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

ธนพงษ์ อุสุพันธ์[1*] และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์[2]
Thanapong Usupan[1*] Pradya Prempraneerach[2]
thanapong_u@mail.rmutt.ac.th[1*], pradya.p@en.rmutt.ac.th[2]

[1*] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[1*] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
[2] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Received: December 1, 2017
Revised: January 19, 2018
Accepted: January 30, 2018

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ใช้สร้างพื้นผิวในสามมิติ ในการออกแบบและพัฒนาระบบชุดกลไกการสแกนพื้นผิวสามมิติ พร้อมกับระบบควบคุมรักษาระนาบการเอียงซ้าย-ขวา และควบคุมความเร็วในการก้ม-เงยอย่างสม่ำเสมอ จะถูกนำไปใช้ในการวัด/เก็บข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่สามารถนำไปติดตั้งไว้บนเรือ ฉะนั้นการวัดตำแหน่งของวัตถุและลักษณะกายภาพของวัตถุจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์จะมีความถูกต้องและแม่นยำขึ้น ในขั้นตอนการออกแบบได้ทำการทดสอบระบบกลไกด้วยแบบจำลองทางจลศาสตร์ เพื่อคำนวณหาความยาวของแต่ละก้านโยงสำหรับกลไกการเชื่อมต่อแบบสี่ก้านโยง (four-bar linkage mechanism) เพื่อให้ได้มุมก้ม-เงย (pitch angle) ของเลเซอร์สแกนเนอร์รอบแกน y ในช่วง $\pm 16.5^{\circ}$ และ แบบจำลองทางพลศาสตร์จะใช้ช่วยคำนวณหาแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ในแต่ละแกนที่เหมาะสม ในขั้นที่สองจึงพัฒนาระบบควบคุมสองแบบด้วย Arduino ไมโครคอนโทรเลอร์ 1) เพื่อช่วยรักษาเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน โดยใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดีสำหรับควบคุมมอเตอร์ดีซีตัวบน โดยใช้เอนโค้ดเดอร์ในการป้อนกลับองศาการกลิ้ง (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าของหัวเรือ 2) เพื่อให้ได้พื้นผิวข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวตั้งอย่างสม่ำเสมอจากการเคลื่อนที่แบบก้ม-เงย ของกลไกแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ดีซีตัวล่าง ด้วยระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ใช้องศาก้ม-เงยจากเซนเซอร์วัดมุมเอียง ซึ่งจะช่วยชดเชยแรงโน้มถ่วงของโลก ในส่วนที่สามจะเป็นสร้างพื้นผิวในสามมิติจากข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวรัศมี ซึ่งจะทำการประมวลผลในรูปแบบพื้นผิวแบบกลุ่มจุดสามมิติในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน แล้ววิเคราะห์ค่าความแม่นยำของพื้นผิวที่สร้างขึ้นโดยพิจารณาจากระยะทางในแนวนอนทางสถิตินั้นมีค่าอยู่ในช่วง ±7 เซนติเมตร และ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่น้อยกว่า 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/colleting 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.

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

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากสภาพอากาศของโลกที่เปลี่ยนแปลงไป ภัยพิบัติในรูปแบบต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มสูงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุทกภัยที่เกิดจากมรสุมและพายุฝน และวาตะภัยที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในประเทศไทยมาโดยตลอด ดังนั้นหน่วยงานต่างๆ ได้เล็งเห็นความสำคัญและเร่งดำเนินการเพื่อหามาตรการป้องกันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในวิธีการเตรียมความพร้อมรับมือกับอุทกภัย คือ การสำรวจเพื่อหยั่งความลึก และหาหน้าตัดตามขวางและปริมาณความจุของแม่น้ำลำคลอง อ่างเก็บน้ำ ฝาย ทั่วประเทศ เพื่อให้ได้ข้อมูล ณ สภาวะปัจจุบันในการจัดการและวางแผนการรองรับและระบายน้ำ ในการเก็บข้อมูลทางอุทกศาสตร์จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เก็บข้อมูลที่ถูกติดตั้งไว้บนเรือ ได้แก่ เลเซอร์สแกนเนอร์ (Laser Scanner) ที่นำมาใช้วัดระดับความสูงขอบตลิ่ง หรือสภาพแวดล้อมริมฝั่งน้ำ ที่พัฒนาโดย P. Prempraneerach และคณะ [1] โดยข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนเรือนั้นยังคงมีข้อจำกัดของข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่เก็บได้ในแนวตั้ง เมื่อเรือปะทะกับคลื่นลมจะทำให้ข้อมูลที่วัดได้เอียงไป ทำให้ข้อมูลอาจขาดหายไปบางช่วง และความแม่นยำของข้อมูลนั้นยังขึ้นกับความแม่นยำของเซนเซอร์จีพีเอสในการระบุตำแหน่งอีกด้วย

ในงานวิจัยของ Thomas J. Pastore และคณะ [2] ได้พัฒนาเรือลาดตระเวนผิวน้ำอัตโนมัติที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนเนอร์สำหรับสำรวจหรือตรวจจับวัตถุที่เข้ามาใกล้ชายฝั่งและท่าเรือ ซึ่งการประมวลผลการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย MOOS-IvP suite ที่เป็นซอฟแวร์แบบเปิด แต่จะมีการโคลงของเรือระหว่างการปฏิบัติการซึ่งจะทำให้ข้อมูลจากเลเซอร์ในระนาบสองมิตินั้นไม่ได้ขนานกับระนาบแนวนอนตลอดเวลา และอาจจะทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบได้อย่างแน่ชัด ถ้าสามารถลดปัญหาการโคลงของข้อมูลที่เก็บได้จากเรือและสามารถจัดเก็บข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในรูปแบบ 3D ได้ไปพร้อมกันจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบ่งบอกลักษณะของวัตถุจากข้อมูลที่เก็บได้เพิ่มมากขึ้น ในงานวิจัยของ A. Battistel และคณะ [3] ได้พัฒนาและสร้างระบบรักษาเสถียรภาพระบบตรวจจับภาพโดยใช้เซนเซอร์ไจโรแบบสองแกน (Dual-axis gyros) ที่ประยุกต์ใช้การควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งจะช่วยลดการบิดเบือนของข้อมูลภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่และในงานวิจัยของ L. Hongkai และคณะ [4] ได้นำเอาเลเซอร์สแกนเนอร์จำนวน 6 ตัว มาติดตั้งไว้บนรถเพื่อเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเนอร์ของสภาพแวดล้อมในรูปแบบ 3D ได้ แต่การใช้เลเซอร์หลายตัวนั้นต้องใช้งบลงทุนสูงและการ

