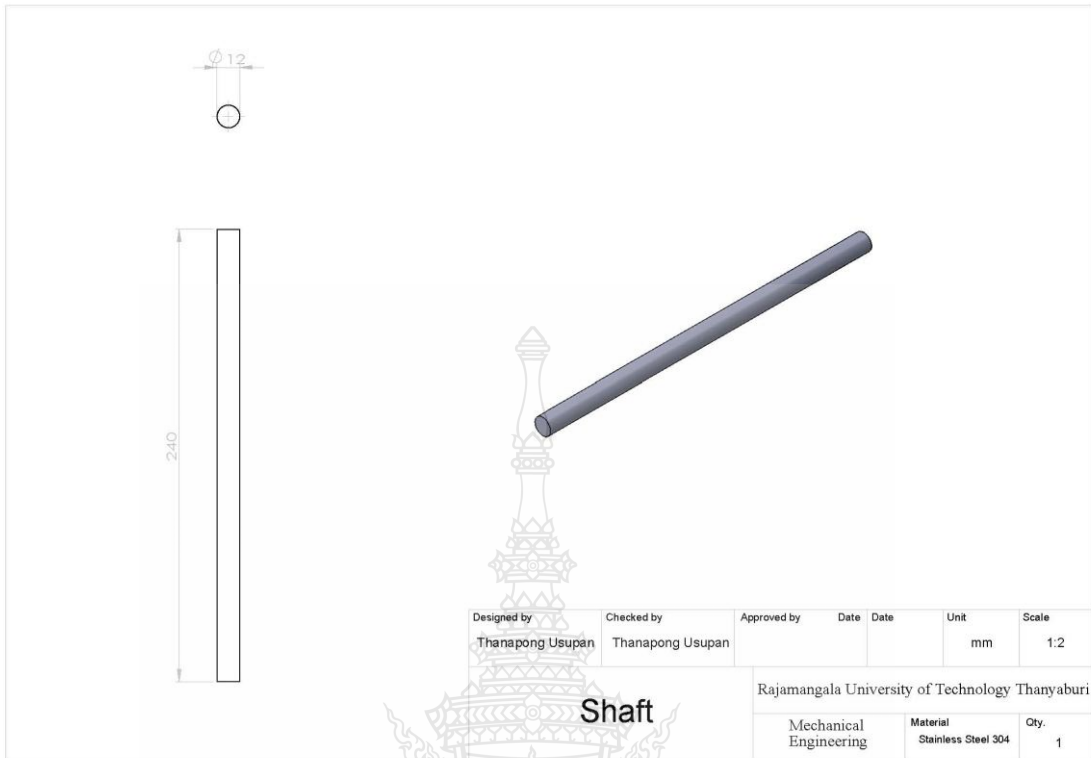


ข.1 แสดงแบบชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพ

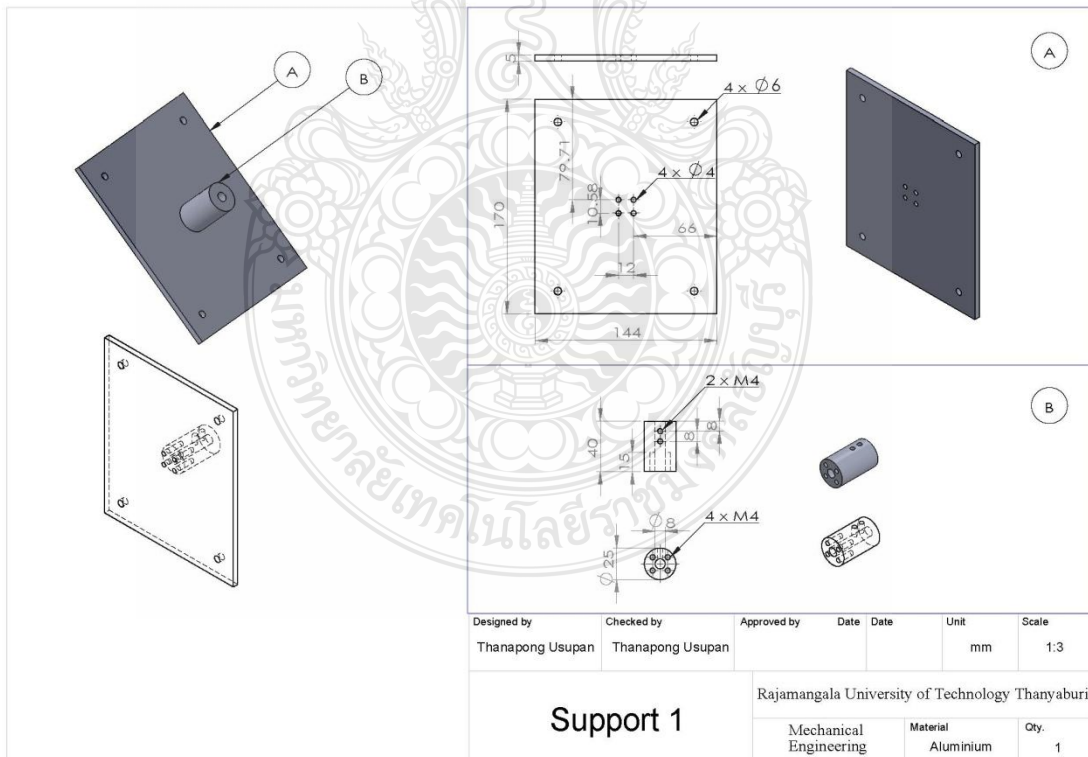
Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	Unit	Scale	
Thanapong Usupan	Thanapong Usupan				mm	2:1	
Bush						Rajamangala University of Technology Thanyaburi	
Mechanical Engineering		Material		Qty.			
		Aluminium		4			

Designed by	Checked by	Approved by	Date	Date	Unit	Scale	
Thanapong Usupan	Thanapong Usupan				mm	1:2	
Link 1						Rajamangala University of Technology Thanyaburi	
Mechanical Engineering		Material		Qty.			
		Aluminium		1			

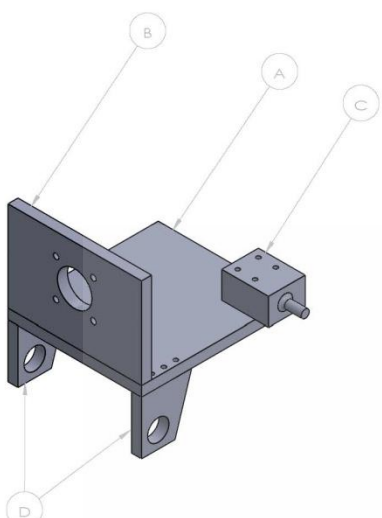
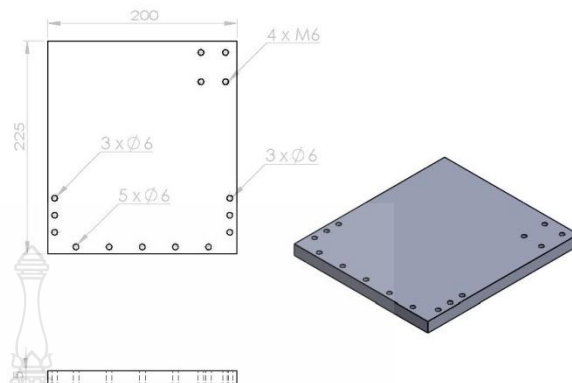




