

การประกอบกลุ่มของจุดจากหลายมุมมอง สำหรับ การวัดพื้นผิวสามมิติโดยใช้แสงแบบอัตโนมัติ

Registration of Views for an Automatic 3D-Optical Measurement System

นัยสันต์ อภิวัฒนลังการ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการประกอบกลุ่มของจุดที่อยู่บนวัตถุจากหลายมุมมองที่อยู่ในระบบพิกัดต่างกัน เพื่อให้จุดทั้งหมดอยู่ในระบบพิกัดเดียวกัน โดยอาศัย Iterative Closest Point (ICP) algorithm ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) การคำนวณหาจุดที่ใกล้ที่สุดซึ่งอยู่ในกลุ่มของจุด กับจุดที่กำหนดให้ และ 2) การคำนวณหา coordinate transformation ระหว่างกลุ่มของจุดที่สอดคล้องกัน ในการทดลอง กลุ่มของจุดที่อยู่บนวัตถุได้มาโดยอาศัยการฉายแสงรหัสสีเทาไปบนวัตถุ แล้วทำการถอดรหัสสีเทาออกมาเป็นพิกัดของจุด โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา ถูกนำมาทดสอบกับกลุ่มของจุดจาก 2 ตัวอย่าง ซึ่งได้แก่ a) การยืนยันการทำงานของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมาด้วยกลุ่มของจุดที่ได้มาจาก [4] และ b) การประกอบกลุ่มของจุดที่ได้มาจากการ scan กล้องลูกบาศก์ที่มีขนาด 0.2 m

คำสำคัญ : วิศวกรรมย้อนกลับ, การประกอบกลุ่มของจุดจากหลายมุมมอง, แสงที่มีโครงสร้าง

Abstract

In this article, the procedures to assemble point clouds of an object represented in different coordinate systems into the same coordinate system using Iterative Closest Point (ICP) algorithm are presented. The ICP algorithm is composed of two parts: 1) computing the closest point in a point set to a given point and 2) corresponding point set registration. In experiments, point clouds of an object are obtained from gray-code light projection technic. The developed programs are tested by two examples: a) verifying the developed programs against point set matching example from [4] and b) assembling point clouds obtained by scanning a cube with dimension 0.2 m.

Key words: Reverse Engineering, Registration of Views, Structured Light

1. บทนำ

เครื่องวัดพิกัด (CMM) ซึ่งใช้หลักการบันทึกตำแหน่งของจุดสัมผัสระหว่างหัวสัมผัสกับวัตถุที่ถูกวัด เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในการวัดพื้นผิวสามมิติของวัตถุ เนื่องจากทำให้ข้อมูลพิกัดที่แม่นยำ อย่างไรก็ตามเครื่องวัดที่ใช้หลักการสะท้อนของแสงก็ได้รับความนิยมที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีข้อได้เปรียบกว่าเครื่องวัดแบบแรก กล่าวคือ ไม่ก่อให้เกิดการสึกหรอต่อวัตถุที่กำลังวัด มีความเร็วในการวัดที่สูง และมีราคาถูกกว่าเมื่อพื้นผิวที่ต้องการวัดมีความซับซ้อนและมีความจำเป็นที่ต้องใช้เวลาในการวัดต่ำ และความแม่นยำในการวัดไม่มีความจำเป็นต้องสูงมาก ดังนั้นเครื่องวัดที่ใช้การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้น (wide-area laser scanners) และเครื่องวัดที่ใช้การฉายแสงรหัสดิจิทัลทั้งพื้นที่ (whole-field optical digitizer) จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่าเครื่องวัดพิกัด เครื่องวัดที่ใช้หลักการฉายแสงนั้นสามารถทำงานได้เร็วกว่าเครื่องวัดพิกัดมาก กล่าวคือมันสามารถทำให้ได้ข้อมูลพื้นผิวสามมิติได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที ([1])