ประมวลผลข้อมูลที่เยอะนั้นทำให้การคำนวณช้าหรือจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย ซึ่งถ้าสามารถพัฒนากลไกที่จะช่วยให้เลเซอร์เพียงตัวเดียวสามารถเก็บข้อมูลได้ประสิทธิภาพดีกว่าข้อมูลในระนาบสองมิติแบบปกติก็จะลดงบประมาณและประมวลผลสภาพแวดล้อมได้ไวขึ้น

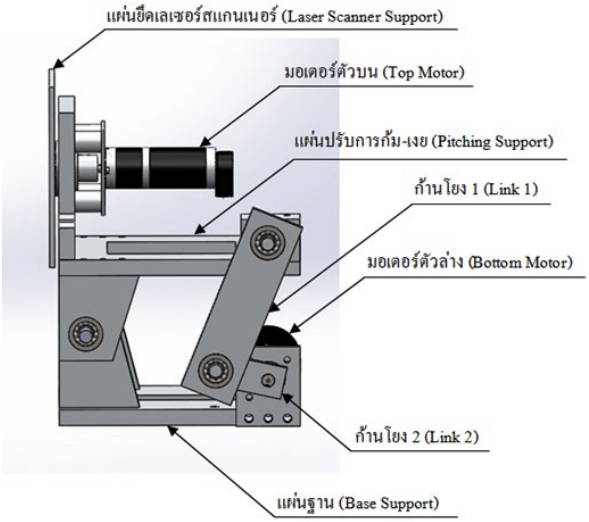
จากปัญหาข้างต้นและงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างกลไกการก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจวัดวัตถุเพื่อให้ได้ข้อมูลแบบสามมิติ พร้อมระบบรักษาเสถียรภาพของข้อมูลที่วัดได้ในระนาบแนวนอนสำหรับติดตั้งบนเรือขึ้น โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบกลไกและการเลือกใช้อุปกรณ์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อที่ 3 และจะแสดงผลการเก็บข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากเลเซอร์เพื่อสร้างเป็นพื้นผิวสามมิติและวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของข้อมูลอีกด้วย ในหัวข้อที่ 4

2. ทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์สามารถเก็บข้อมูลในระนาบแนวตั้งได้ จึงได้ออกแบบและพัฒนากลไกที่เพิ่มองศาการก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ให้หมุนรอบแกน y พร้อมกันกับกลไกรักษาองศาการเอียงซ้าย-ขวา ของเลเซอร์สแกนเนอร์รอบแกน x เพื่อให้ข้อมูลระยะทางของวัตถุอยู่ในระนาบแนวนอนเสมอไม่ว่าจะมีแรงภายนอกมากระทำหรือมีการโคลงของฐานของชุดกลไกที่จะนำไปติดตั้งบนเรือ ดังนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบและทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณทั้งทางจลศาสตร์และพลศาสตร์

2.1 การออกแบบโครงสร้างของชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

เพื่อให้เลเซอร์สแกนเนอร์ที่วัดข้อมูลระยะทางในแนวนอนนั้นให้สามารถเก็บข้อมูลที่เกิดจากการก้มเงย ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลในแนวตั้งหรือในมิติที่สาม จึงได้ออกแบบกลไลแบบสี่ก้านโยงที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ตัวล่าง ดังในรูปที่ 2 ที่ส่งกำลังโดยก้านโยงที่ 1 และ 2 เพื่อทำให้แผ่นปรับการก้มเงยนั้นยกตัวขึ้นลงในรูปแบบของฟังก์ชั่นซายด์ (sinusoidal function) นอกจากนั้นแล้วได้ออกแบบให้ใช้มอเตอร์ตัวบนที่เชื่อมต่อเข้ากับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์โดยตรงเพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพในการเอียงของข้อมูลที่วัดได้จากเลเซอร์ให้ขนานกับระนาบแนวนอนเสมอ กลไกทั้งหมดได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS เพื่อจำลองและทดสอบการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ ก่อนดำเนินการสร้างจริง



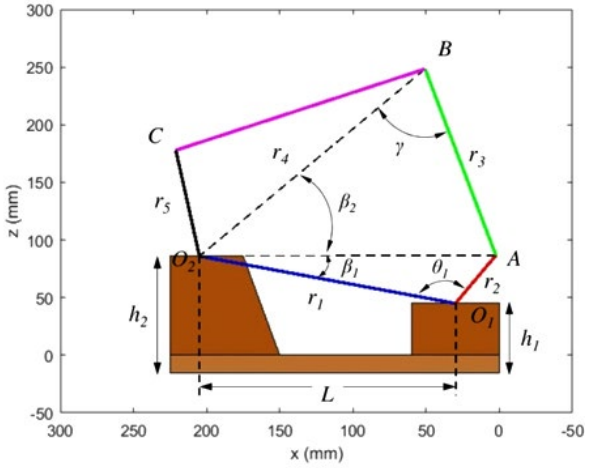
รูปที่ 1 ส่วนประกอบของกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS

รูปที่ 2 ชุดกลไกการเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ได้ออกแบบ (ซ้าย) และ ที่ได้สร้างขึ้นพร้อมติดตั้งอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ (ขวา)

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

ถ้าต้องการให้องศาการก้มเงยของเลเซอร์สแกนเนอร์อย่างน้อยสุดเท่ากับ 30 องศา จึงได้ทำการคำนวณองศาการหมุนของกลไกแบบสี่ก้านโยงสำหรับชุดกลไกที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะสามารถช่วยใช้เลือกขนาดความยาวของก้านโยงที่ 1 และ 2 และ ความยาวของแผ่นการก้มเงย แล้วจึงทำการจำลองทางจลนศาสตร์ลูกโซ่ของกลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage) โดยจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยงที่ประกอบด้วยก้านโยง r_1-r_2-r_3-r_4 และ ข้อต่อที่จุด A, B, O_1, O_2 ดังแสดงในรูปที่ 3