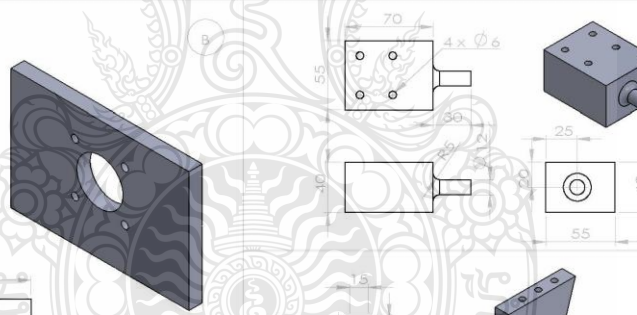
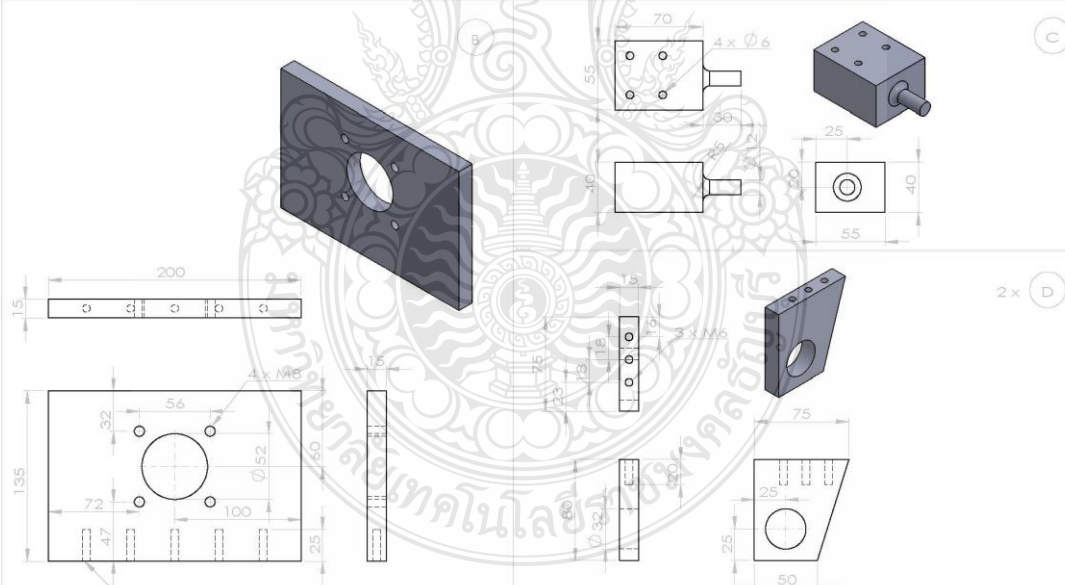
Shaft



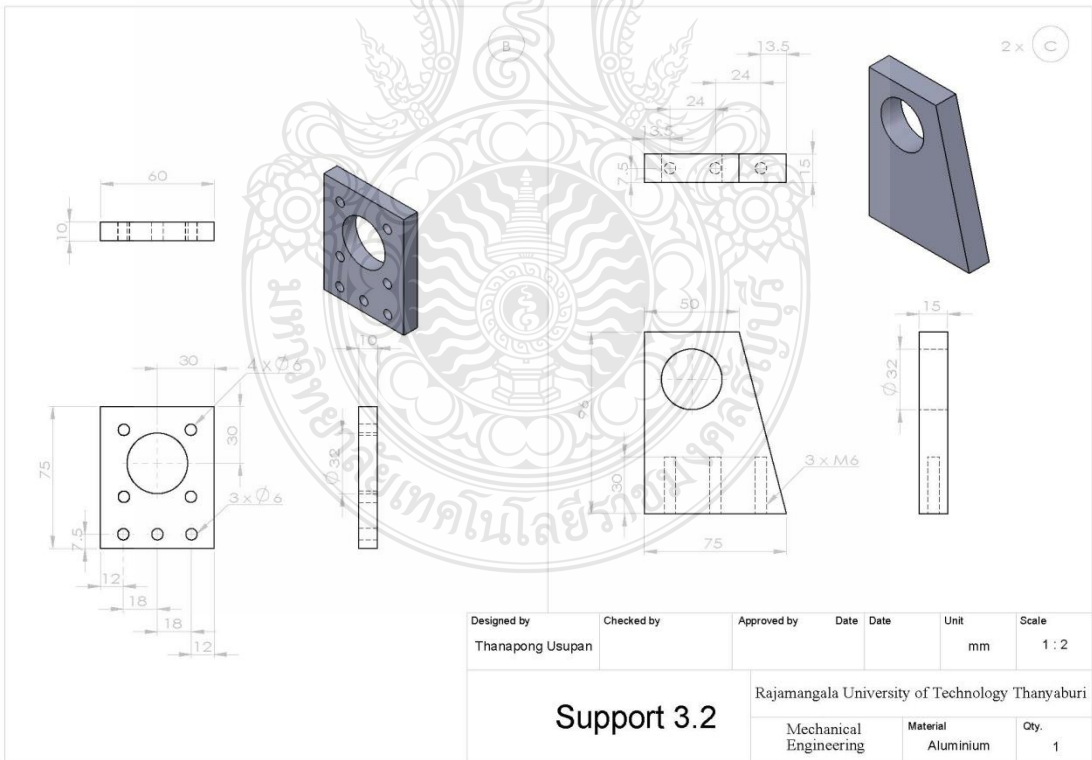
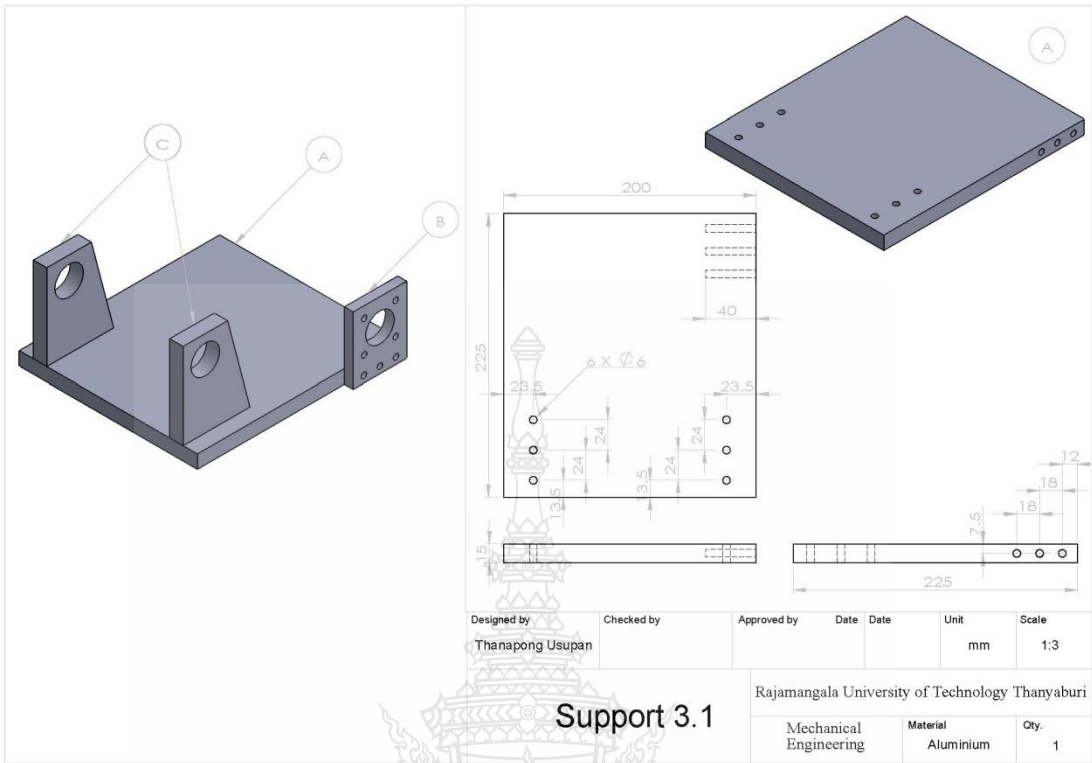
Support 1