เครื่องวัดที่ใช้การฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นเมื่อเทียบกับเครื่องวัดที่ใช้การฉายแสงรหัสดิจิทัลทั้งพื้นที่ นั้นพบว่ามีข้อด้อยกว่า กล่าวคือ เส้นแสงเลเซอร์จะต้องถูกฉายให้ชิดกันเพื่อที่จะให้ได้แนวเส้นที่ใช้ในการสร้างพื้นผิวสามมิติที่หนาแน่น ในกรณีอย่างนี้ปัญหาความไม่ชัดเจนจะเกิดขึ้น โดยเฉพาะ ณ ตำแหน่งที่พื้นผิวมีความชันและมีการกระโดด ([2])

วัตถุประสงค์ของบทความนี้คือการสร้างระบบการวัดพื้นผิวสามมิติโดยใช้การฉายแสงรหัสดิจิทัลทั้งพื้นที่เพื่อให้ได้มาซึ่งกลุ่มของจุด (point cloud) บนวัตถุทั้งชิ้น กลุ่มของจุดที่ได้สามารถถูกนำมาสร้างพื้นผิวของวัตถุทั้งชิ้นเพื่อนำไปใช้ในการสร้างวัตถุจริงโดยอาศัยการพิมพ์สามมิติ (3D printing) หรือขึ้นรูปโดยอาศัยเครื่องกลึง CNC

2. การประกอบภาพจากหลายมุมมอง

(Registration of Views)

ขั้นตอนในการหาพิกัดของจุดบนวัตถุโดยอาศัยการฉายแสงรหัสสีเทา (grey-code light projection) สามารถดูได้จาก [3]

การทำ registration of views ([4]) ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) การคำนวณหาจุดที่ใกล้ที่สุดซึ่งอยู่ในกลุ่มของจุด กับจุดที่กำหนดให้ และ 2) การคำนวณหา coordinate transformation ระหว่างกลุ่มของจุดที่สอดคล้องกัน (corresponding point set registration)

2.1 การคำนวณหาจุดที่ใกล้ที่สุดซึ่งอยู่ในกลุ่มของจุด กับจุดที่กำหนดให้

ระยะทาง (Euclidean distance) $d(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ ระหว่างจุดสองจุด $\mathbf{r}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ และ $\mathbf{r}_2 = (x_2, y_2, z_2)$ สามารถถูกคำนวณได้จาก

$$d(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2\| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1)$$

ให้ A เป็นกลุ่มของจุดที่มีจำนวน N_a จุด ซึ่งแต่ละจุดถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{a}_i$ ดังนั้น $A = \{\mathbf{a}_i\}$ ซึ่ง $i = 1, \dots, N_a$ ระยะทางระหว่างจุด $\mathbf{p}$ และกลุ่มของจุด A ถูกกำหนดโดย

$$d(\mathbf{p}, A) = \min_{i \in \{1, \dots, N_a\}} d(\mathbf{p}, \mathbf{a}_i) \quad (2)$$

จุดที่ใกล้ที่สุด $\mathbf{a}_j$ ของกลุ่มของจุด A กับจุดที่กำหนดให้ $\mathbf{p}$ ทำให้ได้ $d(\mathbf{p}, \mathbf{a}_j) = d(\mathbf{p}, A)$

2.2 การคำนวณหา coordinate transformation ระหว่างกลุ่มของจุดที่สอดคล้องกัน (corresponding point set registration)

สำหรับปัญหาในสองหรือสามมิติ algorithm ที่อาศัย quaternion ([5]) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการระบุถึงการหมุนรอบแกนต่างๆ ในการคำนวณหา rotation matrix และ translation vector ระหว่างกลุ่มของจุดที่สอดคล้องกัน

เป็นวิธีที่เหมาะสมกว่าวิธี singular value decomposition ซึ่งเหมาะกับปัญหาที่มีมิติมากกว่าสาม Horn ([6]) เป็นผู้หา closed-form solution ที่อาศัย quaternion สำหรับ rotation matrix และ translation vector ออกมา ดังที่แสดงข้างล่าง