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



รูปที่ 3 พารามิเตอร์ของกลไกแบบสี่ก้านโยงโดยเฉพาะมุมองศาในการส่งถ่ายแรง (γ) และมุมก้ม-เงย ของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1)

จากรูปสามเหลี่ยม AO_1O_2 และ ABO_2 เมื่อประยุกต์ใช้กฎของ Cosines กับสามเหลี่ยมทั้งสองรูปจะได้

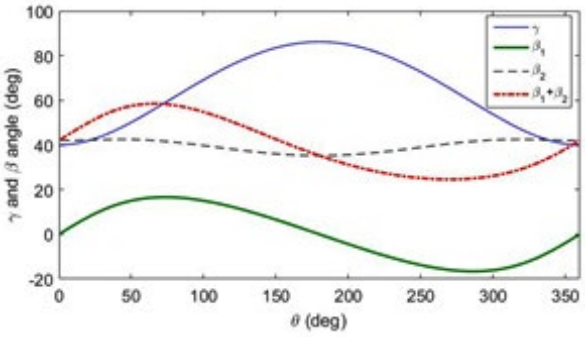
$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\theta_1 \qquad (1)$$

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

และเมื่อให้ความยาวด้าน z เท่ากันหรือ (1)=(2) จะได้

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

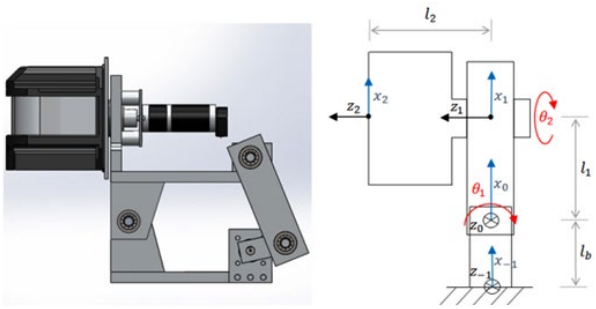
จากสมการ (3) ถ้าองศา เป็นมุมการหมุนของมอเตอร์ตัวล่างแบบต่อเนื่อง (0˚-360˚) ดังนั้นจะสามารถคำนวณหามุม γ และ $\beta_{1.2}$ จากสามเหลี่ยม ฉะนั้นเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดความยาวของก้านโยงทั้ง 4 ชิ้น ในโปรแกรม MATLAB จะทำให้ได้องศาของมุมก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ (β_1) ตามที่ต้องการ โดยมีค่าอยู่ในช่วง ±16.5˚ ซึ่งผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการจำลองมุมองศาในการส่งถ่ายแรง (γ) และมุมก้มเงยของเลเซอรสแกนเนอร์ (β_1)

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

การสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในขั้นต้นจะทำการหาเมตริกซ์ในการหมุน (Rotation Matrix) โดยใช้พารามิเตอร์ของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก (Denavit–Hartenberg หรือ D-H) เพื่อใช้ในการตั้งแกนก้านต่อของกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 และ พารามิเตอร์ของชุดกลไกในตารางที่ 1



รูปที่ 5 การตั้งแกนสำหรับก้านต่อของชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 D-H Table แสดงพารามิเตอร์ของชุดกลไก

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

ขั้นที่สองจะทำการคำนวณหาเมทริกซ์จาโคเบียนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายก้านโยงแต่ละข้อต่อและความเร็วเชิงมุมในการหมุนของแต่ละข้อต่อ $\left[v_i \quad \omega_i\right] = J_i\left[\theta_i\right]$ ซึ่งแสดงในสมการที่ (4) เพื่อนำไปใช้หาเมทริกซ์ในสมการพลศาสตร์

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 & 0 \\ l_1 c_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ และ } J_2 = \begin{bmatrix} l_2 c_1 - l_1 s_1 & 0 \\ l_1 c_1 + l_2 s_2 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & s_1 \\ 0 & -c_1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

(4) สำหรับสมการแบบจำลองทางพลศาสตร์ของชุดกลไก ในกรณีที่ไม่คิดแรงเสียดทานภายในของแต่ละข้อต่อ คือ

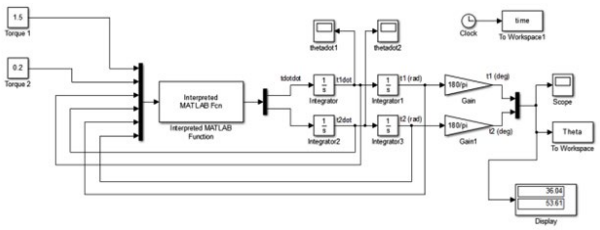
$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = Q \qquad (5)$$

โดยที่ $M(q)$ คือ เมตริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix) เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับองศาการหมุนของข้อต่อ q และ $C(q,\dot{q})$ คือ เมตริกซ์โคริออลิสและสู่ศูนย์กลาง (Coriolis and Centripetal Matrix) เป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ q และ $\dot{q}$ และ $G(q)$ คือ เวกเตอร์แรงบิดที่มาจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ Q คือ แรงบิดที่เป็น อินพุตจากมอเตอร์ทั้งสองตัว ส่วน $\ddot{q}, \dot{q}, q$ คือ เวกเตอร์ของความเร่ง ความเร็ว และองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อ ตามลำดับ จากสมการที่ (5) ชุดกลไกจะต้องใช้แรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว $(Q = \left[\tau_1, \tau_2\right])$ ได้ดังนี้

$$\tau_1 = \left(I_{1v} + m_1 l_{s1}^2 + m_2(l_{s1}^2 + l_{s2}^2) + I_{2x}s_2^2 + I_{2v}c_2^2\right)\ddot{\theta}_1 + 2c_2 s_2 (I_{2x} - I_{2v})\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - m_1 g l_{s1} c_1 \qquad (6)$$

$$\tau_2 = I_{2z}\ddot{\theta}_2 - c_2 s_2 (I_{2x} + I_{2y})\dot{\theta}_1^2 - m_2 g (l_{s1}c_1 + l_{s2}s_1) \qquad (7)$$

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



รูปที่ 6 แผนภาพสมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยโปรแกรม MATLAB/Simulink