Designed by Thanapong Usupan	Checked by Thanapong Usupan	Approved by	Date	Date	Unit mm	Scale 1:4
Support 2.1						Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Mechanical Engineering		Material Aluminium	Qty. 1			

Designed by Thanapong Usupan	Checked by Thanapong Usupan	Approved by	Date	Date	Unit mm	Scale 1:3
Support 2.2						Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Mechanical Engineering		Material Aluminium	Qty. 1			



ภาคผนวก ค
แบบตอบรับตีพิมพ์ในวารสารและรายละเอียด





วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี >>>>>

ที่ วร๐๑๗ / 2561

30 มกราคม 2561

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

เรียน จันทพงษ์ อุตพันธุ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง "กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ" เพื่อขอตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ทางกองบรรณาธิการได้พิจารณาแล้ว เห็นควรให้ตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี ปีที่ 16 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม - ธันวาคม 2561

ผู้เขียนร่วม : ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ดร.ปรกช สิริสุวัฒน์)

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏธนบุรี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชภัฏธนบุรี ถนนรังสิต-นครนายก (กม.13) อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทรศัพท์: 0 2549 3493 โทรสาร: 0 2549 3493 e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

www.engineer.rmutt.ac.th/journal

กลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ
Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction

ธนพงษ์ อุตพันธุ์¹ และ ปรีชญา เปรมปรางค์²
thanapong_u@mail.rmutt.ac.th¹, pradya.p@en.rmutt.ac.th²

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ ในการออกแบบและพัฒนา ระบบชุดกลไกการสแกนพื้นผิวสามมิติ พร้อมกับระบบควบคุมรักษาการเอียงซ้าย-ขวา และควบคุมความเร็วในการก้ม-เงย อย่างสม่ำเสมอ จะถูกนำไปใช้ในการวัด/เก็บข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สามารถนำไปติดตั้งไว้บนเรือ ฉะนั้นการวัดตำแหน่ง ของวัตถุและลักษณะกายภาพของวัตถุจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์จะมีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบได้ทำ การทดสอบระบบกลไกด้วยแบบจำลองทางจลศาสตร์ เพื่อคำนวณหาความยาวของแต่ละก้านโยงสำหรับกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้าน โยง (four-bar linkage mechanism) เพื่อให้ได้มุมก้ม-เงย (pitch angle) ของเลเซอร์สแกนเนอร์ รอบแกน y ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ และ แบบจำลองทางพลศาสตร์จะใช้ช่วยคำนวณหาแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ในแต่ละแกนที่เหมาะสม ในขั้นที่สองจึงพัฒนาระบบควบคุม สองแบบด้วย Arduino ไมโครคอนโทรลเลอร์ 1) เพื่อช่วยรักษาเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน โดยใช้ระบบควบคุมแบบ พีไอดีสำหรับควบคุมมอเตอร์สี่ตัวบน โดยใช้เอนโคเดอร์ในการป้องกันการก้ม-เงย (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้าน หน้าของหัวเรือ 2) เพื่อให้ได้พื้นผิวข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอจากการเคลื่อนที่แบบก้ม-เงย ของ กลไกแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สี่ตัวล่าง ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้ของค้ำก้ม-เงยจากเซนเซอร์วัดมุม เอียง ซึ่งจะช่วยให้ขดเชยแรงโน้มถ่วงของโลก ในส่วนที่สามจะเป็นสร้างพื้นผิวในสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ ในแนวระนาบ ซึ่งจะทำให้การประมวลผลในรูปแบบพื้นผิวแบบกลุ่มจุดสามมิติในระบบที่ก่อกำเนิดที่เขียน แล้ววิเคราะห์ค่าความแม่นยำของ พื้นผิวที่สร้างขึ้นโดยพิจารณาจากระยะทางในแนวนอนทางสถิติที่มีค่าอยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่า 2.2 เซนติเมตร

คำสำคัญ: เลเซอร์สแกนเนอร์ กลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง ระบบควบคุมแบบพีไอดี ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า
พื้นผิวแบบกลุ่มจุดสามมิติ

Abstract

This research paper presents a performance enhancement mechanism of laser scanner for three-dimensional (3D) surface reconstruction. Design and development of a 3D vertical surface-scanning mechanism along with control systems for roll-motion stabilization and periodic pitch speed is used for measuring/collecting laser-scanner point cloud data, which can be installed on a surface vessel. As a result, accuracy and precision of object's position and physical characteristics measurement from laser cloud points can be improved. In a designing phase, testing with kinematics and dynamics models helps computing for link's length of a four-bar linkage mechanism such that a pitch angle of $\pm 16.5^\circ$ around y -axis for the laser scanner is obtained. Derived dynamic model of this mechanism assists in calculating proper maximum torque of motors for each axis. In the second phase, two control systems are developed within Arduino microcontroller 1) for laser-scanner roll-motion stabilizing using a PID control system with the top DC motor's encoder feedback, and 2) for reconstructing a smooth vertical surface from laser cloud points during a pitching motion of the four-bar linkage mechanism, driven by bottom DC motor, using a feed-forward control system with the pitching angle from Inertial Measurement Unit for a gravity compensation. In the third phase, the 3D vertical reconstructed surface from laser cloud points, measured along a radial direction, is processed as a 3D point-cloud surface in a Cartesian coordinate system. A statistically analysis of reconstructed surface precision along the horizontal direction is within ± 7 centimeter with a standard deviation less than 2.2 centimeter.

¹ นักศึกษาคณะวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Keywords: laser scanner, four-bar linkage mechanism, PID control system, feed-forward control system, 3D point-cloud surface

1. ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพอากาศของโลกที่เปลี่ยนแปลงไป ก๊าซพิษในรูปแบบต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุทกภัยที่เกิดจากมรสุมและพายุฝน และ วาตภัยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทยโดยตลอด ดังนั้นหน่วยงานต่างๆ ได้เล็งเห็นความสำคัญและเร่งดำเนินการเพื่อหามาตรการป้องกันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการเตรียมความพร้อมรับมือกับอุทกภัย คือ การสำรวจเพื่อหยั่งความลึก และหาหน้าตัดตามขวางและปริมาณความจุ ของแม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ ฝาย ทั่วประเทศ เพื่อให้ได้ข้อมูล ณ สภาวะปัจจุบันในการจัดการและวางแผนการรองรับและระบายน้ำ ในการเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลที่ถูกต้องตั้งไวบนเรือ ได้แก่ เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) ที่นำมาใช้วัดระดับความสูงของบตลิ่ง หรือ สภาพแวดล้อมริมฝั่งน้ำ ที่พัฒนาโดย P. Prempraneerach และคณะ [1] โดยข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรือ นั้นยังคงมีข้อจำกัดของข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่เก็บได้ในแนวตั้ง เมื่อเรือปะทะกับคลื่นลมจะทำให้ข้อมูลที่วัดได้เอียงไปทำให้ข้อมูลอาจขาดหายไปบางส่วน และความแม่นยำของข้อมูลนั้นยังขึ้นกับความแม่นยำของเซนเซอร์จีพีเอสในการระบุตำแหน่งอีกด้วย