Unit quaternion เป็น vector หนึ่งที ประกอบด้วย 4 components $\mathbf{q}_R = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$ ซึ่ง $q_0 \geq 0$

และ $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ rotation matrix ที่มีขนาด 3x3 ที่ได้จาก unit quaternion ได้แก่

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix}$$

ให้ $\mathbf{q}_T = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{bmatrix}$ เป็น translation vector

ดังนั้น $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_R \\ \mathbf{q}_T \end{bmatrix}$ เป็น registration vector ให้ $\mathbf{P} = \{\mathbf{p}_i\}$ เป็นกลุ่มของจุดที่ได้จากการวัดที่ต้องการนำมาเรียงให้สอดคล้องกับ กลุ่มของจุดที่ได้จาก model $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}$ ซึ่งจำนวนของจุดใน $\mathbf{P}$ เท่ากับจำนวนของจุดใน $\mathbf{X}$ ($N_x = N_p$) และแต่ละจุด $\mathbf{p}_i$ จะสอดคล้องกับแต่ละจุด $\mathbf{x}_i$ เมื่อมี index เดียวกัน

Mean square objective function ที่ต้องการทำให้มีค่าน้อยที่สุดได้แก่

$$f(\mathbf{q}) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{x}_i - (\mathbf{R}(\mathbf{q}_R)\mathbf{p}_i + \mathbf{q}_T)\|^2 \quad (4)$$

Center of mass μ_p ของกลุ่มของจุด $\mathbf{P}$ และ center of mass μ_x ของกลุ่มของจุด $\mathbf{X}$ ถูกคำนวณได้จาก

$$\mu_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{p}_i \quad (5)$$

$$\mu_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \mathbf{x}_i \quad (6)$$

Cross-covariance matrix $\sum_{px}$ ของกลุ่มของจุด

$\mathbf{P}$ และ $\mathbf{X}$ ถูกคำนวณได้จาก

$$\sum_{px} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (\mathbf{p}_i - \mu_p)(\mathbf{x}_i - \mu_x)^T = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \mathbf{p}_i \mathbf{x}_i^T - \mu_p \mu_x^T \quad (7)$$

Cyclic components ของ anti-symmetric matrix $A_{ij} = (\sum_{px} - \sum_{px}^T)_{ij}$ ซึ่งนำมาใช้ในการ

สร้าง column vector $\Delta = \begin{bmatrix} A_{23} \\ A_{31} \\ A_{12} \end{bmatrix}$ column vector

Δ ถูกนำมาใช้สร้าง symmetric 4x4 matrix $\mathbf{Q}(\sum_{px})$

$$\mathbf{Q}(\sum_{px}) = \begin{bmatrix} \text{tr}(\sum_{px}) & \Delta^T \\ \Delta & \sum_{px} + \sum_{px}^T - \text{tr}(\sum_{px})\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ซึ่ง $\mathbf{I}_3$ เป็น 3x3 identity matrix Unit

eigenvector $\mathbf{q}_R = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$ ที่สอดคล้องกับ eigenvalue ที่

มีค่ามากที่สุดของ matrix $\mathbf{Q}(\sum_{px})$ ถูกเลือกให้เป็น optimal rotation matrix ส่วน optimal translation vector ถูกคำนวณได้จาก

$$\mathbf{q}_T = \mu_x - \mathbf{R}(\mathbf{q}_R)\mu_p \quad (9)$$

จาก algorithm ข้างต้น least squares quaternion operation สามารถถูกแทนได้ด้วย operator $\mathbf{Q}$ ดังแสดงข้างล่าง

$$(\mathbf{q}, d_{ms}) = \mathbf{Q}(\mathbf{P}, \mathbf{X}) \quad (10)$$

ซึ่ง d_{ms} คือ mean square point matching error

2.3 Iterative Closest Point Algorithm

ระยะทาง d ระหว่างจุดที่ได้จากการวัดใดๆ (data point) $\mathbf{p}$ กับกลุ่มของจุดที่ได้จาก model $\mathbf{X}$ ถูกกำหนดโดย

$$d(\mathbf{p}, \mathbf{X}) = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \|\mathbf{x} - \mathbf{p}\| \quad (11)$$