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

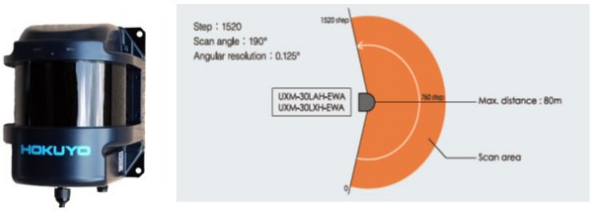
3. การสร้างชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์

3.1 อุปกรณ์และเซนเซอร์ที่ใช้

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเลเซอร์สแกนเนอร์ในทั้งสองแกน นั้นจำเป็นต้องใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียง (หรือ IMU) ในการป้อนกลับองศาการเอียงที่ใช้ร่วมกับบอร์ดควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนในทั้งสองแกน เซนซอร์ IMU ที่ใช้วัดมุมเอียง คือ 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 ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ทั้งสองแกนคือ Arduino DUE ซึ่งสามารถประมวลผลความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จากเอนโค้ดเดอร์ได้

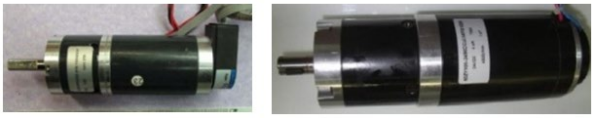
รูปที่ 7 เซนเซอร์วัดมุมเอียงแบบ 9 แกนขนาดเล็ก (MinIMU-9) ของ Pololu [10] (ซ้าย) และ ไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino DUE [11] (ขวา)

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



รูปที่ 8 เลเซอร์สแกนเนอร์ของ Hokuyo รุ่น UXM30LXH-EWA [12]

มอเตอรที่ใช้มี 2 ตัวคือ ได้แก่ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R ซึ่งใช้สำหรับการปรับการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ มอเตอร์เกียร์ 24-VDC ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM ใช้สำหรับการปรับองศาก้ม-เงยของอุปกรณ์

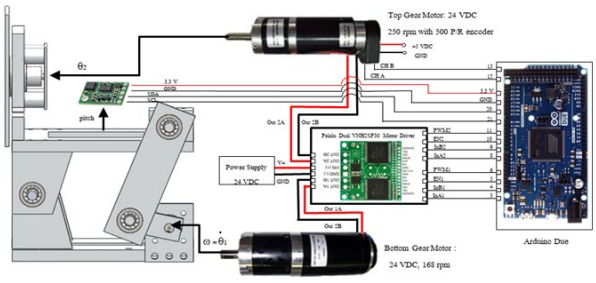


รูปที่ 9 มอเตอร์เกียร์ 24 VDC [13] ที่มีความเร็วรอบ 250 RPM พร้อมด้วยเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) แบบ 500 P/R (ซ้าย) และมอเตอร์เกียร์ 24 VDC [14] ที่มีความเร็วรอบ 168 RPM (ขวา)

เมื่อนำอุปกรณ์และเซนเซอร์ต่างๆ มาประกอบเข้ากับชุดกลไกที่ออกแบบและสร้างขึ้น จะได้ดังในรูปที่ 2

3.2 ระบบควบคุมชุดกลไกด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ในระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้นี้จะใช้องศาการกลิ้ง (Roll) และ องศาการก้ม-เงย (Pitch) เพื่อใช้ในการป้อนกลับและป้อนไปข้างหน้าด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE เพื่อทำการประมวลผลแล้วจึงส่งคำสั่งความเร็วในการหมุนไปยัง Motor Driver ดังแสดงในรูปที่ 10

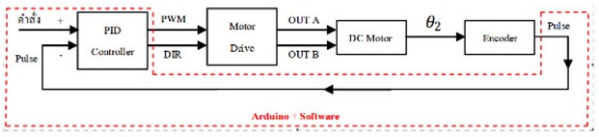


รูปที่ 10 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมแบบป้อนกลับและแบบป้อนไปข้างหน้าด้วยไมโครคอนโทรเลอร์ Arduino DUE

โดยจะประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) [15] ดังในสมการที่ 8 เพื่อควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาของเลเซอร์สแกนเนอร์ด้วยมอเตอร์ตัวบน ซึ่งจะใช้ค่าความผิดพลาด (หรือ e) ที่นิยามเป็นผลต่างระหว่างคำสั่งองศาการกลิ้งที่แปลงเป็นคำสั่งพัลส์และองศาการกลิ้งหรือพัลส์ที่วัดได้จากเอนโค้ดเดอร์ของมอเตอร์ตัวบน

$$u_2(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)\,dt + K_D \frac{a}{dt} e(t) \qquad (8)$$

โดยค่า K_P, K_I , K_D เป็นค่าอัตราขยายแบบแปรผันตรงแบบปริพันธ์ และ แบบอนุพันธ์ ตามลำดับ แผนภาพการทำงานของการควบคุมแบบ PID แสดงดังรูปที่ 11

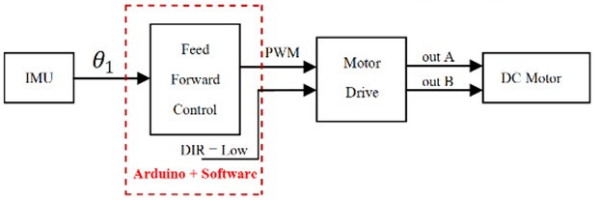


รูปที่ 11 ระบบควบคุมแบบ PID สำหรับมอเตอร์ตัวบน ที่สั่งการด้วไมโครคอนโทรเลอร์

ส่วนมอเตอร์ตัวล่างจะถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ ป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward) ดังในสมการที่ 9 เพื่อใช้ช่วยชดเชยแรงโน้มถ่วงโลก สำหรับการยกก้านโยง 1 และ 2 ในช่วงขาขึ้นด้วยการเพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่าง และจะลดความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยง ดังนั้นจะสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชั่นซายด์ขององศาการก้ม-เงยที่ขึ้นกับเวลา โดย θ_1=0 เมื่อแผ่นปรับการก้ม-เงย ขนานกับระนาบแนวนอน ส่วนเมื่อ $\theta_1 > 0$ และ $\theta_1 < 0$ เมื่อยกแผ่นปรับการก้ม-เงยให้ยกขึ้น และ ลง ตามลำดับ

$$u_1(t) = K_F \sin(A_1(\theta_1(t) - B_1)) \qquad (9)$$

เมื่อ แอมพิจูด (K_F) เป็นอัตราขยายที่ใช้ช่วยปรับความเร็วรอบการหมุนที่ป้อนไปข้างหน้า ค่า A_1 เป็นอัตราขยายขององศาการก้ม-เงย และค่า B_1 ใช้ปรับแก้องศาการก้มเงยของเซนซอร์ IMU แผนภาพการทำงานของการควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed Forward Control) แสดงดังในภาพที่ 12