ในงานวิจัยของ Thomas J. Pastore และคณะ [2] ได้พัฒนาเรือลาดตระเวนผิวน้ำอัตโนมัติที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์สำหรับสำรวจหรือตรวจจับวัตถุที่เข้ามาใกล้ชายฝั่งและท่าเรือ ซึ่งการประมวลผลการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย MOOS-IvP suite ที่เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิด แต่จะมีการโคลงของเรือระหว่างการปฏิบัติการซึ่งจะทำให้ข้อมูลจากเลเซอร์ในระนาบสองมิติ นั้นไม่ได้ขนานกับระนาบแนวนอนตลอดเวลา และอาจจะทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบได้อย่างแน่ชัด ถ้าสามารถลดปัญหาการโคลงของข้อมูลที่เก็บได้จากเรือและสามารถจัดเก็บข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในรูปแบบ 3D ได้ไปพร้อมกัน จะทำให้มีประสิทธิภาพในการบ่งบอกลักษณะของวัตถุจากข้อมูลที่เก็บได้เพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยของ A. Battistel และคณะ [3] ได้พัฒนาและสร้างระบบรักษาเสถียรภาพระบบตรวจจับภาพโดยใช้เซนเซอร์จีโรแบบสองแกน (Dual-axis gyros) ที่ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งจะช่วยลดการบิดเบือนของข้อมูลภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่และ ในงานวิจัยของ L. Hongkai และคณะ [4] ได้นำเอาเลเซอร์สแกนเนอร์จำนวน 6 ตัว มาติดตั้งไว้บนรถเพื่อ

เก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ของสภาพแวดล้อมในรูปแบบ 3D ได้ แต่การใช้เลเซอร์หลายตัวนั้นต้องใช้งบประมาณสูงและการประมวลผลข้อมูลที่เยื่อนั้นทำให้การคำนวณซ้ำหรือจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ซึ่งถ้าสามารถพัฒนาโลกที่จะช่วยให้เลเซอร์เพียงตัวเดียวสามารถเก็บข้อมูลได้ ประสิทธิภาพดีกว่าข้อมูลในระนาบสองมิติแบบปกติก็จะลดงบประมาณและประมวลผลสภาพแวดล้อมได้เร็วขึ้น

จากปัญหาข้างต้นและงานวิจัยที่ผ่านมา ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างกลไกการก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดวัตถุเพื่อให้ได้ข้อมูลแบบสามมิติ พร้อมระบบรักษาเสถียรภาพของข้อมูลที่วัดได้ในระนาบแนวนอนสำหรับติดตั้งบนเรือขึ้น โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อที่ 3 และจะแสดงผลการเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์เพื่อสร้างเป็นพื้นผิวสามมิติและวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของข้อมูลอีกด้วย ในหัวข้อที่ 4

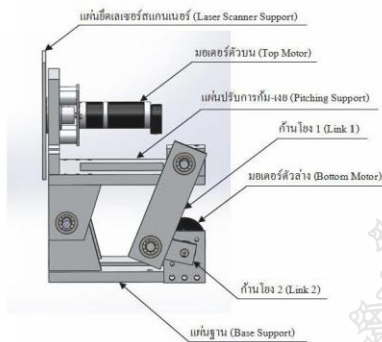
2. ทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถเก็บข้อมูลในระนาบแนวตั้งได้ จึงได้ออกแบบและพัฒนากลไกที่เพิ่มองศาการก้ม-เงย (θ_1) ของเลเซอร์สแกนเนอร์ให้หมุนรอบแกน y พร้อมกับกับกลไกรักษองศาการเอียงซ้าย-ขวา (θ_2) ของเลเซอร์สแกนเนอร์รอบแกน x เพื่อให้ข้อมูลระยะทางของวัตถุอยู่ในระนาบแนวนอนเสมอไม่ว่าจะมีแรงภายนอกมากระทำหรือมีการโคลงของฐานของชุดกลไกที่จะนำไปติดตั้งบนเรือ ดังนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบและทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทั้งทางจลศาสตร์และพลศาสตร์

2.1 การออกแบบโครงสร้างของชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์ที่วัดข้อมูลระยะทางในแนวนอนนั้นให้สามารถเก็บข้อมูลที่เกิดจากการก้มเงย ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลในแนวตั้งหรือในมิติที่สาม จึงได้ออกแบบกลไกแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ตัวกลาง ดังในรูปที่ 2 ที่ส่งกำลังโดยก้านโยงที่ 1 และ 2 เพื่อทำให้แผ่นปรับการก้มเงยนั้นยกตัวขึ้นลงในรูปแบบของฟังก์ชันซายด์ (sinusoidal

function) นอกจากนั้นแล้วได้ออกแบบให้ใช้มอเตอร์ตัวบนที่เชื่อมต่อเข้ากับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์โดยตรง เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพในการเอียงของข้อมูลที่ได้จากเลเซอร์ให้ขนานกับระนาบแนวนอนเสมอ กลไกทั้งหมดได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อจำลองและทดสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ ก่อนดำเนินการสร้างจริง



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

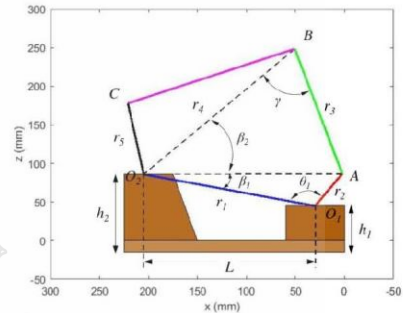


รูปที่ 2 ชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ได้ออกแบบ (ซ้าย) และ ที่ได้สร้างชิ้นพร้อมติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ (ขวา)

2.2 แบบจำลองทางจลศาสตร์ (Kinematics Model) ของชุดกลไก [5], [6]

ถ้าต้องการให้องศาการก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์อย่างน้อยสุดเท่ากับ 30 องศา จึงได้ทำการคำนวณองศาการหมุนของกลไกแบบสี่ก้านโยงสำหรับชุดกลไกที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะสามารถช่วยเลือกใช้ขนาดความยาวของก้านโยงที่ 1 และ 2 และความยาวของแผ่นการก้มเงยแล้วจึงทำการจำลองทางจลศาสตร์ลูกโซ่ของกลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage) โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยงที่ประกอบด้วยก้านโยง r_1 - r_2 - r_3 - r_4 และ ข้อต่อที่จุด A, B, O₁, O₂ ดังแสดงในรูปที่ 3

ได้เลือกลักษณะกลไกที่เป็นแบบ Crank Rocker จากกฎของ Grashoff และ กฎของ Cosines (Law of Cosines) [5] มาช่วยในการคำนวณหาช่วงมุมในการส่งถ่ายแรง (γ) และ มุมก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1) ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 พารามิเตอร์ของกลไกแบบสี่ก้านโยง โดยเฉพาะมุมองศาในการส่งถ่ายแรง (γ) และ มุมก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1)

จากรูปสามเหลี่ยม AO₁O₂ และ ABO₂ เมื่อประยุกต์ใช้กฎของ Cosines กับสามเหลี่ยมทั้งสองรูป จะได้