จุดที่ใกล้ที่สุดในกลุ่มของจุด $\mathbf{X}$ กับจุด $\mathbf{p}$ ถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ $\mathbf{y}$ ซึ่งจะทำให้ได้

$$d(\mathbf{p}, \mathbf{y}) = d(\mathbf{p}, \mathbf{X}); \mathbf{y} \in \mathbf{X} \quad (12)$$

ให้ Y แทนกลุ่มของจุดที่เป็นผลลัพธ์จากการหาจุดที่ใกล้ที่สุดระหว่าง กลุ่มของจุดที่ได้จากการวัด P กับกลุ่มของจุดที่ได้จาก model X และให้ C เป็น closest point operator:

$$Y = C(P, X) \quad (13)$$

เมื่อได้กลุ่มของจุด Y มาแล้ว least squares registration ถูกคำนวณโดยอาศัยขั้นตอนที่อธิบายข้างต้น

$$(q, d) = Q(P, Y) \quad (14)$$

กลุ่มของจุดที่ได้จากการวัดจะถูกปรับ

(updated) โดยอาศัย $P = q(P)$

ICP algorithm สามารถถูกสรุปออกมาเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

- กลุ่มของจุดที่ได้จากการวัด $P = \{p_i\}$ มีจำนวน N_p จุด และกลุ่มของจุดที่ได้จาก model $X = \{x_i\}$ มีจำนวน N_x จุด
- Iteration ถูกทำให้เริ่มต้นโดยให้

$$P_0 = P, q_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, k = 0$$

ขั้นตอน 1, 2, 3, และ 4 ข้างล่างถูกใช้จนกระทั่งการลู่เข้า (convergence) มีค่าต่ำกว่า tolerance τ

1. คำนวณหา closest points: $Y_k = C(P_k, X)$
2. คำนวณหา registration: $(q_k, d_k) = Q(P_0, Y_k)$
3. ใช้ registration ที่หาได้: $P_{k+1} = q_k(P_0)$
4. หยุดการคำนวณซ้ำเมื่อผลต่างของ mean square error มีค่าต่ำกว่าค่า threshold $\tau > 0$ ที่ถูกเลือกไว้: $d_k - d_{k+1} < \tau$

3. ผลการทดลอง

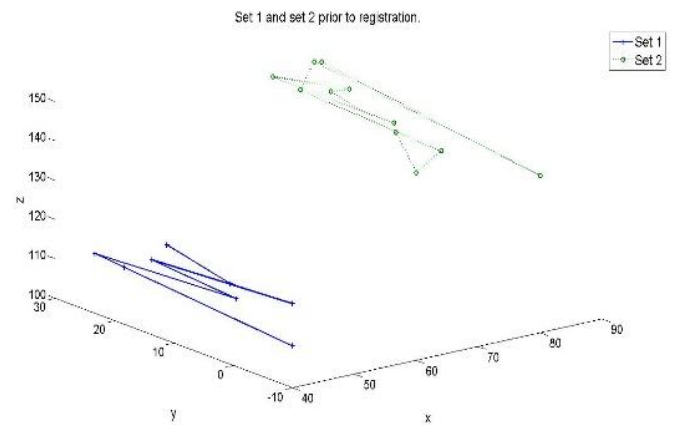
โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา ถูกนำมาทดสอบกับกลุ่มของจุดจาก 2 ตัวอย่างซึ่งได้แก่ 1) กลุ่มของจุดที่ได้มาจาก [4] และ 2) กลุ่มของจุดที่ได้มาจากการ scan กล้องลูกบาศก์ที่มีขนาด 0.2 m