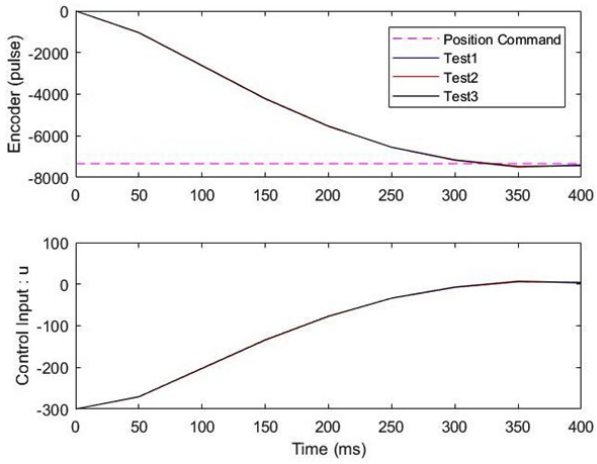
รูปที่ 12 ระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าสำหรับมอเตอร์ตัวล่าง ที่สั่งการด้วยไมโครคอนโทรเลอร์

4. ผลการทดสอบการทำงานและการประมวลผลภาพจากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

4.1 ผลทดสอบการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในทั้งสองแกนสำหรับชุดกลไก

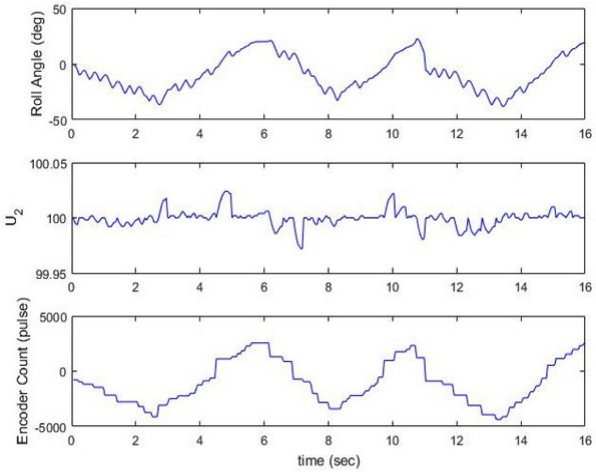
เมื่อเปิดสวิตช์การทำงาน เริ่มต้นแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์จะหมุนไปแตะลิมิตสวิตช์ที่ติดตั้งไว้ฝั่งซ้ายเป็นมุม 60° จากแนวดิ่ง และทำการรีเซ็ตค่าเอ็นโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์ เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง และมอเตอร์ตัวบนจะถูกหมุนกลับมาให้ตั้งตรงด้วยการป้อนกลับค่าสัญญาณพลัสจากเอ็นโคดเดอร์ (Encoder Count) ในหนึ่งรอบจะให้ค่าพลัสเป็น 500 P/R x อัตราทดเกียร์ 22:1 x 2CH (A,B) x 2 การนับสัญญาณขาขึ้นและลงของสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ ที่ไมโครคอนโทรเลอร์นับได้

เมื่อถึง -7,333 พลัส (ซึ่งเป็นค่าคำสั่งอ้างอิง) แล้ว มอเตอร์จะถูกสั่งให้หยุดหมุนและรีเซ็ตค่าเอนโค้ดเดอร์ให้เป็นศูนย์อีกครั้ง ได้ทำการทดสอบการหมุนกลับมาตั้งตรงขนานกับแนวดิ่งเป็นจำนวน 3 ครั้ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าแผ่นยึดเลเซอร์สามารถปรับให้เลเซอร์สแกนเนอร์กลับมาตั้งตรงได้ภายใน 400 มิลลิวินาที หลังจากแตะลิมิตสวิทช์เพื่อรีเซ็ตค่าเอ็นโค้ดเดอร์



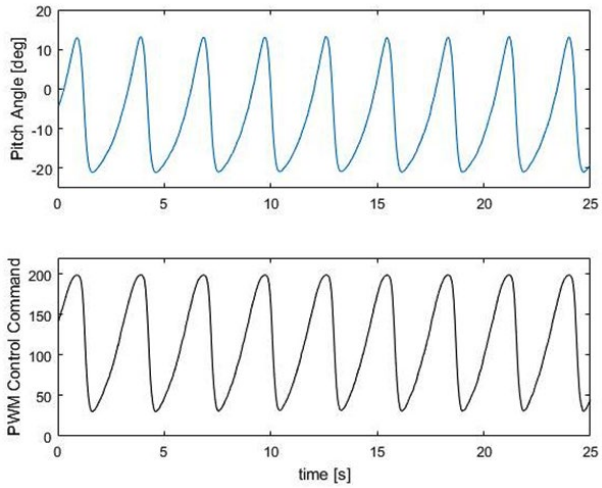
รูปที่ 13 ค่าพลัสของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) และค่าคำสั่งแบบ PWM หรือ Control Input ที่ไปควบคุมตำแหน่งองศาการหมุนของมอเตอร์ตัวบนเทียบกับเวลา