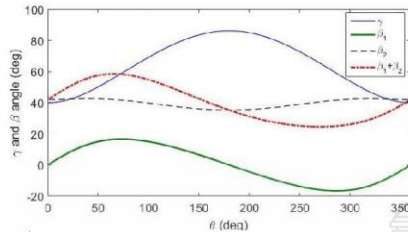
$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_1 \quad (1)$$

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

และเมื่อให้ความยาวด้าน z เท่ากันหรือ (1)=(2) จะได้

$$\cos \gamma = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_1}{-2r_3r_4} \quad (3)$$

จากสมการ (3) ถ้าองศา θ_1 เป็นมุมการหมุนของมอเตอร์ตัวล่างแบบต่อเนื่อง (0° - 360°) ดังนั้นจะสามารถหาคำนวณหามุม γ และ $\beta_{1,2}$ จากสามเหลี่ยม ฉะนั้นเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของก้านโยงทั้ง 4 ชิ้น ในโปรแกรม MATLAB จะทำให้ได้องศาของมุมก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1) ตามที่ต้องการ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ ซึ่งผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการจำลองมุมมองค่าในการส่งถ่ายแรง (γ) และ มุมก้มของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β)

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & 0 \\ l_1 c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ และ } J_2 = \begin{bmatrix} l_2 c_1 - l_1 s_1 & 0 \\ l_2 c_1 + l_1 s_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & s_1 \\ 0 & -c_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

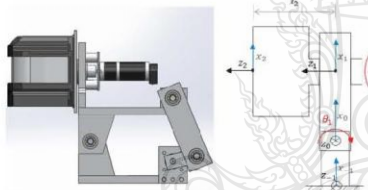
สำหรับสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในกรณีที่ไม่คิดแรงเสียดทานภายในของแต่ละข้อต่อ คือ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \quad (5)$$

2.3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamic Model) ของชุดกลไก [7],[8],[9]

การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในขั้นต้นจะทำการหาเมตริกซ์ในการหมุน (Rotation Matrix) โดยใช้พารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg หรือ D-H) เพื่อใช้ในการตั้งแกนกันต่อของกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 และพารามิเตอร์ของชุดกลไกในตารางที่ 1

โดยที่ $M(q)$ คือ เมตริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix) เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับองศาการหมุนของข้อต่อ q และ $C(q, \dot{q})$ คือ เมตริกซ์โคริโอลิสและสู่ศูนย์กลาง (Coriolis and Centripetal Matrix) เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ q และ \dot{q} และ $G(q)$ คือ เวกเตอร์แรงบิดที่มาจากรถโน้มถ่วงของโลก และ Q คือ แรงบิดที่เป็นอินพุตจากมอเตอร์ทั้งสองตัว ส่วน \ddot{q}, \dot{q}, q คือ เวกเตอร์ของความเร่ง ความเร็ว และ องศาการหมุนของแต่ละข้อต่อตามลำดับ จากสมการที่ (5) ชุดกลไกจะต้องใช้แรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ($Q = [\tau_1, \tau_2]$) ได้ดังนี้



รูปที่ 5 การตั้งแกนสำหรับกันต่อของชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ

$$\tau_1 = (I_{1x} + m_1 l_{s1}^2 + m_2 (l_{21}^2 + l_{22}^2) + I_{2x} s_2^2 + I_{2y} c_2^2) \ddot{\theta}_1 + 2c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2y}) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 g l_2 c_1 \quad (6)$$

$$\tau_2 = I_{2x} \ddot{\theta}_2 - c_2 s_2 (I_{2x} + I_{2y}) \dot{\theta}_1^2 - m_2 g (l_{21} c_1 + l_{22} s_1) \quad (7)$$

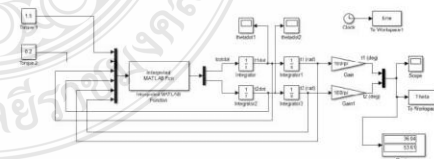
ตารางที่ 1 D-H Table แสดงพารามิเตอร์ของชุดกลไก

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
0	0	$l_b = 8.6cm$	0	0
1	90°	$l_1 = 13.0cm$	0	θ_1
2	0	0	$l_2 = 2.8cm$	θ_2

นำสมการที่ (6) และ (7) ไปคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ที่มากที่สุดที่จะใช้ขับเคลื่อนชุดกลไกที่ออกแบบไว้ ให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม ($[\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2]$) ได้ไม่เกิน 0.210 และ 0.312 เรเดียน/วินาที โดยโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งแสดงดังรูปที่ 6

ขั้นที่สองจะทำการคำนวณหาเมตริกซ์จาโคเบียนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายก้านโย่งแต่ละข้อต่อและความเร็วเชิงมุมในการหมุนของแต่ละข้อต่อ ($[v; \omega] = J_1 [\dot{\theta}]$) ซึ่งแสดงในสมการที่ (4) เพื่อนำ

ไปใช้หาเมตริกซ์ในสมการพลศาสตร์



รูปที่ 6 แผนภาพสมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

จาก Simulink ทำให้สามารถคำนวณได้ว่ามอเตอร์ที่ 1 นั้นต้องมีแรงบิด (τ_1) มากกว่า 1.5 N-m จึงจะสามารถยกกลไกแบบสี่ก้านโยงให้หมุนครบรอบได้ ส่วนมอเตอร์ที่ 2 ต้องมีแรงบิด (τ_2) มากกว่า 0.2 N-m จึงจะสามารถให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถหมุนเอียงซ้าย-ขวาได้

3. การสร้างชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์

3.1 อุปกรณ์และเซนเซอร์ที่ใช้

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์ในทั้งสองแกน นั้นจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียง (หรือ IMU) ในการป้องกันองศาการเอียง ที่ใช้ร่วมกับบอร์ดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนในทั้งสองแกน เซนเซอร์ IMU ที่ใช้วัดมุมเอียงคือ MinIMU-9 ของ Pololu ซึ่งเป็น เซ็นเซอร์วัดมุมเอียง (Compass) ความเร่ง (Accelerometer) ความเร็วในการหันเห (Gyro) ทั้งสามแกน มีขนาดเล็กรวม $0.9" \times 0.6" \times 0.1"$ ใช้ไฟเลี้ยง 2.6-5.5 VDC ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ทั้งสองแกนคือ Arduino DUE ซึ่งสามารถประมวลผลความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จากเอนโค้ดเดอร์ได้



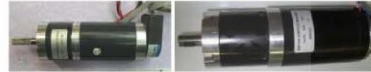
รูปที่ 7 เซนเซอร์วัดมุมเอียงแบบ 9 แกนขนาดเล็ก (MinIMU-9) ของ Pololu [10] (ซ้าย) และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE [11] (ขวา)

เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ตรวจจับวัตถุ คือ Hokuyo รุ่น UXM-30LXH-EWA มีขนาด $125 \times 124 \times 150$ มม. มีน้ำหนัก 800 กรัม ใช้แหล่งจ่ายไฟในช่วง 10-30 VDC มีช่วงการวัดระยะทาง (Range) สูงสุดได้ถึง 80 เมตร ความแม่นยำ (Accuracy) ± 50 มิลลิเมตร ความถี่ในการสแกน 20 Hz มีมาตรฐานการป้องกันแบบ IP67



รูปที่ 8 เลเซอร์สแกนเนอร์ของ Hokuyo รุ่น UXM30LXH-EWA [12]

มอเตอร์ที่ใช้มี 2 ตัวคือ ได้แก่ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R ซึ่งใช้สำหรับการปรับการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM ใช้สำหรับการปรับองศาแกม-งยของอุปกรณ์