3.1 กลุ่มของจุดสำหรับกรณี point set matching ซึ่งได้มาจาก [4] ถูกนำมาใช้ในการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา กลุ่มของจุดดังกล่าวถูกแสดงในตารางข้างล่าง

q_R และ q_T ที่ได้จากโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา มีค่าสอดคล้องกับที่ได้จาก [4] ถึงทศนิยมลำดับที่ 3 เป็นส่วนใหญ่ จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่า เราสามารถหาจุดในกลุ่มของจุดชุดที่ 2 ที่มีความสอดคล้องกับกลุ่มของจุดชุดที่ 1 ได้อย่างแม่นยำ

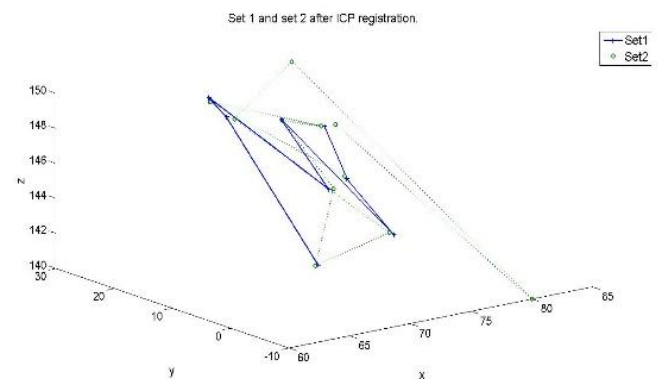
กลุ่มของจุดชุดที่ 1		
x1	y1	z1
43.89	-5.88	106.99
42.02	20.52	112.52
42.01	25.39	113.25
44.95	4.69	112.60
44.12	17.96	115.15
48.26	-1.37	113.59
46.28	7.03	114.58
47.00	18.52	117.65

กลุ่มของจุดชุดที่ 2		
x2	y2	z2
72.78	7.12	146.10
70.19	24.80	148.67
76.21	18.28	147.20
72.71	17.69	148.09
70.67	4.62	145.95
64.38	-5.40	143.59
72.47	-1.16	143.85
69.82	19.81	148.32
77.00	25.00	150.00
80.00	-10.00	140.00
83.00	30.00	145.00



รูปที่ 1: กลุ่มของจุดชุดที่ 1 และ 2 ก่อนการทำ registration

Corresponding Point Set Registration	
โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา	ข้อมูลอ้างอิงจาก [4]
$\mathbf{q}_R = \begin{bmatrix} -0.8841 \\ -0.0150 \\ -0.4664 \\ 0.0238 \end{bmatrix}$	$\mathbf{q}_R = \begin{bmatrix} 0.8841 \\ 0.0150 \\ 0.4665 \\ -0.0238 \end{bmatrix}$
$\mathbf{q}_T = \begin{bmatrix} -48.0776 \\ 6.6571 \\ 119.4772 \end{bmatrix}$	$\mathbf{q}_T = \begin{bmatrix} -48.078 \\ 6.65685 \\ 119.479 \end{bmatrix}$



รูปที่ 2: กลุ่มของจุดชุดที่ 1 และ 2 หลังการทำ registration:

กลุ่มของจุดชุดที่ 1 ถูกอธิบายด้วยระบบพิกัดของกลุ่มของจุดชุดที่ 2 โดยอาศัย $\mathbf{q}_R$ และ $\mathbf{q}_T$ ที่หาได้ในการแปลงระบบพิกัด (coordinate transformation)