ระบบควบคุมแบบพีไอดีจะพยายามรักษาองศาการหมุนของแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้ตั้งตรงเสมอ เพื่อให้ได้ข้อมูลระยะทางจากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวราบ ดังนั้นได้ทำการทดสอบการเอียงของแผ่นฐาน ซ้าย-ขวา เพื่อสังเกตการตอบสนองของมอเตอร์ตัวบนในการปรับแผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ให้กลับมาตั้งตรง ดังในรูปที่ 14 ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้าย ซึ่งสังเกตุได้จากองศาการกลิ้ง (Roll Angle) ของ IMU ที่เป็นลบ เมื่อ $t \in [0, 4.6]$ วินาที แผ่นยึดเลเซอร์สแกนเนอร์ก็จะถูกปรับให้หมุนกลับมาทางขวาให้ตั้งตรงกับแนวดิ่ง โดยค่าพลัสของเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder Pulse) จะมีค่าเป็นลบและคำสั่งของระบบควบคุมแบบพีไอดี (U_2) ที่สั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกา ในทางกลับกันเมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางขวาในช่วงเวลา $t \in [4.6, 7.1]$ วินาที ระบบควบคุมแบบพีไอดีก็จะพยายามปรับแผ่นยึดเลเซอร์ให้หมุนกลับมาทางซ้ายหรือสั่งให้มอเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยเช่นกัน และคำสั่ง U_2 ของระบบควบคุมจะมีค่าเป็นบวก



รูปที่ 14 องศาการกลิ้ง (บน), คำสั่งของระบบควบคุมแบบพีไอดี หรือ U_2 (กลาง) และค่าพลัสของเอ็นโค้ดเดอร์ (ล่าง) เมื่อทดสอบการเอียงแผ่นฐานไปทางด้านซ้ายและขวา

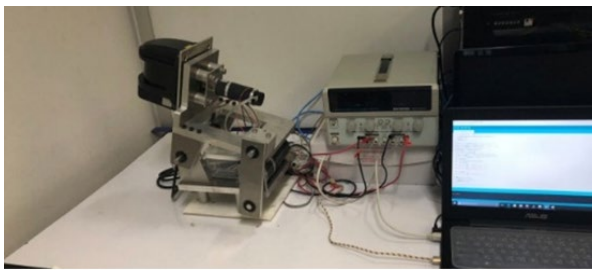
นอกจากนั้นยังได้ทดสอบการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวล่างในการปรับการก้ม-เงยของเลเซอร์สแกนเนอร์ เมื่อเอียงแผ่นฐานไปทางซ้ายและขวา จากผลการทดสอบพบว่ามอเตอร์ตัวล่างสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและการหมุนขึ้นลงในแต่ละรอบนั้นมีช่วงเวลาในการหมุนขึ้น-ลงที่คงที่และเท่ากัน ที่สามารถสังเกตุได้จากค่ามุมก้ม-เงย (Pitch Angle) ของ IMU โดยในหนึ่งคาบใช้เวลาประมาณ 3 วินาที ซึ่งจะสัมพันธ์กับคำสั่งจากระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ส่งเป็นค่าควบคุมแบบ PWM (PWM Control) เพื่อส่งไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์ตัวล่างที่มีค่าอยู่ในช่วง 32 ถึง 199 ดังในรูปที่ 15



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

4.2 ผลทดสอบการประมวลผลภาพสามมิติจากกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์

ในการสร้างพื้นผิวสามมิติจากข้อมูลระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในระนาบสองมิติที่จะนำมาบรูณาเข้ากับองศาการก้ม-เงย (θ_1) ที่วัดได้จาก IMU ดังนั้นเพื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดระยะทางในแนวรัศมีจากเลเซอร์สแกนเนอร์ (d) ที่กวาดเป็นมุม α ในช่วง $\pm 95^{\circ}$ มาแปลงให้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดในพิกัดคาร์ทีเซียนเทียบกับแกนอ้างอิงที่ตั้งอยู่ที่จุดกึ่งกลางเพลาของฐานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพของเลเซอร์สแกนเนอร์หรือจุด o_B ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18



รูปที่ 16 อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับทดสอบการทำงานชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพเลเซอร์สแกนเนอร์

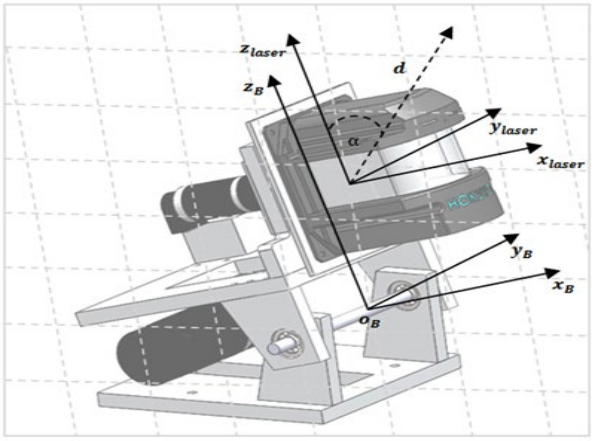
จากรูปที่ 17 จุดที่เลเซอร์สแกนเนอร์วัดระยะทางในแนวรัศมีเป็น d ที่กวาดเป็นมุม α จากฝั่งด้านซ้ายไปขวา เมื่อพิจารณาในระนาบ xz และระนาบ yz จะได้ระยะทางในแนวรัศมีเป็น $d\cos\alpha$ และ $d\sin\alpha$ ตามลำดับ ฉะนั้นจะได้ระยะทางของวัตถุเทียบกับจุด o_B ตามแกน x_B, y_B และ z_B ที่อธิบายด้วยสมการที่ 10, 11 และ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

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

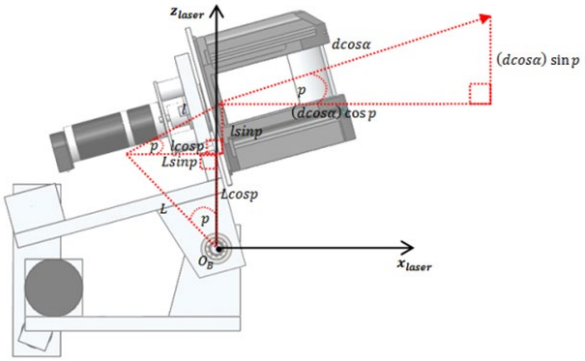
$$y = d\sin\alpha \quad (11)$$

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

โดยที่ จุด o_B นั้นตั้งอยู่ที่กึ่งกลางของเพลาที่ฐาน ส่วน z_B และ z_{laser} ชี้ขึ้นขนานกับขอบด้านข้างในแนวตั้งของเลเซอร์สแกนเนอร์ และ y_B และ y_{laser} ชี้ขนานไปกับเพลาที่ฐานของชุดกลไก และ x_B และ x_{laser} ชี้ไปข้างหน้าของเลเซอร์สแกนเนอร์