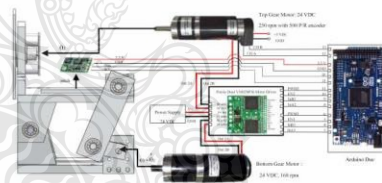


รูปที่ 9 มอเตอร์เกียร์ 24 VDC [13] ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R (ซ้าย) และมอเตอร์เกียร์ 24 VDC [14] ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM (ขวา)

เมื่อนำอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆมาประกอบเข้ากับชุดกลไกที่ออกแบบและสร้างขึ้น จะได้ดังในรูปที่ 2

3.2 ระบบควบคุมชุดกลไกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นี้จะใช้องศาการก้ม (Roll) และ องศาการก้ม-งย (Pitch) เพื่อใช้ในการป้องกันและป้องกันข้างหน้าด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE เพื่อทำการประมวลผลแล้วจึงส่งคำสั่งความเร็วในการหมุนไปยัง Motor Driver ดังแสดงในรูปที่ 10

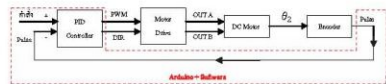


รูปที่ 10 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมแบบป้องกันและแบบป้องกันข้างหน้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE

โดยจะประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบพีเอ็ด (PID) [15] ดังในสมการที่ 8 เพื่อควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวา ของเลเซอร์สแกนเนอร์ด้วยมอเตอร์ตัวบน ซึ่งจะใช้ค่าความผิดพลาด (หรือ e) ที่นิยามเป็นผลต่างระหว่างคำสั่งองศาการก้มที่แปลงเป็นคำสั่งพัลส์ และองศาการก้มหรือพัลส์ที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์ของมอเตอร์ตัวบน

$$u_2(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (8)$$

โดยค่า K_p , K_i , K_d เป็นค่าอัตราขยายแบบแปรผันตรงแบบปริพันธ์ และ แบบอนุพันธ์ ตามลำดับ แผนภาพการทำงานของการควบคุมแบบ PID แสดงดังรูปที่ 11

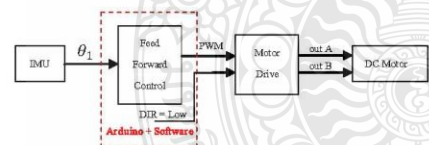


รูปที่ 11 ระบบควบคุมแบบ PID สำหรับมอเตอร์ตัวบน ที่สั่งการด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ส่วนมอเตอร์ตัวล่างจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) ตั้งในสมการที่ 9 เพื่อใช้ช่วยชดเชยแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับการยกก้อนโยง 1 และ 2 ในช่วงขาขึ้นด้วยการเพิ่มความเร็วมอเตอร์ตัวล่างและจะลดความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในช่วงขาลงของกลไกแบบสีก้านโยง ดังนั้นจะสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันขยายตัวของศากการกัม-แรงที่ขึ้นกับเวลา โดย $\theta_1 = 0$ เมื่อแผ่นปรับการกัม-แรง ขนานกับระนาบแนวนอน ส่วนเมื่อ $\theta_1 > 0$ และ $\theta_1 < 0$ เมื่อยกแผ่นปรับการกัม-แรงให้ยกขึ้น และ ลงตามลำดับ

$$u_1(t) = K_p \sin(A_1(\theta_1(t) - B_1)) \quad (9)$$

เมื่อ แอมพลิจูด (K_p) เป็นอัตราขยายที่ใช้ช่วยปรับความเร็วรอบการหมุนที่ป้อนไปข้างหน้า ค่า A_1 เป็นอัตราขยายขององศาการกัม-แรง และค่า B_1 ใช้ปรับแกงศาการกัม-แรงของเซนเซอร์ IMU แผนภาพการทำงานของการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) แสดงดังในภาพที่ 12



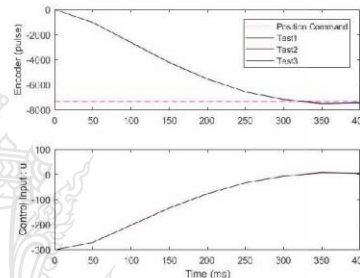
รูปที่ 12 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง ที่สั่งการด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

4. ผลการทดสอบการทำงานและการประมวลผลจากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

4.1 ผลทดสอบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในทั้งสองแกนสำหรับชุดกลไก

เมื่อเปิดสวิตซ์การทำงาน เริ่มต้นแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์จะหมุนไปและลิมิตสวิตซ์ที่ติดตั้งไว้ฝั่งซ้ายเป็นมุม

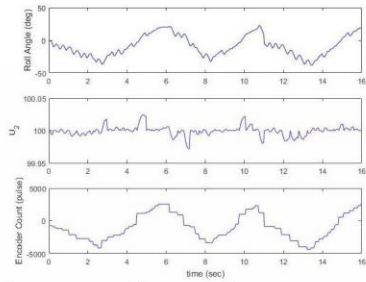
60° จากแนวตั้ง และทำการรีเซ็ตค่าเอ็นโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง และมอเตอร์ตัวบนจะถูกหมุนกลับมาให้ตั้งตรงด้วยการป้อนกลับค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder Count) ในหนึ่งรอบจะให้ค่าพัลส์เป็น $500 \text{ P/R} \times \text{อัตราทดเกียร์ } 22:1 \times 2\text{CH (A,B)} \times 2$ การนับสัญญาณขาขึ้นและลงของสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์นับได้ เมื่อถึง $-7,333$ พัลส์ (ซึ่งเป็นค่าคำสั่งอ้างอิง) แล้วมอเตอร์จะถูกล็อกให้หยุดหมุนและรีเซ็ตค่าเอ็นโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์อีกครั้ง ได้ทำการทดสอบการหมุนกลับมาตั้งตรงขนานกับแนวตั้งเป็นจำนวน 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าแผ่นยึดเลเซอร์สามารถปรับให้เลเซอร์สแกนเนอร์กลับมาตั้งตรงได้ภายใน 400 มิลลิวินาที หลังจากแต่ละลิมิตสวิตซ์ที่รีเซ็ตค่าเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 13 ค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และ ค่าคำสั่งแบบ PWM หรือ Control Input ที่ไปควบคุมตำแหน่งองศาการหมุนของมอเตอร์ตัวบนเทียบกับเวลา

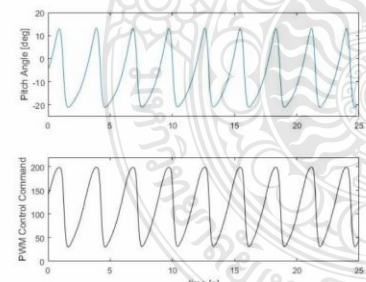
ระบบควบคุมแบบพีไอจะพยายามรักษองศาการหมุนของแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้ตั้งตรงเสมอ เพื่อให้ได้ข้อมูลระยะทางจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวราบ ดังนั้นได้ทำการทดสอบการเอียงของแผ่นฐาน ช้าย-ขวา เพื่อสังเกตการตอบสนองของมอเตอร์ตัวบนในการปรับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้กลับมาตั้งตรง ดังในรูปที่ 14 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้าย ซึ่งสังเกตได้จากองศาการก้ม (Roll Angle) ของ IMU ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อ $t \in [0, 4.6]$ วินาที แผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ก็จะถูกปรับให้หมุนกลับมาทางขวาให้ตั้งตรงกับแนวตั้ง โดยค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder Pulse) จะมีค่าเป็นลบ และคำสั่งของระบบควบคุมแบบพีไอ (U_2) ที่สั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาในทางกลับกันเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางขวาในช่วงเวลา $t \in [4.6, 7.1]$ วินาที ระบบควบคุมแบบพีไอก็จะพยายามปรับแผ่นยึดเลเซอร์ให้หมุนกลับมาทางซ้ายหรือสั่งให้มอเตอร์หมุน