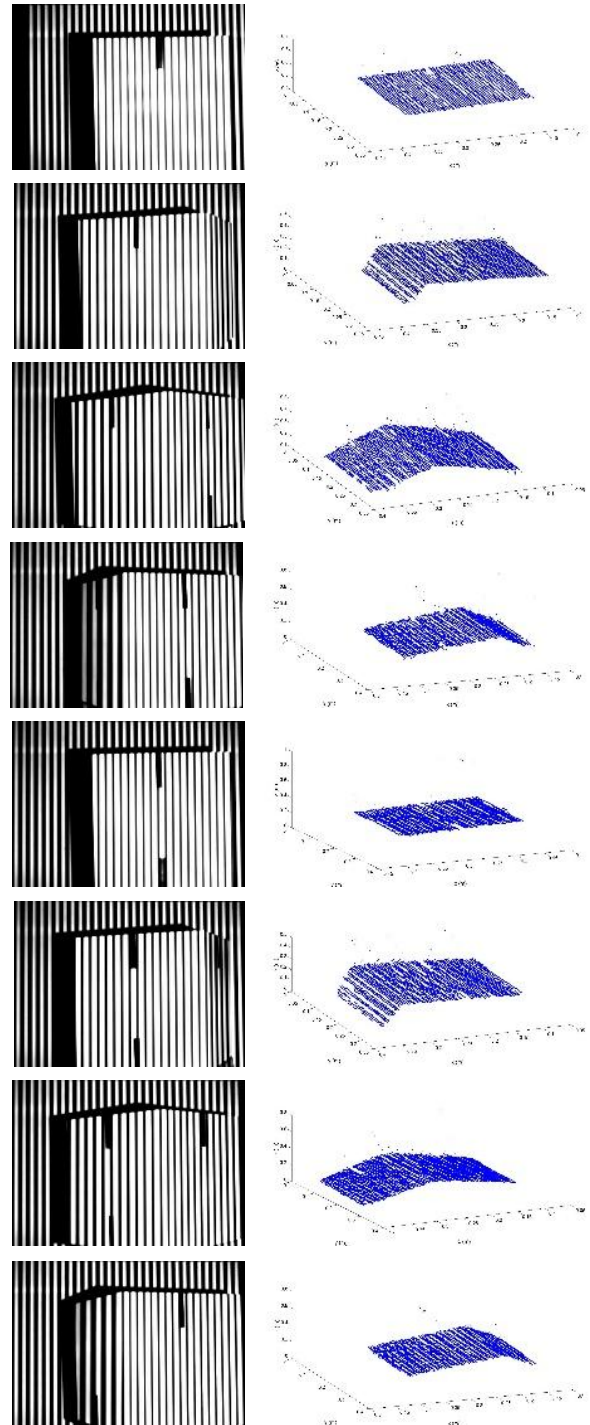
3.2 กลุ่มของจุดที่ได้มาจากการ scan กล้องลูกบาศก์ที่มีขนาด 0.2 m กล้องลูกบาศก์ถูก scan โดยทำการหมุนกล้องลูกบาศก์รอบแกนสมมาตรแนวตั้งจำนวน 16 มุม ซึ่งแต่ละมุมมีองศาห่างกัน 22.5 องศา point cloud ที่ได้จากแต่ละมุมถูกแสดงในรูปที่ 3