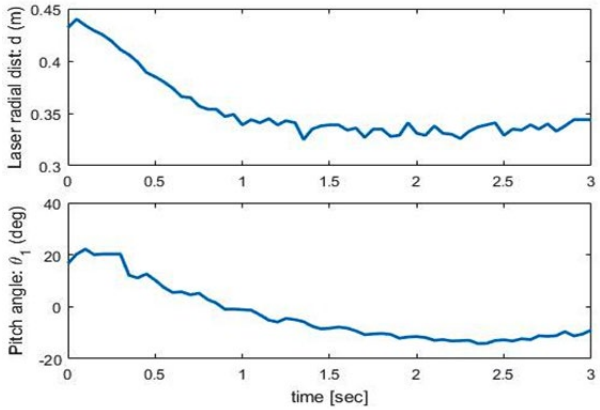
รูปที่ 17 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ที่พุ่งออกตามแนวรัศมี และกวาดเป็นมุม α



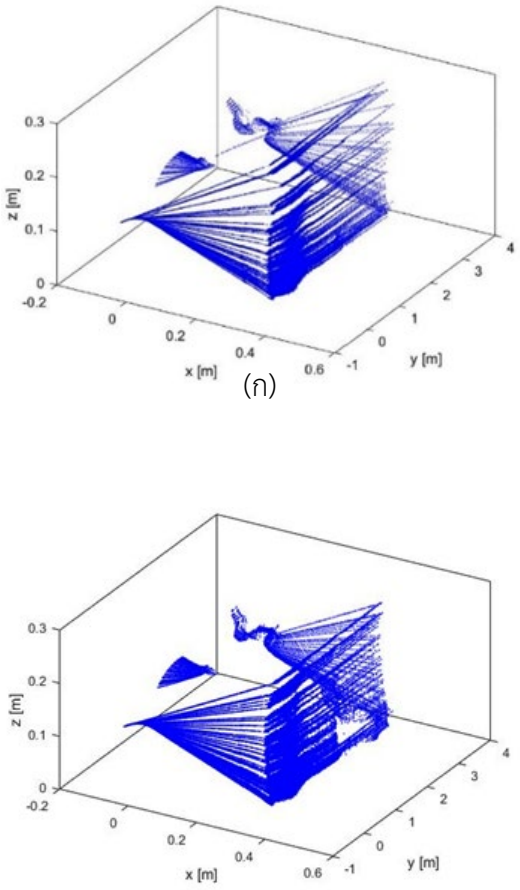
รูปที่ 18 ระยะทางของวัตถุที่วัดได้จากเลเซอร์เมื่อเทียบกับจุด o_B ที่แผ่นฐานในระนาบ xz

เมื่อนำข้อมูลองศาก้ม-เงย ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 20 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 19 แทนลงในสมการที่ 10, 11, 12 และ เมื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นไปแสดงผลในพิกัดคาร์ทีเซียน จากการทดสอบสองครั้งด้วยโปรแกรม MATLAB [16] ดังในรูปที่ 21 จากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัดแนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด o_B นั้นอยู่ที่พิกัด (x,y,z) = (0,0,0.13) เมตร

รูปที่ 19 สถานที่ฯใช้ทดสอบความแม่นยำของความกว้างผนังด้วยชุดกลไกเพิ่มประสิทธิภาพเลเซอร์สแกนเนอร์

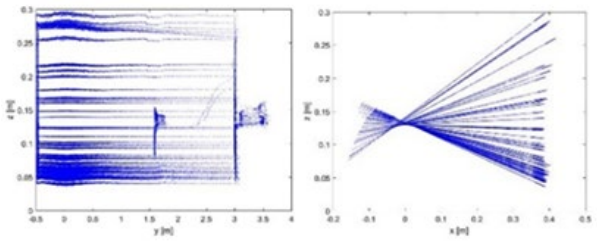


รูปที่ 20 ระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี (d) และองศาการก้ม-เง้ย (pitch angle หรือ θ_1) ในช่วงเวลา 3 วินาที



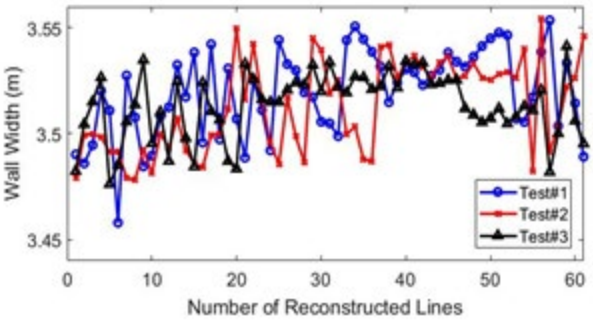
รูปที่ 21 ข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้น (3D reconstructed point cloud) ในพิกัด xyz ของผนังในห้องทดลอง (ก) ทดสอบครั้งที่ 1 (ข) ทดสอบครั้งที่ 2

เมื่อนำข้อมูลองศาก้ม-เงย ที่วัดได้จาก IMU ที่อยู่ในช่วงประมาณ 3 วินาทีแรก ที่แสดงในรูปที่ 20 มาประมวลผลร่วมกับ ข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์ในแนวรัศมี ที่ทดสอบการเก็บข้อมูลจากผนังห้องที่กว้าง 3.45 เมตร ในรูปที่ 19 แทนลงในสมการที่ 10, 11, 12 และ เมื่อนำข้อมูลกลุ่มจุดในสามมิติที่สร้างขึ้นไปแสดงผลในพิกัดคาร์ทีเซียน จากการทดสอบสองครั้งด้วยโปรแกรม MATLAB [16] ดังในรูปที่ 21 จากรูปที่ 22 จะเห็นได้ว่าจะสามารถวัดความกว้างและวัดแนวตั้งตรงของพื้นผิวผนังที่ได้สร้างขึ้นจากข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่จุด o_B นั้นอยู่ที่พิกัด (x,y,z) = (0,0,0.13) เมตร