ทวนเข้ามาหาค่าด้วยเช่นกัน และคำสั่ง U_2 ของระบบควบคุม จะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 14 องศาการก้ม (บน), คำสั่งของระบบควบคุมแบบพีไอดี หรือ U_2 (กลาง) และค่าพัลส์ของเอ็นโค้ดเดอร์ (ล่าง) เมื่อทดสอบการเอียงแผ่นฐานไปทางด้านซ้ายและขวา

นอกจากนี้ยังได้ทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในการปรับการก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ เมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางด้านซ้ายและขวา จากผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์ตัวล่างสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและการหมุนขึ้นลงในแต่ละรอบ นั้นมีช่วงเวลาในการหมุนขึ้น-ลงที่คงที่และเท่ากัน ที่สามารถสังเกตได้จากค่ามุมก้ม-เงย (Pitch Angle) ของ IMU โดยในหนึ่งคาบใช้เวลาประมาณ 3 วินาที ซึ่งจะสัมพันธ์กับคำสั่งจากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า ที่ส่งเป็นค่าควบคุมแบบ PWM (PWM Control) เพื่อส่งไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์ตัวล่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 32 ถึง 199 ดังในรูปที่ 15



รูปที่ 15 องศาการก้ม-เงย (บน) และ คำสั่งควบคุมแบบ PWM จากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง (ล่าง) เมื่อทดสอบการเอียงแผ่นฐานไปทางด้านซ้ายและขวา

4.2 ผลทดสอบการประมวลผลภาพสามมิติจากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

ในการสร้างพื้นผิวสามมิติจากข้อมูลระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบสองมิติที่จะนำมา บรูณาเข้ากับองศาการก้ม-เงย (θ) ที่วัดได้จาก IMU ดังนั้นเพื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดระยะทางในแนวรัศมีจากเลเซอร์สแกนเนอร์ (d) ที่กวาดเป็นมุม α ในช่วง $\pm 95^\circ$ มาแปลงให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนเทียบกับแกนอ้างอิงที่ตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเพลลาของฐานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์หรือจุด O_B ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18



รูปที่ 16 อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทดสอบการทำงานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพเลเซอร์สแกนเนอร์

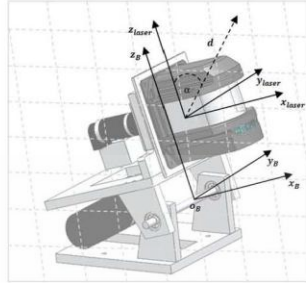
จากรูปที่ 17 จุดที่เลเซอร์สแกนเนอร์วัดระยะทางในแนวรัศมีเป็น d ที่กวาดเป็นมุม α จากฝั่งด้านซ้ายไปขวา เมื่อพิจารณาในระนาบ xz และระนาบ yz จะได้ระยะทางในแนวรัศมีเป็น $d \cos \alpha$ และ $d \sin \alpha$ ตามลำดับ ฉะนั้นจะได้ระยะทางของวัตถุเทียบกับจุด O_B ตามแกน x_B, y_B และ z_B ที่อธิบายด้วยสมการที่ 10, 11 และ 12 ดังในรูปที่ 18

$$x = (d \cos \alpha) \cos \phi + l \cos \phi - L \sin \phi \quad (10)$$

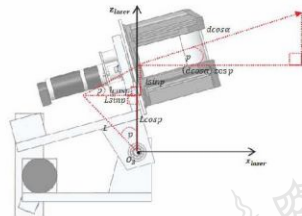
$$y = d \sin \alpha \quad (11)$$

$$z = (d \cos \alpha) \sin \phi + l \sin \phi + L \cos \phi \quad (12)$$

โดยที่ จุด O_B นั้นตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของเพลลาที่ฐาน ส่วน z_B และ z_{laser} ชี้ขนานกับขอบด้านข้างในแนวตั้งของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ y_B และ y_{laser} ชี้ขนานไปกับเพลลาที่ฐานของชุดกลไก และ x_B และ x_{laser} ชี้ไปข้างหน้าของเลเซอร์สแกนเนอร์



รูปที่ 17 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมี และกวาดเป็นมุม α

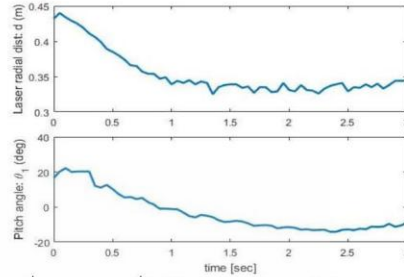


รูปที่ 18 ระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์เมื่อเทียบกับจุด O_B ที่แผ่ฐานในระนาบ xz

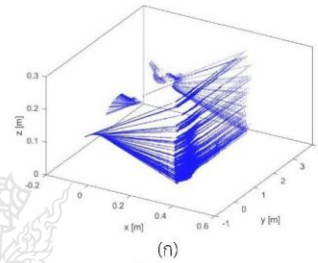
เมื่อนำข้อมูลองศาแกมมา (θ_1) ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 20 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี (d) ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 19 แทนลงในสมการที่ 10, 11, 12 และ เมื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นไปแสดงผลในพีคคาร์ทที่เขียน จากการทดสอบสองครั้ง ด้วยโปรแกรม MATLAB [16] ดังในรูปที่ 21 จากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัดแนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด O_B นั้นอยู่ที่พิกัด $(x,y,z) = (0,0,0.13)$ เมตร



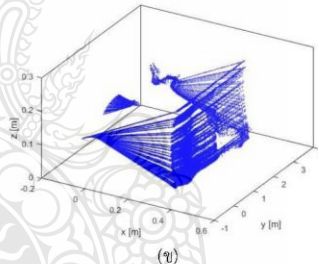
รูปที่ 19 สถานที่ที่ใช้ทดสอบความแม่นยำของความกว้างผนัง ด้วยชุดกลไกที่ประสิทธิภาพเลเซอร์สแกนเนอร์



รูปที่ 20 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี (d) และองศาการแกมมา (pitch angle หรือ θ_1) ในช่วงเวลา 3 วินาที

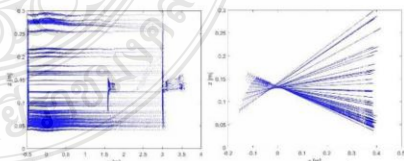


(ก)



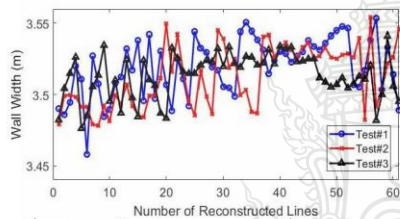
(ข)

รูปที่ 21 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้น (3D reconstructed point cloud) ในพิกัด xyz ของผนังในห้องทดลอง (ก) ทดสอบครั้งที่ 1 (ข) ทดสอบครั้งที่ 2



รูปที่ 22 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติในระนาบ yz เมื่อมองจากด้านหน้า (ซ้าย) และ ในระนาบ xz เมื่อมองจากด้านข้าง (ขวา) จากการทดสอบครั้งที่ 1

จากผลการทดสอบสามครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของความกว้างผนังที่วัดได้จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติ จำนวนแนวเส้นที่สแกนได้ (Number of Reconstructed Lines) จากเลเซอร์ในครั้งรอบในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีจำนวนทั้งหมด 62 เส้น จึงได้ทำการวัดระยะทางความกว้างของผนังดังแสดงในรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแต่ละเส้นนั้นมีความใกล้เคียงกันมากในระดับมิลลิเมตร แล้วจึงทำการหาค่าน้อยสุด (Min) ค่ามากที่สุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Std) จากข้อมูลความกว้างทั้ง 62 แนวเส้นในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังนำเสนอในตารางที่ 1 เมื่อเทียบความกว้างของผนังในห้องทดลองที่วัดด้วยดัลต์เมตร กับ ค่าเฉลี่ยของความกว้างผนังที่ประมวลจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดที่เก็บจากเลเซอร์สแกนเนอร์ จะพบว่ามีความผิดพลาด ± 7 เซนติเมตร หรือ $\pm 2\%$ ซึ่งจะมาได้จากความผิดพลาดในการวัดความกว้างด้วยดัลต์เมตร และ มุมก้ม-เงยที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU



รูปที่ 23 ความกว้างผนัง (Wall Width) ที่วัดจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดใน 3 มิติสำหรับการทดสอบ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1) ผลการประมวลค่าความแม่นยำของความกว้างของผนัง (W) จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติที่ประเมินจากค่าเฉลี่ยของความกว้าง หรือ Mean(W) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้าง หรือ Std(W) จากการทดสอบ 3 ครั้ง

Test No.	Min(W) (เมตร)	Max(W) (เมตร)	Mean(W) (เมตร)	Std(W) (เมตร)
1	3.458	3.554	3.520	0.020
2	3.478	3.554	3.513	0.022
3	3.476	3.541	3.514	0.016

5. สรุปผลการทดลอง

ชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้ตรวจจับวัตถุ ได้ถูกออกแบบให้สามารถรักษาข้อมูลระยะทางจากเลเซอร์สแกน ให้อยู่ในระนาบแนวนอน และ เพิ่มองศาอิสระในการเก็บข้อมูลระยะทางในแนวตั้งจากเลเซอร์ที่วัดข้อมูลในระนาบแนวนอน จะทำให้ได้พื้นผิวหรือรูปภาพแบบสามมิติ โดยได้ออกแบบให้ชุดกลไกสามารถปรับองศา ก้ม-เงย (pitching angle) ในช่วง $\pm 16.5^\circ$ ได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้กลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage) ที่สามารถหมุนปรับแก้อองศาการเอียงซ้าย-ขวา (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าอยู่ในช่วง $\pm 20^\circ$ และทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางจลนศาสตร์และพลศาสตร์ของชุดกลไก ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่สามารถคำนวณหาแรงบิดอย่างน้อยที่ต้องการเพื่อใช้เลือกมอเตอร์ที่จะมาประยุกต์สร้างชุดกลไกที่ออกแบบไว้ให้มีกำลังเพียงพอ

ยังได้พัฒนาระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) สำหรับมอเตอร์ตัวบนเพื่อให้สามารถควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาได้เมื่อฐานของชุดกลไกเกิดการเอียง ที่ช่วยรักษาระนาบของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน และระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) สำหรับมอเตอร์ตัวล่างที่สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยการเพิ่มความเร็วในช่วงขาขึ้นและลดความเร็วในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยง ส่งผลให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์ที่วัดได้แบบสม่ำเสมอในแนวตั้ง

นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำในการสร้างพื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สร้างขึ้นจาก กลุ่มจุดข้อมูลวัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวรัศมี โดยได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของความกว้างของผนังในห้องทดลอง โดยตรวจสอบค่าความผิดพลาด อยู่ในช่วง ± 7 เซนติเมตร หรือ คิดเป็น $\pm 2\%$ ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกินกว่า 2 เซนติเมตร

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ ในโครงการวิจัยเรื่อง เรือลาดตระเวนแบบสองทุนควบคุมระยะไกลเพื่อใช้ช่วยตรวจจับวัตถุต้องสงสัยด้วยภาพ ประจำปีงบประมาณ 2559

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Prempraneerach, M. Janthong, K. Phothongkum, C. Choosui, S. Timpitak, "Hydrographical survey using point cloud data from laser scanner and echo sounder," **13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**, pp. 1-6, 2016.
- [2] Thomas J. Pastore and A.N. Patrikalakis, "Laser Scanners for Autonomous Surface Vessels in Harbor Protection: Analysis and Experimental Results," **International WaterSide Security Conference**, pp. 1-6, 2010.
- [3] A. Battistel, F. Lizarralde, L. Hsu. "Inertially stabilized platforms using dual-axis gyros: sensitivity analysis to unmodeled motion and an extension to visual tracking," **American Control Conference**, 2012.
- [4] L. Hongkai, H. Guojian, Y. Haichen, Z. Yan and W. Wei, "Fast 3D Scene Segmentation and Classification with Sequential 2D Laser Scanning Data in Urban Environments", **2016 35th Chinese Control Conference (CCC)**, pp. 5446-5450, 2016
- [5] Hamilton H. Mabie and Charles F. Reinholtz (1987), **Mechanisms and Dynamics of Machinery**, 4th edition, ISBN: 13978-0-471-80237-2, John Wiley & Sons, Inc.
- [6] วสันต์ สิลลธนาถฤกษ์ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, การศึกษาและออกแบบสร้างหุ่นยนต์กระพ้อปีกควบคุมด้วยวิทยุบังคับ, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2557
- [7] Reza N. Jazar, **Theory of Applied Robotics : Kinematics, Dynamics, and Control**, Second Edition, Springer Science+Business Media, LLC 2006, 2010
- [8] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo, **Robotics: Modelling, Planning and Control**, Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [9] พงศ์แสน พิทักษ์วิริยะ, พื้นฐานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบอนุกรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557
- [10] Pololu. MinIMU-9. (Online), Available: <https://www.pololu.com/product/1264> (October 15, 2016).
- [11] Arduino. Arduino DUE. (Online), Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue> (October 16, 2016).
- [12] Autonomoustuff. UXM-30LXH-EWA. (Online), Available: <https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/07/UXM-30LXH-EWA.pdf> (October 20, 2016).
- [13] Sangtawan. มอเตอร์เกียร์ DC SMG016. (Online), Available: http://www.sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=959&lng=th (October 25, 2016).
- [14] Sangtawan. มอเตอร์เกียร์ DC SMG033. (Online), Available: http://www.sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=261&lng=t (October 25, 2016).
- [15] ระบบควบคุมที่ไอที (Online), Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมที่ไอที>, (December 18, 2014).
- [16] วีระยุทธ บุญครอง, หลักการทำงานของจิมูลิงค์โนแมทแลป, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, ถนนรังสิต-นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120 (21/6/2547)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธนพงษ์ อุดุพันธ์
วัน เดือน ปีเกิด	1 มิถุนายน 2527
ที่อยู่	118 ซอยรามอินทรา 58 แยก 3-13 แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ประสบการณ์การทำงาน	พนักงานรัฐวิสาหกิจ แผนกควบคุมกำลังผลิต กองควบคุมระบบผลิต การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
เบอร์โทรศัพท์	084-661-5064
อีเมล	nook1627@gmail.com