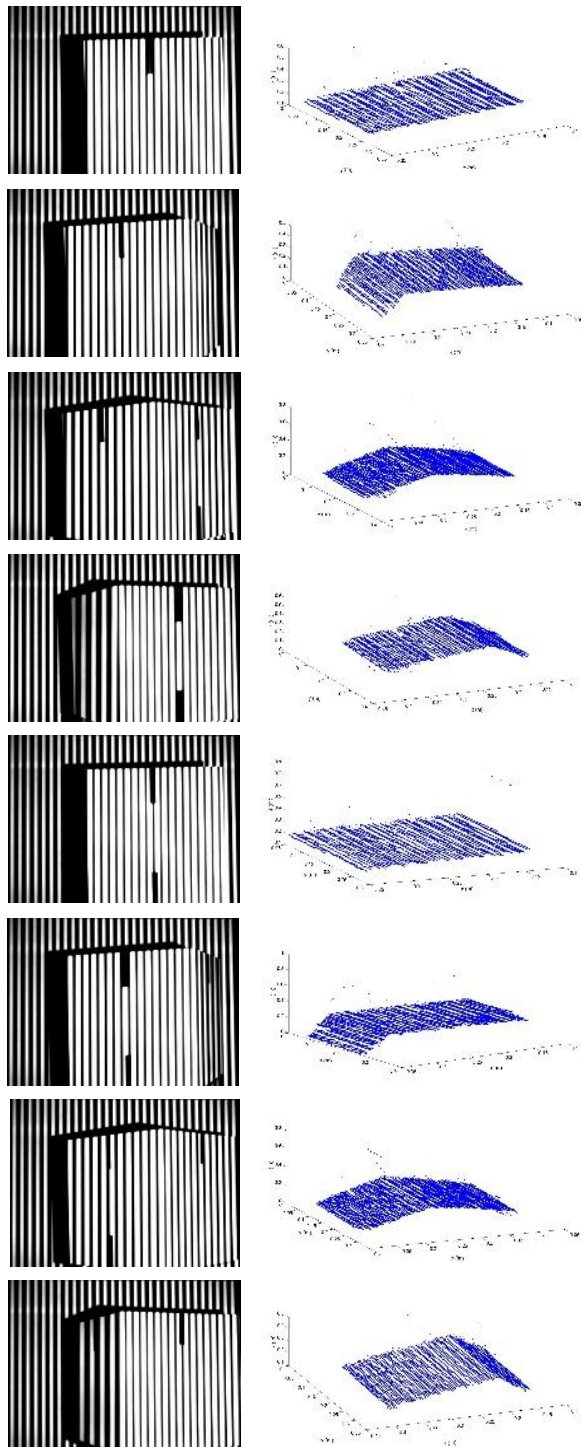
ในลำดับถัดมา การทำ registration ระหว่างมุม 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 13-14, 14-15 และ 15-16 ได้ถูกกระทำ

Translation vector $\mathbf{q}_T$ และ rotation matrix $\mathbf{R}$ ที่ได้จากการทำ registration ระหว่างมุมต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ในการรวม point cloud จากมุมที่ 1, 5, 9, และ 13 ซึ่งคือด้านทั้งสี่ของกล้องลูกบาศก์ ให้มาอยู่ในระบบพิกัดของมุมที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4

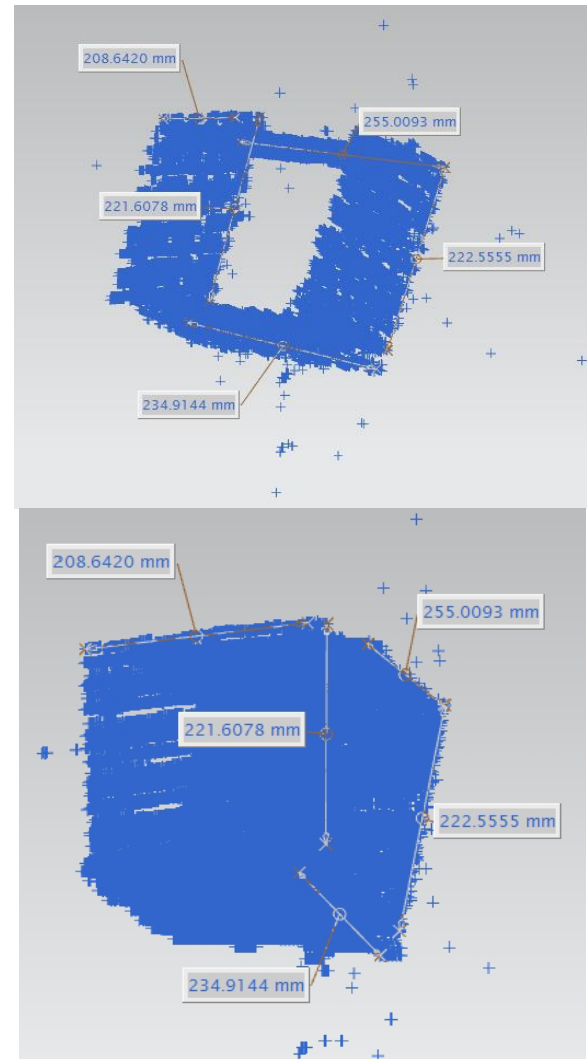
ก่อนการทดลองนี้ กล้องลูกบาศก์ถูก scan ด้วยจำนวน 8 มุมซึ่งแต่ละมุมมีองศาห่างกัน 45 องศา ผลลัพธ์ที่ได้คือ กล้องลูกบาศก์ที่ด้านไม่บรรจบกัน ขอบสุดท้ายของมุมที่ 8 ไม่บรรจบกับขอบตั้งต้นของมุมที่ 1

ในการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าขอบของลูกบาศก์ 2 ด้านที่เป็ดออกในการทดลองก่อนหน้านี้ ถูกนำมาให้เชื่อมกันจนเกือบได้กล้องลูกบาศก์ นอกจากนั้นแล้วยังพบว่าขอบด้านบน และด้านล่างของทุกด้านของลูกบาศก์ไม่ได้อยู่ในระดับเดียวกัน แต่มีลักษณะวนเป็นเกลียว และความยาวของแต่ละด้านของกล้องลูกบาศก์ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถถูกลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนมุมที่ใช้ในการ scan ให้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะบริเวณมุมแต่ละมุมของกล้องลูกบาศก์





รูปที่ 3: การ scan ลูกบาศก์จากมุม 16 มุม โดยทำการหมุนกล้องลูกบาศก์รอบแกนสมมาตรแนวตั้งโดยที่แต่ละมุมมีองศาห่างกัน 22.5 องศา



รูปที่ 4: point cloud จากเฉพาะมุมที่ 1, 5, 9, และ 13 รวมให้อยู่ในระบบพิกัดของมุมที่ 1

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอ วิธีการประกอบกลุ่มของจุดที่อยู่บนวัตถุจากหลายมุมมอง ที่อยู่ในระบบพิกัดต่างกัน เพื่อให้จุดทั้งหมดอยู่ในระบบพิกัดเดียวกัน โดยอาศัย ICP algorithm โปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา ได้ถูกนำมาทดสอบกับกลุ่มของจุดจาก 2 ตัวอย่างซึ่งได้แก่ 1) กลุ่มของจุดที่ได้มาจาก [4] ซึ่งการทดลองให้ผลถูกต้องแม่นยำถึงทศนิยมลำดับที่ 3 เมื่อเทียบกับตัวอย่างอ้างอิง และ 2) กลุ่มของจุดที่ได้มาจากการ scan กล้องลูกบาศก์ที่มีขนาด 0.2 m

ซึ่งการทดลองให้ผลใกล้เคียงกับวัตถุอ้างอิง โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถถูกลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนมุมที่ใช้ในการ scan ให้เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะบริเวณมุมแต่ละมุมของกล่องลูกบาศก์

- [6] B.K.P. Horn, "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," J. Opt. Soc. Amer. A, Vol.4, No.4, pp.629-642, Apr., 1987.

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Sansoni and F. Docchio, "Three-Dimensional Optical Measurements and Reverse Engineering for Automotive Applications," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.20, pp.359-367, 2004.
- [2] J. Guhring, "Dense 3-D Surface Acquisition by Structured Light Using Off-the-Shelf Components," Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement, SPIE, Vol.4309, pp.220-231, 2001.
- [3] N. Apiwattanalungarn, "Development of an Automatic 3D-Optical Measurement System for Industrial Applications," Kasetsart Engineering Journal, Vol.72, May-July, 2553.
- [4] P. Besl and N. Mckay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, pp.239-256, 1992.
- [5] K.S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, ROBOTICS: Control, Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw-Hill, 1987.