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

จากผลการทดสอบสามครั้ง เพื่อประเมินความแม่นยำของความกว้างผนังที่วัดได้จากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดในสามมิติ จำนวนแนวเส้นที่สแกนได้ (Number of Reconstructed Lines) จากเลเซอร์ในครึ่งรอบในการทดสอบแต่ละครั้งจะมีจำนวนทั้งหมด 62 เส้น จึงได้ทำการวัดระยะทางความกว้างของผนังดังแสดงในรูปที่ 23 จะเห็นได้ว่าค่าความกว้างของแต่ละเส้นนั้นมีความใกล้เคียงกันมากในระดับมิลลิเมตร แล้วจึงทำการหาค่าน้อยสุด (Min) ค่ามากสุด (Max) ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน (Std) จากข้อมูลความกว้างทั้ง 62 แนวเส้นในการทดสอบแต่ละครั้ง ดังนำเสนอในตารางที่ 1 เมื่อเทียบความกว้างของผนังในห้องทดลองที่วัดด้วยตลับเมตร กับค่าฉลี่ยของความกว้างผนังที่ประมวลจากข้อมูลพื้นผิวแบบกลุ่มจุดที่เก็บจากเลเซอร์สแกนเนอร์ จะพบว่ามีค่าความผิดพลาด ±7 เซนติเมตร หรือ ±2% ซึ่งจะมาได้จากความผิดพลาดในการวัดความกว้างด้วยตลับเมตร และ มุมก้ม-เงยที่วัดได้จากเซนเซอร์ IMU



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

ตารางที่ 2 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 และเพิ่มองศาอิสระในการเก็บข้อมูลระยะทางในแนวตั้งจากเลเซอร์ที่วัดข้อมูลในระนาบแนวนอน จะทำให้ได้พื้นผิวหรือรูปภาพแบบสามมมิติ โดยได้ออกแบบให้ชุดกลไกสามารถปรับองศาก้ม-เงย (pitching angle) ในช่วง ±16.5° ได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้กลไกแบบสี่ก้านโยง (Four-Bar Linkage)

ที่สามารถหมุนปรับแก้องศาการเอียงซ้าย-ขวา (roll angle) รอบแกน x ที่ชี้ไปทางด้านหน้าอยู่ในช่วง ±20° และทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางจลนศาสตร์และพลศาสตร์ของชุดกลไก ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ที่สามารถคำนวณหาแรงบิดอย่างน้อยที่ต้องการเพื่อใช้เลือกมอเตอร์ที่จะมาประยุกต์สร้างชุดกลไกที่ออกแบบไว้ให้มีกำลังเพียงพอยังได้พัฒนาระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) สำหรับมอเตอร์ตัวบนเพื่อให้สามารถควบคุมองศาการเอียงซ้าย-ขวาได้เมื่อฐานของชุดกลไกเกิดการเอียง ที่ช่วยรักษาระนาบของข้อมูลกลุ่มจุดที่วัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ให้อยู่ในระนาบแนวนอน และระบบควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward Control) สำหรับมอเตอร์ตัวล่าง ที่สามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ โดยการเพิ่มความเร็วในช่วงขาขึ้นและลดความเร็วในช่วงขาลงของกลไกแบบสี่ก้านโยง ส่งผลให้ได้ข้อมูลกลุ่มจุดของเลเซอร์ที่วัดได้แบบสม่ำเสมอในแนวตั้ง

นอกจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำในการสร้างพื้นผิวของกลุ่มข้อมูลแบบจุดในสามมิติ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่สร้างขึ้นจาก กลุ่มจุดข้อมูลวัดได้จากเลเซอร์สแกนเนอร์ในแนวรัศมี โดยได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของความกว้างของผนังในห้องทดลอง โดยตรวจสอบค่าความผิดพลาด อยู่ในช่วง ±7 เซนติเมตร หรือ คิดเป็น ±2% ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตราฐานอยู่ไม่เกินกว่า 2 เซนติเมตร

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำหรับงบประมาณสนับสนุนงานวิจัยนี้ ในโครงการวิจัยเรื่อง เรือลาดตระเวนแบบสองทุ่นควบคุมระยะไกลเพื่อใช้ช่วยตรวจจับวัตถุต้องสงสัยด้วยภาพ ประจำปีงบประมาณ 2559

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Prempraneerach, M. Janthong, K. Phothongkum, C. Choosui, S. Timpitak. Hydrographical survey using point cloud data from laser scanner and echo sounder. In 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). 2016;pp. 1-6.

[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. 2010; pp. 1-6.

[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; pp. 1-8.

[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). 2016; pp. 5446-5450.

[5] Hamilton H. Mabie and Charles F. Reinholtz. Mechanisms and Dynamics of Machinery, 4nd edition, ISBN: 13978-0-471-80237-2. United States: John Wiley & Sons, Inc. 1987.

[6] Wasan Leelatanaroek, Pradya Prempraneerach. Study and Design of Radio-control Flapping-wing Robot. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2014.

[7] Reza N. Jazar. Theory of Applied Robotics: Kinematics, Dynamics, and Control, Second Edition. New York: Springer Science+Business Media, LLC 2006; 2010.

[8] Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco, Luigi Villani, Giuseppe Oriolo. Robotics : Modelling, Planning and Control. United Kingdom: Springer-Verlag London Limited; 2009.

[9] Pitakwatchara P. Fundamentals of Robotics : Kinematics of Serial Manipulators. Bangkok, Thailand : Chulalongkorn University Press; 2014. (in Thai)

[10] Pololu [Internet]. MinIMU-9 [modified 2016 October 15]. Available from: https://www.pololu.com/product/1264

[11] Arduino [Internet]. Arduino DUE [modified 2016 October 16]. Available from: https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoDue

[12] Autonomoustuff [Internet]. UXM-30LXH-EWA [modified 2016 October 20]. Available from: https://www.autonomoustuff.com/wp-content/uploads/2016/07/UXM-30LXH-EWA.pdf

[13] Sangtawan [Internet]. Gear Motor DC SMG016 [modified 2016 October 25]. Available from: http://www. sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=959&lng=th

[14] Sangtawan [Internet]. Gear Motor DC SMG033 [modified 2016 October 25]. Available from: http://www. sangtawan.org/product_detail.asp?product_id=261&lng=t

[15] Wikipedia [Internet]. PID Control System [modified 2014 October 25]. Available from: https://th.wikipedia. org/wiki/ระบบควบคุมพีไอดี

[16] Boonkrong W. Pinciple of Simulink in MATLAB. Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University; 2004. (in Thai)